

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM PROJETO E PROCESSOS DE  
FABRICAÇÃO

Área de concentração: Projeto e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado

SIMULAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTOS DE  
ESTAMPAGEM COM DIFERENTES MODELOS  
TRIBOLÓGICOS

Lindolfo Stürmer

Passo Fundo

2021



**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE**  
**FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL**

**Lindolfo Stürmer**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTOS DE ESTAMPAGEM**  
**COM DIFERENTES MODELOS TRIBOLÓGICOS**

Passo Fundo  
2021

**Lindolfo Stürmer**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTOS DE ESTAMPAGEM  
COM DIFERENTES MODELOS TRIBOLÓGICOS**

Orientador: Prof. Dr. Agenor Dias de Meira Junior

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo  
2021

CIP – Catalogação na Publicação

---

S936s Stürmer, Lindolfo  
Simulação numérica e experimentos de estampagem com diferentes modelos tribológicos [recurso eletrônico] / Lindolfo Stürmer. – 2021.  
6,570 Kb ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Agenor Dias de Meira Junior.  
Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, 2021.

1. Estampagem (Metais). 2. Tribologia. 3. Aspereza de superfície. 4. Lubrificação e lubrificantes. I. Meira Junior, Agenor Dias de, orientador. II. Título.

CDU: 669.1

---

Silva – CRB 10/2241 Catalogação: Bibliotecário Luís Diego Dias de S. da

**Lindolfo Stürmer**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTOS DE ESTAMPAGEM  
COM DIFERENTES MODELOS TRIBOLÓGICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 08 de Outubro de 2021.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Agenor Dias de Meira Junior  
Orientador

Professor Doutor Charles Leonardo Israel  
UPF

Professor Doutor William Haupt  
UPF

Professor Doutor Ney Francisco Ferreira  
UFRGS

*Dedico este trabalho ao Senhor Deus, à minha esposa Cristiane e, às minhas filhas, Emily e Alice.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. Agenor Dias de Meira Junior, pela prestatividade sempre cordial, pelo compartilhamento dos ensinamentos e seguros aconselhamentos.

Aos professores Dr. Willian Haupt e Dr. Charles Leonardo Israel pela ajuda na definição do tema e direcionamentos.

À Universidade de Passo Fundo por me conceder uma bolsa de estudos e toda a estrutura necessária para a realização do curso de Mestrado.

À empresa Bruning Tecnometal Ltda, pelo incentivo financeiro e pelo fornecimento de todos os recursos necessários ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas Dr. Diego Tolotti e Msc. Ibson Härter pelo auxílio durante todas as etapas deste trabalho.

Ao colega Deocleber pela ajuda com os ensaios de laboratório.

Aos colegas da Ferramentaria e Estamparia da empresa Bruning Tecnometal Ltda pela ajuda na construção da ferramenta e nos testes práticos.

À Autoform do Brasil e Triboform pelo suporte técnico e fornecimento de recursos necessários para realização das simulações;

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre as condições tribológicas no processo de conformação de chapas, e suas relações com o produto estampado, através de simulação numérica e testes experimentais; e um estudo de caso utilizando modelos tribológicos gerados, considerando a rugosidade da ferramenta em 2 níveis, com 3 níveis de lubrificação, correlacionando-os com o tipo de material da chapa. Ao mesmo tempo, foi realizada simulação com o modelo de atrito convencional de Coulomb, para comparação de resultados. As simulações foram validadas através de testes experimentais, fazendo uso de uma ferramenta de testes em ambiente fabril. As peças conformadas foram submetidas às medições das abas e espessuras, sendo as medições analisadas estatisticamente. Os resultados das simulações utilizando os modelos tribológicos calculados, demonstraram que, entre todas as variações testadas, a espessura da peça tem menor alteração dimensional com a combinação entre rugosidade  $S_a = 0,4 \mu\text{m}$  e  $3 \text{ g/m}^2$  de lubrificante, sendo esta combinação também responsável pelo melhor fluxo de material sobre a ferramenta, resultando em abas menores. Já a simulação utilizando o modelo convencional de coulomb, resultou em espessuras menores e abas maiores, ou seja, maior restrição ao fluxo da chapa sobre a ferramenta. Quanto aos experimentos práticos, no quesito redução de espessura, a análise estatística demonstrou que as quantidades de lubrificante testadas não exerceram influência significativa. Desta forma, levando em consideração o custo benefício, a condição tribológica ideal para preservação de espessura, foi a ferramenta com rugosidade  $S_a = 0,4 \mu\text{m}$ , juntamente com adição de  $0,5 \text{ g/m}^2$  de lubrificante. Já no quesito dimensões das abas, a análise estatística demonstrou que tanto a variável rugosidade da ferramenta, quanto a variável quantidade de lubrificante, exerceram influência significativa nos resultados dimensionais. A quantidade de  $3 \text{ g/m}^2$  de lubrificante resultou em abas bem menores em comparação com as demais condições de lubrificação, principalmente sobre a rugosidade  $0,4 \mu\text{m}$ , sendo esta a combinação recomendada. Quanto às comparações entre simulação e experimentos práticos, no quesito redução de espessura, verificou-se que as peças estampadas resultaram em espessuras em torno de 4% menores em relação às simulações com os modelos tribológicos calculados e, em torno de 3% menores em relação ao modelo de atrito convencional de Coulomb. Já as medições das abas, por sua vez, tiveram variação média em torno de 2% na comparação com as simulações. Para as condições de estudo deste trabalho, e baseado nos resultados obtidos, a opção pelo uso do modelo de atrito convencional de Coulomb para simulações numéricas está justificada.

**Palavras chave:** Estampagem, Tribologia, Rugosidade, Lubrificação, Simulação.



## ABSTRACT

This work presents a study on the tribological conditions in the sheets forming process and its relations with the stamped product, through numerical simulation and experimental tests; and a case study using generated tribological models, considering the roughness of the tool in two levels, with three lubrication levels, correlating them with the type of sheet material. At the same time, it was performed a simulation with the conventional Coulomb's friction model for the comparison of results. It has validated the simulations throughout experimental tests by using a tests tool in a factory facility. It has subjected the shaped parts to measurements of the bends and thicknesses, and it has been analyzed the measurements statistically. The results of the simulations using the calculated tribological models showed which, among all the tested variations, the part's thickness has the smallest dimensional change with the combination of roughness between  $S_a = 0.4 \mu\text{m}$  and  $3 \text{ g/m}^2$  of lubricant, this combination has also been responsible for the best flow of material over the tool, resulting in smaller bends. Meanwhile, the simulation using the conventional Coulomb's model resulted in smaller thicknesses and larger bends, in other words, greater restriction to the flow of the sheet over the tool. As for practical experiments, in terms of thickness reduction, the statistical analysis has evidenced that the quantities of tested lubricants did not exert a significant influence. Thus, considering the cost-benefit, the ideal tribological condition for thickness conservation was the tool with roughness  $S_a = 0.4 \mu\text{m}$ , in conjunction with the addition of  $0.5 \text{ g/m}^2$  of lubricant. In terms of bend dimensions, the statistical analysis showed that both the roughness variable of the tool and the quantity variable of the lubricant exerted a significant influence on the dimensional results. The amount of  $3 \text{ g/m}^2$  of lubricant resulted in much smaller bends compared to other lubrication conditions, mainly on  $0.4 \mu\text{m}$  roughness, which is the recommended combination. As for the comparisons between simulation and practical experiments, in terms of thickness reduction was found that the stamped components resulted in thickness around 4% lower compared to the simulations with the calculated tribological models around 3% lower compared to the conventional Coulomb's friction model. The measurements of the bends, in turn, had an average variation of around 2% in comparison with the simulations. For the study conditions of this work, and based on the obtained results, the option to use the conventional Coulomb's friction model for numerical simulations is justified.

**Keywords:** Stamping, Tribology, Roughness, Lubrication, Simulation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação dos processos de fabricação conforme DIN 8580 .....	19
Figura 2 – Etapas de produção de um componente estampado. ....	20
Figura 3 – Principais componentes.....	22
Figura 4 – Ferramenta de simples ação .....	23
Figura 5 – Curva de Tensão x Deformação relacionada ao corpo de prova.....	25
Figura 6 – Representação de contatos onde: (A) representa a área de contato aparente e (B) a área de contato real .....	28
Figura 7 – Curva de Tensão x Deformação relacionada ao corpo de prova.....	29
Figura 8 – Mecanismos de atrito, onde: (A) é adesão; (B) é a formação de micro asparas e (C) é a deformação elástica/plástica de asperezas. ....	32
Figura 9 – Representação de contato mecânico entre dois sólidos expostos a cargas mecânicas, térmicas, elétricas e ambientais.....	33
Figura 10 – Esquema das componentes do coeficiente de atrito em contato metal com metal. ....	34
Figura 11 – Representação de modelo de atrito em relação a Tensão cisalhante de atrito e Pressão de contato .....	35
Figura 12 – Modelo de barras para representação das asperezas da superfície.....	36
Figura 13 – Representação da topografia real da chapa .....	36
Figura 14 – Representação das geometrias da ferramenta .....	36
Figura 15 – Princípio de operação de um rugosímetro óptico.....	37
Figura 16 – Representação da rugosidade Ra.....	38
Figura 16 – Representação da rugosidade Sa .....	38
Figura 18 – Representação dos regimes de lubrificação na curva de Stribeck.....	40
Figura 19 – Fluxograma dos experimentos .....	44
Figura 20 – Orientação dos corpos de prova para ensaio de tração, referente ao sentido de laminação.....	45
Figura 21 – Corpos de prova para Perfilometria onde: (A) é a chapa; (B) refere-se a ferramenta com acabamento usinado e (C) refere-se a ferramenta com acabamento polido.....	47
Figura 22 – Geometria da peça e parâmetros do estudo.....	47
Figura 23 – Verificação da região com maior afinamento onde: (A) Região demarcada pela simulação; (B) Verificação com Ultrassom e (C) Peça cortada para medição.....	48
Figura 24 – Regiões de medição das espessuras .....	48
Figura 25 – Pontos de medição das peças estampadas.....	49
Figura 26 – Principais características do lubrificante comercial LUBSTAMP 100.....	50
Figura 27 – Geometrias das ferramentas para simulação .....	52
Figura 28 – Projeto da ferramenta de testes, onde: (A) refere-se a estrutura de fixação e (B) refere-se ao módulo projetado para este estudo.....	53
Figura 29 – Ferramenta de testes montada .....	54
Figura 30 – Ferramenta aberta na prensa.....	55
Figura 31 – Representação da topografia da chapa .....	58
Figura 32 – Representação dos pontos verificados nos modelos, onde: (A) representa os pontos de verificação no modelo usinado, e (B) o modelo polido. ....	59
Figura 33 – Topografia da ferramenta usinada no ponto A1.....	59
Figura 34 – Topografia da ferramenta polida no ponto B1 .....	60
Figura 35 – Topografia da chapa lubrificada: (A) representa 0,5g/m <sup>2</sup> de lubrificante; (B) representa 1,0g/m <sup>2</sup> de lubrificante e (C) representa 3,0g/m <sup>2</sup> de lubrificante .....	61

Figura 36 – Modelos tribológicos com rugosidade da ferramenta $S_a = 0,4\mu\text{m}$ , onde: (A) Atrito deslizante sem deformação plástica e (B) = Com deformação plástica da chapa .....	62
Figura 37 – Modelos tribológicos com rugosidade da ferramenta $S_a = 0,75\mu\text{m}$ , onde: (A): Atrito deslizante sem deformação plástica e (B): Com deformação plástica da chapa....	63
Figura 38 – Representação do afinamento de espessura .....	65
Figura 39 – Resultados da espessura mínima.....	66
Figura 40 – Percentagem da redução de espessura .....	66
Figura 41 – Resultados da dimensão das abas.....	68
Figura 42 – Resultados testes práticos onde: (A) todas as 18 peças conformadas e (B) visualização de uma peça. ....	69
Figura 43 – Resultados das espessuras mínimas .....	70
Figura 44 – Resultados da percentagem de redução de espessura .....	71
Figura 45 – Resultados estatísticos da média das espessuras com intervalo de confiança de 95% .....	72
Figura 46 – Malhas geradas para medição das abas estampadas na ferramenta $S_a = 0,4\mu\text{m}$ .....	73
Figura 47 – Malha gerada para medição das abas estampadas na ferramenta $S_a = 0,75\mu\text{m}$ .....	73
Figura 48 – Resultados das medições das abas .....	74
Figura 49 – Resultados estatísticos da média das Abas com intervalo de confiança de 95% ..	75
Figura 50 – Medições médias das espessuras mínimas das simulações e dos testes práticos..	76
Figura 51 – Percentagem média de redução das espessuras nas simulações e nos testes práticos .....	76
Figura 52 – Medições médias das abas das simulações e dos testes práticos. ....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da chapa CR4 DIN 1654.....	45
Tabela 2 – Planejamento dos experimentos .....	50
Tabela 3 – Propriedades dos materiais utilizados.....	56
Tabela 4 – Coeficiente “n” e “r” para cada direção de laminação .....	57
Tabela 5 – Resultados das rugosidades da chapa. ....	58
Tabela 6 – Resultados das rugosidades da ferramenta .....	60
Tabela 7 – Resultados das simulações.....	65
Tabela 8 – Resultados dos experimentos práticos .....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$E$	Modulo de elasticidade	[N/mm <sup>2</sup> ]
$\Sigma$	Tensão de engenharia	[N/mm <sup>2</sup> ]
$K_f$	Tensão de escoamento	[N/mm <sup>2</sup> ]
$A_{1\%}$	Alongamento mínimo	[%]
$E$	Deformação de Engenharia	
$\emptyset$	Deformação verdadeira	
$\Delta R$	Anisotropia planar	
$R_{0^\circ}$	Índice de anisotropia a 0°	
$R_{45^\circ}$	Índice de anisotropia a 45°	
$R_{90^\circ}$	Índice de anisotropia a 90°	
$R$	Anisotropia normal	
$N$	Coefficiente de encruamento	
$l$	Comprimento instantâneo do corpo de prova	[mm]
$l_0$	Comprimento inicial do corpo de prova	[mm]
$\beta$	Relação máxima de embutimento	
$R_m$	Resistência à tração do material	[N/mm <sup>2</sup> ]
$S_a$	Medida de Rugosidade	[ $\mu$ m]

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
1.1.1 Objetivo geral .....	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
<b>1.2 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>18</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 FABRICAÇÃO INDUSTRIAL .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA ESTAMPAGEM .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 FERRAMENTAS PARA ESTAMPAGEM.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS APLICADOS NA ESTAMPAGEM.....</b>	<b>24</b>
<b>2.5 TRIBOLOGIA NA CONFORMAÇÃO DE CHAPAS POR ESTAMPAGEM.....</b>	<b>28</b>
2.5.1 Mecanismos de atrito na Estampagem .....	30
2.5.2 Modelos Tribológicos.....	33
2.5.3 Medição Óptica da Rugosidade Superficial .....	37
2.5.4 Lubrificação na Estampagem .....	38
2.5.5 Simulação Numérica por MEF .....	40
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>44</b>
<b>3.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL .....</b>	<b>45</b>
<b>3.2 CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DA CHAPA E DA FERRAMENTA.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DO ESTUDO DE CASO E MEDIÇÕES.....</b>	<b>47</b>
<b>3.4 LUBRIFICANTE .....</b>	<b>49</b>
<b>3.5 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS.....</b>	<b>50</b>
<b>3.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....</b>	<b>51</b>
3.6.1 Cinética das geometrias da Ferramenta .....	52
<b>3.7 PROJETO E CONSTRUÇÃO DA FERRAMENTA DE TESTES .....</b>	<b>52</b>
<b>3.8 TESTES PRÁTICOS PARA VALIDAÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....</b>	<b>54</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>56</b>
<b>4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL .....</b>	<b>56</b>
<b>4.2 CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE DA CHAPA E DA FERRAMENTA.....</b>	<b>58</b>
<b>4.3 MODELOS TRIBOLÓGICOS .....</b>	<b>61</b>
<b>4.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES .....</b>	<b>64</b>

4.4.1 Resultados da Redução da Espessura do Produto .....	65
4.4.2 Resultados das dimensões do Produto.....	67
<b>4.5 RESULTADOS DOS TESTES EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>69</b>
4.5.1 Resultados da Redução da Espessura do Produto .....	70
4.5.2 Resultados das dimensões das Abas do Produto .....	72
4.6 Comparações das Simulações Versus Estampados. ....	76
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>81</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de estampagem convencional, como o embutimento, tem se tornado especialmente desafiador a medida em que a complexidade das geometrias e o desenvolvimento de novos materiais estão mais presentes na indústria metal mecânica, principalmente na fabricação de peças automotivas. Neste sentido, os profissionais das ferramentarias são postos a prova a cada novo desenvolvimento, sem margens de erro e com prazos de entrega dos ferramentais extremamente reduzidos, sem espaços para retrabalhos.

Na busca pelo aperfeiçoamento da técnica de estampagem, o mecanismo de atrito torna-se objeto natural de pesquisas pois, conforme diversos autores assim como Moro (2006), a conformação de chapas ocorre devido aos esforços transmitidos pelo punção para moldar uma chapa à forma da matriz, ou seja, às custas de grande atrito, logo, a qualidade de um produto estampado depende diretamente das condições de atrito e lubrificação atuantes no conjunto ferramenta/chapa. Segundo Jost (1966) a ciência de interação entre superfícies com movimento relativo entre si e dos fenômenos recorrente dela recebe o nome de Tribologia.

O sistema tribológico que compõe a estampagem é dependente de diversas variáveis, algumas controláveis, como a rugosidade; quantidade de lubrificação; folgas entre as geometrias; estratégias e conceitos de fabricação, além de outras variáveis não controláveis, como temperatura; umidade e impurezas gerais de um ambiente fabril. De todas as variáveis, as controláveis são as que exercem maiores influências sobre o resultado do produto estampado, e também sobre a vida útil da ferramenta.

Economicamente, a tribologia também afeta as operações de estamparia, e não apenas na forma de desgaste de componentes, mas em energia da prensa para realizar o ciclo, no uso excessivo de lubrificantes e, principalmente, nas dimensões e acabamento superficial do produto estampado. Outro fato comum que afeta economicamente os novos desenvolvimentos de estampados relativamente complexos, é a necessidade de ajustes ou reusinagens no ferramental na fase de try-out para atender aos requisitos de desenho. Estas reusinagens não previstas costumam atrapalhar o cronograma e afetar consideravelmente o orçamento. Geralmente estão relacionadas, além de outros fatores, a diferenças de acabamentos nas diferentes regiões das matrizes ou prensa chapas, o que acarreta em diferentes níveis de atrito e, por consequência, diferenças na corrida do blank e dimensional do produto.

Essas diferenças de acabamento nas ferramentas são justificáveis devido aos diferentes processos de usinagem empregados, onde nem sempre a aplicação de acabamento alisado



ou mesmo o polimento em todas as superfícies torna-se viável em termos de custo para as ferramentarias.

Neste sentido, os softwares comerciais de simulação de estampagem têm evoluído ao longo do tempo, direcionando esforços também para a geração de soluções sob os aspectos tribológicos do sistema, uma vez que, um produto estampado é concebido através da interação entre chapa e ferramenta, influenciado pelo acabamento destas superfícies e velocidades de conformação, tudo isso sob altas pressões de contato.

Estes softwares precisam ser atualizados frequentemente com novos dados coletados a partir de estudos práticos, principalmente aqueles realizados em ambientes fabris, de modo a chegar o mais próximo possível das condições reais de produção.

O presente trabalho apresenta uma pesquisa sobre as condições tribológicas no processo de conformação de chapas e suas relações com o produto estampado, através de simulação numérica e testes experimentais. O objetivo geral é ampliar os conhecimentos no que se refere à tribologia em processos de estampagem, através de uma nova abordagem sobre o mecanismo de atrito, fazendo uso de modelos tribológicos mais eficientes, que considerem as condições de acabamento e lubrificação do conjunto chapa e ferramenta.

Também pretende-se determinar uma geometria de estampado, cujas características propiciem um estudo real referente às alterações de rugosidade e lubrificação em uma operação de estampagem; e a criação de padrões de acabamento para ferramentas. Ainda, utilizando softwares específicos, a geração dos modelos tribológicos será testada a fim de comparações com resultados experimentais, obtidos em ambiente fabril.

Nas próximas seções, serão abordados os efeitos dos diferentes modelos tribológicos sobre as dimensões de abas e espessura de um produto estampado. Será detalhada a obtenção dos modelos tribológicos e a simulação da estampagem. Ainda, a preparação e execução dos testes experimentais e as comparações também serão apresentadas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Estudo sobre as condições tribológicas no processo de conformação de chapas e suas relações com o produto estampado, através de simulação numérica e testes experimentais.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Determinar uma geometria de estampado, cujas características propiciem um estudo real, referente as alterações de rugosidade e lubrificação em uma operação de estampagem;
- Gerar modelos de acabamento em aços para ferramentas;
- Gerar simulações de estampagem com diferentes modelos de tribologia e diferentes condições de lubrificação para comparações com o modelo tribológico de coulomb;
- Projetar e construir um protótipo de ferramenta para validação prática das simulações;
- Comparar resultados práticos com a simulação;

## **1.2 Justificativa**

A pesquisa busca ampliar os estudos no que se refere a tribologia em processos de estampagem, objetivando uma nova abordagem sobre o mecanismo de atrito, fazendo uso de modelos tribológicos mais eficientes.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No âmbito da fabricação industrial, especificamente na estampagem a frio de chapas, existem algumas lacunas que norteiam o desenvolvimento de pesquisas e experimentos práticos. As buscas constantes pelo preenchimento destas lacunas colaboram para a evolução da qualidade do produto estampado.

Neste capítulo será apresentado o contexto da fabricação industrial, a qual está inserido o presente trabalho. Serão apresentados alguns conceitos de estampagem de chapas e suas principais características, ferramentas para conformação, bem como características mecânicas dos materiais desenvolvidos para produção por estampagem. Será abordado também o mecanismo de atrito na interface entre ferramenta e produto estampado, e suas correlações com a qualidade do produto final, além do método de elementos finitos para estampagem, acoplado a softwares de tribologia.

### 2.1 Fabricação Industrial

A norma alemã DIN-8580, classifica os processos de fabricação em seis grupos principais, sendo que a conformação por estampagem se encaixa no grupo de Modificação de Forma com Volume Constante – Grupo 2, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Classificação dos processos de fabricação conforme DIN 8580

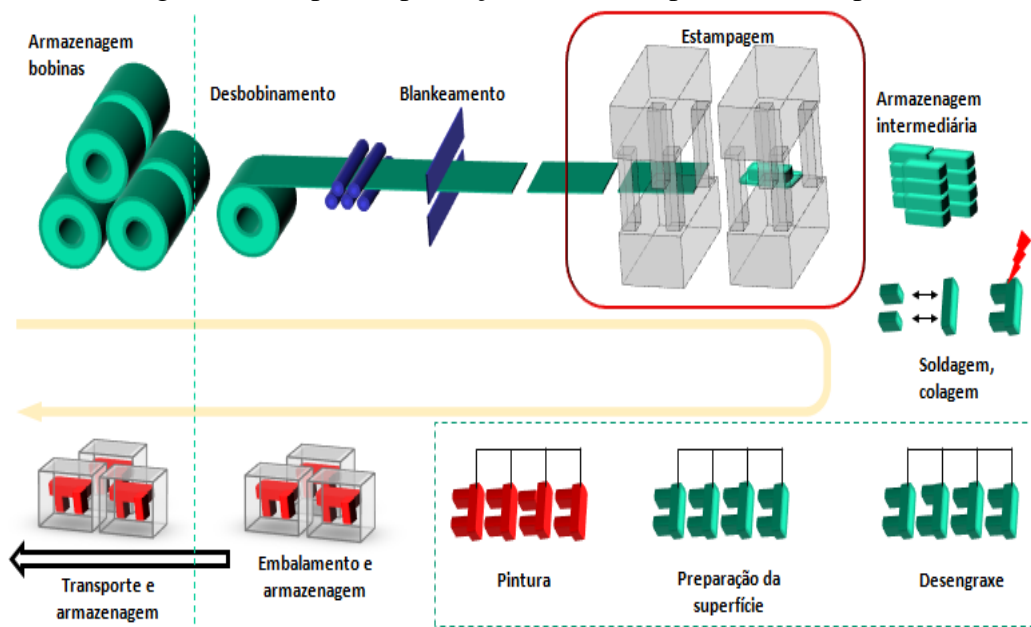


Fonte: Souza (2011)

Geralmente, o objetivo das técnicas de fabricação industrial, através de diferentes processos produtivos, é a obtenção de produtos de geometrias e propriedades mecânicas definidas. Neste contexto, a estampagem tem sido relevante na fabricação de componentes

metálicos, seja pela capacidade de melhorar a resistência mecânica do produto estampado pela inclusão de encruamento, ou pela possibilidade de produção em larga escala. A Figura 2 demonstra didaticamente as etapas de produção de um produto metálico estampado, as quais formam a espinha dorsal de muitas indústrias metal-mecânicas.

Figura 2 – Etapas de produção de um componente estampado.



Fonte: Souza (2011)

## 2.2 Princípios básicos da Estampagem

A estampagem, também conhecida como conformação plástica de chapas, é o conjunto de processos de fabricação de componentes metálicos através de conformação ou corte, em operação de prensagem geralmente a frio, e é apropriada para produção seriada de peças apresentando bom acabamento sem necessidade de usinagem posterior, além de boa estabilidade geométrica e dimensional.

A conformação de chapas, tem por objetivo obter formas geométricas por deformação plástica através de forças aplicadas por ferramentas, sem que as propriedades químicas do material sejam alteradas.

Moro (2006) escreveu que a conformação de chapas é o processo de transformação mecânica que ocorre devido aos esforços transmitidos pelo punção para moldar uma chapa à forma da matriz. Nesta operação, a chapa geralmente plana, adquire a forma da matriz, ocasionando alongamentos ou contrações em todos os elementos do material conformado.

Filho *et al.* (1997), afirmaram que a conformação de metais é a modificação de um corpo metálico em outra forma definida, sendo que os processos podem ser definidos em processos mecânicos, nos quais as modificações de forma são provocadas pela aplicação de tensões externas, e processos metalúrgicos, nos quais as transformações de formas estão relacionadas com altas temperaturas.

A Norma DIN 8582 classifica as técnicas de estampagem de acordo com a direção principal da tensão aplicada, sendo: Conformação sob condição de compressão; Conformação sob condição combinada de tração e compressão; Conformação por flexão e Conformação por cisalhamento. Diz ainda que a alteração da geometria ocorre pelo deslocamento de forma controlada do volume inicial do material através de um espaço tridimensional, mas mantendo a massa e composição química original.

Conformar, de acordo com Schuller (1998), é a modificação de uma forma com geometria controlada. Segundo Folle (2012), uma operação de estampagem pode ser dividida em 3 partes principais, sendo as propriedades da matéria prima, as geometrias das ferramentas, e o atrito, o qual representa a interação entre geometrias e matéria prima.

Os principais processos de conformação de chapas que compõem a estampagem podem ser classificados da seguinte forma:

**Processo de estampagem por Corte ou Cisalhamento:** Normatizado pela DIN 8587, e visa obter formas geométrica por meio de cortes. Neste processo, um punção de corte acionado pela força de uma prensa, exerce pressão sobre uma chapa apoiada sobre a matriz. No momento em que o punção penetra na peça converte o esforço de compressão em esforço de cisalhamento ocasionando o corte. Somente tensões cisalhantes atuam neste processo;

**Processo de estampagem por Dobramento:** O processo de dobra é normatizado pela DIN 8586, que define o processo de dobramento em conformação por movimento linear ou rotativo da ferramenta. É muito utilizado pela indústria metal mecânica para obtenção de produtos como calhas, cantoneiras e perfis variados. Também muito utilizado para aumentar a rigidez de peças com dobras de reforços. Consiste em dobrar a chapa através do movimento relativo entre punção e matriz;

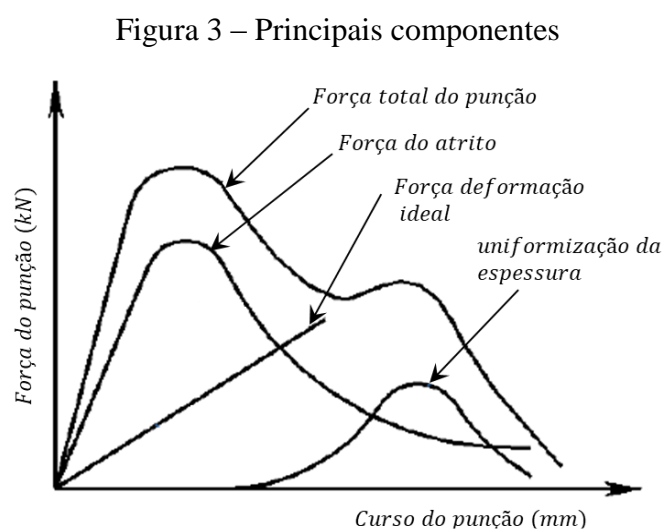
**Processo de estampagem por Estiramento:** O processo de estiramento é normatizado pela DIN 8585, e consiste em tracionar o produto por meio de um punção, onde as extremidades da chapa estão fixas por garras, não havendo fluxo de material sendo que o estiramento ocorre pelo alongamento da chapa. Apenas tensões de tração estão envolvidas neste processo, o qual é muito usado na indústria aeronáutica por propiciar raios de grandes curvaturas com níveis interessantes de encruamento.

Na indústria convencional metal mecânica, o processo de estiramento pode-se verificar também em operações de embutimento, com a utilização de prensa chapas para controle do fluxo de material, ou ainda usando o artifício de prende rugas para maior restrição, conforme Souza (2013);

**Processo de estampagem por Embutimento:** O processo de embutimento, também conhecido como estampagem profunda, tem se tornado desafiador a medida em que a complexidade das geometrias e o desenvolvimento de materiais de alta resistência estão cada vez mais presentes na indústria metal mecânica, principalmente na fabricação de peças automotivas. Neste sentido, os profissionais da estampagem são postos a prova a cada novo desenvolvimento. Por estes motivos, o presente estudo fará uso deste processo nos experimentos.

Este processo é utilizado para fazer com que uma chapa plana sujeitada por um prensa chapas, adquira a forma de uma matriz através da ação de um punção. Neste processo ocorre uma combinação de tensões tangenciais de compressão e tensões radiais de tração e é normatizado pela DIN 8584. Schaeffer (2004), escreve que o embutimento é um processo de conformação no qual o blank é transformado em diferentes formas geométricas em operação que envolve a contínua interação entre o material a ser conformado, a ferramenta, lubrificante e equipamento.

Para Garcia et al. (2000), a força exercida pelo punção é o somatório de fatores como, a força para deformação ideal originada pelo encruamento do material, a força de uniformização da espessura que ocorre no final do processo para calibragem do produto, as forças de atrito estáticas e dinâmicas originadas pelos contatos entre a chapa e as ferramentas, e a força de conformação, conforme são mostrados na Figura 3.



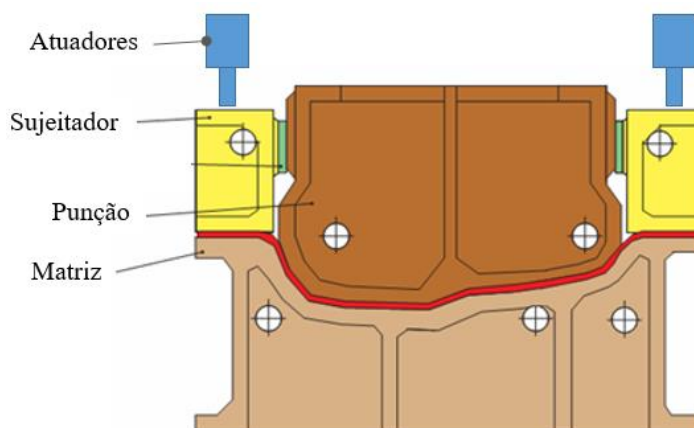
### 2.3 Ferramentas para Estampagem

Na estampagem, as ferramentas são projetadas e construídas sob medida de acordo com aplicações específicas para determinado produto, sendo que geralmente necessita-se de um conjugado de ferramentas, ou vários estágios para obtenção de um único produto estampado. Este motivo, torna a estampagem dependente de um custo inicial elevado, e que a amortização do investimento ocorre somente com um alto volume de peças produzidas.

Existem ferramentas de conceitos e formas construtivas variadas. Geralmente as nomenclaturas incluem ferramentas de simples ação, dupla ou tripla ação, ferramentas de corte, ferramentas progressivas dentre outras. Schuller (1998) destaca que o tipo da ferramenta, as formas das geometrias, bem como os meios de transferência do produto, estão estritamente relacionadas com o tamanho, a forma e o volume de produção deste produto estampado. O presente estudo fará uso de uma ferramenta de simples ação para validação dos experimentos.

O conceito de uma ferramenta de simples ação, como mostra a Figura 4, compreende o uso de um punção fixado na parte superior da ferramenta, junto com um prensa chapas, este acionado por cilindros de nitrogênio, ou molas, para a sujeição do produto. Este conjunto punção/prensa chapas está fixado no martelo móvel da prensa. A parte inferior da ferramenta é fixada na mesa da prensa, e nesta parte está fixada a matriz, a qual dará forma ao produto estampado. Esta configuração de ferramenta não é regra, e muitas vezes fixa-se a matriz no martelo móvel da prensa, enquanto o punção e o prensa chapas são fixados na mesa, possibilitando assim o uso dos próprios atuadores da prensa na sujeição do produto, abstendo do uso de cilindros de nitrogênio ou molas para esta função.

Figura 4 – Ferramenta de simples ação



Fonte: Adaptado de Schuller (1998).

Os componentes de construção de uma ferramenta para embutimento de simples ação englobam ainda bases, suportes, guiamientos, encostos, parafusos entre outros, que variam conforme a necessidade. Em termos de materiais para construção, os itens mais importantes são: punção; matriz e prensa chapas, devido aos esforços envolvidos e ao desgaste a que estão sujeitos. Rodrigues & Martins (2005), destacam que a seleção dos materiais depende da temperatura de trabalho, do material da chapa conformada e volume de produção, além da pressão de contato entre produto e ferramenta. Normalmente utilizam-se aços micro ligados como da categoria D2 ou D6, além de ligas fundidas como GGG70L, e em casos especiais usam-se aços sinterizados.

Além da seleção correta dos materiais para os componentes supracitados, Rodrigues & Martins (2005) destacam a importância em obter superfícies lisas e dentro de um campo dimensional controlado, para que, em conjunto com uma boa lubrificação, os esforços de estampagem sejam sensivelmente reduzidos.

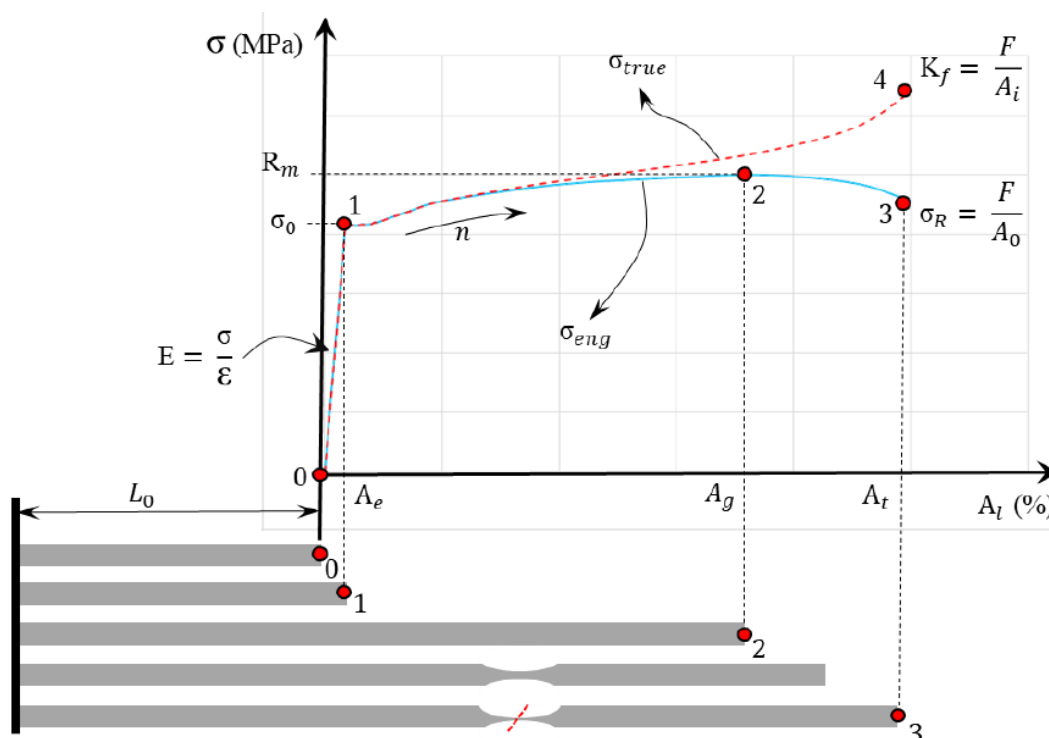
#### **2.4 Propriedades Mecânicas dos Materiais Aplicados na Estampagem**

Embora muitos conceitos da estampagem convencional permaneçam fiéis à sua originalidade, a indústria ferramenteira tem sido obrigada a se aperfeiçoar continuamente para acompanhar a evolução dos materiais aplicados em produtos estampados. Constantemente novas ligas metálicas são desenvolvidas, com composições químicas e propriedades mecânicas variadas, impactando diretamente nos processos de estampagem, pois características como limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), coeficiente de encruamento ( $n$ ), % alongamento ( $\Delta l$ ) e anisotropia ( $r$ ), funcionam como resposta às tensões externas que são induzidas pela ferramenta de conformação. Neste sentido, os ensaios de laboratório, fornecem essas características, sendo o Ensaio de Tração o mais utilizado. A Figura 5 ilustra a curva característica deste ensaio para materiais metálicos.

A Norma ISO 6892-1 regulamenta o procedimento para o Ensaio de Tração a temperatura ambiente, onde o corpo de prova é submetido a uma força de tração uniaxial crescente com velocidade constante e sem atrito, enquanto são feitas as observações simultâneas relacionadas com a deformação do corpo de prova em relação à carga aplicada para obtenção das características mecânicas do material. Da relação entre a carga aplicada e a deformação do corpo de prova, uma curva característica é plotada no gráfico e a partir desta curva são extraídas as informações pertinentes.



Figura 5 – Curva de Tensão x Deformação relacionada ao corpo de prova



Fonte: Härter (2019)

Normalmente a curva característica fornecida pelo Ensaio de Tração é a curva de tensão de engenharia ( $\sigma_{eng}$ ), conforme a Equação 3 abaixo, mas para efeitos de simulação de estampagem, usa-se a curva de tensão verdadeira ( $\sigma_{true}$ ) conforme a Equação 4, a qual considera no cálculo da tensão a Área instantânea calculada pela equação 5, ou seja, a medida em que ocorre o escoamento do material e, por consequência, o afinamento da espessura, o cálculo atualiza o valor da área da seção segundo este afinamento. Por este motivo a tensão verdadeira geralmente é maior do que a tensão de engenharia para grandes deformações, como ocorre na estampagem.

Os softwares de simulação convertem as tensões de engenharia em tensões verdadeiras através das equações 6 e 7 conforme Ferrarini (2004) e Härter (2019).

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0} \quad (3)$$

$$\sigma_{true} = \frac{F}{A_1} \quad (4)$$

$$A_1 = A_0 / \varepsilon^\phi \quad (5)$$

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} (1 + \varepsilon_{eng}) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln (1 + \varepsilon_{eng}) \quad (7)$$

O Ensaio de Tração ainda fornece outras características como as descritas abaixo: Ferrarini (2004) e Callister (2007).

- **Módulo de Elasticidade:**

Compreende entre os pontos 0 e 1 da Figura 5, pois esta característica governa o comportamento do material até o início do escoamento, sendo praticamente linear e, portanto, expressa pela Equação 8, como sendo o produto da divisão entre a tensão e a deformação.

$$E = \sigma/\varepsilon \quad (8)$$

Normalmente em simulações de estampagem, adota-se o valor de 210 GPa para materiais metálicos independentemente do tipo deste, pois a inclinação da reta elástica é praticamente igual para todos, obedecendo a linearidade até o início do escoamento.

- **O limite de escoamento ( $\sigma_0$ )**

Está localizado no Ponto 1 da Figura 5. Trata-se da transição heterogênea entre a deformação elástica e plástica do material.

Este ponto é importante tanto para cálculos estruturais, onde o escoamento do material é indesejado, quanto para estampagem, na qual a elasticidade do material é o grande problema em se tratando de dimensional do produto. Callister (2007) cita que após o escoamento, a tensão não é mais proporcional à deformação.

- **Limite de Resistencia ( $R_m$ ):**

Este ponto também conhecido como Alongamento uniforme ( $A_g$ ) representa a tensão em que se obtém a carga máxima suportada pelo material no Ensaio de Tração, aparece no Ponto 2 da Figura 5. Até este ponto, o alongamento é uniforme. A partir deste ponto, ao continuar a aplicação de carga, aparecerá um início de estricção e o material entrará em colapso e fratura.

- **Tensão de Ruptura ( $\sigma_R$ ):**

Representado pelo Ponto 3 na Figura 5, a Tensão de Ruptura também conhecida como Alongamento Total ( $A_t$ ), configura o instante em que ocorre a fratura no corpo de prova.

- **Coeficiente de Encruamento ( $n$ ):**

A Norma DIN EN ISO 10113 especifica o procedimento para se obter o Coeficiente de Encruamento ( $n$ ) através de um ensaio de Tração Uniaxial. Este índice é caracterizado pela

propensão do aço aumentar sua resistência durante a deformação. Quanto maior o valor de  $n$ , maior a resistência a estrição e maior o retorno elástico do material, mas também é maior a capacidade de endurecer por deformação. Devido à característica de encruamento, uma chapa conformada tende a ser mais resistente que uma chapa em estado original.

Em termos práticos, o valor do encruamento é o expoente da função matemática exponencial que descreve a curva entre o Limite de escoamento ( $\sigma_0$ ) e o Limite de Resistência ( $R_m$ ).

Conforme Härter (2019), para caracterizar o material no regime plástico, os softwares de simulação utilizam modelos de aproximação com objetivo de extrapolar a curva de deformação de modo a forçar o modelo a convergir mesmo quando as tensões ultrapassem o limite de resistência do material. As equações 9, 10 e 11 trazem alguns modelos de aproximações:

$$\text{Equação de Hollomon:} \quad \sigma_{true} = K \cdot \varepsilon^n \quad (9)$$

$$\text{Equação de Swift:} \quad \sigma = K (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (10)$$

$$\text{Equação de Ludwik} \quad \sigma_{true} = \sigma_0 + K \cdot \varepsilon^n \quad (11)$$

O presente trabalho utiliza a equação de Ludwik para realização das simulações, onde  $\sigma_{true}$  representa a tensão verdadeira em MPa,  $\sigma_0$  a tensão de escoamento em MPa,  $K$  é o coeficiente de resistência em MPa,  $\varepsilon$  é a deformação verdadeira e  $n$  é o coeficiente de encruamento.

- **Coefficiente de Anisotropia ( $r$ )**

A Norma DIN EN ISO 10113 descreve o procedimento para obtenção do coeficiente de anisotropia a partir do ensaio de tração. Este coeficiente representa a taxa de deformação plástica do material. Conforme Härter (2019), a resistência da chapa ao afinamento pode ser avaliada pelo coeficiente de anisotropia.

Para Carller (1997), a anisotropia plástica representa a variação das propriedades mecânicas em função da direção em que as mesmas estão sendo medidas, pois devido ao processo de fabricação dos aços laminados, as propriedades mecânicas resultantes variam dependendo da direção da laminação.

O índice de anisotropia plástica ( $r$ ) é definido como a razão da deformação verdadeira na largura ( $\varepsilon_w$ ) e a deformação verdadeira na espessura ( $\varepsilon_t$ ) e deve ser obtido para diferentes direções na chapa. Normalmente, amostras são removidas de chapas a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  da direção de laminação. Por este motivo, é comum a representação da anisotropia através de duas formas: coeficiente de anisotropia  $r$  (Equação 12) e coeficiente de anisotropia média  $r_m$

(Equação 13), onde os valores de  $r_0$ ,  $r_{45}$  e  $r_{90}$  representam os coeficientes de anisotropia nos sentidos de laminação  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , respectivamente.

$$r = \frac{\epsilon W}{\epsilon t} \quad (12)$$

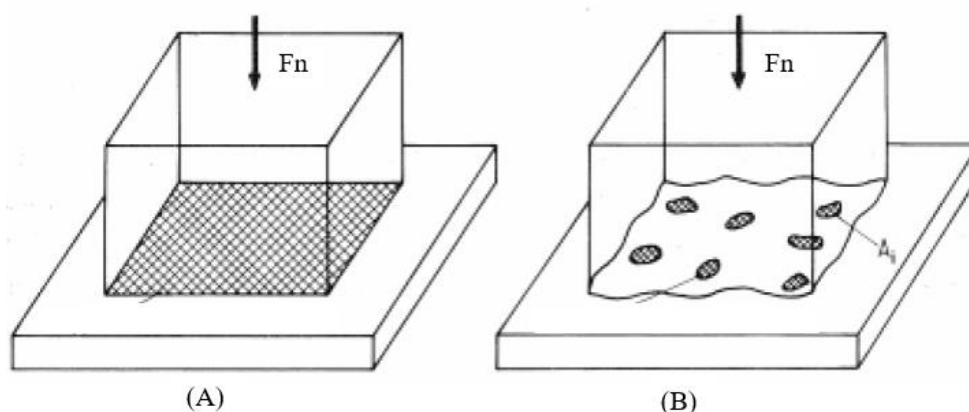
$$r_m = \frac{r_0 + 2.r_{45} + r_{90}}{4} \quad (13)$$

## 2.5 Tribologia na Conformação de Chapas por Estampagem

O processo de estampagem, por definição, está intimamente ligado à tribologia e seus mecanismos, sendo que a única maneira de se obter qualquer peça conformada, é às custas do inevitável atrito durante o fluxo do material entre os componentes da ferramenta. Neste sentido, Nielsen (2018) afirma que o atrito entre as partes atuantes neste processo tem grande influência na qualidade do produto estampado e, também, na vida útil da ferramenta.

Um fator determinante para a geração de atrito, e por consequência outros fenômenos físicos, segundo Popov (2017), é a rugosidade dos materiais. O autor explica que quando há o contato entre duas superfícies, este contato acontece basicamente entre os picos de rugosidade, e segundo Zum Gahr (1987), o somatório das áreas destes picos corresponde a área de contato real, em detrimento da área aparente e visível, como representado na Figura 6.

Figura 6 – Representação de contatos onde: (A) representa a área de contato aparente e (B) a área de contato real



Fonte: Zum Gahr (1987)

Valberg (2010) cita que o fenômeno do atrito na conformação é de grande importância pois, as cargas e tensões transferidas para as matrizes dependem do atrito, o qual

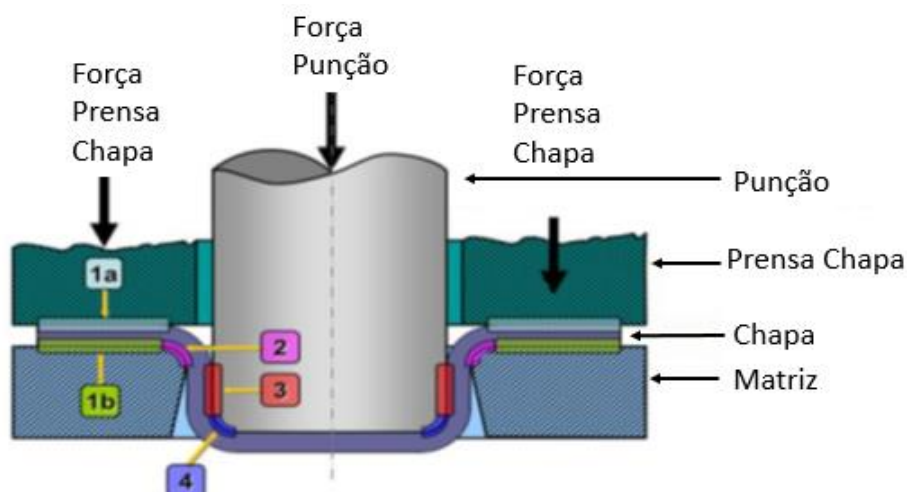
pode ser reduzido pelo uso de lubrificante apropriado, desta forma reduzindo também o desgaste da ferramenta.

Härter (2019), escreveu que a estrutura de um sistema tribológico na estampagem é composta basicamente pelos seguintes objetos: ferramenta e chapa; um meio intermediário que é o lubrificante; e o meio ambiente. Sobre estes objetos atuam os carregamentos e deslizamentos relativos. Segundo Härter, os objetos ferramenta e chapa, tem como principais características o material e suas propriedades mecânicas, geometrias, acabamento superficial e revestimento. O lubrificante possui características de viscosidade, resistência ao cisalhamento, resistência a pressões e temperatura de trabalho. Por fim, o meio ambiente colabora com a temperatura e umidade relativa do ar.

Souza (2008) sugere que os mecanismos de atrito atuam de forma diferente em cada região de contato, sendo muito difícil quantificar um coeficiente devido à complexidade dinâmica do sistema.

A Figura 7 ilustra um processo de embutimento simplificado com os objetos punção, matriz, prensa chapa e chapa. O ponto 1a representa a interação entre o prensa chapa, o lubrificante e a chapa conformada. O ponto 1b, representa a interação entre a chapa conformada, o lubrificante e a matriz. No ponto 2 ocorre o contato entre a chapa, o lubrificante e a matriz. Já no ponto 3 existe contato entre o punção, o lubrificante e a chapa, assim como no ponto 4.

Figura 7 – Curva de Tensão x Deformação relacionada ao corpo de prova



Fonte: Adaptado de Souza (2008)

De maneira geral, costuma-se tratar o atrito como algo prejudicial devido à grande taxa de desgaste da ferramenta. Outro motivo é o acabamento do produto estampado, tanto superficial quanto dimensional, ambas características mais sensíveis aos mecanismos tribológicos implícitos ao processo de conformação. Helman e Cetlin (1993) lembram que o atrito está presente em todos os processos. Corroboram ainda com a ideia de nocividade ocasionada por este na estampagem, apontando alguns aspectos como: tensões residuais no produto; fluxo irregular do blank para dentro da matriz; aumento da temperatura de trabalho e desgaste da ferramenta, além do consumo de energia da prensa.

Por outro lado, alguns resultados esperados em uma conformação dependem muito de um coeficiente de atrito elevado. A obtenção de estiramento por exemplo, está ligado principalmente a restrição de fluxo do material durante a conformação. O estiramento é responsável pelo ganho de resistência mecânica e também pela diminuição do retorno elástico no produto estampado. Altan et al. (1999) afirmam que em alguns casos, o atrito é benéfico para o processo. Para aumentar o coeficiente de atrito, usam-se artifícios como prende rugas, por exemplo, os quais agem de maneira localizada na ferramenta, como relataram Bae (2007), Padmanabhan (2008), Souza et.al (2013).

Desta forma, na estampagem, o objetivo é conhecer os mecanismos de atrito buscando o equilíbrio, de maneira a aproveitar seus benefícios, como o estiramento, e minimizar os malefícios, como desgaste da ferramenta e acabamento superficial do produto prejudicados.

### **2.5.1 Mecanismos de atrito na Estampagem**

Conforme visto na seção anterior, a estampagem por definição é muito sensível ao atrito, devido aos esforços envolvidos e aos movimentos relativos, pois como citado por Stolarski (1990), o atrito apresenta-se como a resistência ao movimento relativo entre dois corpos em contato, e conclui que o fenômeno do atrito depende de diversos fatores individuais e específicos do par tribológico, e que uma avaliação somente das características intrínsecas do material pode estar equivocada.

Bresciani Filho et al. (1997), lembram que a severidade de uma operação de estampagem pode ser dada pelo nível de esforço, o qual depende essencialmente do atrito. Grande parcela desse atrito deve-se aos processos de usinagem empregados para obtenção dos componentes das ferramentas, que, embora esteja evoluindo constantemente ao longo do tempo em termos de qualidade, os acabamentos de classes superiores acabam sendo economicamente inviáveis para as ferramentarias.

Seguindo o mesmo pensamento, Valberg (2010) cita que o atrito é fator crucial para que um processo de conformação seja executado com resultados econômicos aceitáveis, mas reconhece que, em alguns casos, as condições de atrito reais são desconhecidas, pois é muito difícil entrar na interface de limite entre a peça e a matriz, para fazer observações. Também é difícil medir o atrito, porque a tensão de cisalhamento de atrito transferida através da interface é muito menor do que o componente de tensão normal transferida através da mesma interface.

Sobre as imperfeições das superfícies, Lenard (2002) foi categórico ao afirmar que as superfícies sempre são rugosas e contaminadas, seja por elementos líquidos, ou sólidos. Pontua ainda, que o contato ocorre primeiro nas asperezas das partes, cujas pontas se deformam plasticamente com as pressões de contato, sendo esta a forma mais comum de atrito. Outra forma comum de atrito, é a adesão de estado sólido pelas deformações das asperezas, as quais acabam se fundindo em virtude da pressão de contato e movimentos relativos. O terceiro modo mais comum de atrito, é o arrasto viscoso, nesse caso, as partes são completamente separadas por um lubrificante, e a resistência ao movimento relativo é causada pela necessidade de superar o atrito deste terceiro elemento.

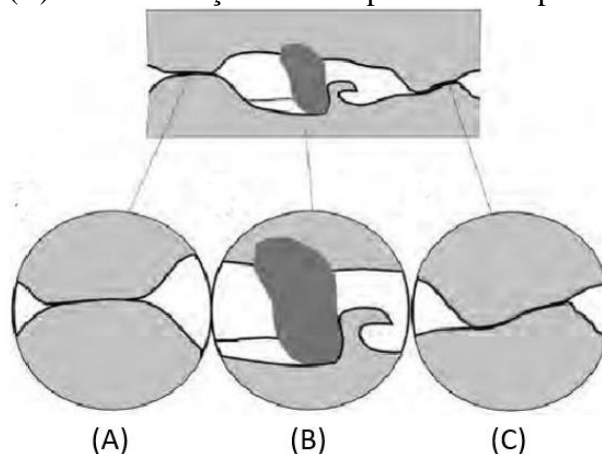
Dentre os modelos mais comuns de atrito sugeridos por Lenard (2002), a adesão é o modelo predominante de atrito na estampagem por embutimento, devido as altas pressões de contato envolvidas em superfícies relativamente lisas.

Bowden e Tabor, explicaram que quando duas superfícies entram em contato a pressões elevadas, as asperezas em fricção provocam micro soldaduras, as quais rompem-se com o movimento relativo, sendo que durante o movimento relativo das interfaces, o processo de soldadura e ruptura ocorre continuamente, absorvendo energia e provocando desgaste na ferramenta. Outro modo de atrito é a formação de micro asparas quando um terceiro elemento está presente na iteração, neste caso o material mais duro prevalecerá sobre o mais macio, o que também acontece quando ocorre a deformação elástica e plástica das asperezas. A Figura 8 ilustra estes mecanismos de atrito.

Schey (1984), escreveu que na estampagem, o atrito aparece nas interfaces devido a aspectos como reações químicas, temperatura, velocidades relativas e quaisquer outras condições que interfiram no comportamento do lubrificante. Na mesma linha de pensamento, Tavares (2019) pontua que o atrito resulta da resposta de um sistema, e que varia de acordo com a velocidade de deslizamento, compatibilidade química, área de contato, lubrificação e outras influencias que atuem sobre o processo de conformação. Correlacionar todas essas

variáveis em um modelo matemático realista é de grande complexidade, por isso muitas vezes determina-se experimentalmente os valores para diferentes aplicações.

Figura 8 – Mecanismos de atrito, onde: (A) é adesão; (B) é a formação de micro asparas e (C) é a deformação elástica/plástica de asperezas.



Fonte: Adaptado de Holmberg (2009)

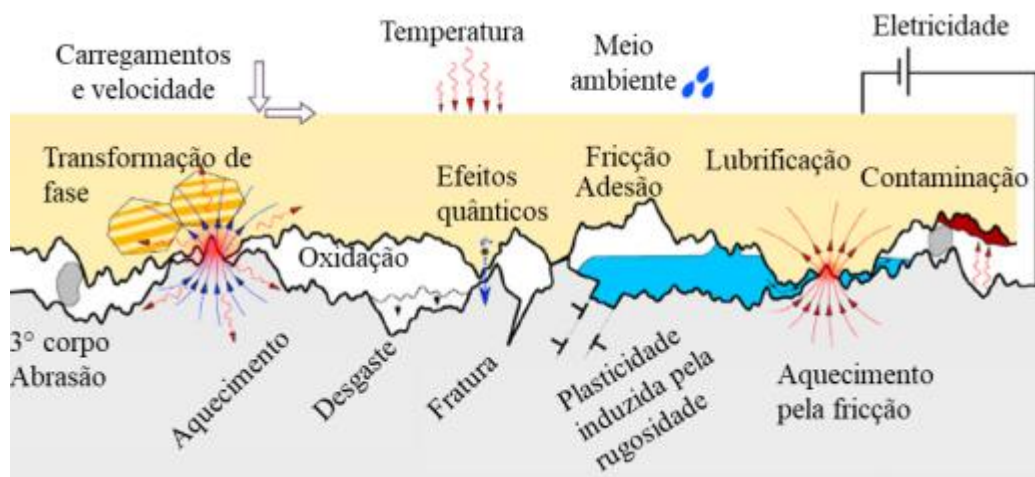
Em um estudo experimental proposto por Azushima e Kudo (1995), com uma chapa lubrificada de alumínio puro alternada em dois níveis de rugosidade, foi verificado que o coeficiente de atrito tende a diminuir a medida que a pressão de contato aumenta. Neste caso, o lubrificante fica aprisionado nos bolsões da interface de contato, elevando a pressão hidrostática que se sobressai à pressão metal com metal, e conseqüentemente reduzindo o coeficiente de atrito. Além da pressão de contato, o aumento da velocidade de deformação também provoca redução no coeficiente de atrito. Hao *et al.* (1999), provaram esta teoria em um ensaio de dobramento sob tensão, no qual o coeficiente de atrito foi reduzido em aproximadamente 30% para um aumento de 100 vezes na velocidade. Hol *et al.* (2017) também relataram que a pressão de contato maior resulta em um coeficiente de atrito menor, assim como Sigvant *et al.* (2019) também verificaram a dependência do coeficiente de atrito para a taxa de deformação da chapa. Szakaly e Lenard (2010) avaliaram os efeitos dos parâmetros de estampagem como velocidade de deformação, rugosidades dos componentes da ferramenta e da chapa e a pressão de contato, e comprovaram que existe um nível de rugosidade ideal para baixar o nível de atrito, e que este diminui à medida que aumentam a velocidade de deformação e a pressão de contato.

Vakis *et al.* (2018) escreve afirmando que todas as interações entre as interfaces dos sólidos são determinadas pelas interações atômicas dentro e entre os sólidos, no que foi chamado de paraíso da multifísica. Os autores ainda citam que os seguintes tipos de



fenômenos podem ocorrer na interface ou em suas proximidades: mecânico (sólida e fluida), térmico, eletromagnético, metalúrgico, quântico e outros. A Figura 9 ilustra um esquema que representa a natureza multifísica das interações entre dois sólidos com superfícies rugosas.

Figura 9 – Representação de contato mecânico entre dois sólidos expostos a cargas mecânicas, térmicas, elétricas e ambientais.



Fonte: Härter (2019)

### 2.5.2 Modelos Tribológicos

De acordo com literaturas básicas, a definição de atrito pode ser dada como uma força tangencial à interface, e de sentido contrário ao movimento. Comumente representado pelo parâmetro  $\mu$ , conhecido como coeficiente de atrito, o qual pode ser definido pela razão entre a força de atrito sobre a força normal. (Blau, 2009).

$$\mu = \frac{F_{\text{Atrito}}}{F_{\text{Normal}}} \quad (14)$$

Já o coeficiente de atrito de Coulomb é definido pela equação 15.

$$\mu = \frac{F_{\text{Atrito}}}{F_{\text{Normal}}} = \frac{\tau_i \cdot A_r}{\rho_r \cdot A_r} \quad (15)$$

Onde:

$\tau_i$  = Tensão cisalhante;

$A_r$  = Área de contato real;

$\rho_r$  = Pressão de contato real, que pode ser definido por:

$$\rho_r = \frac{F_{\text{Normal}}}{A_r} \quad (16)$$

Na estampagem, o coeficiente de atrito é controlado por duas componentes diferentes segundo Folle (2012), como pode ser visto na Figura 10. A primeira componente é a força adesiva que atua nas áreas reais de contato (A). A outra componente é a força de deformação plástica que ocorre nas asperezas mais macias, provocadas pelo material mais duro (B). Dessa forma, o coeficiente de atrito pode ser descrito pela equação 17.

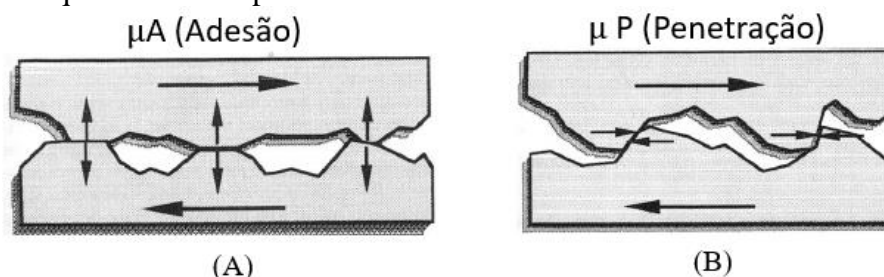
$$\mu = \mu A + \mu B \quad (17)$$

Onde:

$\mu A$  é a componente adesiva e que depende dos materiais;

$\mu B$  é a componente de deformação das asperezas, que depende da topologia das superfícies em contato.

Figura 10 – Esquema das componentes do coeficiente de atrito em contato metal com metal.



Fonte: Adaptado de Folle (2012)

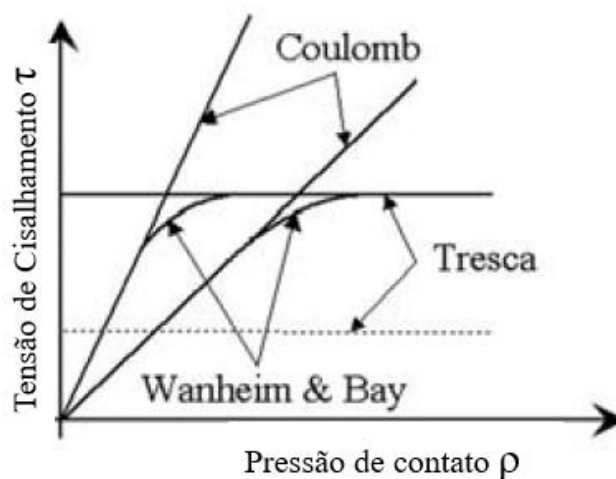
Para Valberg (2010) o modelo de atrito de Coulomb é o mais adequado para descrever o atrito entre dois corpos em contato deslizante somente a baixas pressões, onde o componente de tensão normal médio é menor ou aproximadamente igual a tensão de fluxo do material da peça ( $\sigma_n \leq \sigma_0$ ). Para pressões maiores ( $\sigma_n \gg \sigma_0$ ), como em operações de forjamento ou estampagem com matriz fechada, o modelo de atrito mais indicado passa a ser o modelo de Tresca. Um terceiro modelo pode ser usado na conformação de chapas. Este modelo é chamado de Wanheim and Bay's e faz uma combinação com transição arredondada entre o modelo de Coulomb e o de Tresca, como visualizado na Figura 11. Geralmente é usado quando existe condições de deformação plástica combinada com deformação elástica.

Segundo Härter (2019), a lei de Coulomb é uma relação proporcional entre a tensão de cisalhamento de atrito e a tensão normal efetiva na área de contato, sendo este o modelo de atrito mais utilizado na simulação de processos de estampagem para descrever as condições de atrito entre a ferramenta e a chapa.

Karupannasamy (2014) cita que apesar da reconhecida influência de fatores externos como as condições de contato entre a peça e a ferramenta, usa-se o coeficiente de Coulomb

constante nas simulações por elementos finitos. No entanto é reconhecida a necessidade de um modelo de atrito com base nas condições de contato locais e topografia de superfície para melhorar a previsibilidade da conformação.

Figura 11 – Representação de modelo de atrito em relação a Tensão cisalhante de atrito e Pressão de contato



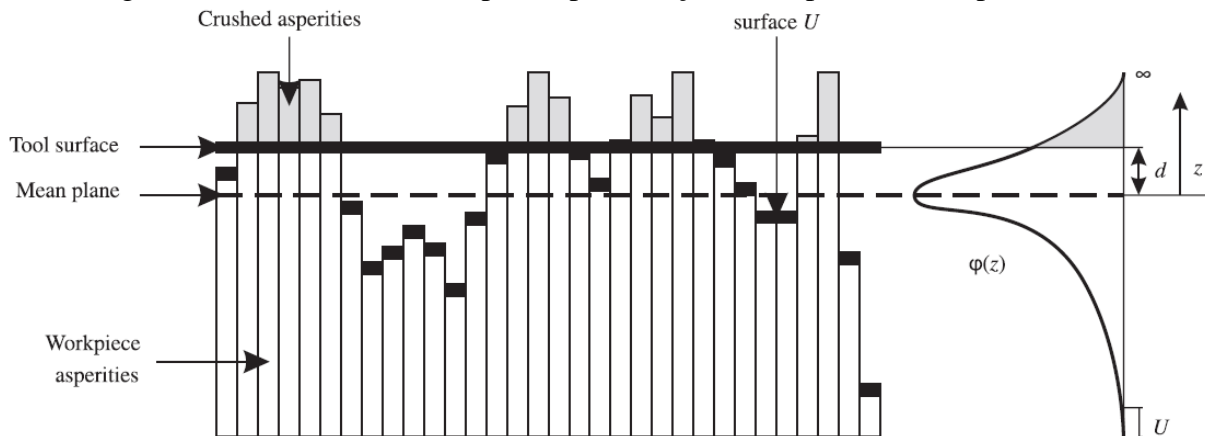
Fonte: Valberg (2010)

Nilsen *et al* (2018) realizaram um apanhado sobre os desenvolvimentos tribológicos dos últimos 80 anos, e destacaram que a teoria da adesão foi a primeira teoria quantitativa sobre o atrito. Esta teoria foi baseada na análise da deformação plástica das asperezas em contato entre duas superfícies metálicas, e o cisalhamento devido a adesão e soldagem a frio das asperezas. O desenvolvimento de algoritmos numéricos durante as últimas décadas fez o uso de simulações numéricas crescer continuamente desde a virada de milênio. Nielsen relata que em 2003, Zhang *et al.* demonstraram uma simulação numérica de contato ferramenta-peça para estabelecer um modelo de atrito com base em ferramenta específica e rugosidade da peça.

Hol *et al.* (2012, 2015) desenvolveram um modelo dos efeitos de fricção na conformação de chapas, onde as asperezas da superfície foram modeladas por barras que representam as asperezas genericamente, conforme ilustrado em Figura 12. O achatamento das asperezas foi modelado durante a interação entre as barras deformáveis.

Os coeficientes locais de atrito foram estimados com base nas topografias da superfície real, conforme visualizado na Figura 13. O achatamento das asperezas sob tensões normais, bem como o carregamento tangencial foram incluídos junto com o fluxo de material na ferramenta.

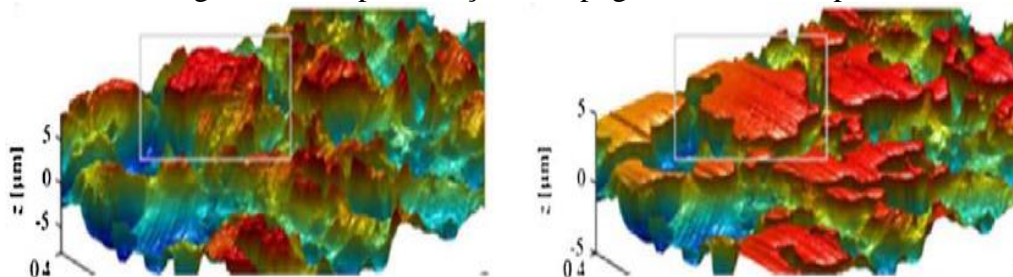
Figura 12 – Modelo de barras para representação das asperezas da superfície.



Fonte: Hol *et al.* (2012)

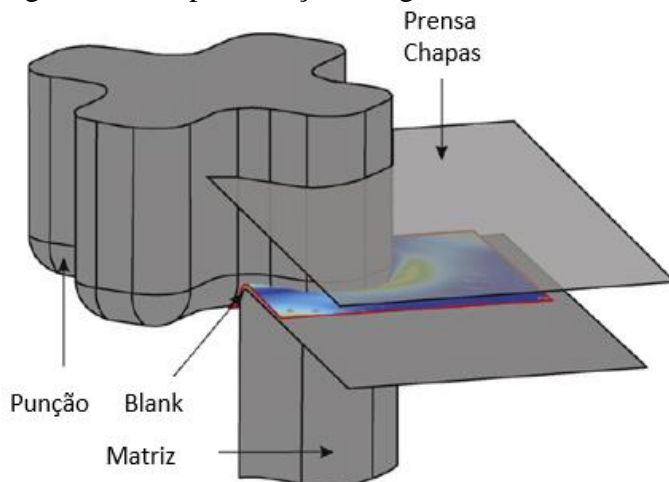
As informações sobre os coeficientes de atrito locais foram então usadas para geração de um código de elementos finitos para simulação em escala real de conformação de uma peça metálica, apresentada na Figura 14.

Figura 13 – Representação da topografia real da chapa



Fonte: Hol *et al.* (2015)

Figura 14 – Representação das geometrias da ferramenta



Fonte: Hol *et al.* (2015)

Atualmente os softwares permitem representar os coeficientes de atrito variáveis, adaptando às condições locais do processo de estampagem para utilização em larga escala como relatam Hol *et al.* (2013) e Sigvant *et al.* (2016). Este trabalho fará uso do software Triboform<sup>®</sup> para elaboração dos modelos tribológicos.

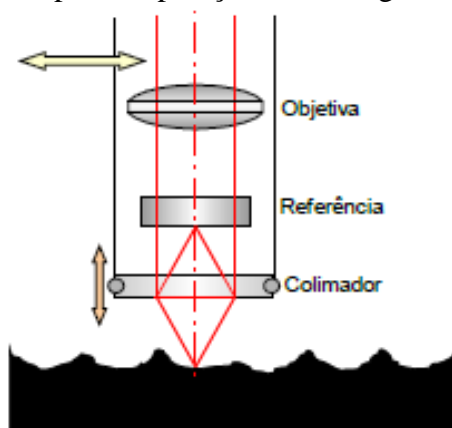
### 2.5.3 Medição Óptica da Rugosidade Superficial

A determinação das rugosidades de uma superfície pode ser realizada através de métodos onde existe contato mecânico, ou também através do método óptico (Figura 15), sem contato.

A interferometria é um método de medição de superfícies sem contato. Esta técnica utiliza o fenômeno da interferência de ondas eletromagnéticas, que se sobrepõem, criando um padrão de interferência que pode ser mensurado e analisado.

Esta técnica de medição permite a obtenção de parâmetros de rugosidade, forma, aplicação de filtros (FFT), levantamento da curva de sustentação em 2-D ou 3-D, além de dados estatísticos. Em função do pequeno diâmetro focal, este método permite a obtenção de informações bem mais precisas do que pelo método mecânico. O princípio de funcionamento está baseado no ajuste contínuo do foco sobre a superfície, e a comparação das variações das distâncias focais sucessivas com a referência. Stoeterau (2004).

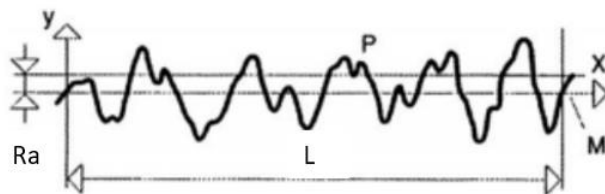
Figura 15 – Princípio de operação de um rugosímetro óptico



Fonte: Stoeterau (2004).

O parâmetro de rugosidade buscado com a interferometria, dentre outros são o Ra e o Sa. O parâmetro Ra é a média aritmética dos valores absolutos em relação a linha média das ordenadas  $P(x)$  no comprimento da amostragem, como ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Representação da rugosidade Ra

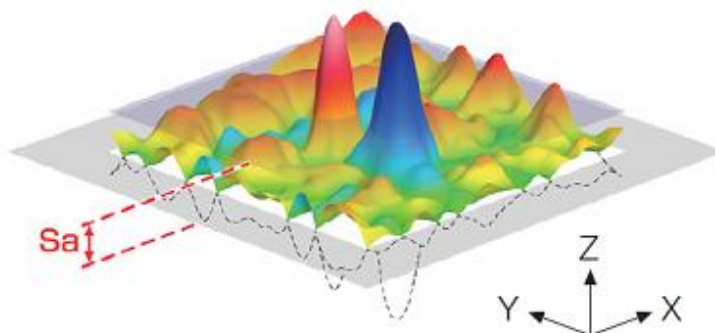


Fonte: Adaptado de Kalpakjian e Schmid (2010)

O parâmetro  $S_a$ , representado na Figura 16, é baseado na média aritmética das alturas de picos e vales em uma área na superfície, ou também, como a rugosidade média relativa a uma área ou desvio do plano médio da rugosidade da superfície. Normalmente o parâmetro  $S_a$  refere-se a análise 3D de superfícies usinadas.

Figura 17 – Representação da rugosidade  $S_a$ 

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x,y)| dx dy$$



Fonte: keyence

#### 2.5.4 Lubrificação na Estampagem

O uso de lubrificantes em operações de conformação de chapas se dá basicamente pela busca do controle do atrito, o qual geralmente é muito nocivo nestas operações e provoca desgaste por abrasão ou adesão nas matrizes, além de prejudicar o acabamento superficial e dimensional do produto estampado.

Soliman (2006) escreveu que, em termos de conformabilidade, os lubrificantes têm duas funções principais. A primeira função trata do controle do movimento da chapa. O lubrificante pode estimular o fluxo de metal através de um baixo coeficiente de atrito ou restringir o fluxo de metal através de um alto coeficiente. A segunda função de um

lubrificante é a prevenção de marcas e escoriações nas peças. Aqui, o lubrificante deve manter isolamento suficiente entre a peça (blank) e a ferramenta, evitando também o desgaste da matriz.

Valberg (2010) cita que os mecanismos de lubrificação na conformação de metais referem-se à forma como o lubrificante, aplicado nas interfaces entre a matriz e a chapa, interage com os dois corpos em contato e afeta as condições mecânicas na interface. Cita que os principais mecanismos de lubrificação são: atrito seco, lubrificação hidrodinâmica e filme de lubrificação. Na literatura encontram-se outras denominações para estes regimes de lubrificação, sendo ainda encontrado o modelo de mínima lubrificação, ou “de contorno” segundo Folle (2012), ou ainda “limítrofe” de Hamrock e Schmid (2004).

O termo “atrito seco” de Valberg (2010), é usado para descrever o contato deslizante entre dois corpos sem a adição de nenhum meio lubrificante. Esta condição é muito difícil de acontecer na estampagem devido as próprias características dos materiais e do ambiente macro, pois mesmo o material sendo limpo com álcool ou acetona, ao ser exposto na atmosfera de ar normal acabará sendo contaminado por uma camada de óxidos na superfície que atuará como um lubrificante.

O modelo de lubrificação chamado de “contorno” por Folle (2012) ou “limítrofe” de Hamrock e Schmid (2004) é o modelo onde a espessura do filme de lubrificante permite o contato entre as asperezas das superfícies, e onde o coeficiente de atrito é governado pelo contato entre os picos da rugosidade superficial.

Já o modelo de lubrificação hidrodinâmica é caracterizado pela formação de uma película de lubrificante espessa que separa completamente a peça da matriz. Neste modelo de lubrificação, o atrito é baixo porque as tensões de cisalhamento transferidas através da interface entre os dois corpos dependem das propriedades de cisalhamento do filme lubrificante apenas, pois não há contato direto entre as asperezas superficiais dos dois corpos.

O modelo de lubrificação mais recomendado para a estampagem segundo Valberg (2010) é o modelo de filme de lubrificação, ou lubrificação mista para Folle (2012) Hamrock e Schmid (2004), Bannister (1996) e Davim (2011). Neste modelo, a espessura do filme lubrificante é normalmente da mesma magnitude que o comprimento médio das moléculas da cadeia do lubrificante, fornecendo uma separação bastante eficaz entre as superfícies. Com este mecanismo de lubrificação, o valor do coeficiente de atrito geralmente estará no intervalo  $0,01 < \mu < 0,1$ .

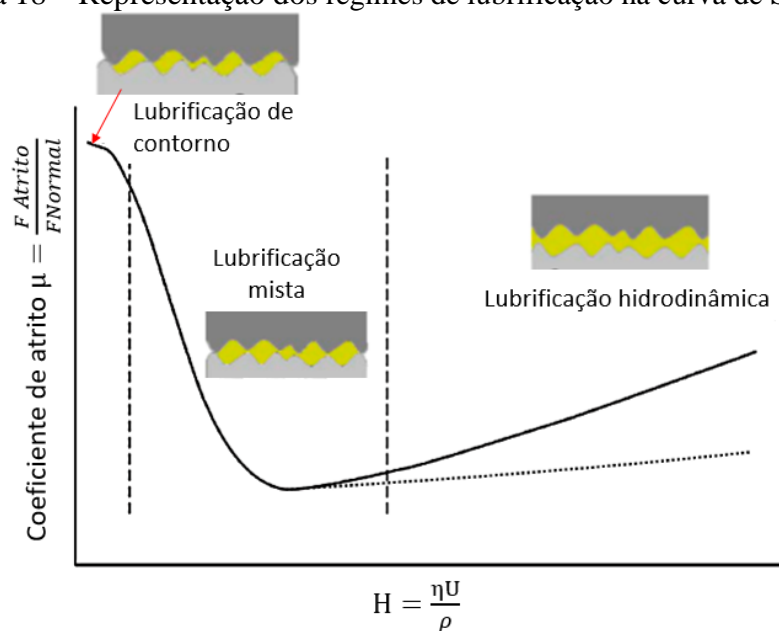
Os regimes de lubrificação podem ser representados visualmente através das curvas de Stribeck, onde o coeficiente de atrito  $\mu$  é representado pelo eixo y, e o eixo x é governado

por uma relação entre viscosidade, velocidade de deslizamento e pressão de sollicitação externa. Este parâmetro é adimensional e conhecido como número de Hersey, dado por:

$$H = \frac{\eta U}{\rho} \quad (17)$$

Onde " $\eta$ " é o valor da viscosidade absoluta, " $U$ " é a velocidade de deslizamento e " $\rho$ " é a pressão de sollicitação externa. A Figura 18 ilustra a representação da curva de Stribeck para os regimes de lubrificação apresentados.

Figura 18 – Representação dos regimes de lubrificação na curva de Stribeck.



Fonte: Adaptado de Folle. (2012)

### 2.5.5 Simulação Numérica por MEF

Nielsen et al. (2018) relataram que os algoritmos numéricos começaram a ser estudados na década de 80 e desde então vem ocorrendo aprimoramentos. Já Alves Filho (2013) cita que MEF foi inicialmente desenvolvido na engenharia aeronáutica para análise de tensões, e, embora o método seja baseado em matemática complexa, foi desenvolvido mais por engenheiros do que por matemáticos. O MEF tem em sua essência a aplicação prática e atualmente vários softwares comerciais fazem os cálculos segundo os modelos discretizados do problema proposto.

O MEF é um método aproximado de cálculo de meios contínuos, no qual o meio contínuo analisado é dividido em um número finito de partes de forma que a estrutura inteira



se torna um agregado de estruturas simples. Os pontos de conexão destas partes são chamados de nós do modelo. Alves Filho (2013) explica ainda que o modo como a estrutura se comporta entre os nós do modelo depende das propriedades atribuídas ao elemento, e a partir do conhecimento dos deslocamentos dos nós, pode-se calcular o comportamento interno de cada elemento.

Soliman (2006), cita que, na estampagem, a simulação do processo é usada para prever o fluxo do material, deformações, tensões, forças da ferramenta e fontes potenciais de defeitos e falhas. As simulações dos processos de conformação oferecem uma racionalização substancial dos recursos, melhorando a confiabilidade do processo.

As indústrias de transformação de metais têm usado a simulação numérica em seus desenvolvimentos por vários motivos, como reduzir o tempo de entrada no mercado, reduzir o custo de desenvolvimento de ferramentas, prever a influência dos parâmetros do processo, reduzir o custo de produção, melhorar a qualidade do produto, além de reduzir o desperdício de material.

Conforme citado por Soliman (2006), o método dos elementos finitos é geralmente composto de três etapas básicas, a saber:

- Pré-processamento: é a criação de um modelo geométrico para a peça a ser conformada, a imposição das condições de contorno adequadas para o processo de conformação, a seleção da equação constitutiva para a deformação plástica e seleção de variáveis de material e processo.
- Análise computacional: envolve a resolução de equações apropriadas para obter a forma deformada da peça.
- Pós-processamento: os resultados das simulações numéricas fornecem as formas previstas das peças, bem como dados de distribuição de tensão e deformação para toda a área de superfície das peças moldadas. Dados de tensão superficial e deformação são dadas na forma de código de cores ou contorno gráficos para facilitar a interpretação dos resultados.

Os métodos atuais de simulação possibilitam uma interação entre softwares de diferentes finalidades na estampagem. No pré-processamento por exemplo, a modelagem das geometrias pode ocorrer em softwares de CAD especializados em modelagens 3D, pois possuem maiores recursos de criação e podem exportar as malhas gráficas em diferentes extensões compatíveis com os softwares de simulação.

O mesmo ocorre atualmente com os aspectos tribológicos do sistema, onde softwares especializados em tribologia podem ser acoplados a softwares de elementos finitos, representando de forma mais realística os atritos e mecanismos de contato entre as superfícies. Hol *et al.* (2012) e Hol *et al.* (2015) desenvolveram experimentos com modelos de atrito locais e com ferramentas representando a rugosidade para simulação de processos de conformação com efeitos do atrito.

Sigvant *et al.* (2018) destaca que o software Triboform® permite representar o coeficiente de atrito variável adaptado às condições locais do processo de conformação. Os modelos de base física incluídos no Triboform® permitem a modelagem do atrito no regime de lubrificação mista. Isso é obtido através do acoplamento de um modelo de lubrificação de contorno e um modelo de atrito hidrodinâmico. O modelo de lubrificação inclui modelos para descrever a mudança nas propriedades tribológicas durante a conformação devido ao carregamento normal, deformação do material subjacente e deslizamentos. Os modelos fornecem uma expressão para a área de contato real, usada como entrada para o cálculo do atrito. As tensões de cisalhamento na interface são obtidas considerando a influência da abrasão e da adesão durante o deslizamento. O somatório das tensões individuais de toda superfície de contato permite obter a tensão de cisalhamento limite ( $\tau_{asp}$ ). Com as deformações das asperezas da superfície é calculado o volume de lubrificante preso nos vales das superfícies em contato e, conseqüentemente, o filme de lubrificante. A tensão de cisalhamento viscoso ( $\tau_{lub}$ ) na interface fluido-sólido é calculada com base na distribuição da pressão hidrodinâmica. Com a tensão de cisalhamento limite ( $\tau_{asp}$ ) e a tensão de cisalhamento viscoso ( $\tau_{lub}$ ) é calculado o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) através da equação 16.

$$\mu = \frac{\tau_{asp}}{\tau_{lub}} \quad (16)$$

Quanto à simulação da conformação da chapa, Härter (2019), cita que um software de elementos finitos de uso comercial bastante utilizado para simulação de processos de conformação de chapas é o Autoform®, desenvolvido pela Autoform Engineering GmbH. Este software fornece resultados através de uma solução implícita que resolve as equações de equilíbrio com interações de Newton-Raphson expressas por:

$$M^{t+\Delta t} \ddot{U} = R^{t+\Delta t} - F^{t+\Delta t} \quad (17)$$

Onde "R" é o vetor de forças nodais aplicadas externamente, "F" é o vetor de forças nodais correspondentes à tensão nos elementos, "M" é a matriz de massa e "Ü" são os vetores

de deslocamentos nodais e aceleração, respectivamente. A interação de Newton-Raphson é resolvida através de,

$$M^{t+\Delta t} \ddot{U}_{(i)} + K_{(i-1)}^{t+\Delta t} \Delta U_{(i)} = R^{t+\Delta t} - F_{(i-1)}^{t+\Delta t} \quad (18)$$

Até que a convergência seja satisfeita, onde

$$U_{(i)}^{t+\Delta t} = U_{(i-1)}^{t+\Delta t} + \Delta U_{(i)} \quad (19)$$

E as condições iniciais correspondem ao instante calculado para o tempo  $t$

$$U_{(0)}^{t+\Delta t} = U_{(i-1)}^{t+\Delta t}, \quad F_{(0)}^{t+\Delta t} = F^t, \quad K_{(0)}^{t+\Delta t} = K^t \quad (20)$$

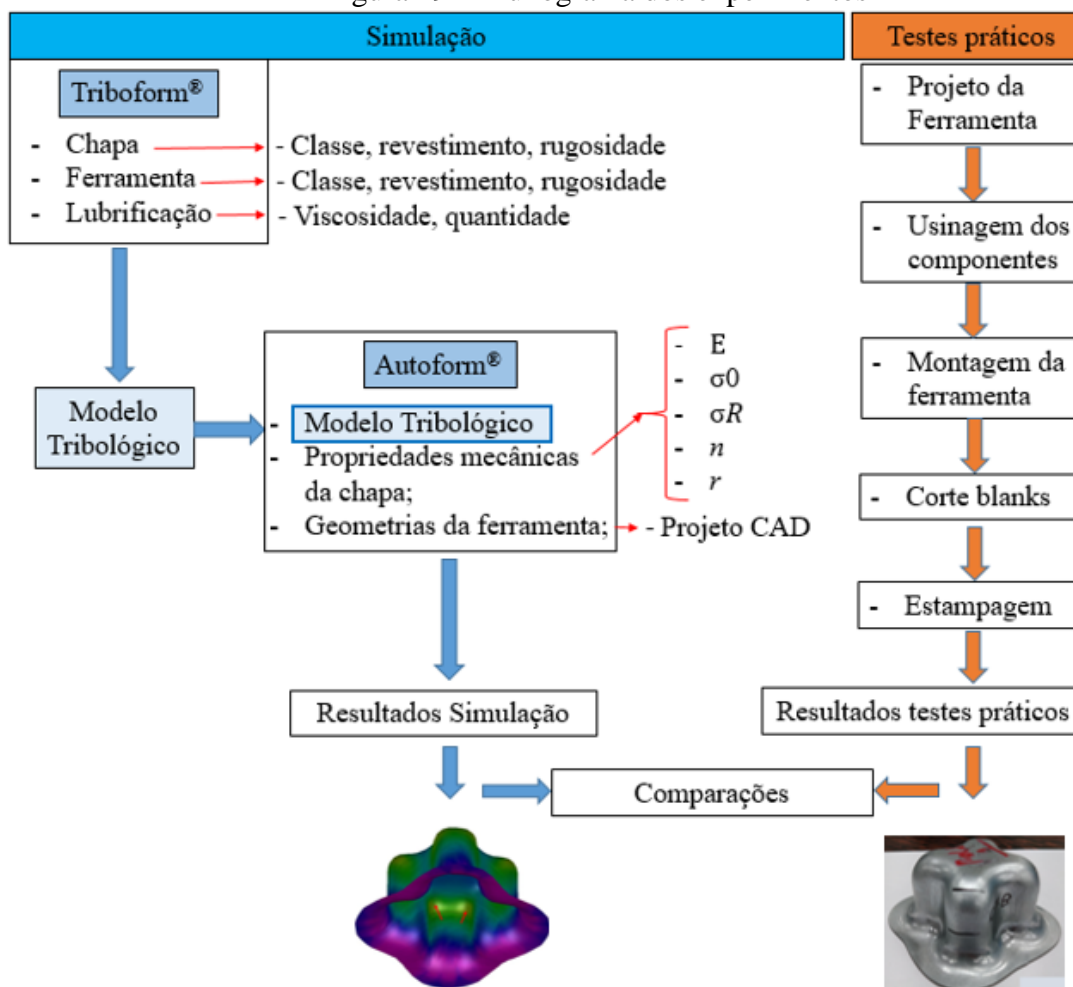
O " $K$ " representa a matriz de rigidez e o " $i$ " é índice de contagem das interações não lineares.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho está voltado para aplicação prática na indústria, logo, a definição da geometria da peça a ser estudada e os equipamentos envolvidos, são itens característicos industriais.

Para auxiliar no estudo do processo da estampagem, foi utilizado o software gerador de modelos tribológicos denominado TriboForm<sup>®</sup>, em conjunto com o software de elementos finitos AutoForm<sup>®</sup>. Estes softwares trabalham combinados a partir dos dados característicos imputados, de maneira que o TriboForm<sup>®</sup> gera o modelo tribológico em função das rugosidades da chapa e ferramenta, além das características da lubrificação. O modelo tribológico então é combinado ao software de CAE AutoForm<sup>®</sup>, que reúne ainda as características mecânicas da chapa e as geometrias da ferramenta para gerar resultados da conformação. A Figura 19 ilustra o fluxograma do planejamento experimental, contemplando as simulações e os testes práticos.

Figura 19 – Fluxograma dos experimentos



Fonte: O autor (2021).

Para validação dos resultados simulados, foi utilizada uma ferramenta construída especialmente para testes de estampagem. Após a estampagem dos corpos de prova, estes foram submetidos a medições, como mostra o planejamento da Tabela 2 do capítulo 3.5.

Nos próximos capítulos serão detalhadas as etapas deste estudo.

### 3.1 Propriedades Mecânicas do Material

O material utilizado no estudo foi uma chapa laminada a frio e galvanizada a quente da classe CR4 DIN 1654 com 1mm de espessura. As propriedades mecânicas do material foram obtidas através de ensaios de tração. O dimensionamento e o formato adotados para os corpos de prova foram tomados a partir da norma NBR 6673, que descreve o ensaio. A Tabela 1 demonstra a composição química do material.

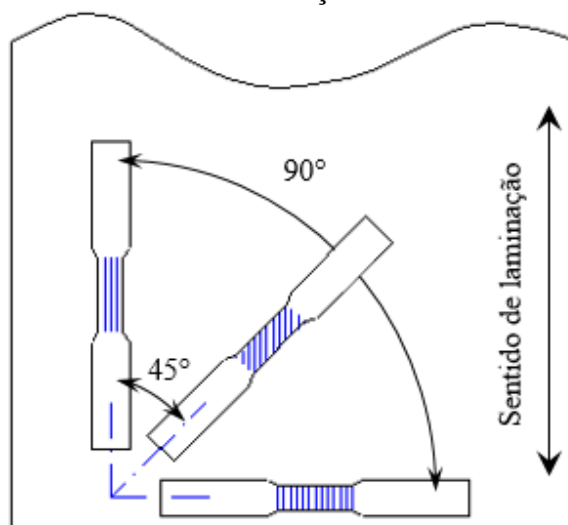
Tabela 1 – Composição química da chapa CR4 DIN 1654

C	Mn	P	S	Al
0,08	0,4	0,025	0,02	0,015

Fonte: DIN 1654

Os corpos de prova, conforme ilustrado na Figura 20, foram cortados em uma guilhotina, extraídos formando ângulo de 0°, 45° e 90° em relação ao sentido de laminação, na mesma chapa cujos blanks também foram extraídos para os testes práticos. Foram extraídos 5 corpos de prova para cada direção de laminação, totalizando 15 amostras. Após o corte, o perfil do C.P. foi usinado em centro de usinagem CNC.

Figura 20 – Orientação dos corpos de prova para ensaio de tração, referente ao sentido de laminação.



Fonte: Bruning Tecnometal

O ensaio de tração foi realizado conforme norma NBR 6892-1 de 04/2013 em uma máquina universal de ensaios EMIC modelo DL-20000 com capacidade máxima de 20 KN, pertencente ao LEMM - Laboratório de Ensaio Mecânicos e Metalográficos - da empresa Bruning Tecnometal.

Foram determinados os valores do fator de anisotropia ( $R$ ) e índice de encruamento ( $n$ ), além do limite de escoamento ( $LE$ ), limite de resistência ( $LR$ ), e % de alongamento. Estes dados auxiliam na avaliação das características de estampabilidade das chapas, os quais serão usados para realização das simulações em software de elementos finitos.

### 3.2 Caracterização da Superfície da Chapa e da Ferramenta

O aparelho utilizado para realizar as medições foi da marca BRUKER modelo Contour GT. Para tratamentos dos dados, foi utilizado o software Vision64®. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Tribologia da Universidade de Caxias do Sul.

A chapa foi medida através de um corpo de prova de dimensões 40 x 40mm (Fig. 21 A). Já para a ferramenta, devido ao tamanho impossibilitar a verificação das rugosidades na escala real, foram confeccionados corpos de prova modelos (Fig. 21 B e C), de modo a representar as superfícies dos componentes - matriz e prensa chapas, cujas interações com a chapa influenciam na conformação. Para tanto, estes modelos foram fabricados e usinados utilizando os mesmos parâmetros de usinagem dos componentes da ferramenta, sendo em um dos lados aplicado acabamento alisado e do outro lado acabamento polido. O processo de fabricação do corpo de prova modelo seguiu conforme descrito abaixo:

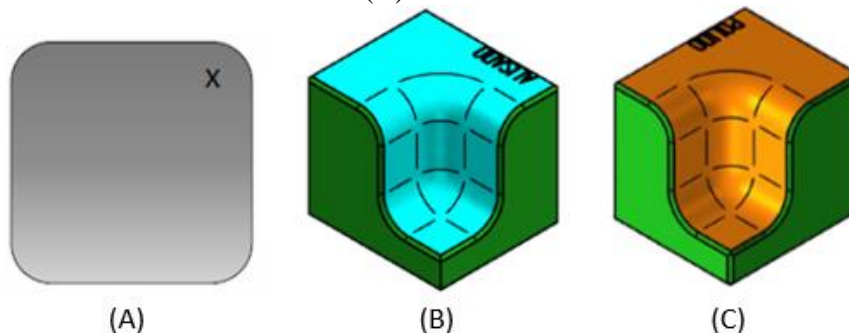
- 1- Cortar o material aço AISI D-6 (VC-131) em serra nas medidas de 62,5 x 62,5 x 62,5mm;
- 2- Esquadrear em fresadora convencional nas medidas de 60mm x 60mm x 60mm;
- 3- Pré usinar as formas deixando 0,5mm de sobre-metal nas faces e raios;
- 4- Temperar e revenir para obter a dureza de  $60 \pm 1$  HRC;
- 5- Reusinar nas dimensões finais com acabamento;
- 6- Polir manualmente com pedra e depois com feltro o lado indicado como 'Polido' no modelo.

A ferramenta de usinagem usada para realização dos passes de acabamento e os parâmetros de usinagem foram conforme descritos abaixo:

- Ferramenta: Fresa Esférica de diâmetro 12mm com insertos de Metal Duro
- Avanço: 1600mm/min

- Profundidade de corte: 0,25mm
- Rotação: 5500 RPM

Figura 21 – Corpos de prova para Perfilometria onde: (A) é a chapa; (B) refere-se a ferramenta com acabamento usinado e (C) refere-se a ferramenta com acabamento polido.

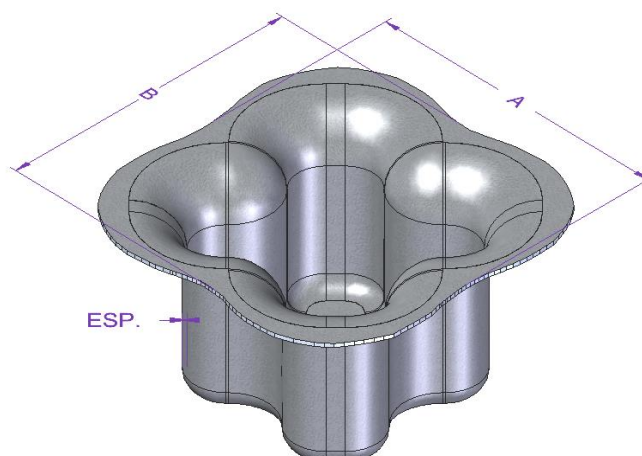


Fonte: O autor (2021).

### 3.3 Definição da Geometria do Estudo de Caso e Medições

A definição da geometria de estudo baseou-se em estudos tribológicos anteriores, como Hol et al. (2012) e Hol et al. (2015), além de Härter (2019). Além disso, esta geometria, como pode ser vista na Figura 22, apresenta características que normalmente são encontradas em peças estampadas, como raios de concordância grandes e pequenos, superfícies côncavas e convexas, áreas com grandes deformações e outras com pequenas deformações relativas, estado de tensões de tração e compressão, pressões de contato variáveis, simetria e regiões suscetíveis à variação significativa de espessura e coeficiente de atrito.

Figura 22 – Geometria da peça e parâmetros do estudo.

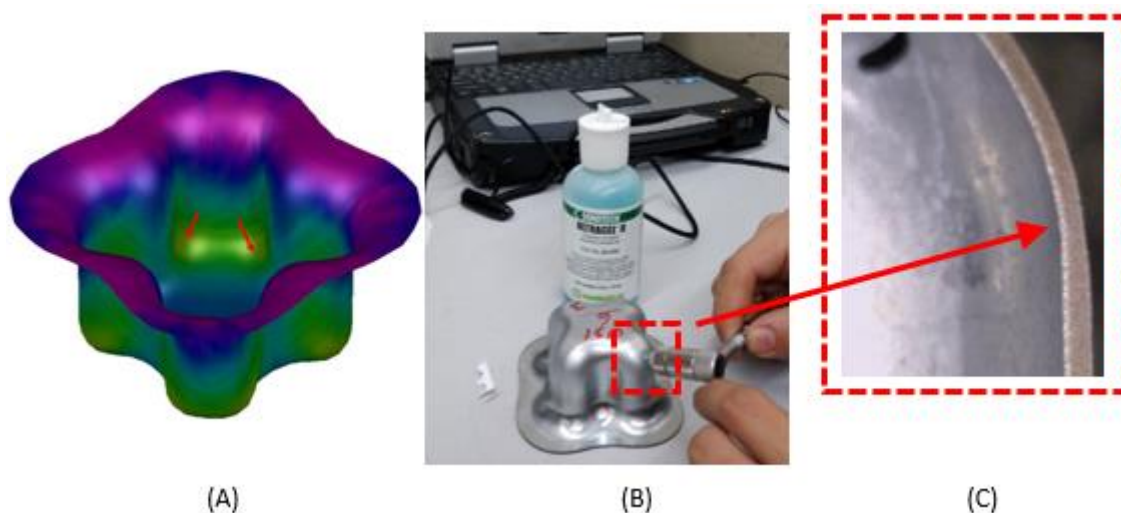


Fonte: O autor (2021).

O blank foi definido em formato circular com diâmetro de 120 mm, e os aspectos avaliados foram as dimensões das abas “A” e “B”, além da redução da espessura, demonstrados na Figura 22.

A determinação do ponto com menor espessura nas peças foi realizada com o auxílio de um aparelho de ultrassom, de maneira a confirmar que a região com maior afinamento foi a mesma região registrada nas simulações, como pode ser visto na Figura 23. Após a demarcação da região de maior afinamento, todas as peças conformadas foram cortadas, para posterior medição com auxílio de uma lupa eletrônica modelo DinoLite com capacidade de ampliação de até 200x. A medição ocorreu em dois lados da peça, de modo a realizar medida média em virtude das possíveis diferenças nas medições, como ilustra a Figura 24.

Figura 23 – Verificação da região com maior afinamento onde: (A) Região demarcada pela simulação; (B) Verificação com Ultrassom e (C) Peça cortada para medição.



Fonte: O autor (2021).

Figura 24 – Regiões de medição das espessuras



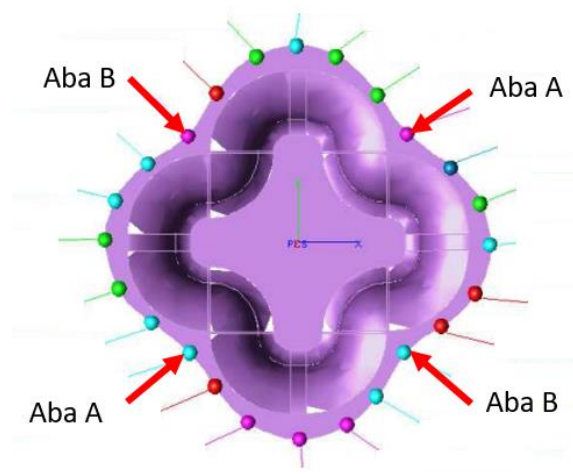
Fonte: O autor (2021).



As medições das abas podem ser realizadas através de medição direta utilizando um instrumento como o paquímetro. No presente trabalho a medição foi realizada utilizando um braço de medição tridimensional, do laboratório de metrologia da empresa patrocinadora. Os pontos foram registrados e exportados no modelo de extensão “.iges”, para posterior criação da malha no software de CAD Solid Edge ST8. A Figura 25 ilustra os pontos de toque para geração da malha e os pontos de medição das abas.

Após todas as medições, a análise estatística foi realizada.

Figura 25 – Pontos de medição das peças estampadas



Fonte: O autor (2021).

### 3.4 Lubrificante

A exemplo da definição da geometria da peça para estudo, a escolha pela quantidade de lubrificante também foi baseada em estudos anteriores. Hol *et al.* (2016) utilizaram quantidades de 0,5 g/m<sup>2</sup> e 1,2 g/m<sup>2</sup> em um ensaio de atrito do tipo tracionamento de tiras, onde buscou modelar numericamente o comportamento do atrito. Em 2017, novamente Hol *et al.* analisaram a influência da quantidade de lubrificante na qualidade final do produto estampado automotivo, e utilizaram quantidades de 0,6 g/m<sup>2</sup> e 2 g/m<sup>2</sup> em cada lado da chapa para avaliar a qualidade e estabilidade de dimensões deste produto. Em 2018, Sigvant *et al.*, utilizaram 2 g/m<sup>2</sup> em um estudo de caso envolvendo componentes automotivos estampados. Já Härter (2019) utilizou as quantidades de 0,5 g/m<sup>2</sup>, 1,2 g/m<sup>2</sup> e 2 g/m<sup>2</sup> de lubrificante para conformação nos estudos de caso, avaliando coeficientes de atrito e força de estampagem na simulação de uma peça similar.

Para este estudo, optou-se em usar o óleo comercial de estampagem LUBSTAMP 100, variando as quantidades entre 0,5 g/m<sup>2</sup>, 1 g/m<sup>2</sup> e 3 g/m<sup>2</sup>. A tabela da Figura 26 demonstra as principais características do lubrificante utilizado.

Figura 26 – Principais características do lubrificante comercial LUBSTAMP 100.

LUBSTAMP 100	
Densidade	Viscosidade
Kg/m <sup>3</sup>	cSt
885 - 905	100 a 40°

Fonte: LUBSTAMP

### 3.5 Planejamento dos experimentos

O planejamento experimental proposto (Tabela 2), utiliza as variáveis: Rugosidade da ferramenta em 2 níveis; e a Quantidade de lubrificante em 3 níveis, com 3 repetições. Realizou-se, assim, um total de 18 experimentos. Os resultados medidos foram as dimensões da aba, além do afinamento máximo da espessura (Fig. 22).

As variáveis propostas são:

- Rugosidade média nas regiões de raios e faces planas da ferramenta, obtida através dos modelos com acabamento Alisado (Sa= 0,75µm) e Polido (Sa= 0,4µm).
- Quantidade de Lubrificante, variando entre 0,5 g/m<sup>2</sup>, 1,0 g/m<sup>2</sup> e 3,0 g/m<sup>2</sup>.

Concomitantemente, foi realizada uma simulação com o coeficiente de atrito de Coulomb, convencionalmente usado em simulações de estampagem, para efetuar as comparações.

Tabela 2 – Planejamento dos experimentos

Variáveis		
Sa (Chapa) [µm]	Sa (Ferramenta) [µm]	Quantidade lubrificante (g/m <sup>2</sup> )
1,08	0,4	0,5
		1
		3
	0,75	0,5
		1
		3
Coeficiente de atrito de Coulomb		0,15

Fonte: O autor (2021).

### 3.6 Simulação Numérica

As análises numéricas empregadas neste estudo de caso foram realizadas utilizando o software Triboform®, em combinação com o Autoform®. A abordagem do trabalho está ilustrada no fluxograma da Figura 19.

O software Triboform® faz o arranjo das informações pré-definidas como:

- Dados da rugosidade da chapa e da ferramenta, obtidos por Perfilometria Óptica de Varredura;
- Dados do lubrificante, como quantidade;

O Triboform® funciona como plug-in do Autoform®, no qual imputa-se o modelo tribológico, além de novos dados para efetuar a simulação. Estes dados são:

- Propriedades mecânicas da matéria prima, como módulo de elasticidade (E), limite de escoamento ( $\sigma_0$ ), limite de resistência (Rm), tensão de ruptura ( $\sigma_R$ ), coeficiente de encruamento (n) e coeficiente de anisotropia (r);
- Geometria das ferramentas, que são arquivos de CAD, as quais podem ser exportadas diretamente do projeto da ferramenta e referem-se às partes que interagem com a chapa como, matriz, punção e prensa chapas.

Todos os dados acima são processados para geração do resultado final da simulação, que fornecerá diversas respostas ao profissional, como redução de espessura, percentagem de alongamento da chapa, dimensionais externos gerais, retorno elástico, dentre outras.

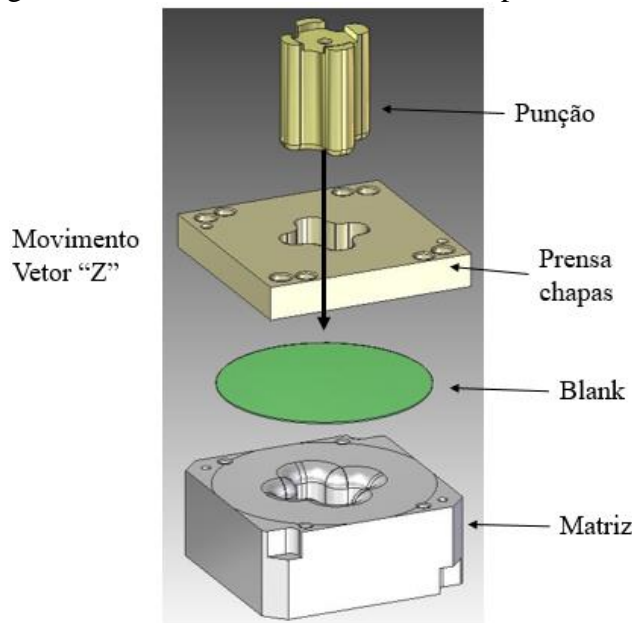
Os parâmetros da simulação foram os mesmos que Härter (2019) também utilizou em seus experimentos, sendo que a geometria possui tamanho máximo de elemento de 10 mm e para a chapa foi utilizado o elemento de casca elasto-plástico com 11 pontos de integração ao longo da espessura. As principais características das simulações estão descritas abaixo:

- Raio de penetração: 0,22 mm
- Ângulo máximo do elemento: 22,5°
- Nível máximo de refinamento: 4
- Tamanho inicial máximo do elemento: 12 mm
- Tamanho mínimo do elemento com todos níveis de refinamento: 0,75 mm
- Número máximo de interações: 40

### 3.6.1 Cinética das geometrias da Ferramenta

Com relação às geometrias para a simulação de conformação no Autoform®, foram desenhadas no software de CAD Solid Edge® ST8, sendo as malhas extraídas diretamente do projeto da ferramenta, e exportadas em formato de extensão IGES para posterior montagem da simulação. A Figura 27 demonstra essas geometrias.

Figura 27 – Geometrias das ferramentas para simulação



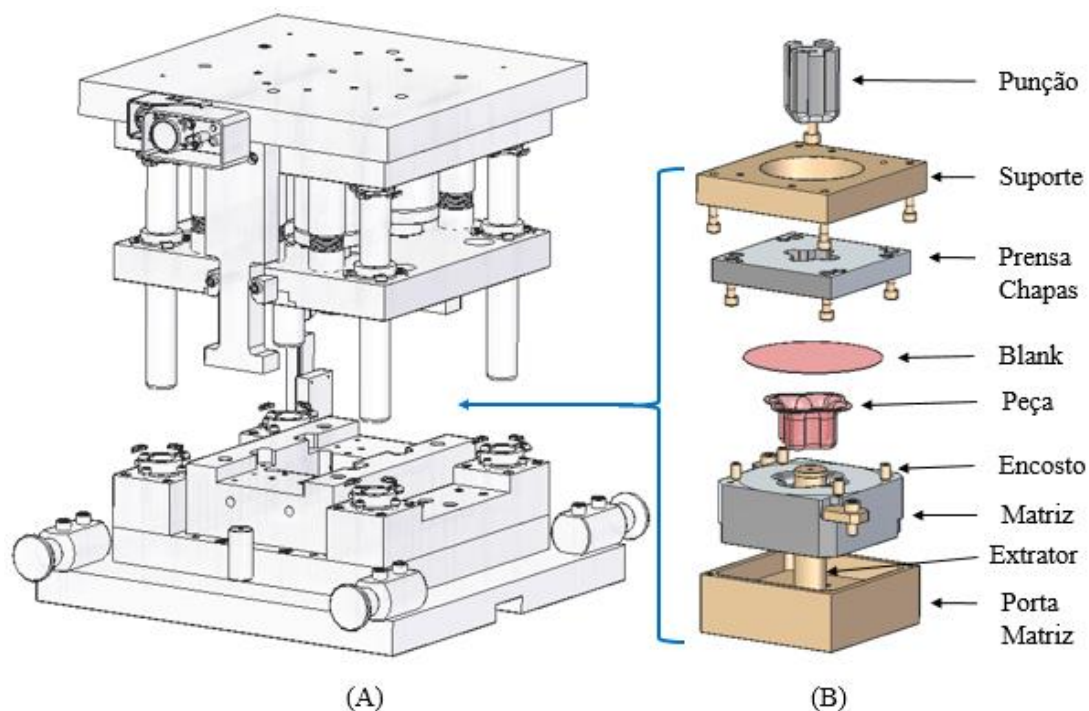
Fonte: O autor (2021).

Quanto aos movimentos, o “prensa chapas” possui movimento de corpo rígido com translação no vetor  $-Z$  com curso de 45 mm, sendo suportada por uma carga de cilindros com força inicial de 24,5 kN e rigidez de 0,104 kN/mm, resultando em uma força final de 29,2 kN. A “matriz” possui uma geometria rígida e com todos os graus de liberdade fixados. O “punção” é composto por uma geometria rígida possuindo movimento apenas no vetor  $-Z$ . O movimento está delimitado ao curso de 40 mm. A velocidade da operação foi considerada 200 mm/s.

### 3.7 Projeto e Construção da Ferramenta de Testes

O projeto do módulo de testes foi desenvolvido no software Solid Edge ST8 e pode ser visualizado na Figura 28. Este módulo foi projetado para ser montado na estrutura de uma ferramenta de testes instrumentada.

Figura 28 – Projeto da ferramenta de testes, onde: (A) refere-se a estrutura de fixação e (B) refere-se ao módulo projetado para este estudo.



Fonte: O autor (2021).

As principais partes da ferramenta são:

- Punção: Exerce a força para embutir o blank dentro da matriz. Fabricado em aço AISI D6, sendo temperado e revenido obtendo uma dureza de 60 HRC. O punção é fixado na parte superior da estrutura da ferramenta de testes existente;
- Suporte: Funciona como um espaçador e fixador do Prensa chapas e foi construído em aço SAE 1020;
- Prensa chapas: Exerce pressão sobre o blank, de modo a segurá-lo na posição, controlando o fluxo de material que escoar para dentro da matriz. Teve seu acabamento variado entre alisado e polido para efetuar os testes, sendo fabricado em aço AISI D6, temperado e revenido obtendo uma dureza de 60 HRC;
- Encostos: São os posicionadores do blank sobre a matriz, sendo fabricados em aço SAE 1045, temperados por indução obtendo uma dureza de 45 HRC;

- Matriz: Dá forma ao produto estampado. Teve seu acabamento variado entre alisado e polido para efetuar os testes. Foi fabricada em aço AISI D6 temperado e revenido obtendo uma dureza de 60 HRC.
- Porta Matriz: Responsável por fixar e posicionar a matriz na ferramenta. Foi construído em aço SAE 1020 e é fixada na parte inferior da estrutura de testes existente.

A construção da ferramenta ocorreu no departamento de Ferramentaria da empresa patrocinadora, seguindo as definições de projeto expostas neste relatório, podendo ser configurada para as diferentes combinações citadas na Tabela 2. A ferramenta completa pode ser visualizada na Figura 29.

Figura 29 –Ferramenta de testes montada



Fonte: O autor (2020).

### 3.8 Testes Práticos para Validação dos Experimentos

As simulações computacionais por MEF são importantes para dar segurança ao projetista na tomada de decisões. Contudo, por mais avançada que esteja a tecnologia virtual na área da estampagem, necessariamente ela deve ser acompanhada de testes práticos, principalmente quando se trata de estudos que objetivam estabelecer parâmetros de auxílio aos profissionais da estampagem. Sendo assim, o presente trabalho validou

experimentalmente as simulações computacionais dentro do ambiente fabril. A Figura 30 mostra a ferramenta aberta na prensa.

A ferramenta foi preparada para reproduzir os parâmetros da simulação. Foram regulados os cursos do prensa chapas e do punção para atingir as dimensões propostas para a peça. Também foi calibrada a pressão nos cilindros de nitrogênio do prensa chapas para reproduzir a força indicada na simulação. Todos os cilindros foram calibrados com 25 bar, de modo obter força inicial de 24,5 kN e força final de 29,2 kN.

Os blanks foram todos limpos cuidadosamente com Acetona. Da mesma forma, a ferramenta também foi cuidadosamente limpa com acetona, e a cada novo teste efetuou-se a limpeza novamente, para não haver acúmulo de lubrificante ou sujeira do teste anterior.

Figura 30 –Ferramenta aberta na prensa



Fonte: O autor (2020).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos capítulos seguintes, serão apresentados os resultados da caracterização do material dos blanks, assim como os modelos tribológicos gerados a partir dos modelos padrão de usinagens, além dos resultados das simulações computacionais e dos ensaios práticos com a ferramenta de testes em prensa hidráulica.

### 4.1 Propriedades Mecânicas do Material

O ensaio de tração foi realizado com o objetivo de caracterizar corretamente o material da classe CR4 DIN 1654, usado nos softwares de simulação numérica.

Os corpos de prova foram confeccionados formando ângulos de 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação da chapa, e forneceram informações relativas às propriedades mecânicas do material, como o limite de resistência (LR), tensão limite de escoamento (LE) e alongamento (Al). Os resultados podem ser vistos na Tabela 3 e o relatório completo no Apêndice B.

Tabela 3 – Propriedades dos materiais utilizados

Corpo de Prova	Limite de Resistência (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento Uniforme Médio (%)
CP0°	271	150	25,45
CP45°	282	159	23,05
CP90°	269	155	26,29
Média	274,2	154,9	24,93
Mediana	271	155,4	25,45
Desvio Padrão	6,89	4,6	1,68

Fonte: O autor (2021).

Outros dados calculados ao final dos ensaios de tração foram o fator de anisotropia “r” e índice de encruamento “n” através das normas DIN EN ISO10113 e ASTM E-517, com 3 corpos de prova válidos para cada orientação em relação ao sentido de laminação (0°, 45° e 90°). Os resultados obtidos nos ensaios estão ilustrados na Tabela 4.



Tabela 4 – Coeficiente “n” e “r” para cada direção de laminação

Corpo de Prova	Índice de Encruamento (n)	Índice de Anisotropia (r)
CP0°	0,256	2,4
CP45°	0,249	1,77
CP90°	0,25	2,82
Média	0,252	2,19
Desvio Padrão	0,004	0,528

Fonte: O autor (2021).

Os resultados do ensaio de tração evidenciaram que o material ensaiado possui boas características de estampabilidade.

A ductilidade representada pela *percentagem de alongamento*, é uma das principais características avaliadas na definição do conceito do ferramental para embutimento, sendo que quanto maior este valor, maiores níveis de deformações pode-se atingir na operação. O alongamento uniforme do material ensaiado ficou em torno de 25%, sendo compatível com outros materiais aplicados nas operações de estampagem profunda, como é o caso do material NBR 5915 da classe EEP, e ainda, apresenta o dobro do alongamento de um aço de alta resistência, como o DP 800 por exemplo.

A característica do alongamento depende muito do *coeficiente de anisotropia “r”*, pois, a deformação provoca redução da espessura mais pronunciada em materias com valores deste coeficiente abaixo de 1. No presente estudo, verificou-se que o material é anisotrópico e, encontrou-se um valor médio de “r” próximo a 2, ou seja, forte preferência em deformar-se no plano da chapa sob qualquer direção, e pouco na espessura.

O *índice de encruamento “n”* demonstra a capacidade de redução de espessura e distribuição das deformações sem ocorrer falhas no material. Quanto maior o valor do coeficiente de encruamento, maior o alongamento uniforme e, conseqüentemente, melhor conformação mecânica. No presente estudo, encontrou-se um valor médio de “n” próximo a 0,25. Este valor também é compatível com valores típicos de outros materiais utilizados na estampagem profunda, como o já citado NBR 5915 da classe EEP.

Todas essas particularidades quantificadas, explicam a grande taxa de utilização do material da classe CR4 DIN 1654 na aplicação de produtos estampados de alta complexidade

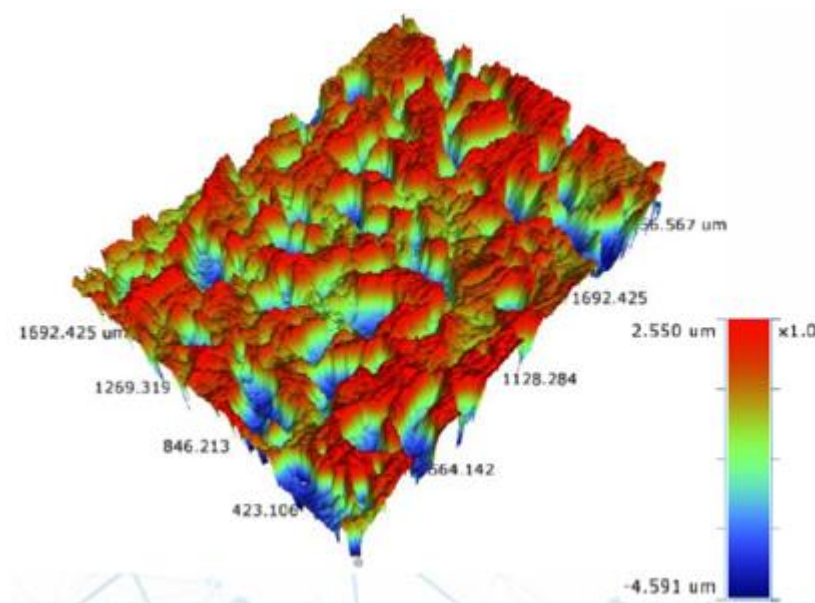
geométrica, principalmente nos chamados repuxos profundos de grandes estiramentos, aplicados massivamente na indústria de estampados automotivos.

#### 4.2 Caracterização da Superfície da Chapa e da Ferramenta

Utilizando a técnica de Interferometria Óptica, foram encontrados os valores médios das rugosidades para a chapa e também para os modelos de usinagem da ferramenta.

Na chapa, foi realizada a verificação em 3 pontos aleatórios da superfície. A Figura 31 apresenta a topografia da superfície correspondente a um dos pontos. A Tabela 5 demonstra os valores estatísticos obtidos da média das medições nos três pontos, sendo utilizado o parâmetro Sa para geração dos modelos tribológicos. O parâmetro Sa, é baseado na média aritmética das alturas de picos e vales em uma área na superfície, ou também, como a rugosidade média relativa a uma área ou desvio do plano médio da rugosidade da superfície

Figura 31 – Representação da topografia da chapa



Fonte: O autor (2021).

Tabela 5 – Resultados das rugosidades da chapa.

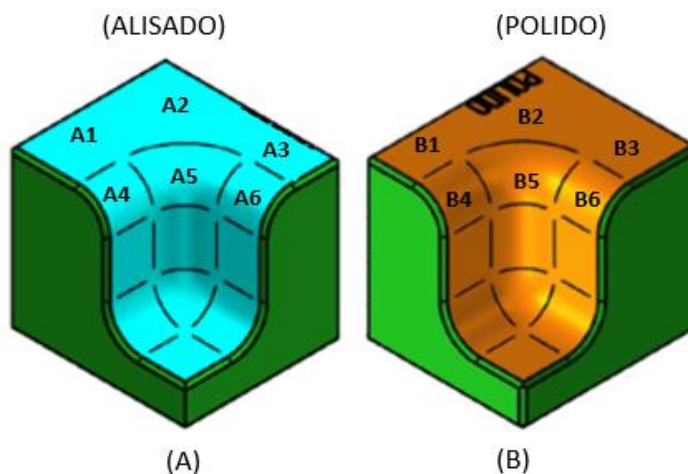
Parâmetro	Unid.	Média	D.Padrão
Sa	µm	1,088	0,014

Fonte: O autor (2021).

A verificação das rugosidades da ferramenta, foi realizada através de corpos de prova modelos de acabamento (Figura 32), os quais foram usinados sob os mesmos parâmetros de usinagem e confecção dos aços da ferramenta, de modo que um modelo recebeu acabamento usinado, e outro modelo foi usinado e polido.

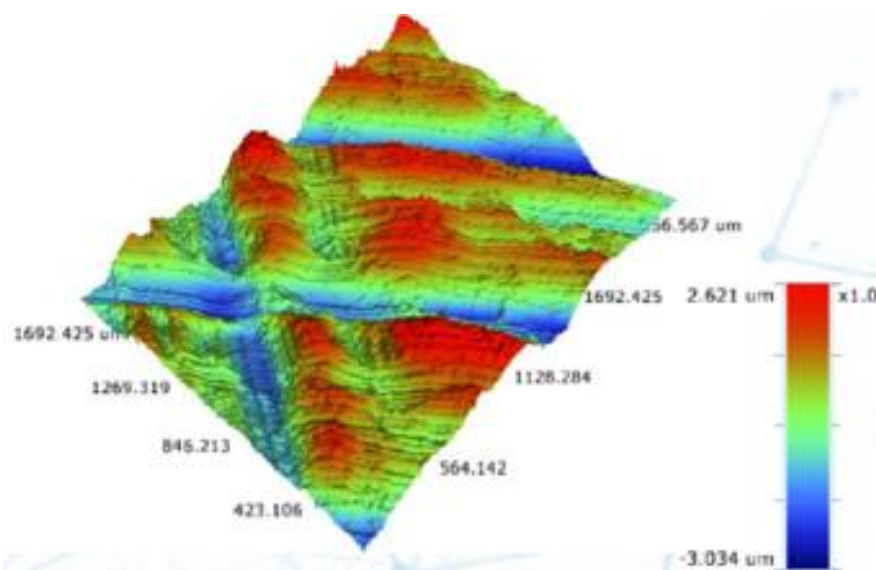
Os modelos foram submetidos a verificação nas faces planas e também nos raios para, em seguida, gerar o modelo tribológico correspondente usando a média estatística. A Figura 32 apresenta os pontos verificados da ferramenta usinada, e a Figura 33 representa a topografia da face no ponto A1 da ferramenta apenas usinada.

Figura 32 – Representação dos pontos verificados nos modelos, onde: (A) representa os pontos de verificação no modelo usinado, e (B) o modelo polido.



Fonte: O autor (2021).

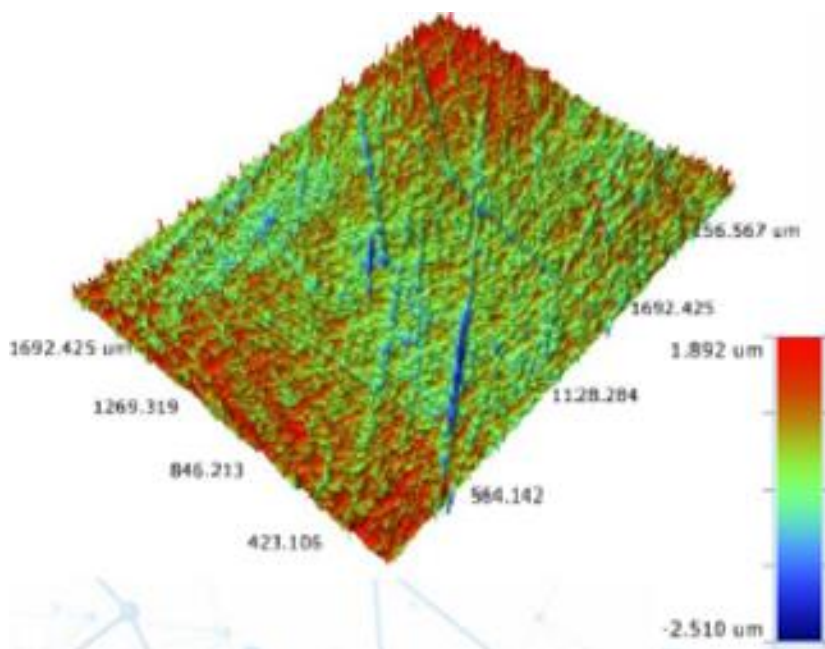
Figura 33 – Topografia da ferramenta usinada no ponto A1.



Fonte: O autor (2021).

O procedimento descrito acima foi repetido para verificação do modelo polido. A Figura 34 representa a topografia das faces da ferramenta polida. A Tabela 6 demonstra os valores encontrados, dos quais foi utilizado o parâmetro Sa para geração dos modelos tribológicos.

Figura 34 – Topografia da ferramenta polida no ponto B1



Fonte: O autor (2021).

Tabela 6 – Resultados das rugosidades da ferramenta

Parâmetro	Unid.	Modelo Usinado				Modelo Polido			
		Média Faces Planas	Desvio Padrão	Média Faces Raios	Desvio Padrão	Média Faces Planas	Desvio Padrão	Média Faces Raios	Desvio Padrão
Sa	μm	0,753	0,079	0,744	0,032	0,233	0,017	0,357	0,04
<b>Sa adotado</b>	<b>μm</b>	<b>0,75</b>				<b>0,4 (mínimo software)</b>			

Fonte: O autor (2021).

A topografia do corpo de prova usinado, exposta na Figura 33, é composta por uma grande quantidade de sulcos, provocados pelo movimento de rotação e avanço da ferramenta de usinagem. O padrão e tamanho destes sulcos variam de acordo com os parâmetros e estratégias empregadas na fabricação. Em geral, quanto maior for o avanço da ferramenta, maiores serão os sulcos, assim como baixas rotações da ferramenta também contribuem para geração destes sulcos indesejados. Desta forma, a combinação ideal é o sincronismo entre altas rotações da ferramenta e baixas velocidades de avanço. Contudo, as medições das

rugosidades da ferramenta apontaram que a estratégia e parâmetros de usinagem utilizados promoveram um bom nível de acabamento, atingindo o valor de  $S_a$  máximo abaixo de  $0,8 \mu\text{m}$ .

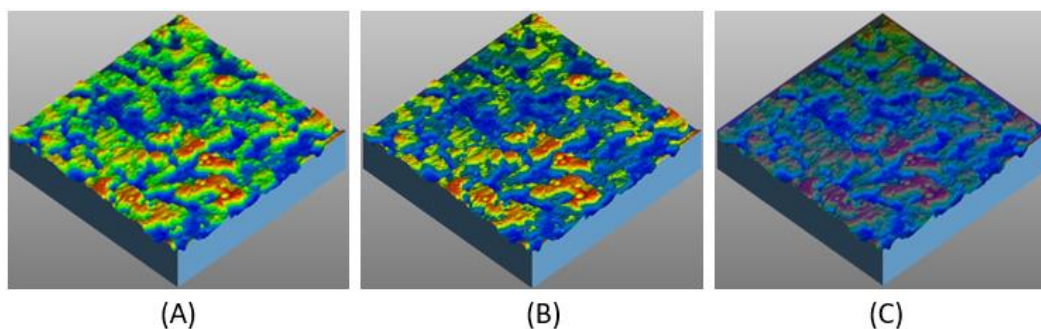
Conseqüentemente, as rugosidades das faces polidas também ficaram em níveis muito baixos, sendo encontrado  $S_a$  máximo próximo a  $0,3 \mu\text{m}$ , pois, como mostra a Figura 34, os sulcos foram suavizados com a operação de polimento.

Para este estudo, considerou-se a a rugosidade da ferramenta usinada  $S_a = 0,75 \mu\text{m}$ ; e para a ferramenta polida  $S_a = 0,4 \mu\text{m}$ , pois este é o valor mínimo aceito pelo software Triboform®.

### 4.3 Modelos Tribológicos

Os modelos tribológicos foram gerados pelo software Triboform® a partir das medições das rugosidades, tanto da chapa quanto da ferramenta, juntamente com a adição do óleo lubrificante, de acordo com as variações propostas na Tabela 2. A Figura 35 ilustra a topografia da chapa combinada com o óleo lubrificante, adicionado em três níveis:  $0,5\text{g}/\text{m}^2$ ;  $1\text{g}/\text{m}^2$  e  $3\text{g}/\text{m}^2$ .

Figura 35 – Topografia da chapa lubrificada: (A) representa  $0,5\text{g}/\text{m}^2$  de lubrificante; (B) representa  $1,0\text{g}/\text{m}^2$  de lubrificante e (C) representa  $3,0\text{g}/\text{m}^2$  de lubrificante



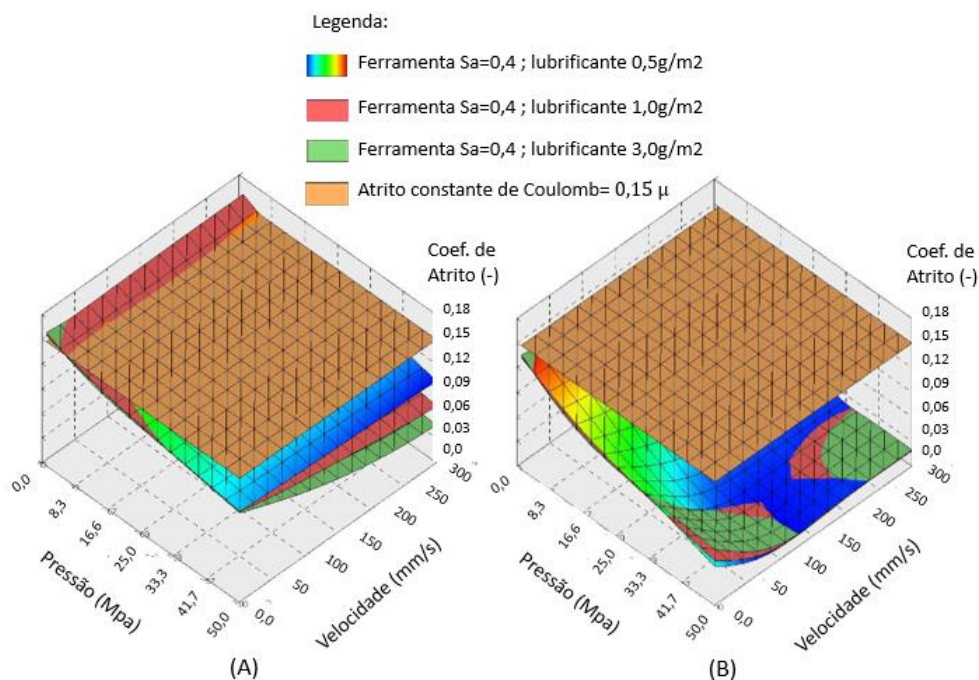
Fonte: O autor (2021).

O aspecto visual da lubrificação sobre a chapa apresentado na Figura 35 (A) demonstra que os picos mais altos da superfície ainda estão proeminentes e não foram totalmente cobertos. Com esta condição de lubrificação, inevitavelmente haverá contato físico entre as faces da chapa e da ferramenta durante a estampagem, resultando assim, no modelo de lubrificação chamado de “contorno”. Da mesma maneira, porém com os sulcos mais preenchidos, a condição apresentada na Figura 35 (B) tende a resultar no modelo de

lubrificação “mista”. Contudo, a condição apresentada na Figura 35 (C), com a quantidade de 3,0g/m<sup>2</sup>, cobriu todos os vales e picos da superfície, indicando um modelo de lubrificação “hidrodinâmica”, sendo que a adição maior de lubrificante neste caso seria configurado como desperdício. Porém, devido à grande pressão de contato durante a operação de estampagem, ainda haverá contato físico entre as partes.

As interações entre a chapa e os componentes da ferramenta durante processo de estampagem, geram modelos tribológicos únicos, os quais sofrem alterações de acordo com os níveis de deformações, sendo o coeficiente de atrito um parâmetro importante deste modelo. O software Triboform<sup>®</sup> permite a plotagem da modelagem do coeficiente de atrito, por exemplo, em função da pressão de contato e da velocidade de conformação. A Figura 36 ilustra o modelo de atrito para a condição de lubrificação variando entre 0,5; 1,0 e 3,0 g/m<sup>2</sup> sobre a rugosidade da ferramenta Sa= 0,4μm, e chapa Sa= 1,088μm. Para efeito de comparação, foi adicionado o modelo de atrito constante de Coulomb 0,15μ.

Figura 36 – Modelos tribológicos com rugosidade da ferramenta Sa= 0,4μm, onde: (A) Atrito deslizante sem deformação plástica e (B) = Com deformação plástica da chapa



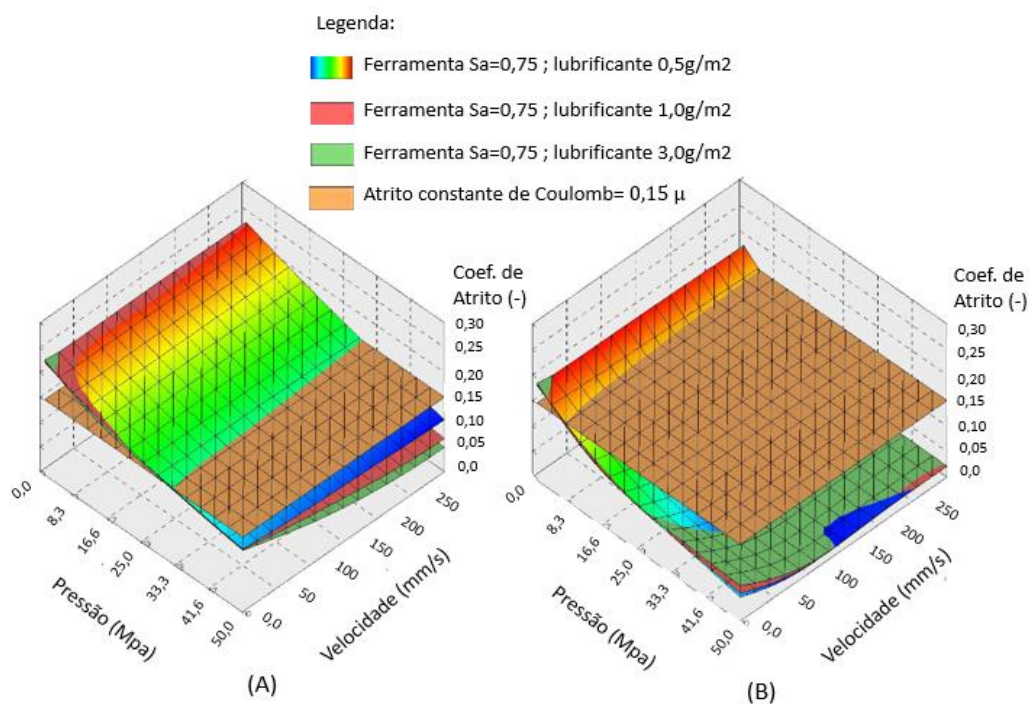
Fonte: O autor (2021).

O modelo tribológico, cujo a ferramenta apresenta Sa= 0,4μm, demonstra que para esta condição superficial do conjunto chapa/ferramenta, em atrito sem deformação plástica, a magnitude da variação dos coeficientes ficou entre 0,03 e 0,16 considerando 3,0 g/m<sup>2</sup> de

lubrificante; 0,06 e 0,16 considerando 1,0 g/m<sup>2</sup> de lubrificante e 0,09 e 0,16 considerando 0,5 g/m<sup>2</sup> de lubrificante. Todavia, ao considerar o sistema com deformação plástica, os modelos tendem a se comportarem de maneira parecida, de modo que a velocidade e a quantidade de lubrificante não provocam alterações significativas, e sim, a pressão de contato.

A Figura 37 demonstra os modelos de atrito sob as mesmas condições de lubrificação supracitadas, porem sobre a rugosidade da ferramenta  $S_a = 0,75\mu\text{m}$ . Neste sistema, a magnitude da variação foi entre 0,05 e 0,25 considerando 3,0 g/m<sup>2</sup> de lubrificante; 0,07 e 0,25 considerando 1,0 g/m<sup>2</sup> de lubrificante e 0,1 e 0,25 considerando 0,5 g/m<sup>2</sup> de lubrificante. Essa variação pode ser considerada bastante expressiva em se tratando de estampagem, como citado por Härter (2019) quando também encontrou valores similares em seus experimentos.

Figura 37 – Modelos tribológicos com rugosidade da ferramenta  $S_a = 0,75\mu\text{m}$ , onde: (A): Atrito deslizante sem deformação plástica e (B): Com deformação plástica da chapa



Fonte: O autor (2021).

Observa-se que a rugosidade da ferramenta têm grande influência sobre os coeficientes de atrito e, quanto maior a rugosidade, maior também é a amplitude da variação deste coeficiente, sendo este um fator negativo para a estampagem.

A pressão de contato também exerce influência sobre o coeficiente de atrito, sendo que, de maneira geral, o coeficiente de atrito tende a diminuir com o aumento da pressão de contato. Sigvant et al. (2019) e Hol et al. (2017), além de Härter (2019) também encontraram esta condição, que pode ser explicada pelo provável achatamento das asperezas da chapa, em contato com o aço mais duro da ferramenta.

Quanto a quantidade de lubrificante, não altera de maneira significativa o coeficiente de atrito na condição de deformação plástica. Isso também pode ser explicado pela atuação da pressão de contato, a qual acaba expelindo a parte excedente do lubrificante, e aprisionando-o nos bolsões das superfícies, como relatam Azushima e Kudo (1995), de modo que na estampagem convencional, dificilmente ocorre a chamada lubrificação hidrodinâmica.

Já a velocidade de conformação não impactou de maneira significativa os modelos estudados.

Para efeito de comparação com os modelos gerados em software, foi apresentado o modelo de atrito de Coulomb, o qual é geralmente usado em simulações na indústria. Este modelo, segundo Sigvant et al., (2018), representa a interação entre a chapa e a ferramenta, acrescida de um pequeno filme de lubrificante, e considera o coeficiente de atrito constante igual a 0,15 do início ao fim da operação de estampagem. Porém, na realidade, os modelos tribológicos são bastante dependentes da pressão de contato, do tipo e quantidade de lubrificante usado no processo, sendo descrito com mais precisão no modelo calculado pelo software.

#### **4.4 Resultados das Simulações**

A partir da caracterização do material e geração do modelo tribológico, foram realizadas as simulações de estampagem utilizando o software Autoform<sup>®</sup>, seguindo o planejamento proposto na Tabela 2. Todos os resultados foram compilados na Tabela 7. Para um melhor entendimento dos parâmetros de saída das simulações, pode-se visualizar a Figura 22 no capítulo 3.3.

Os maiores afinamentos da espessura, conforme observa-se na Figura 38, foram encontrados nas regiões das paredes laterais inferiores, tanto nas simulações com modelos tribológicos, quanto com o uso do atrito constante de Coulomb. Esta região da peça tem características de embutimento profundo, e sofre tensões desde o início, e principalmente no início da conformação. Isso acontece porque, ao contrário das regiões próximas das bordas



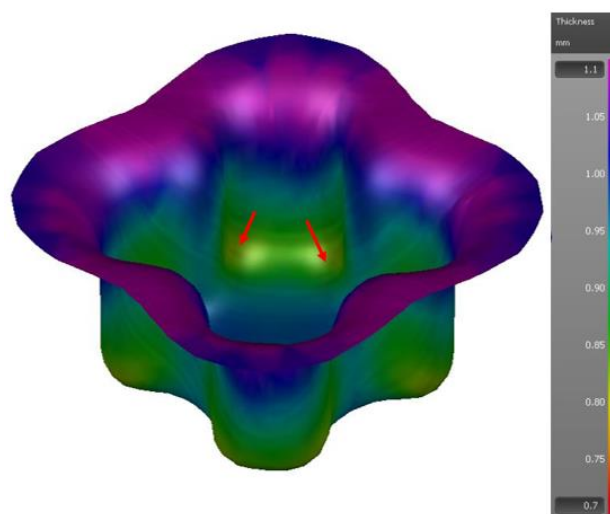
onde o material pode escoar com maior facilidade, as regiões conformadas mais ao centro da geometria são mais solicitadas pela atuação da força do punção, de modo que o fluxo do material para dentro da matriz acaba exigindo mais da espessura.

Tabela 7 – Resultados das simulações

CP	Variáveis			Resultados Autoform				
	Sa (Chapa) [ $\mu\text{m}$ ]	Sa (Ferramenta) [ $\mu\text{m}$ ]	Quantidade lubrificante ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	Dimensão da aba A (mm)	Dimensão da aba B (mm)	Média das Abas (mm)	Espessura mín. (mm)	Redução da espessura (%)
1	1,08	0,4	0,5	76,7	76,09	76,395	0,842	15,8
2		0,4	1	76,56	75,99	76,275	0,844	15,6
3		0,4	3	76,52	75,91	76,215	0,846	15,4
4		0,75	0,5	76,88	76,23	76,555	0,84	16
5		0,75	1	76,65	76,1	76,375	0,842	15,8
6		0,75	3	76,57	76,01	76,29	0,844	15,6
Coeficiente de atrito de Coulomb								
7	0,15			77,11	76,47	76,79	0,833	16,7

Fonte: O autor (2021).

Figura 38 – Representação do afinamento de espessura



Fonte: O autor (2021).

#### 4.4.1 Resultados da Redução da Espessura do Produto

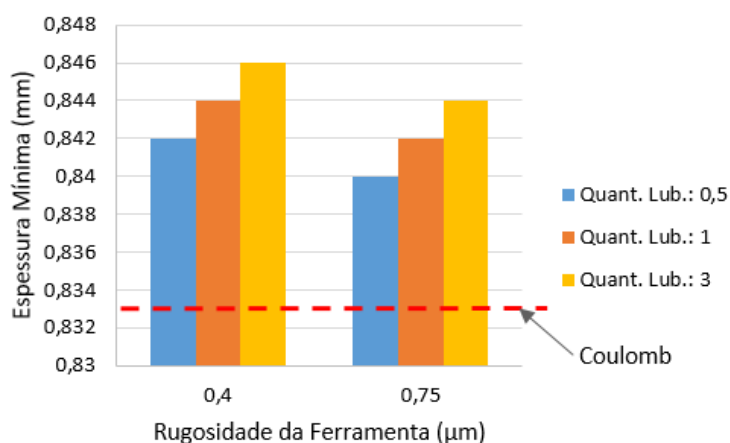
Os resultados das medições das espessuras mínimas estão ilustrados nos gráficos das Figuras 39 e 40.

Para a condição da ferramenta polida, com rugosidade  $Sa = 0,4 \mu\text{m}$ , a espessura variou entre: 0,842 mm com 0,5  $\text{g}/\text{m}^2$  de lubrificante, o que representa um afinamento de 15,8%;

0,844 mm com 1,0 g/m<sup>2</sup> de lubrificante, sendo 15,6% de afinamento e e; 0,846 mm com 3,0 g/m<sup>2</sup> de lubrificante, ou seja, 15,4 % de afinamento da espessura.

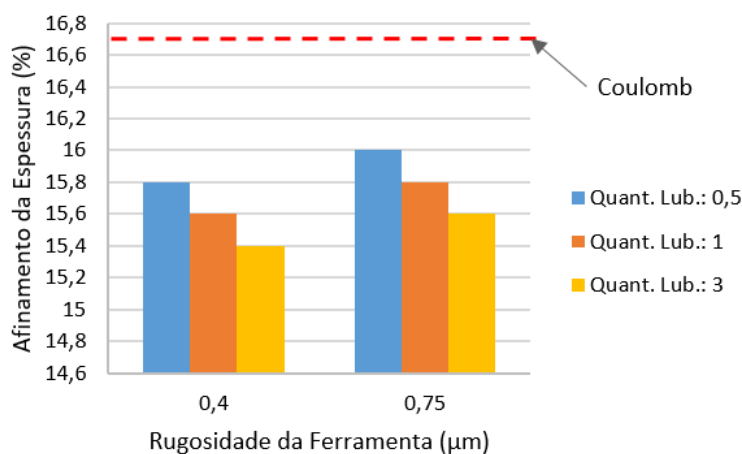
Com relação à ferramenta usinada sem polimento, com a rugosidade  $S_a = 0,75 \mu\text{m}$ , a menor espessura encontrada foi de 0,840 mm, ou redução de 16% da espessura com a utilização de 0,5 g/m<sup>2</sup> de lubrificante. Com o aumento da quantidade de lubrificante para 1,0 g/m<sup>2</sup>, houve redução de 15,8%, chegando a 0,842 mm de espessura. Utilizando 3,0 g/m<sup>2</sup> de lubrificante, a menor espessura encontrada foi de 0,844 mm, ou 15,6% de afinamento.

Figura 39 – Resultados da espessura mínima



Fonte: O autor (2021).

Figura 40 – Percentagem da redução de espessura



Fonte: O autor (2021).

Os resultados confirmaram a já esperada tendência à maior redução da espessura nas peças conformadas sobre a superfície mais rugosa da ferramenta, e quantidade menor de óleo lubrificante. Isso acontece devido ao atrito ser maior nesta condição, de modo que o

fluxo da chapa fica dificultado e, por consequência, exige mais da espessura da peça para completar a forma.

Do mesmo modo, a superfície mais lisa e mais lubrificada facilita o fluxo de material, proporcionando maior preservação da espessura.

Outrossim, as medições mostraram que as variáveis: rugosidade e quantidade de lubrificante, exerceram influência parecida no quesito redução de espessura, possuindo praticamente a mesma significância.

Para comparação, o modelo de atrito constante de Coulomb resultou na espessura de 0,833 mm, sendo a redução na ordem de 16,7%, ou seja, a espessura ficou 1,7% menor em comparação com a condição de menor atrito simulada; e 0,7% menor em relação à pior condição de atrito simulada.

Esta diferença pode ser explicada pelo modelo tribológico usado no software de simulação. Este modelo considera o atrito dependente da pressão de contato, e varia durante a estampagem de acordo com os resultados apresentados no capítulo 4.3, enquanto que, o modelo de Coulomb é constante. Desta forma, ao considerar o percurso total da conformação, o coeficiente de atrito de Coulomb fica maior em relação aos modelos calculados, resultando em uma maior restrição de fluxo da chapa e, por consequência, maior redução de espessura.

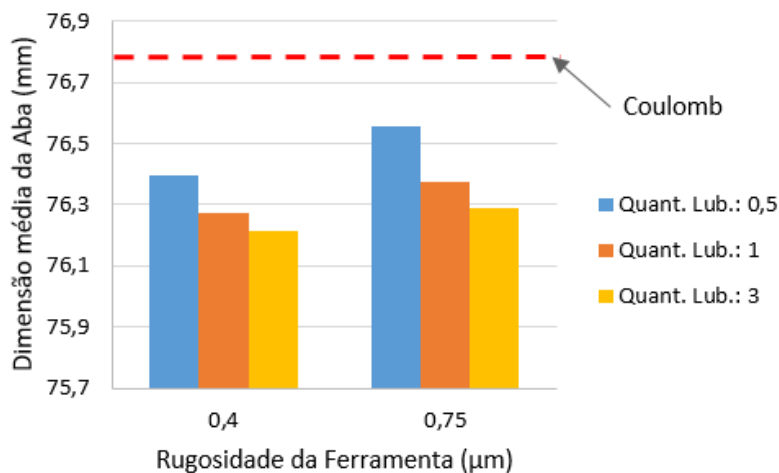
#### **4.4.2 Resultados das dimensões do Produto**

O fluxo da chapa sobre a ferramenta é um parâmetro interessante para verificação das influências das variáveis aqui propostas, isso porque a condição tribológica pode significar maior ou menor restrição de fluxo de material para dentro da matriz durante a conformação, sendo essa característica relevante para garantia das dimensões externas do produto estampado. A avaliação proposta por este trabalho, é verificar as dimensões das abas da peça, comparando com os diferentes modelos tribológicos. Todos os resultados foram plotados no gráfico da Figura 41.

Primeiramente, foi observada uma variação da aba A para a aba B, em torno de 0,6mm, inclusive considerando o atrito constante de Coulomb. Isto acontece em função da característica anisotrópica do material da chapa, que apresenta índices diferentes para cada direção em relação ao sentido de laminação. Os valores ensaiados em 0°, 45° e 90° foram demonstrados na Tabela 4, de modo que as medições das abas podem variar dependendo do

sentido de laminação da chapa. Desta forma, foram coletadas as dimensões médias para as comparações.

Figura 41 – Resultados da dimensão das abas.



Fonte: O autor (2021).

De modo geral, a quantidade de lubrificante exerceu maior influência nas peças conformadas com a ferramenta de rugosidade  $S_a = 0,75 \mu\text{m}$ . Nesta condição de superfície, juntamente com a quantidade de  $0,5 \text{ g/m}^2$  de lubrificante, foi encontrada a maior média de aba, em torno de  $76,55 \text{ mm}$ , inclusive com variação média maior com relação às outras quantidades de lubrificante. Este fato também ocorreu com a rugosidade  $S_a = 0,4 \mu\text{m}$ , sendo observado descolamento das medidas médias sob a menor quantidade de lubrificante.

A menor média de aba foi encontrada com a rugosidade  $S_a = 0,4 \mu\text{m}$  e  $3 \text{ g/m}^2$  de lubrificante, e ficou em torno de  $76,21 \text{ mm}$ .

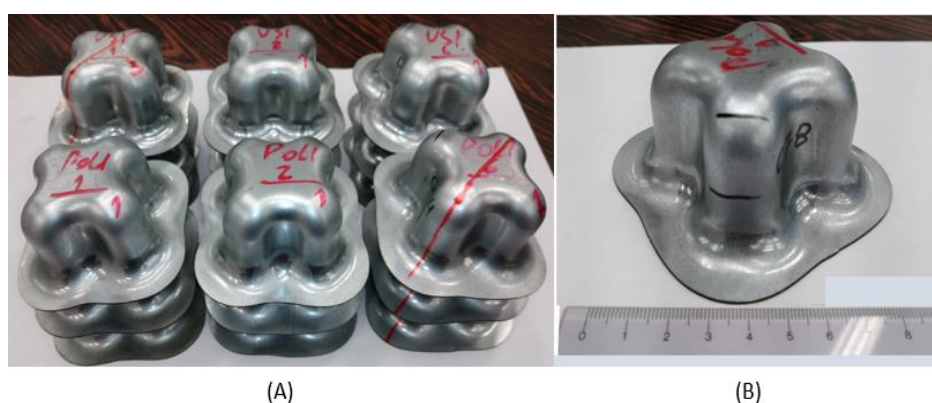
As abas mais alongadas, foram encontradas com a combinação de face mais rugosa com menor quantidade de lubrificante. Isso já era esperado devido a ser a condição com maior atrito dos experimentos, ou seja, maior restrição ao fluxo de material, dificultando a corrida do blank, forçando o alongamento do material.

Todavia, o modelo de atrito constante de Coulomb apresentou ainda maior restrição de fluxo, pois a medição mostrou medidas maiores das abas ( $76,79 \text{ mm}$ ), fato que justifica também a maior redução de espessura, verificada no capítulo anterior. Isso pode ser explicado pelo fato de que o modelo de atrito de Coulomb é constante, enquanto que o modelo de atrito proposto pelo software Tribiform® considera a diminuição do coeficiente conforme a pressão de contato aumenta, logo, durante o processo de conformação, o software considera atrito menor em comparação ao modelo de Coulomb.

#### 4.5 Resultados dos Testes Experimentais

Foram produzidas um total de 18 peças, sendo 6 configurações de experimentos com 3 repetições. As peças conformadas e identificadas, que podem ser visualizadas na Figura 42, foram encaminhadas ao laboratório dimensional da empresa patrocinadora para efetuar as medições. A Tabela 8 contempla as medições médias dos experimentos. A Tabela completa pode ser visualizada no Apêndice A.

Figura 42 – Resultados testes práticos onde: (A) todas as 18 peças conformadas e (B) visualização de uma peça.



Fonte: O autor (2021).

Tabela 8 – Resultados dos experimentos práticos

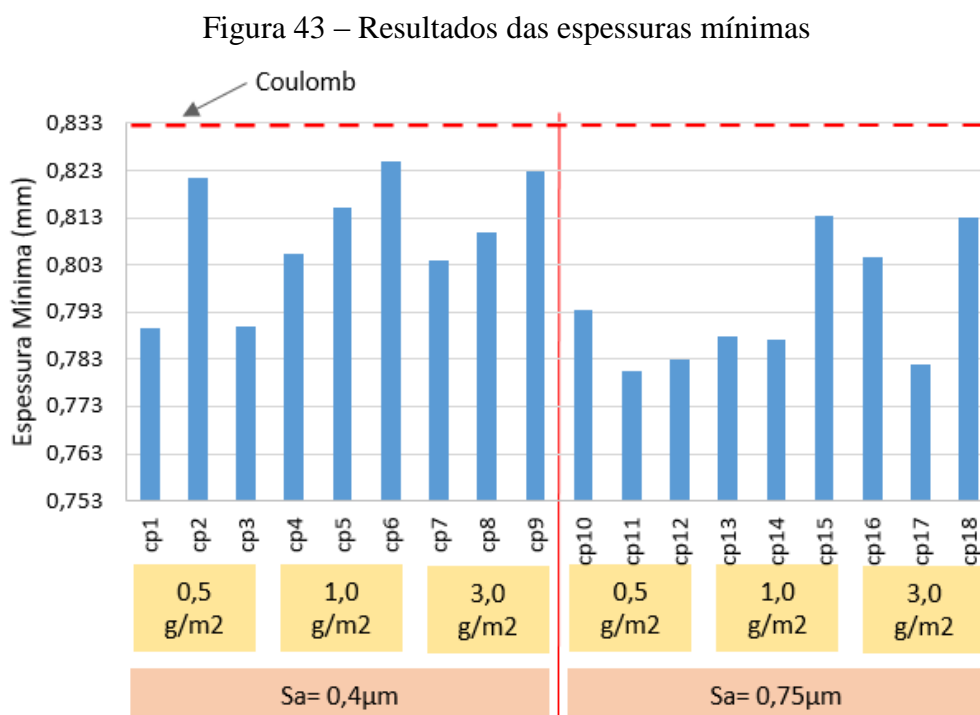
CP	Variáveis		Resultados Testes Práticos					
	Sa (μm)	Quant. lub. (g/m <sup>2</sup> )	Média Abas (mm)	Desvio Padrão Abas	Média Espessura mínima (mm)	Desvio Padrão Espessura	Redução da Espessura (%)	Média Redução Espessura (%)
cp1	0,4	0,5	77,47	0,346	0,790	0,018	21,05	19,97
cp2			78,14		0,822		17,85	
cp3			77,65		0,790		21	
cp4		1	78,34	0,233	0,806	0,010	19,45	18,48
cp5			78,12		0,815		18,5	
cp6			77,87		0,825		17,5	
cp7		3	77,13	0,312	0,804	0,010	19,6	18,77
cp8			76,71		0,810		19	
cp9			76,52		0,823		17,7	
cp10	0,75	0,5	79,11	0,106	0,794	0,007	20,65	21,43
cp11			79,13		0,781		21,95	
cp12			78,94		0,783		21,7	
cp13		1	79,68	0,650	0,788	0,015	21,2	20,38
cp14			79,03		0,787		21,3	
cp15			78,38		0,814		18,65	
cp16		3	77,79	0,164	0,805	0,016	19,55	20,02
cp17			77,47		0,782		21,8	
cp18			77,69		0,813		18,7	
Coef.de atrito de Coulomb			76,79		0,833		16,7	

Fonte: O autor (2021).

#### 4.5.1 Resultados da Redução da Espessura do Produto

Todas as medições foram compiladas na Tabela 8. A Figura 43 demonstra o gráfico das medições das espessuras e a Figura 44 demonstra a percentagem de afinamento dos testes realizados. Os experimentos foram realizados com três repetições para cada condição:

- C.P.'s 1,2, 3: Rugosidade  $0,4 \mu\text{m}$  +  $0,5 \text{ g/m}^2$  de lubrificante;
- C.P.'s 4,5, 6: Rugosidade  $0,4 \mu\text{m}$  +  $1,0 \text{ g/m}^2$  de lubrificante;
- C.P.'s 7,8, 9: Rugosidade  $0,4 \mu\text{m}$  +  $3,0 \text{ g/m}^2$  de lubrificante;
- C.P.'s 10,11, 12: Rugosidade  $0,75 \mu\text{m}$  +  $0,5 \text{ g/m}^2$  de lubrificante;
- C.P.'s 13,14, 15: Rugosidade  $0,75 \mu\text{m}$  +  $1,0 \text{ g/m}^2$  de lubrificante;
- C.P.'s 16,17, 18: Rugosidade  $0,75 \mu\text{m}$  +  $3,0 \text{ g/m}^2$  de lubrificante.



Fonte: O autor (2021).

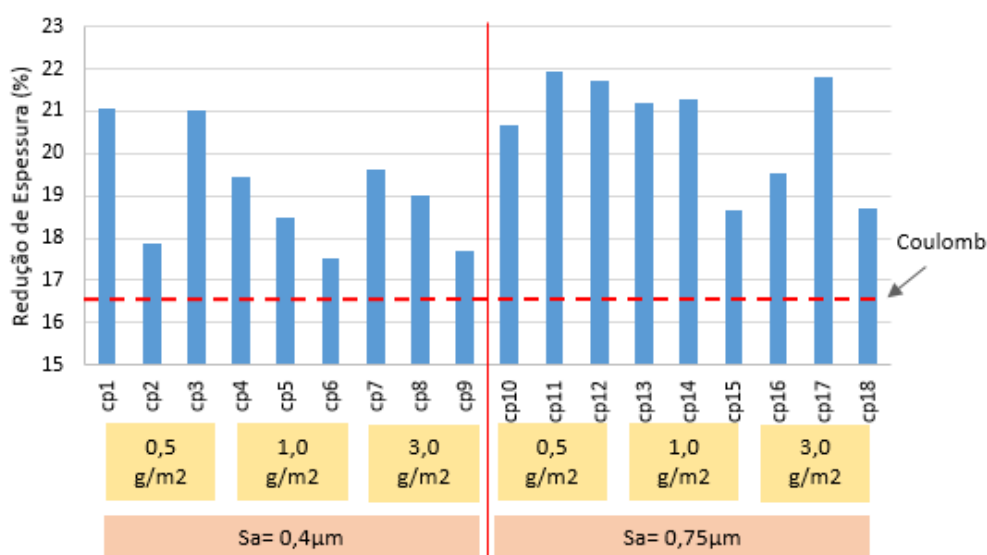
A superfície da ferramenta polida cuja rugosidade  $S_a=0,4 \mu\text{m}$ , proporcionou no geral taxas menores de redução de espessura e, embora aparentasse algumas extrapolações, os desvios padrões calculados ficaram em níveis baixos, sendo o coeficiente de variação CV menor que 5%.

Com esta rugosidade combinada a 0,5g/m<sup>2</sup> de lubrificante (C.P.'s 1, 2 e 3), obteve-se a espessura mínima média de 0,8mm, ou 20% de redução.

Já com a quantidade de 1g/m<sup>2</sup> (C.P.'s 4, 5 e 6), a espessura média mínima foi de 0,815mm, com 18,48% de redução. Enquanto que com 3g/m<sup>2</sup>, (C.P.'s 7, 8 e 9), houve redução média de 18,77 %, resultando 0,812mm de espessura média.

Por outro lado, com a ferramenta usinada Sa=0,75µm, a condição de 0,5 g/m<sup>2</sup> de lubrificação (C.P.'s 10, 11 e 12), também resultou em um maior afinamento, na média, 0,786mm, ou 21,43%. Com esta rugosidade, a espessura foi mais preservada com o uso de 3 g/m<sup>2</sup> de lubrificante, cujo afinamento médio encontrado foi de 20,02% na medição dos C.P.'s 16, 17 e 18.

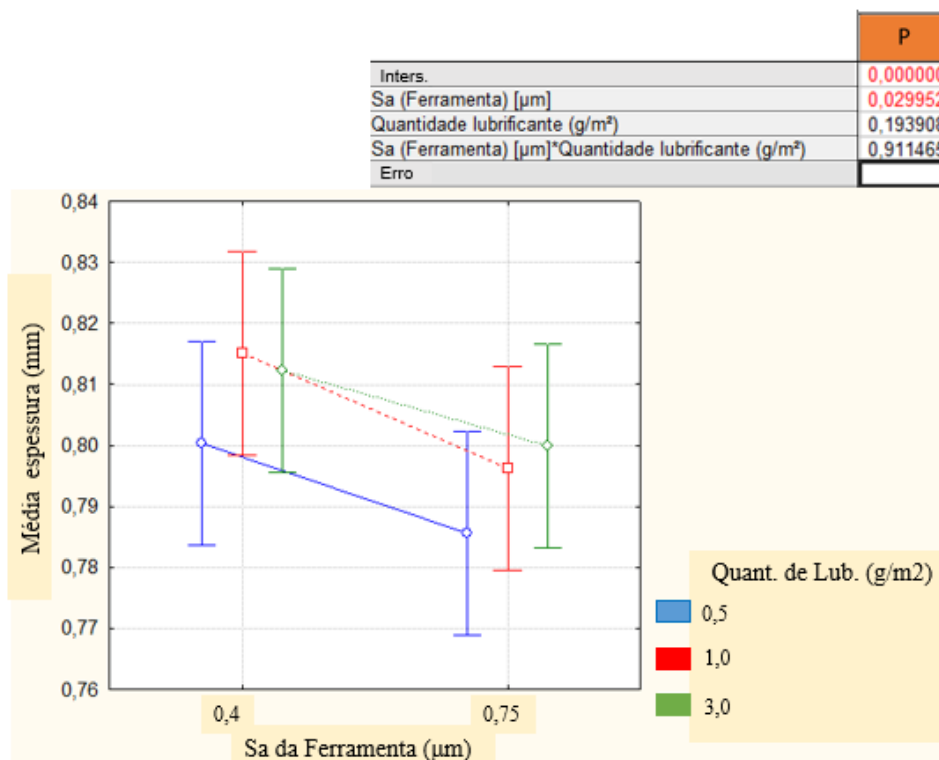
Figura 44 – Resultados da percentagem de redução de espessura



Fonte: O autor (2021).

A análise estatística dos experimentos com intervalo de confiança de 95%, demonstrou que a variável rugosidade exerceu influência significativa dentre todos os resultados, ( $p=0,0299$ ). Contudo, as quantidades de lubrificante testadas não exerceram influência significativa ( $p=0,1939$ ), podendo considerar-se estatisticamente iguais. Também não houve interação significativa entre as duas variáveis propostas neste quesito de redução de espessura ( $p=0,9114$ ). O gráfico da Figura 45 demonstra o comportamento dos experimentos estatisticamente.

Figura 45 – Resultados estatísticos da média das espessuras com intervalo de confiança de 95%



Fonte: O autor (2021).

O fato de o óleo lubrificante não ter exercido influência significativa nos experimentos de redução de espessura, pode ser explicado, novamente, pela atuação da pressão de contato, que acaba expelindo a parte excedente da interface, de modo que a parcela que permanece é apenas a necessária para cobrir os vales da topologia das superfícies, logo, aumentar a quantidade de lubrificante não representa garantia de preservação de espessura.

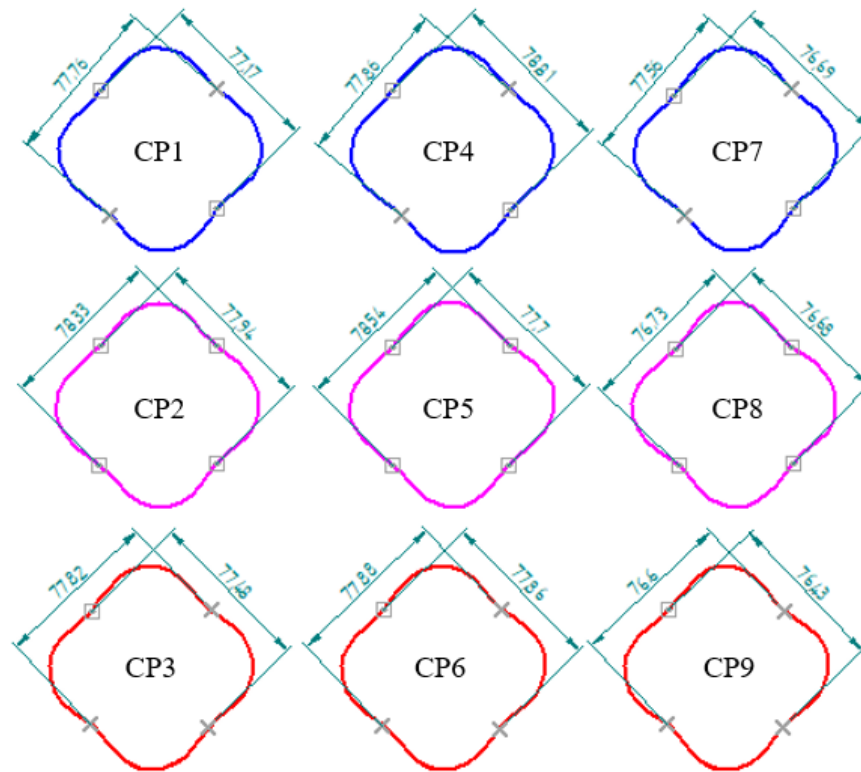
Desta forma, levando em consideração o custo benefício, a condição tribológica ideal para preservação de espessura, é a ferramenta polida  $Sa = 0,4 \mu\text{m}$ , juntamente com adição de  $0,5 \text{ g}/\text{m}^2$  de lubrificante pois, esta condição de lubrificação é estatisticamente igual às condições mais lubrificadas.

#### 4.5.2 Resultados das dimensões das Abas do Produto

As malhas foram geradas sobre os pontos de medição, e podem ser visualizadas nas figuras 46 e 47. As medidas foram compiladas na Tabela 8, e plotadas no gráfico da Figura 48.

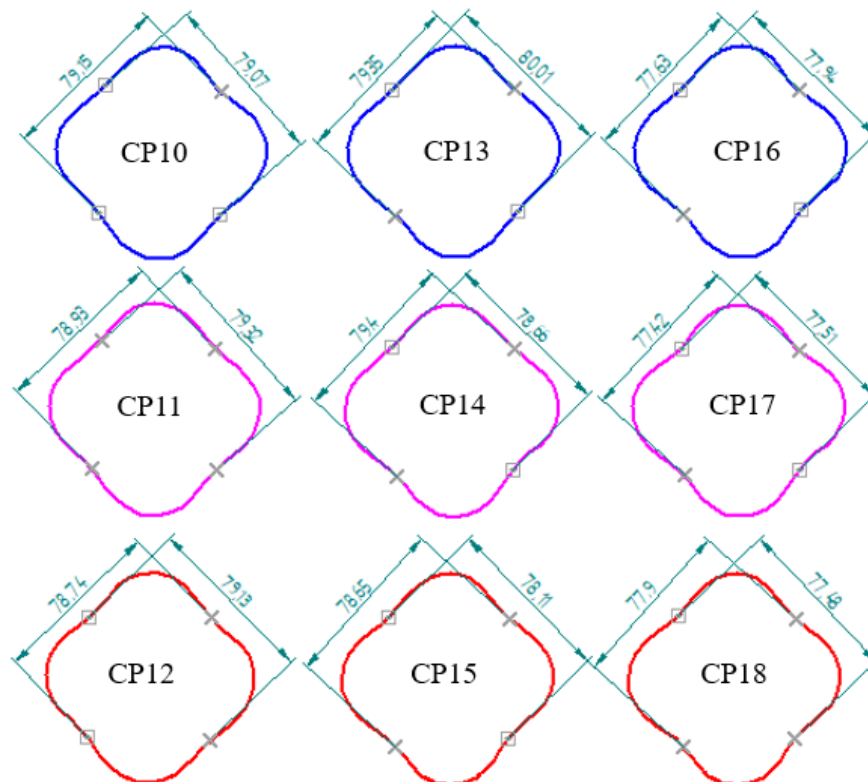


Figura 46 – Malhas geradas para medição das abas estampadas na ferramenta  $Sa=0,4\mu\text{m}$



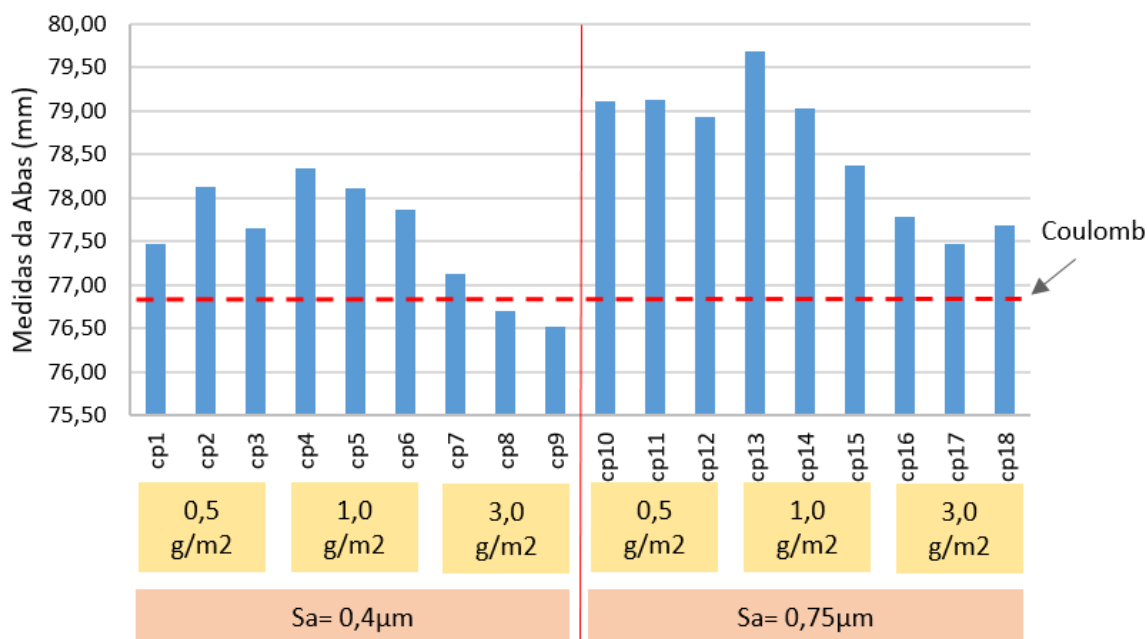
Fonte: O autor (2021).

Figura 47 – Malha gerada para medição das abas estampadas na ferramenta  $Sa=0,75\mu\text{m}$



Fonte: O autor (2021).

Figura 48 – Resultados das medições das abas



Fonte: O autor (2021).

Os resultados das medições das abas confirmaram a tendência apresentada nas simulações, onde a ferramenta com menor rugosidade possibilitou menor restrição ao fluxo, proporcionando maior corrida do blank e por consequência abas menores. Neste contexto, as menores abas foram encontradas com a ferramenta  $Sa=0,4\ \mu\text{m}$  e  $3\ \text{g/m}^2$  de lubrificante (C.P.'s 7, 8 e 9), com média de  $76,78\ \text{mm}$ . As maiores abas com esta rugosidade foram encontradas com  $1\ \text{g/m}^2$  de lubrificante,  $78,11\ \text{mm}$  (C.P.'s 4, 5 e 6).

As medições das abas referentes à ferramenta  $Sa=0,75\ \mu\text{m}$ , seguiram a mesma tendência do modelo anterior, sendo as menores abas encontradas na configuração de  $3\ \text{g/m}^2$  de lubrificante (C.P.'s 16, 17 e 18), ou seja, média da aba com  $77,65\ \text{mm}$ . Já com as quantidades de  $0,5$  e  $1\ \text{g/m}^2$  de lubrificante, (C.P.'s 10 até 15), os resultados foram muito semelhantes entre si, apresentando maiores restrições e por consequência, abas maiores.

A análise estatística com intervalo de confiança de 95%, demonstra que tanto a variável rugosidade da ferramenta  $Sa$  ( $p= 0,00004$ ), quanto a variável quantidade de lubrificante ( $p= 0,00003$ ) exerceram influência significativa nos resultados dimensionais das abas.

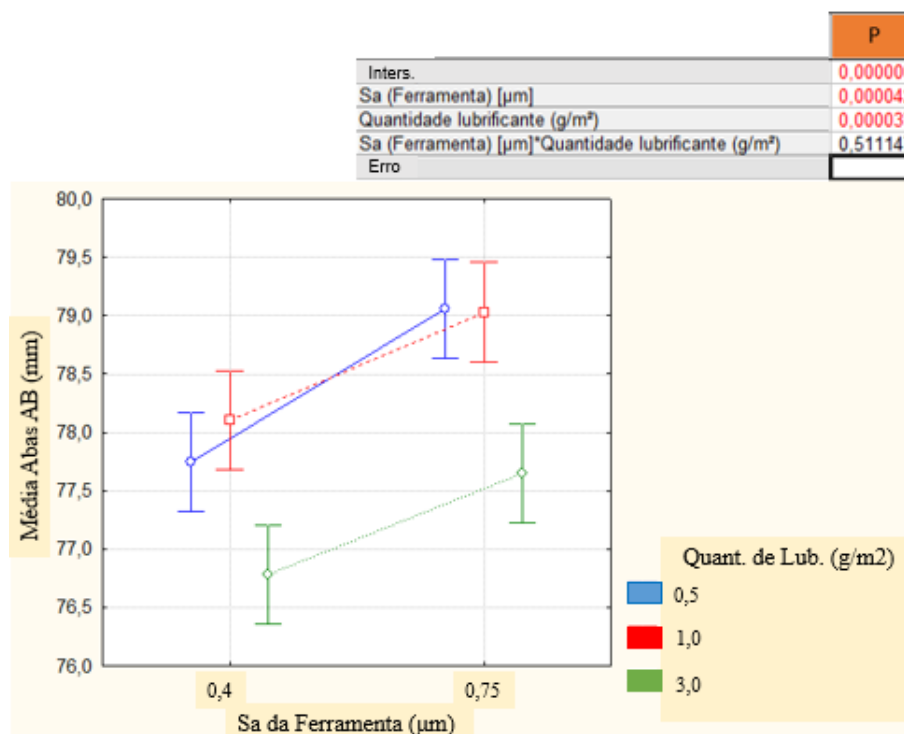
Como pode ser visualizado no gráfico da Figura 49, quantidade de  $3\ \text{g/m}^2$  de lubrificante resultou em abas bem menores em comparação com as demais condições de lubrificação, principalmente sobre a rugosidade  $0,4\ \mu\text{m}$ . Além disso, as quantidades de  $0,5$  e

1g/m<sup>2</sup> podem ser consideradas estatisticamente iguais sobre qualquer nível de rugosidade e, com a mesma influência nas medidas das abas.

Não foi observado interação significativa entre as variáveis testadas.

Desta maneira, a condição tribológica recomendada para o melhor fluxo da chapa é a rugosidade 0,4μm combinado com 3g/m<sup>2</sup> de lubrificante.

Figura 49 – Resultados estatísticos da média das Abas com intervalo de confiança de 95%



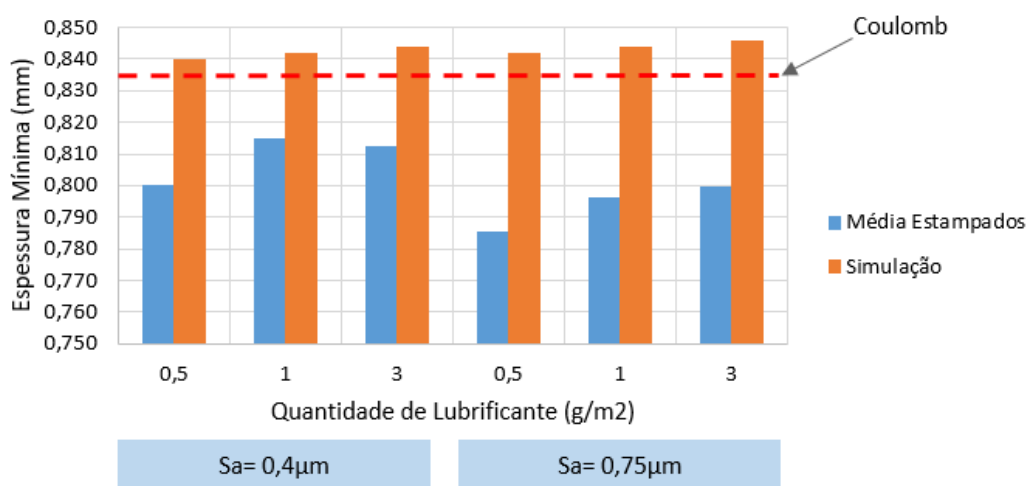
Fonte: O autor (2021).

Existe uma relação entre o afinamento da espessura com a medida final da peça conformada, representada pela corrida da chapa sobre a ferramenta. Esta afirmação se justifica pela conservação de volume de material, ou seja, mantendo a altura da peça padrão para todos os experimentos, as diferenças encontradas nas dimensões das abas externas indicam as diferenças nas restrições de fluxo do material. Como consequência da conservação de volume, peças com abas maiores sofreram maiores alongamentos, com redução da espessura média.

#### 4.6 Comparações das Simulações Versus Estampados.

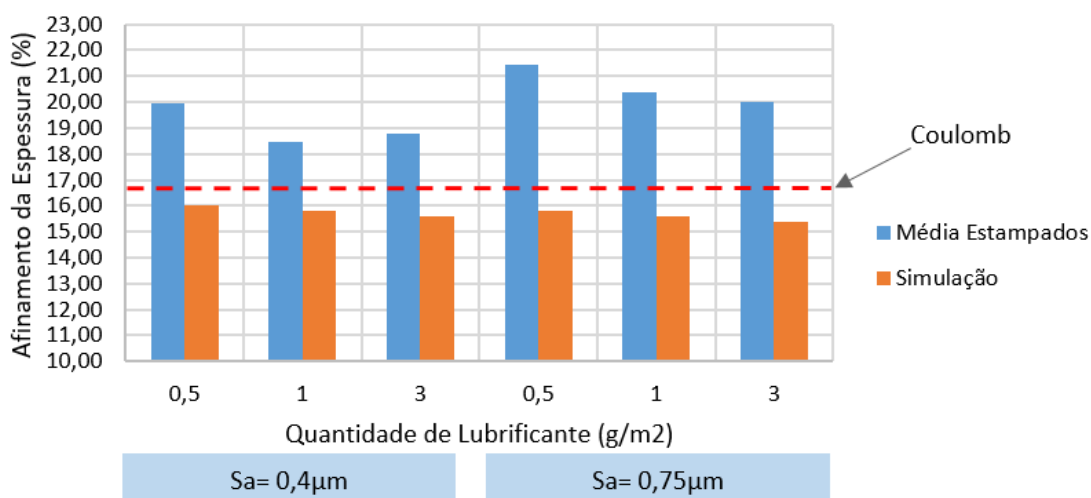
Os resultados das simulações e as médias dos experimentos práticos foram plotados nos gráficos a seguir para efeitos de comparações. Os gráficos das Figuras 50 e 51 ilustram as medições das espessuras e percentagens de afinamento respectivamente, enquanto a Figura 52 ilustra a medição das abas.

Figura 50 – Medições médias das espessuras mínimas das simulações e dos testes práticos.



Fonte: O autor (2021).

Figura 51 – Percentagem média de redução das espessuras nas simulações e nos testes práticos

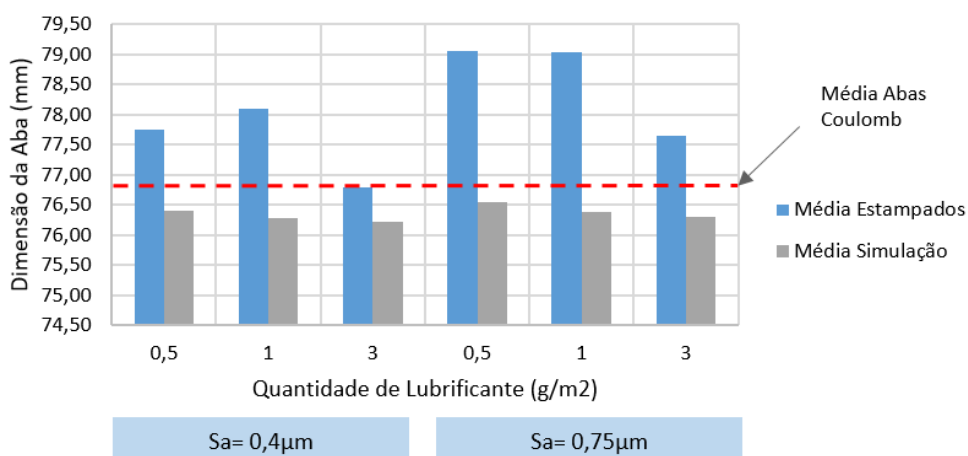


Fonte: O autor (2021).

A diferença média entre as espessuras encontradas nas simulações, considerando os modelos tribológicos calculados, versus peças estampadas, ficou em torno de 4%, sendo que, invariavelmente, as peças estampadas apresentaram afinamentos maiores e mais díspares entre si do que as simulações. Já a diferença encontrada considerando o modelo de atrito de Coulomb ficou em torno de 3%.

As maiores diferenças encontradas foram sobre a ferramenta  $Sa = 0,75 \mu\text{m}$ , sendo a maior diferença na combinação com  $0,5 \text{g/m}^2$  de lubrificação. Neste caso a simulação apontou para 16% de redução de espessura, porém, na prática foi encontrada 21,4% de redução, ou seja, diferença de 5,4%. Todavia, apesar das diferenças de espessura nas comparações entre estampados e simulações, percebe-se que houve certo alinhamento de tendência entre os resultados, ao considerar os diferentes modelos tribológicos.

Figura 52 – Medições médias das abas das simulações e dos testes práticos.



Fonte: O autor (2021).

As dimensões das abas também apresentaram diferenças entre as simulações e os testes experimentais. Na média geral, as abas dos estampados ficaram em torno de 78 mm enquanto que as simulações utilizando os modelos tribológicos ficaram em torno de 76,4 mm, ou seja, uma diferença em torno de 2%. Para comparação, a simulação com o modelo de atrito constante de Coulomb foi de 76,8 mm na média das abas.

A diferença encontrada e relatada entre simulações e experimentos no quesito redução de espessura, se for verificada apenas em termos percentuais que foi em torno de 4%, poderia ser considerada muito elevada. Porém, em valores absolutos, esta variação representa 0,04mm, e que pode carregar erros de medição. Desta forma, os modelos simulados não

podem ser invalidados apenas nesta avaliação de espessura, e sim, agregando a medição da corrida do Blank, representada pela medição das abas externas;

As abas externas, por sua vez, tiveram variação média em torno de 2% na comparação com as simulações. Porém, foi verificada uma extrapolação desta diferença para em torno de 4%, na estampagem sobre a superfície mais rugosa e com menos lubrificante. Esta condição se justifica, pois, o fluxo de material fica muito instável e comprometido nestas condições de elevado atrito.

Quanto ao modelo de atrito de Coulomb, apesar de ser um coeficiente constante, apresentou resultados nas simulações que se aproximaram dos resultados experimentais. Este resultado está alinhando com Härter (2019), quando lembra que este é o modelo de atrito mais utilizado nas simulações de processos de estampagem, mas em desconformidade com Valberg (2010), que afirma que o modelo de atrito de Coulomb somente é adequado para descrever o atrito entre dois corpos a baixas pressões, portanto, não na estampagem.

Com base em todos os resultados, observa-se que a variação da espessura depende mais das rugosidades da ferramenta, e não tanto da quantidade de lubrificação.

Já as dimensões das abas, respondem de maneira mais sensível às diferentes condições tribológicas, de modo que em peças com requisitos dimensionais críticos, há a necessidade de se identificar as regiões de maior fluxo de material na ferramenta e, nestas regiões, aplicar acabamento polido e garantir boa lubrificação.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou estudo sobre as condições tribológicas no processo de conformação de chapas e suas relações com o produto estampado, através de simulação numérica e testes experimentais. Verificou-se que:

- Os modelos tribológicos gerados no software Triboform demonstraram que: a rugosidade da ferramenta tem grande influência sobre o coeficiente de atrito; a pressão de contato também exerce influência sobre o coeficiente de atrito, sendo que, de maneira geral, o coeficiente de atrito tende a diminuir com o aumento da pressão de contato; quanto a quantidade de lubrificante, não altera de maneira significativa o coeficiente de atrito na condição de deformação plástica; a velocidade de conformação não impacta de maneira significativa nenhum dos os modelos estudados.
- As simulações da estampagem no software Autoform, demonstraram que as menores espessuras encontram-se nas regiões das paredes laterais inferiores da peça, tanto nas simulações com modelos tribológicos, quanto com o uso do atrito constante de Coulomb. Os experimentos práticos comprovaram este resultado;
- A espessura mais preservada nas simulações (0,846mm), foi obtida com a rugosidade  $S_a = 0,4 \mu\text{m}$  e com 3,0 g/m<sup>2</sup> de lubrificante. Já com a rugosidade  $S_a = 0,75 \mu\text{m}$  combinada a 0,5 g/m<sup>2</sup> de lubrificante, foi encontrada a menor espessura (0,840 mm). Contudo, a simulação com o modelo de atrito de Coulomb ficou em 0,833 mm, ou seja, adotando o modelo de coulomb, obteve-se a espessura mais fina.
- A menor média de aba foi encontrada com a rugosidade  $S_a = 0,4 \mu\text{m}$  e 3 g/m<sup>2</sup> de lubrificante, e ficou em torno de 76,21 mm. Já a maior média (76,55 mm), foi encontrada sob a rugosidade  $S_a = 0,75 \mu\text{m}$  e 0,5 g/m<sup>2</sup> de lubrificante. A simulação com o modelo de Coulomb apontou para média de 76,79 mm, ou seja, abas maiores devido à maior restrição de fluxo do material;
- Quanto aos experimentos práticos, no quesito redução de espessura, a combinação entre rugosidade 0,4  $\mu\text{m}$  + 1,0 g/m<sup>2</sup> de lubrificante (C.P.'s 4, 5 e 6), proporcionou melhor preservação da espessura, onde a média mínima foi de 0,815mm, com 18,48% de redução. Contudo, a análise estatística demonstrou que as quantidades de lubrificante testadas não exerceram influência significativa no intervalo de confiança de 95%. Desta forma, levando-se em consideração o custo benefício, a condição

tribológica ideal para preservação de espessura, é a ferramenta polida  $S_a = 0,4 \mu\text{m}$ , juntamente com adição de  $0,5 \text{ g/m}^2$  de lubrificante pois, esta condição de lubrificação é estatisticamente igual às condições mais lubrificadas;

- Já no quesito dimensão das abas, a análise estatística demonstra que tanto a variável rugosidade da ferramenta  $S_a$ , quanto a variável quantidade de lubrificante, exerceram influência significativa nos resultados dimensionais. A quantidade de  $3 \text{ g/m}^2$  de lubrificante resultou em abas bem menores em comparação com as demais condições de lubrificação, principalmente sobre a rugosidade  $0,4 \mu\text{m}$  (C.P.'s 7, 8 e 9), com média de  $76,78 \text{ mm}$ . Além disso, as quantidades de  $0,5$  e  $1 \text{ g/m}^2$  podem ser consideradas estatisticamente iguais sobre qualquer nível de rugosidade e, com a mesma influência nas medidas das abas. Não foi observado interação significativa entre as variáveis testadas;
- Quanto às comparações entre simulação e experimentos práticos no quesito redução de espessura, verificou-se que as peças estampadas apresentaram redução de espessura em torno de 4% maiores em relação às simulações com os modelos tribológicos calculados e, em torno de 3% maiores em relação ao modelo de atrito convencional de Coulomb;
- Já as comparações com as medições das abas, por sua vez, tiveram variação média em torno de 2% na comparação com as simulações;
- Em relação ao modelo de atrito convencional de Coulomb, se justifica na relação custo benefício se comparado aos modelos tribológicos gerados em software pois, estes requerem medições de rugosidades a nível 3D por exemplo, o que pode onerar muito a análise.
- Além disso, os processos e estratégias atuais de usinagens nas ferramentarias, geralmente não garantem uniformidade de acabamento em todas as faces das superfícies, tornando difícil a reprodução precisa dos parâmetros simulados em ambiente fabril.



## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Os seguintes tópicos são sugeridos para a continuidade do trabalho apresentado nesta dissertação:

- Realizar estudo a fim de calibrar os modelos tribológicos para que estes se aproximem mais dos resultados práticos alcançados em ambiente fabril;
- Realizar estudos com diferentes acabamentos superficiais da chapa, como decapada, jateada, galvanizada dentre outras;
- Realizar estudos com diferentes materiais da ferramenta, como por exemplo D2, GGG70L, aços sinterizados, além dos revestimentos como VN, TiCrN, TiAlN, dentre outros;
- Realizar estudos com diferentes geometrias de peças, com diferentes solicitações e comportamentos;
- Verificar os impactos dos diferentes modelos tribológicos em relação ao retorno elástico dos estampados.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALTAN T. et al., **Conformação de metais: Fundamentos e aplicações**. São Paulo: EESC-USP, 1999. 350 p.
- [2] ALVES FILHO, AVELINO. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 6ª Ed., 2013.
- [3] AZUSHIMA, A.; KUDO, H. **Direct Observation of Contact Behaviour to Interpret the Pressure Dependence of the Coefficient of Friction in Sheet Metal Forming**. **CIRP Annals**, v. 44, n. 1, 1995. ISSN 0007-8506. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607623099> >
- [4] BAE GH, SONG JH, HUH H., KIM SH, PARK SH. **Simulation based prediction modelo f the draw-bead restraining force and its aplication to sheet metal forming process**. *J Mater Prosses Technol*. 2007.
- [5] BANNISTER, K. E. **Lubrication for Industry**. first edit ed.1996.
- [6] BOWDEN F.P. e Tabor D. **Friction and Lubrication of Solids**, Oxford Claredon Press, Oxford, 1964.
- [7] BLAU, P. J. **Friction Science and Tecnology: From Concepts to Aplications**, 2009.
- [8] BRESCIANI FILHO, E. et al. **Conformação plástica dos metais**. Ed da Unicamp, 1997.
- [9] CALLISTER, W. D., **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2007.
- [10] CARLEER B. D.; **Finite element analysis of deep drawing; PhD-Thesis, University of Twente, The Netherlands; March 1997**.
- [11] DAVIM, J. P. **Tribology for Engineers: A Practical Guide**. Cambridge, 2011.

- [12] DIETER G.E., **Atrito e lubrificação**. Metalúrgica mecânica, v.2, cap. 15.7, 1981.
- [13] DIN 4760, **Form Deviations: Concepts, Classification System**. Deutsches Institut Fur Normung, 1982-06.
- [14] DIN-8580 – **“Fertigungsverfahren”**, Beuth Verlag, Berlim, 1985.
- [15] DIN 8582. **Manufacturing processes forming – Classification, Subdivision, terms and Definitions.**
- [16] DIN 8584. **Manufacturing processes forming under combination of tensile and compressive conditions – Part 3: Deep drawing; Classification, Subdivision, terms and Definitions.**
- [17] DIN 8585. **Manufacturing processes forming under tensile conditions – Part 1: General; Classification, Subdivision, terms and Definitions.**
- [18] DIN 8586. **Manufacturing processes forming by bending – Classification, Subdivision, terms and Definitions.**
- [19] DIN 8587. **Manufacturing processes forming under sheering conditions – Classification, Subdivision, terms and Definitions.**
- [20] FERRARINI, J. L. **Caracterização de materiais para o processo de Estampagem**. Porto Alegre, 2004.
- [21] FILHO, ETTORE BRESCIANNI. et al **Conformação plástica dos metais /5 ed. –** Campinas. SP: Editora da UNICAMP, 1997.
- [22] FOLLE, L.F. **Estudo do coeficiente de atrito para processos de estampagem**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012.
- [23] GARCIA A., SPIM J. A., SANTOS C. A., **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos LTC, 2000.

[24] HAMROCK, B. J.; SCHMID, S. R.; JACOBSON, B. O. **Fundamentals of Fluid Film Lubrication**. CRC Press, 2004.

[25] HÄRTER, I. I., **Simulação numérica do processo de estampagem considerando diferentes modelos tribológicos**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Rio Grande, 2019.

[26] HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. 2a ed. Belo Horizonte: Fundação Chistiano Ottoni, 1993.

[27] HOL J., CID ALFARO M.V., DE ROOIJ M.B., MEINDERS V. T., **Advanced friction modeling for sheet metal forming**. Wear, 2012.

[28] HOL J., MEINDERS V. T., DE ROOIJ M.B., VAN DEN BOOGAARD A. H., **Multi-scale Friction Modeling for Sheet Metal Forming: The Boundary Lubrification Regime**. Tribology International, 2015.

[29] HOL J.H., WIEBENGA J. H., HÖRNING M., DIETRICH F., DANE C. **Advanced friction simulation of standardized friction tests: a numerical and experimental demonstrator**. Numisheet, 734, 032092, 2016.

[30] HOL J., WIEBENGA J. H., CARLEER B., **Friction and lubrication modelling in sheet metal forming: Influence of lubrication amount. Tool roughness and sheet coating on product quality**. Journal of Physics, Conf. Series 896, 2017.

[31] HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN 0081009518.

[32] JOST, R., **Lubrification** (Tribology) Education and Research, Department of Education and Science, HMSO, London, 1966. P.4.

- [33] LENARD J. G., **Metal Forming Science and Practice, A State-of-the-Art Volume in Honour of Professor J.A. Schey's 89 th Birthday**, Department of Mechanical Engineering University of Waterloo, Ontario, Canada, Ed. Elsevier, 2002.
- [34] KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 6 ed. Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1176p., 2010.
- [35] KARUPANNASAMY D.K., HOL, J., ROOIJ, M.B., MEINDERS, T., SCHIPPER, D.J. **A friction model for loading and reloading effects in deep drawing process**. *Wear*, v.318, p.27-39, 2014.
- [36] LUDWIK, P., **Elemente der Technologischen Mechanik**. Springer-Verlag, 1990.
- [28] **Mecânica**. Disponível em: <<http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo8/Capitulo1-parte2.pdf>> Acesso em 10 jun. 2020.
- [37] MORO, Norberto. **Conformação Mecânica I – Generalidades, Laminação e Forjamento**. 2007. Disponível em: [http://norbertocefetsc.pro.br/elm/wp-content/uploads/2014/09/pfb\\_conformacaoi.pdf](http://norbertocefetsc.pro.br/elm/wp-content/uploads/2014/09/pfb_conformacaoi.pdf) - Acesso em Maio de 2020.
- [38] MORO, Norberto. **Conformação Mecânica II - Extrusão, Trefilação e Conformação de Chapas**. 2006. Disponível em: [http://norbertocefetsc.pro.br/elm/wp-content/uploads/2014/09/pfb\\_conformacaoii.pdf](http://norbertocefetsc.pro.br/elm/wp-content/uploads/2014/09/pfb_conformacaoii.pdf) - Acesso em Junho de 2020.
- [39] NBR ISO 4287. **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2002.
- [40] NIELSEN, C.V., BAY, N., **Review of friction modeling in metal forming processes**. *Journal of materials processing*, 255, pp. 234-241, 2018.
- [41] PADMANABHAN, R., SUNG, J., LIM, H., OLIVEIRA, M.C., MENEZES, L.F., WAGONER, R.H. **Influence of draw restraining force on the springback in advanced high strength steels**. *Int. J Mater Form Suppl*. 2008.

- [42] POPOV, V. L. **Contact Mechanics and Friction**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53081-8>
- [43] ROCHA, O. F. L. **Conformação mecânica**. Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2012.
- [44] RODRIGUES, J.; MARTINS, P., **Tecnologia Mecânica – Tecnologia de deformação Plástica V.2: Fundamentos teóricos**. Lisboa: Escolar Editora, 2005.
- [45] SZAKALY, E. D.; LENARD, J. G. **The Effect of Process and Material Parameters on the Coefficient Of Friction in the Flat-Die Test**. Journal of Material Processing Technology, 2010.
- [46] SCHAEFFER, L., **Conformação mecânica**. Porto Alegre, Imprensa Livre Editora, 2004.
- [47] SCHAEFFER, L., **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre, Imprensa Livre Editora, 2005.
- [48] SCHEY, J. A. Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication, and Wear. **Journal of Applied Metalworking**, v. 3, n. 2, p. 173-173, January 01 1984. ISSN 0162-9700. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/BF02833697>>.
- [49] SCHULLER, **Metal Forming Handbook**, Springer-Verlant. Berlin Heidelberg, 1998.
- [50] SIGVANT M., PILTHAMMAR J., HOL J., WIEBENGA J.H., CHEZAN T., CARLEER B., VAN DEN BOOGAARD A. H., **Friction and lubrication modeling in sheet metal forming simulations of a Volvo XC90 inner door**, IOP Conference Series: Material Science and Engineering 159 (1), 2016.
- [51] SIGVANT M., PILTHAMMAR J., HOL J., WIEBENGA J.H., CHEZAN T., CARLEER B., VAN DEN BOOGAARD A. H. **Friction in sheet metal forming: Forming Simulations of Dies in Try-Out**. Numisheet, 1063, 012134, 2018.

[52] SOLIMAN A. A. A., S, M, S., **Numerical Simulation of Metal Sheel Plastic Deformation Processes through Finite Element Method**. PhD Thesis, Doctorate Programmes in Chemical, Materials and Productions Engineering, University Of Naples Federico II, 2006. Disponível em: <[http://www.fedoa.unina.it/2933/1/Al\\_Azraq\\_Ingegneria\\_Chimica\\_dei\\_Materiali\\_e\\_della\\_Produzione.pdf](http://www.fedoa.unina.it/2933/1/Al_Azraq_Ingegneria_Chimica_dei_Materiali_e_della_Produzione.pdf)>.

[53] SOUZA, J. H. C., **Apostila Processo de Conformação – Fundamentos da Conformabilidade**. Fevereiro de 2011.

[54] SOUZA, J. H. C, STÜRMER, L., HÄRTER, I.I., **Estudo sobre a eficiência de estiradores (quebra rugas) na aplicação da força de retenção para a estampagem de aços de alta resistência**. (16ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas – outubro, 2013).

[55] STOLARSKI, T. A., **Tribology in Machine Design**, Elsevier, Oxford, 1990.

[56] STOERTERAU, R. L., **Tribologia**. Apostila da disciplina de Tribologia da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2004. Disponível em <<https://azdoc.tips/download/tribologia-apostila-ufsc-5c13a9732fa0b?hash=6f2170847266710febdc1b9fd1fd281c>> Acesso em Setembro de 2020.

[57] TAVARES, A. F., **Atrito e mecanismos de desgaste em ferramentas revestidas para conformação a frio**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Rio Grande, 2019.

[58] VALBERG H. S., **Applied Metal Forming Including FEM Analysis**, Cambridge University Press, UK, 2010.

[59] XAVIER, H. S., **Análise por perfilometria e tomografia de coerência óptica da rugosidade superficial e do desgaste do esmalte bovino microabrasionado**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-graduação em Clínica Odontológica.– 2011.

[60] ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and Wear of Materials**. Tribology Series, v. 10, n. Ccc, p.1–560, 1987.

[61] <https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/roughness/surface/parameters.jsp>.

Acesso em Setembro de 2021.



## APÊNDICE A – Resultados experimentais

CP	Variáveis		Resultados Testes Práticos												
	Sa Ferramenta ( $\mu\text{m}$ )	Quant. lub. ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	Dimensão aba A (mm)	Dimensão aba B (mm)	Média Abas A+B (mm)	Desvio Padrão Abas	Média Abas (mm)	Esp. min. A (mm)	Esp. min. B (mm)	Média Esp. min. A+B (mm)	Desvio Padrão Esp.	Média Esp. min. (mm)	Redução da Esp. (%)	Média Redução Esp. (%)	
cp1	0,4	0,5	77,76	77,17	77,47			0,773	0,806	0,790		0,800	21,05		
cp2	0,4	0,5	78,33	77,94	78,14	0,346	77,75	0,839	0,804	0,822	0,018	0,800	17,85	19,97	
cp3	0,4	0,5	77,82	77,48	77,65			0,787	0,793	0,790			21		
cp4	0,4	1	78,81	77,86	78,34			0,799	0,812	0,806			19,45		
cp5	0,4	1	78,54	77,70	78,12	0,233	78,11	0,802	0,828	0,815	0,010	0,815	18,5	18,48	
cp6	0,4	1	77,88	77,86	77,87			0,831	0,819	0,825			17,5		
cp7	0,4	3	77,56	76,69	77,13			0,81	0,798	0,804			19,6		
cp8	0,4	3	76,73	76,68	76,71	0,312	76,78	0,831	0,789	0,810	0,010	0,812	19	18,77	
cp9	0,4	3	76,6	76,43	76,52			0,799	0,847	0,823			17,7		
cp10	0,75	0,5	79,15	79,07	79,11			0,806	0,781	0,794			20,65		
cp11	0,75	0,5	79,32	78,93	79,13	0,106	79,06	0,786	0,775	0,781	0,007	0,786	21,95	21,43	
cp12	0,75	0,5	79,13	78,74	78,94			0,793	0,773	0,783			21,7		
cp13	0,75	1	80,01	79,35	79,68			0,778	0,798	0,788			21,2		
cp14	0,75	1	79,4	78,66	79,03	0,650	79,03	0,758	0,816	0,787	0,015	0,796	21,3	20,38	
cp15	0,75	1	78,65	78,11	78,38			0,824	0,803	0,814			18,65		
cp16	0,75	3	77,94	77,63	77,79			0,826	0,783	0,805			19,55		
cp17	0,75	3	77,51	77,42	77,47	0,164	77,65	0,789	0,775	0,782	0,016	0,800	21,8	20,02	
cp18	0,75	3	77,9	77,48	77,69			0,798	0,828	0,813			18,7		
Coef. de atrito de Coulomb															
			77,11	76,47	76,79					0,833				16,7	

## APÊNDICE B – Propriedades Mecânicas da Chapa

### BRUNING TECNOMETAL LTDA ENSAIO DE TRAÇÃO

#### Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL20000 Célula: Trd 12 Extensômetro: Trd 6 Data: 13/11/2020 Hora: 08:01:25 Trabalho n° 23861

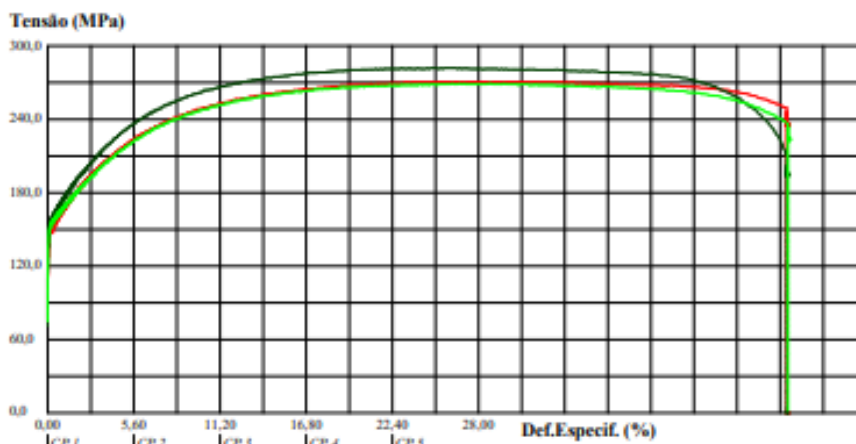
Programa: Tese versão 3.04

Método de Ensaio: TRAÇÃO(ANI) 20 TF COM EXTENSOMETRO

Ident. Amostras: DES.: 126047

Corpo de Prova	Força @Força Max. (kgf)	Tensão @Força Max. (MPa)	Tensão @Escoam. ES1 (MPa)	Def.Especif. @Ruptura (%)	Def.Especif. @fmáx (%)
CP 1	343	271	150	53,56	25,45
CP 2	357	282	159	49,34	23,05
CP 3	341	269	155	51,62	26,29
Número CPs	3	3	3	3	3
Média	347,0	274,2	154,9	51,51	24,93
Mediana	342,6	271,0	155,4	51,62	25,45
Desv.Padrão	9,018	6,890	4,604	2,112	1,680
Coef.Var.(%)	2,598	2,513	2,972	4,101	6,739
Mínimo	341,1	269,5	150,0	49,34	23,05
Máximo	357,4	282,1	159,2	53,56	26,29

Escoam. ES1 - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: 0,200 %



# BRUNING TECNOMETAL LTDA

Ensaio de Anisotropia

Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL20000 Célula: Trf 12 Extensômetro: Trf 6 Data: 13/11/2020 Hora: 11:45:24 Trabalho nº 23865

Programa: Teste versão 3.04

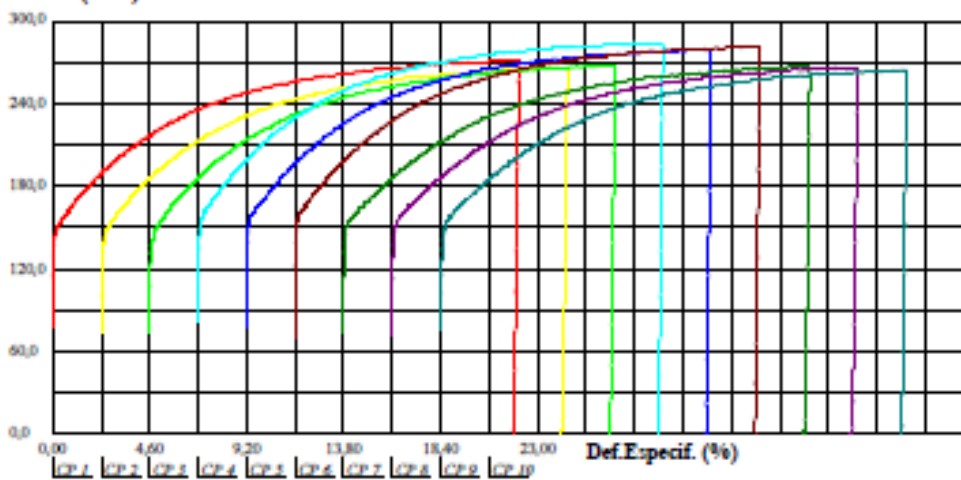
Método de Ensaio: ANISOTROPIA II 20TF COM EXTENSOMETRO

Ident. Amoeba: \*\*\*\*\* DES.: 126047

Corpo de Prova	Tensão Escoamento (MPa)	Espessura (mm)	Compr. Inicial (L0) (mm)	Largura Inicial (W0) (mm)	Compr. Final (Lf) (mm)	Largura Final (Wf) (mm)	Fator R	Ângulo
CP 1	149,96	0,989	50,00	12,516	60,93	10,900	2,3252	0
CP 2	146,78	0,991	50,00	12,521	60,94	10,888	2,4078	0
CP 3	146,46	0,994	50,00	12,514	60,91	10,871	2,4835	0
CP 4	159,22	0,991	50,00	12,537	60,91	11,055	1,7579	45
CP 5	158,25	0,989	50,00	12,551	60,90	11,063	1,7773	45
CP 6	160,13	0,991	50,00	12,562	60,90	11,073	1,7765	45
CP 7	154,02	0,987	50,00	12,538	60,94	10,831	2,8425	90
CP 8	154,33	0,986	50,00	12,537	60,92	10,839	2,8012	90
CP 9	152,46	0,985	50,00	12,532	60,95	10,826	2,8348	90
Número CPs	9	9	9	9	9	9	9	0
Média	153,5	0,9892	50,00	12,53	60,92	10,93	2,334	*
Desv.Padrão	5,105	0,002863	0,0000	0,01583	0,01719	0,1053	0,4621	*
Coef.Var.(%)	3,325	0,2894	0,0000	0,1263	0,02821	0,9638	19,80	*
Mínimo	146,5	0,9850	50,00	12,51	60,90	10,83	1,758	*
Máximo	160,1	0,9940	50,00	12,56	60,95	11,07	2,842	*

Fator de anisotropia médio a 0 graus (R0): 2,4055  
 Fator de anisotropia médio a 45 graus (R45): 1,7706  
 Fator de anisotropia médio a 90 graus (R90): 2,8261  
 Fator de anisotropia - média ponderada (Rm): 2,1932  
 Tendência a onheamento (Dr): 0,8453

Tensão (MPa)



Observação: Foi utilizado o método de medição por largura. Os corpos de prova foram tracionados até o limite de 22 %.

# BRUNING TECNOMETAL LTDA.

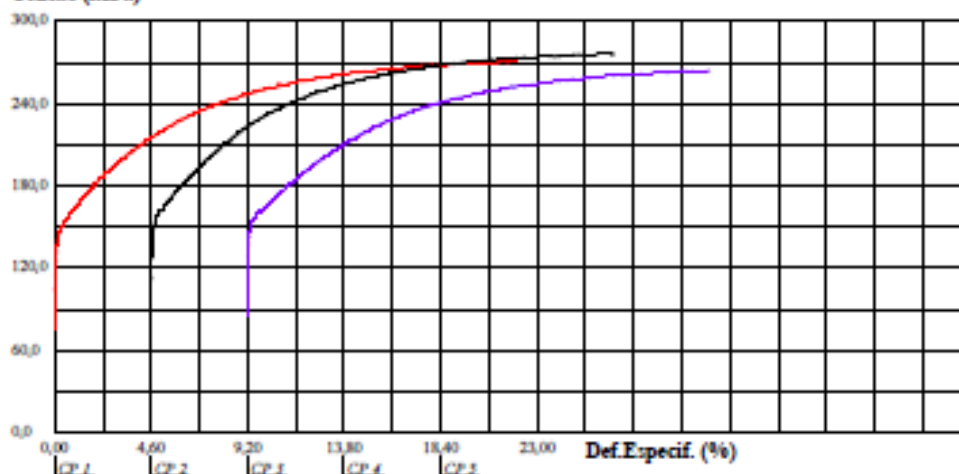
## Ensaio de Coeficiente de Encruamento

### Relatório de Ensaio

Máquina: Emic DL20000 Célula: Trf 12 Extensômetro: Trf 6 Data: 13/11/2020 Hora: 11:16:29 Trabalho nº 23864  
 Programa: Test versão 3.04 Método de Ensaio: COEF ENCRUAMENTO 20TF COM EXTENSOMETRO  
 Ident. Amostra: DES.: 126047

Corpo de Prova	Espessura E (mm)	Largura W (mm)	Coef. encr. n	Desv. padrão SD	Num. pontos N	Const. resist. K (MPa)
CP 1	0,991	12,505	0,2569	0,0004	330	502,25
CP 2	0,988	12,553	0,2494	0,0003	328	507,47
CP 3	0,988	12,543	0,2507	0,0005	326	482,87
Número CPs	3	3	3	3	3	3
Média	0,9890	12,53	0,2523	0,0003830	328,0	497,5
Desv. Padrão	0,001732	0,02532	0,004018	0,00008529	2,000	12,96
Coef. Var. (%)	0,1751	0,2021	1,592	22,27	0,6098	2,605
Mínimo	0,9880	12,51	0,2494	0,0003113	326,0	482,9
Máximo	0,9910	12,55	0,2569	0,0004773	330,0	507,5

#### Tensão (MPa)



Observação: Os valores do coef. de encruamento  $n$  foram obtidos no intervalo de 2% a 22% de alongamento. CP1= 0° CP2= 45° CP3= 90°



**UPF**  
UNIVERSIDADE  
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José  
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900  
(54) 3316 7000 - [www.upf.br](http://www.upf.br)