

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM CONSIDERANDO
DIFERENTES MODELOS TRIBOLÓGICOS

Ibson Ivan Härter

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Porto Alegre, outubro de 2019

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM CONSIDERANDO
DIFERENTES MODELOS TRIBOLÓGICOS

por

Ibson Ivan Härter
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Rogério José Marczak

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Rodrigo Rossi, PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira, PROMEC / UFRGS

Prof. Dra. Henara Lillian Costa Murray / FURG

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 30 de outubro de 2019

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Rogério José Marczak pelos ensinamentos, direcionamentos durante todo o período de estudos e por ter aceitado o desafio de orientar este trabalho;

Aos professores Dr. Ignacio Iturrioz, Dr. Jakson Manfredini Vassoler, Dra. Letícia Fleck Fadel Miguel, Dr. Bardo Ernst Josef Bodmann e à comissão de Pós Graduação que de alguma forma possibilitaram a participação em suas aulas;

À família pelo apoio, compreensão e incentivo em todos os momentos;

À empresa Bruning Tecnometal pelo suporte com recursos, disponibilidade de tempo e pela flexibilização da jornada de trabalho para possibilitar a realização dos estudos;

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e seu Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, bem como seu corpo docente.

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

Aos colegas e amigos que de alguma forma colaboraram na elaboração deste trabalho;

RESUMO

Simulações numéricas são muito utilizadas nos processos de conformação de chapas metálicas no segmento metal mecânico para detectar e resolver problemas de conformação mecânica. Entretanto, existem diversos aspectos importantes que são difíceis de analisar, como é o caso dos mecanismos de atrito. Este trabalho apresenta um estudo sobre as condições tribológicas no processo de conformação de chapas no âmbito da simulação numérica. O trabalho sugere um estudo de caso utilizando modelos tribológicos gerados considerando a rugosidade e o tipo de material da chapa e da ferramenta, com três níveis de lubrificação. Os modelos consideram o atrito dependente de pressão de contato, taxa e velocidade de deformação, quantidade e tipo de lubrificante. Ao mesmo tempo, uma simulação com o modelo de atrito de Coulomb foi realizada para comparação de resultados. Os resultados obtidos mostram a importância de utilizar modelos tribológicos mais realísticos para representar o atrito na conformação. A utilização de diferentes modelos na simulação mostrou variações em todos os parâmetros estudados, sendo que, a rugosidade da ferramenta foi o fator de maior impacto, onde quanto maior a rugosidade, maior a força de conformação. Pode-se observar também que a pressão de contato tem grande influência sobre o coeficiente de atrito, quanto maior a pressão, menor o coeficiente. Neste estudo de caso, os menores valores de coeficiente de atrito estão localizados nos raios de dobra da matriz.

Palavras chaves: Conformação; Tribologia; Rugosidade; Lubrificação; Simulação.

ABSTRACT

Numerical simulations are widely used in sheet metal forming processes in the metal-mechanical area to detect and solve forming problems. However, there are several important aspects that are difficult to analyze, such as friction mechanisms. This paper presents a study about the tribological conditions in sheet metal forming process in numerical simulation space. The work suggests a case study using tribological models generated considering the roughness and material type of the sheet metal and tooling, with three levels of lubrication. The models consider the friction dependent on contact pressure, velocity and strain rate, amount and type of lubricant. At the same time, a simulation with Coulomb's friction model was performed to compare results. The results show the importance of using more realistic tribological models to represent the friction in sheet metal forming. The use of different models in the simulation showed variations in all studied parameters, and the roughness of the tool was the factor of strongest impact, where the higher is the roughness, the higher the forming force. It can also be observed that the contact pressure has high influence on the coefficient of friction, the higher the pressure, the lower the coefficient. In this study, the lowest friction values are located in the die bending radius.

Keywords: Forming; Tribology; Roughness; Lubrification, Simulation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
1.2. OBJETIVOS	22
2. PRINCÍPIOS BÁSICOS NA ESTAMPAGEM DE CHAPAS	23
2.1. PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS	23
2.2. FERRAMENTAS	26
2.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS	27
2.3.1. COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO (N).....	30
2.3.2. COEFICIENTE DE ANISOTROPIA OU DE LANKFORD (R)	31
2.3.3. MODELO DE PLASTICIDADE DO MATERIAL	32
2.3.4. CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO (CLC).....	34
2.4. INTERAÇÃO ENTRE FERRAMENTAS E CHAPA: COEFICIENTE DE ATRITO	35
3. TRIBOLOGIA NA CONFORMAÇÃO	37
3.1. BREVE REVISÃO HISTÓRICA DO ATRITO NA CONFORMAÇÃO	38
3.2. MECANISMOS DE ATRITO	39
3.3. LUBRIFICAÇÃO NA CONFORMAÇÃO.....	41
3.4. FORÇAS NA CONFORMAÇÃO	42
3.5. ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO	44
3.5.1. MODELOS DE ATRITO UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO	48
3.5.2. ATRITO DE COULOMB	49
3.5.3. ATRITO DEPENDENTE DA PRESSÃO DE CONTATO	49
3.5.4. MODELOS TRIBOLÓGICOS UTILIZADOS NESTE TRABALHO	50
4. DESENVOLVIMENTO NUMÉRICO.....	53
4.1. ENSAIOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA CHAPA.....	53
4.2. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DO ESTUDO DE CASO	55
4.3. RUGOSIDADE DAS SUPERFÍCIES	55
4.3.1. TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DA FERRAMENTA	56
4.3.2. TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE DA CHAPA	57
4.4. LUBRIFICANTE	58
4.5. PLANEJAMENTO DO SISTEMA TRIBOLÓGICO	58

4.6.	SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	59
4.6.1.	PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO.....	61
4.6.2.	PARÂMETROS DO MATERIAL E CHAPA.....	62
4.6.3.	CINEMÁTICA DAS FERRAMENTAS.....	63
4.6.4.	COEFICIENTES DE ATRITO.....	64
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
5.1.	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL.....	67
5.2.	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	67
5.2.1.	FORÇA DE CONFORMAÇÃO.....	69
5.2.2.	ESPESSURA E AFINAMENTO DO PRODUTO.....	70
5.2.3.	DIMENSÕES DO PRODUTO CONFORMADO.....	73
5.2.4.	RESULTADOS DE COEFICIENTE DE ATRITO.....	76
6.	CONCLUSÃO.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Redução potencial calculada em função das condições atuais introduzindo soluções tribológicas avançadas em quatro áreas de estudo na escala de tempo de implementação [Adaptado de Holmberg <i>et al.</i> , 2017]	16
Figura 1.2: Microestrutura do ferro fundido nodular 0741 (a), do aço ferramenta Vanadis 4E (b) e do aço rápido sinterizado VANCRON 40 (c). [Fonte: Kirkhorn <i>et al.</i> , 2013].....	17
Figura 1.3 – Resultados para diferentes velocidades e taxas de deformação. [Fonte: Hao <i>et al.</i> , 1999].....	18
Figura 1.4 – Representação das asperezas da superfície através de barras e parâmetros estatísticos. [Fonte: Adaptado de Hol <i>et al.</i> , 2012]	19
Figura 1.5 – Topografia medida da superfície da chapa. [Fonte: adaptado de Hol <i>et al.</i> , 2015]	19
Figura 1.6 – Componente conformado (a), cinemática da ferramenta na simulação (b) e distribuição do coeficiente de atrito no resultado da simulação (c). [Fonte: Adaptado de Hol <i>et al.</i> , 2015].....	20
Figura 1.7 – Superfícies antes (a), durante (b) e após conformação (c). [Fonte: Triboform, 2019]	20
Figura 1.8 – Modelo de contato entre a chapa e ferramenta. [Adaptado de Karupannasamy <i>et al.</i> , 2014].....	21
Figura 2.1 – Exemplo de um processo de corte aberto (a) e de contorno (b). [Adaptado de Schuller, 1998]	24
Figura 2.2 – Exemplo de um processo de dobra em U (a) e em V (b). [Adaptado de Schuller, 1998].....	25
Figura 2.3 – Exemplo de um processo de estiramento. [Adaptado de Schuller, 1998].....	25
Figura 2.4 – Exemplo de um processo de embutimento. [Adaptado de Schuller, 1998]	25
Figura 2.5 – Exemplo de uma ferramenta de simples ação.	27
Figura 2.6 – Curva de tensão x deformação.	29
Figura 2.7 – Coeficiente de encruamento alto (a) e baixo (b)	31
Figura 2.8 – Resultados da conformação para coeficientes de anisotropia média igual a 1 e planar igual a 0 (a), anisotropia média igual a 2 e planar igual a 0 (b) e anisotropia média igual a 1,25 e planar igual a 1 (c)	32

Figura 2.9 – Modelo de plasticidade de Tresca e von Mises no espaço tridimensional (a) e a projeção sobre o plano $\sigma_1\sigma_2$ (b). [Adaptado de Hosford <i>et al.</i> , 2007]	33
Figura 2.10 – Ensaio para determinar a superfície de escoamento	34
Figura 2.11 – Curva limite de conformação com os modos de deformação	35
Figura 2.12 – Regiões críticas em um processo de embutimento [Adaptado de Gåård, 2008]	36
Figura 3.1 – Regiões de contato em um processo de embutimento [adaptado de Souza, 2008]	37
Figura 3.2 – Pintura rupestre encontrada no egipto 2400 AC. [Sinatora, 2005]	38
Figura 3.3 – Representação das interações tribológicas de natureza multifisica [Adaptado de Vakis <i>et al.</i> 2018]	40
Figura 3.4 – Regimes de lubrificação na curva de Stribeck. [Adaptado de Stribeck. 1902]....	42
Figura 3.5 – Tensão atuantes em um processo de embutimento. [Adaptado de Folle, 2012] ..	43
Figura 3.6 – Gráfico de forças resultantes de um processo de embutimento. [Adaptado de Garcia <i>et al.</i> (2000)]	43
Figura 3.7 – Ensaio de atrito com tracionamento de tiras. [Adaptado de Ducan <i>et al.</i> , 1978].	45
Figura 3.8 – Dispositivo de teste de atrito. [Adaptado de Ter Haar, 1996].....	45
Figura 3.9 – Ensaio de atrito com tracionamento de tiras em formato “U” (a) e “L” (b). [Adaptado de Hao <i>et al.</i> , 1999].....	46
Figura 3.10 – Dispositivo de teste de atrito simulando prende rugas. [Adaptado de Sanchez, 1999].....	46
Figura 3.11 – Diagrama cinemático dos testes de atrito. [Adaptado de Bay <i>et al.</i> , 2008]	47
Figura 3.12 – Máquina de ensaios de atrito da empresa Bruning Tecnometal. [Adaptado de Souza <i>et al.</i> , 2015]	48
Figura 3.13 – Grafico do Coeficiente de atrito x Pressão de contato nominal. [Adaptado de Wang <i>et al.</i> (2016)].....	49
Figura 3.14 – Rugosidade da chapa (a) e da ferramenta (b). [Fonte: Triboform, 2013]	51
Figura 3.15 – Modelos tribológicos. [Adaptado de Triboform, 2013]	52
Figura 3.16 – Três modelos de tribológicos gerados pelo Triboform® com as quantidades A, B e C de lubrificante.....	52
Figura 4.1 – Orientação dos corpos de prova quanto ao sentido de laminação.....	54
Figura 4.2 – Principais dimensões da chapa (a) e do estudo de caso (b).....	55
Figura 4.3 – Topografia da superfície da ferramenta com rugosidade de 1,3 μm . [Fonte: Tavares, 2019].....	56

Figura 4.4 – Topografia da superfície da ferramenta com rugosidade de 0,08 μm (a), 0,4 μm (b) e 1,3 μm (c) geradas pelo Triboform®.....	57
Figura 4.5 – Topografia da superfície da chapa com rugosidade de 1,6 μm (a) e superfície gerada pelo Triboform® (b). [Fonte: Tavares, 2019]	57
Figura 4.6 – Fluxograma da abordagem dos estudos	60
Figura 4.7 – Curva de encruamento (a), superfície de escoamento anisotrópico (b) e Curva limite de conformação do material CR4.....	62
Figura 4.8 – Posicionamento da chapa sobre a matriz	62
Figura 4.9 – Geometrias das ferramentas	63
Figura 4.10 – Modelos tribológicos com rugosidade da chapa de 1,6 μm e 0,08 μm para ferramenta e deformações igual a 0 (a) e 0,4 (b)	64
Figura 4.11 – Modelos tribológicos com rugosidade da chapa de 1,6 μm e 0,4 μm para ferramenta e deformações igual a 0 (a) e 0,4 (b)	65
Figura 4.12 – Modelos tribológicos com rugosidade da chapa de 1,6 μm e 1,3 μm para ferramenta e deformações igual a 0 (a) e 0,4 (b)	66
Figura 4.13 – Modelos tribológicos para diferentes rugosidades da ferramenta, quantidades de lubrificante e projeção do coeficiente de atrito de Coulomb com deformações igual a 0 (a) e deformação igual a 0,4 (b).....	66
Figura 5.1 – Detalhamento das variáveis em estudo	68
Figura 5.2 – Gráfico da força máxima do punção	69
Figura 5.3 – Gráfico da força máxima do punção em função da quantidade de lubrificante para tres rugosidades da ferramenta e para o atrito de Coulomb (a) e a força máxima em função da rugosidade da ferramenta para tres quantidades de lubrificante e para o atrito de Coulomb...	70
Figura 5.4 – Afinamento na espessura do caso #01	71
Figura 5.5 – Gráfico da espessura mínima em função da quantidade de lubrificante com as tres rugosidades da ferramenta e para o atrito de Coulomb (a) e espessura mínima em função da rugosidade da ferramenta com as tres quantidades de lubrificante e para o atrito de Coulomb (b)	72
Figura 5.6 – Resultados da dimensão A (a) e dimensão B (b)	73
Figura 5.7 – Gráfico da dimensão A em função da quantidade de lubrificante com as tres rugosidades da ferramenta e para o atrito de Coulomb (a) e a dimensão A em função da rugosidade da ferramenta com as tres quantidades de lubrificante e para o atrito de Coulomb (b)	74

Figura 5.8 – Gráfico da dimensão B em função da quantidade de lubrificante com as tres rugosidades da ferramenta e para o atrito de Coulomb (a) e a dimensão B em função da rugosidade da ferramenta com as tres quantidades de lubrificante e para o atrito de Coulomb (b)	75
Figura 5.9 – Composição dos resultados (a) e detalhe dos 10 resultados para a dimensão B (b)	76
Figura 5.10 – Distribuição do coeficiente de atrito nos raios da matriz para os estudos de caso #01 (a), #02 (b) e #03 (c).....	77
Figura 5.11 – Distribuição do coeficiente de atrito nos raios da matriz para os estudos de caso #04 (a), #05 (b) e #06 (c).....	77
Figura 5.12 – Distribuição do coeficiente de atrito nos raios da matriz para os estudos de caso #07 (a), #08 (b) e #09 (c).....	78
Figura 5.13 – Identificação dos pontos na seção para leitura do coeficiente de atrito	78
Figura 5.14 –Coeficiente de atrito ao longo da seção para os dez estudos de caso.....	79
Figura 5.15 – Distribuição das pressões de contato em MPa na matriz (a) e no punção (b)....	79
Figura 5.16 – Pressão de contato nos raios da matriz para os estudos de caso #01 (a), #02 (b) e #03 (c).....	80
Figura 5.17 – Pressão de contato nos raios da matriz para os estudos de caso #04 (a), #05 (b) e #06 (c).....	81
Figura 5.18 – Pressão de contato nos raios da matriz para os estudos de caso #07 (a), #08 (b) e #09 (c).....	81
Figura 5.19 – Coeficiente de atrito e pressão de contato ao longo da seção	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço ferramenta AISI D2.....	53
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do material	54
Tabela 3 - Coeficiente “n” e “r” para cada direção de laminação	54
Tabela 4 – Planejamento do sistema tribológico	59
Tabela 5 - Parametros de acuracidade da malha de elementos finitos da chapa	61
Tabela 6 – Propriedades mecânicas ensaiadas	67
Tabela 7 – Resultados numéricos.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_e	Alongamento no regime elástico	%
A_l	Alongamento percentual	%
A_t	Alongamento total na ruptura	%
A_g	Alongamento uniforme	%
ASTM	American Society for Testing Materials	
A_0	Área inicial	mm ²
A_i	Área instantânea	mm ²
A_r	Area real de contato	mm ²
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
μ	Coefficiente de atrito	
r_0	Coefficiente de anisotropia a 0° do sentido de laminação	-
r_{45}	Coefficiente de anisotropia a 45° do sentido de laminação	-
r_{90}	Coefficiente de anisotropia a 90° do sentido de laminação	-
r_m	Coefficiente de anisotropia média	-
r	Coefficiente de anisotropia ou de Lankford	-
Δr	Coefficiente de anisotropia planar	-
n	Coefficiente de encruamento	-
ν	Coefficiente de Poisson	-
K	Coefficiente de resistência	MPa
l_f	Comprimento final	mm
l_0	Comprimento inicial	mm
CP0°	Corpo de prova a 0° do sentido de laminação	-
CP45°	Corpo de prova a 45° do sentido de laminação	-
CP90°	Corpo de prova a 90° do sentido de laminação	-
ε	Deformação	-
ε_{Eng}	Deformação de engenharia	-
ε_x	Deformação na direção x, transversal	-
ε_y	Deformação na direção y, transversal	-

ε_z	Deformação na direção z, longitudinal	-
ε_{True}	Deformação verdadeira	-
ε_t	Deformação verdadeira na espessura	-
ε_w	Deformação verdadeira na largura	-
DIN	Deutsches Institut Für Normung	
F	Força	N
ISO	International Organization for Standardization	
R_m	Limite de resistência	MPa
MPa	Megapascal	
mm	Milímetros	
E	Módulo de Elasticidade	MPa
N	Newton	
p_r	Pressão de contato real	mm ²
R_a	Rugosidade aritmética média	μm
t	Tempo	S
σ	Tensão	MPa
τ_{asp}	Tensão de cisalhamento limite	MPa
τ_{lub}	Tensão de cisalhamento viscoso	MPa
σ_{Eng}	Tensão de engenharia	MPa
σ_e	Tensão de escoamento	MPa
σ_R	Tensão de ruptura de engenharia	MPa
K_f	Tensão de ruptura verdadeira	MPa
σ_{True}	Tensão verdadeira	MPa
τ_i	Tensão cisalhante	MPa
Δ_l	Variação no comprimento	mm

1. INTRODUÇÃO

A qualidade de uma peça estampada pelo processo de conformação de chapas é diretamente ligada à tribologia e às condições de atrito que atuam no processo. As condições de atrito são dependentes do material da chapa, material da ferramenta, lubrificante, rugosidade das superfícies, forças normais, velocidade de deformação entre outros. Esta combinação de fatores é conhecido como sistema tribológico.

Estudos recentes indicam que os custos associados ao atrito representam cerca de 5% do valor final de produção da peça, segundo Folle (2012). Em 1966, Jost relatou que a tribologia engloba várias áreas, como a química, física, mecânica dos sólidos, transferência de calor, ciência dos materiais dentre outros. Afirma ainda que o estudo da tribologia é essencial tanto por razões econômicas como por razões ambientais e cita que, em torno de 10% do consumo mundial de petróleo é utilizado para superar o atrito.

Holmberg *et al.* (2017) realizaram um estudo para avaliar a influência da tribologia no consumo de energia, custos e emissões a nível global. O estudo englobou os setores de transporte, indústrias, residências e prestação de serviços. Eles concluíram que 23% do consumo global de energia é originado em contatos tribológicos, sendo que, 20% é usado para superar o atrito e 3% para fabricação de novos componentes para substituir os desgastados. Relatam ainda que, com novas tecnologias em tratamentos superficiais, materiais e lubrificantes será possível reduzir o consumo de energia com as perdas relacionadas ao atrito em 40% num período de 15 anos e 18% em 8 anos. Eles projetam que implementando novas tecnologias em nível global, estaríamos reduzindo 46 EJ de energia, 973.000 milhões de euros e 3.140 MtCO₂ em emissões. Esta redução seria de 8,7% de toda energia consumida globalmente por um período de 15 anos. A Figura 1.1 ilustra os potenciais de redução em quatro segmentos estudados.

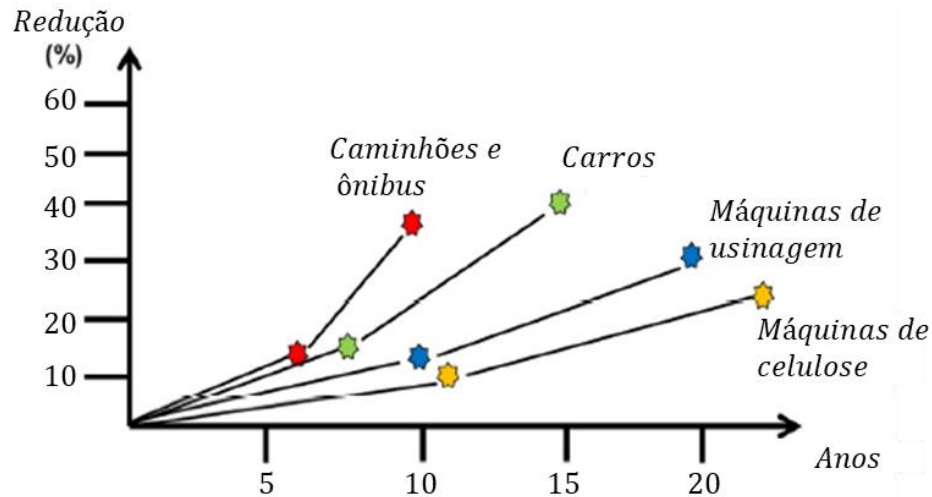


Figura 1.1 – Redução potencial calculada em função das condições atuais introduzindo soluções tribológicas avançadas em quatro áreas de estudo na escala de tempo de implementação [Adaptado de Holmberg *et al.*, 2017]

A importância no processo de conformação e custos envolvidos, aliado à complexidade em elaborar modelos tribológicos mais realísticos, são fatores que fomentam muitas pesquisas voltadas para o atrito. Com o intuito de preencher uma lacuna relacionada ao atrito na simulação, este assunto foi o objeto de pesquisa deste trabalho.

1.1. Revisão bibliográfica

A tribologia é definida como a ciência e a tecnologia de interação entre superfícies com movimento relativo entre si e dos fenômenos dela recorrente segundo Jost (1966), relatando ainda que é algo que está presente em praticamente todas interfaces onde acontecem movimentos, inclusive no contato do ar contra a superfície de um automóvel em movimento. Altan *et al.* (1999) afirmam que em processos de conformação de peças metálicas que utilizam ferramentas, atrito, desgaste e lubrificação são fatores presentes nas operações, sendo que em alguns casos, o atrito é benéfico para o processo.

Dieter (1981) relata que as superfícies reais não são exatamente planas, e sim formadas por sulcos e vales quando avaliadas em escala microscópica. Lenard (2002) relata que a verificação da topografia das superfícies é muito importante para a caracterização do mecanismo de atrito no processo de conformação de metais e afirma que a aspereza da superfície e o lubrificante associado à pressão de contato influenciam diretamente no coeficiente de atrito.

Já Szakaly *et al.* (2010) realizaram ensaios com matrizes planas para avaliar o efeito da velocidade de estampagem, rugosidade das ferramentas, rugosidade da chapa e pressão de contato entre elas no atrito. Eles concluíram que quanto maior a velocidade e pressão de contato, menor o coeficiente de atrito. Da mesma forma, Drunn *et al.* (2016) concluíram que altas pressões de contato deformam plasticamente os picos das asperezas aumentando a área real de contato e, conseqüentemente, reduzindo o coeficiente de atrito. Pereira *et al.* (2010), destacam que a avaliação precisa da pressão de contato é uma etapa essencial para a estimativa de vida útil da ferramenta. Através dos estudos realizados utilizando o método dos elementos finitos e experimentos práticos, observou-se que as regiões com pressões de contato transientes mais altas estão localizadas nos raios da ferramenta e correspondem a um mecanismo de desgaste mais severo. As pressões de contato obtidos nestas regiões ultrapassaram os 1.000 MPa. Da mesma forma, Hou *et al.* (2010), constataram através de simulação que as maiores pressões de contato se encontram nas regiões dos raios de dobramento da ferramenta e, conseqüentemente, onde se inicia a adesão. Outros estudos estão avaliando a microestrutura das ferramentas utilizadas em ferramentas de conformação como é o caso de Kirkhorn *et al.* (2013), que realizaram ensaios com diferentes materiais utilizados na conformação para avaliar a performance do atrito e correlacionar com a microestrutura dos materiais. Eles observaram que há uma grande diversidade na microestrutura dos mesmos conforme observado na Figura 1.2, o que influenciou na preparação das superfícies para os testes. Como observaram que a rugosidade da superfície possui uma grande influência no resultado final, prepararam os corpos de prova individualmente para que os parâmetros de rugosidade e textura fossem os mesmos. Com isso, observaram que o aumento ou redução no teor de carbonetos não está diretamente relacionado com a alteração do coeficiente de atrito nos materiais comparados no ensaio. Eles observaram que a microestrutura tem influência sobre a obtenção da textura da superfície e em função disso, no coeficiente de atrito.

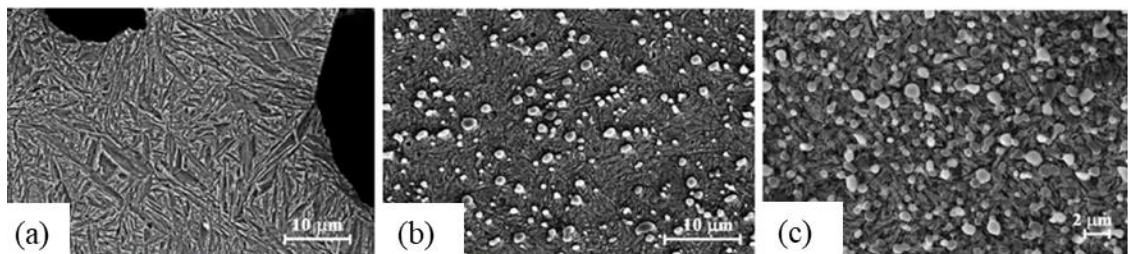


Figura 1.2: Microestrutura do ferro fundido nodular 0741 (a), do aço ferramenta Vanadis 4E (b) e do aço rápido sinterizado VANCRON 40 (c). [Fonte: Kirkhorn *et al.*, 2013]

Hao *et al.* (1999) observaram que há uma redução no coeficiente de atrito na medida em que a velocidade de deformação é aumentada em um ensaio de dobramento sob tensão. O coeficiente foi reduzido em aproximadamente 30% para um aumento de 100 vezes na velocidade. No entanto, essa diferença no coeficiente de atrito é devido à grande diferença entre as maiores e menores taxas de deformação. Os resultados dos ensaios são mostrados na Figura 1.3.

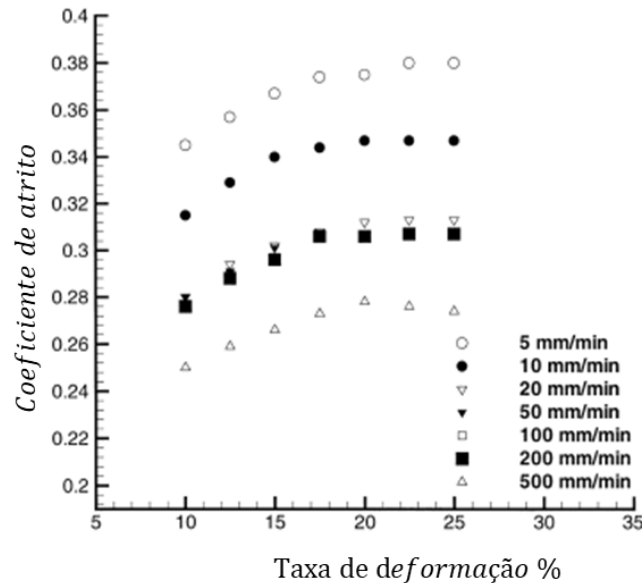


Figura 1.3 – Resultados para diferentes velocidades e taxas de deformação. [Fonte: Hao *et al.*, 1999]

De uma forma geral, a velocidade e a pressão de contato possuem grande influência sobre o atrito, assim como a rugosidade superficial, lubrificante e a temperatura de trabalho. Os mecanismos de atrito são dependentes de muitos fatores, os quais geralmente são estudados individualmente. A combinação destes fatores resulta em modelos complexos que necessitam de soluções numéricas para resolução.

Nielsen *et al.* (2018), relatam que modelos teóricos de atrito na conformação de metais são baseados em análises de área de contato real nas interfaces chapa/ferramenta. Afirmam ainda que há uma necessidade de pesquisas referentes ao mapeamento completo das áreas de contato, deformações massivas das asperezas da superfície, propriedades dos materiais e condições superficiais e, conseqüentemente, aprimorar modelos numéricos em tribologia.

Os primeiros modelos numéricos de atrito começaram a ser estudados na década de 1980, quando Bin *et al.* (1988) aplicaram o método dos elementos finitos no seu estudo para prever a distribuição de tensão e atrito aparente, provando ainda a existência dos fenômenos através de experimentos. Ainda em 1988, Makinouchi *et al.* simularam o achatamento de

asperezas incluindo o encruamento no modelo de elementos finitos. Em 1992, Korzekwa *et al.* aplicaram métodos numéricos para simular a deformação massiva das asperezas da superfície em 3 dimensões. Com o avanço dos desenvolvimentos em algoritmos e o crescimento na utilização de simulações numéricas, Zhang *et al.* (2003) demonstraram através de simulações que o contato localizado entre ferramenta/chapa estabelecem um modelo de atrito localizado baseado na rugosidade delas e aplicaram este modelo na simulação de um processo de embutimento.

Hol *et al.* (2012) e Hol *et al.* (2015) apresentaram um modelo de atrito para utilização em larga escala no âmbito de simulações de conformação baseado nas mudanças micrométricas da superfície. Neste modelo, as asperezas da superfície foram modeladas através de barras e parâmetros estatísticos conforme ilustrado na Figura 1.4. O nivelamento das asperezas foi realizado com o balanço energético na interação entre as barras deformáveis, enquanto que, os coeficientes locais de atrito foram estimados com base na topografia da superfície real (Figura 1.5), através de modelos analíticos obtidos nos dados estatísticos da superfície. Com os dados de coeficientes de atrito locais, foram realizadas simulações de conformação de uma chapa metálica em escala real conforme ilustrado na Figura 1.6.

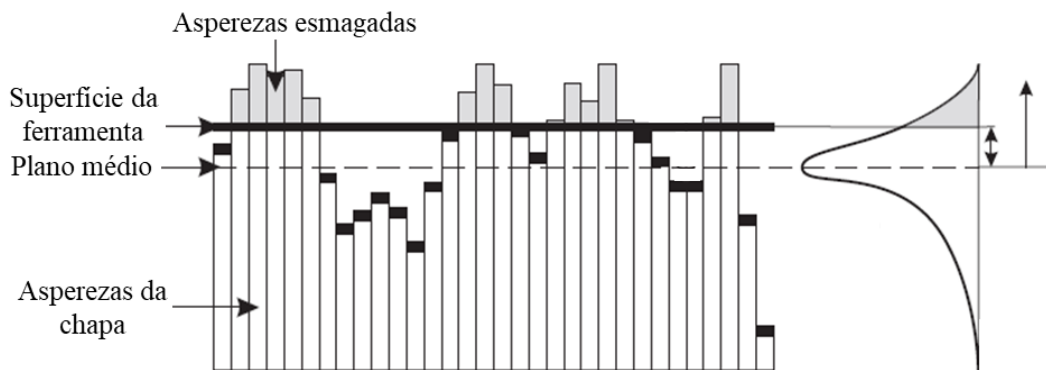


Figura 1.4 – Representação das asperezas da superfície através de barras e parâmetros estatísticos. [Fonte: Adaptado de Hol *et al.*, 2012]

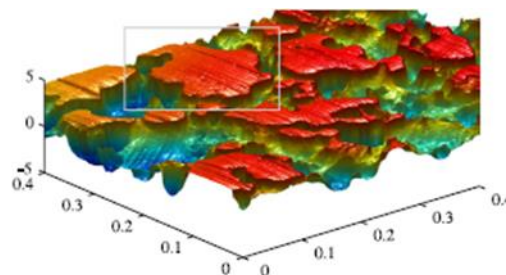


Figura 1.5 – Topografia medida da superfície da chapa. [Fonte: adaptado de Hol *et al.*, 2015]

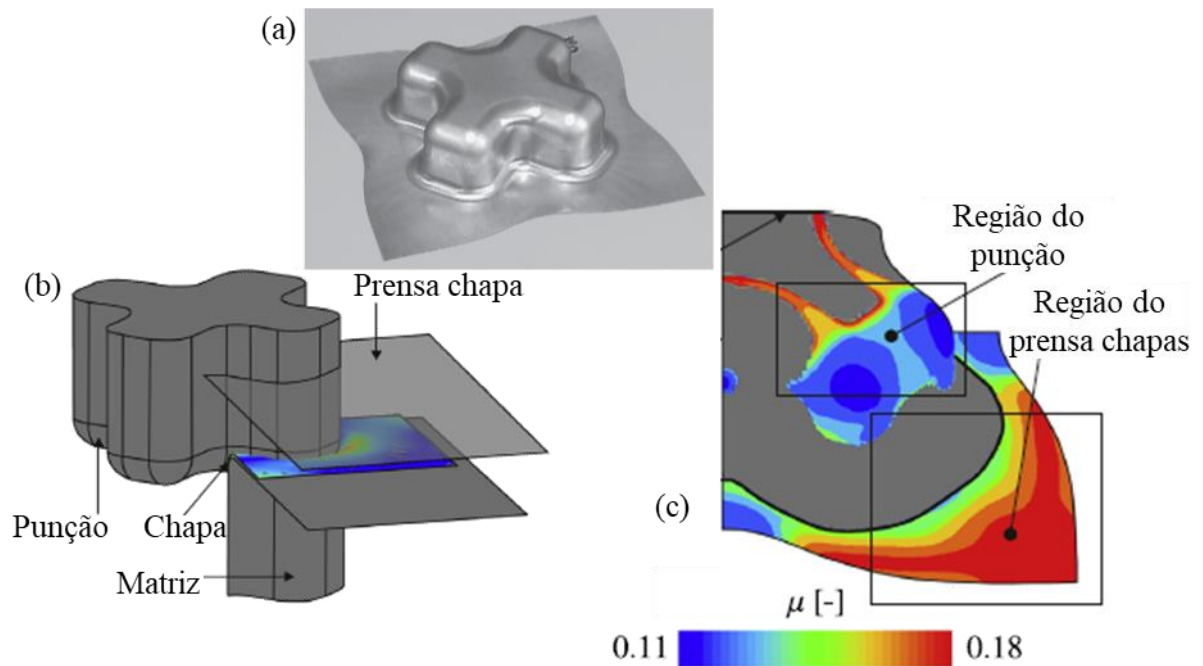


Figura 1.6 – Componente conformado (a), cinemática da ferramenta na simulação (b) e distribuição do coeficiente de atrito no resultado da simulação (c). [Fonte: Adaptado de Hol *et al.*, 2015]

Atualmente softwares propõem uma nova tecnologia para simular as condições tribológicas em um processo de conformação atribuindo parâmetros para as ferramentas, material da chapa e do lubrificante gerando assim, superfícies mais realísticas. A partir do movimento relativo e interação entre estas superfícies, ocorre a deformação das asperezas (Figura 1.7c) e, obtém-se os coeficientes de atrito para utilização em softwares de simulação de conformação.

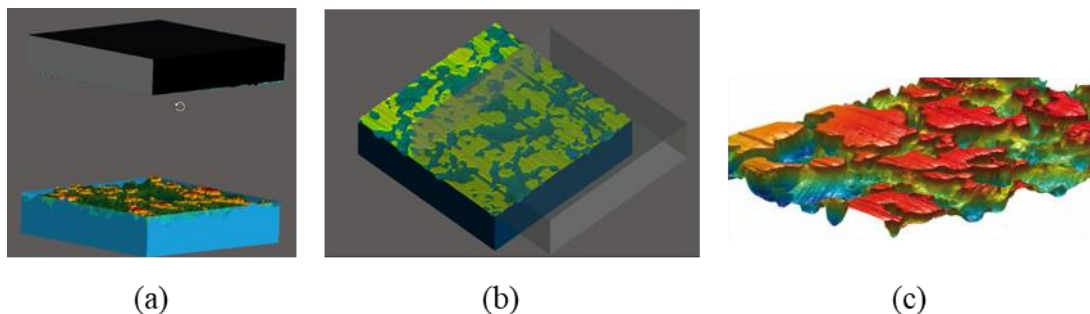


Figura 1.7 – Superfícies antes (a), durante (b) e após conformação (c). [Fonte: Triboform, 2019]

Karupannasamy *et al.* (2014) desenvolveram um modelo de atrito de deslizamento com modos mistos de deformação da superfície, utilizando aproximações determinísticas para um modelo que inclui a rugosidade superficial, tanto das ferramentas quanto da chapa. A geometria das asperezas foi caracterizada por um formato parabólico elíptico para calcular a dependência da carga no atrito comparando os resultados com dados obtidos experimentalmente em um teste rotacional de atrito. Os mecanismos de contato e geometria das asperezas estão ilustrados na Figura 1.8.

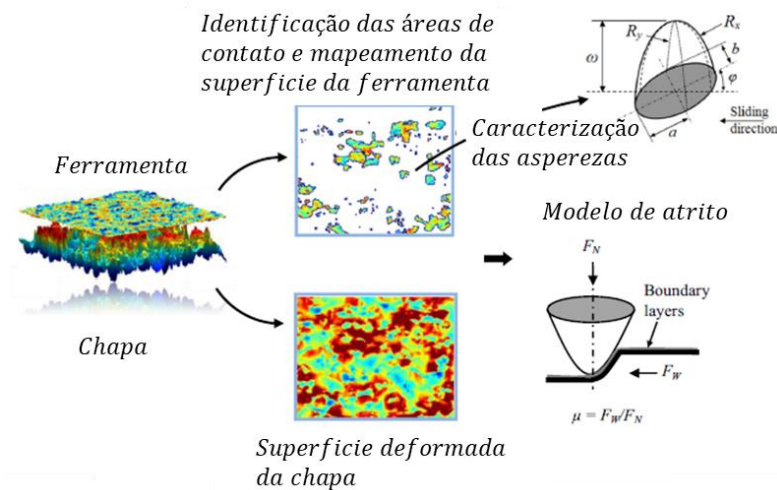


Figura 1.8 – Modelo de contato entre a chapa e ferramenta. [Adaptado de Karupannasamy *et al.*, 2014]

Sigvant *et al.* (2019) indicam a dependência do coeficiente de atrito para a taxa de deformação da chapa. Eles observaram uma variação nos resultados de simulação incorporando a sensibilidade da taxa de deformação no modelo de atrito quando comparado com um modelo independente. Porém, destacam que os efeitos da taxa de deformação são originados do modelos de atrito. Enfatizam ainda, a necessidade de parâmetros precisos para os dados de entrada do modelo de atrito e também a necessidade de investigações adicionais para caracterização dos efeitos da velocidade de deslizamento. Hol *et al.* (2017) também relataram a significativa dependência da pressão de contato e deformação plástica do material da peça, sendo que quanto maior a pressão de contato, maior será a deformação plástica e resultando em um coeficiente de atrito menor.

1.2. Objetivos

Existe uma lacuna em relação ao estudo da tribologia no processo de conformação de chapas no âmbito da simulação. Apesar do grande avanço no assunto nos últimos anos, ainda se utilizam coeficientes constantes em simulações numéricas em escala industrial.

Neste sentido, o objetivo geral do trabalho é estudar o coeficiente de atrito em um processo de conformação através de simulações numéricas avaliando resultados utilizando o modelo de Coulomb e modelos tribológicos.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar o modelo de material realizando ensaios de tração;
- Caracterizar a superfície da chapa e ferramenta através de perfilometria ótica de varredura;
- Realizar uma avaliação de resultados numéricos utilizando o coeficiente de atrito de Coulomb e modelos tribológicos;
- Associar resultados com literaturas.

2. PRINCÍPIOS BÁSICOS NA ESTAMPAGEM DE CHAPAS

A estampagem é um processo muito utilizado na conformação mecânica de chapas metálicas. Ela consiste em alterar a geometria da chapa através de forças aplicadas por ferramentas sem alterar a sua massa e composição química, gerando uma deformação plástica do material.

Rodrigues & Martins (2005) afirmam que os processos de conformação plástica dos metais permitem a obtenção de peças no estado sólido, com características controladas, através da aplicação de esforços mecânicos em corpos metálicos iniciais que mantém o seu volume constante. Destacam ainda que, os processos de conformação plástica podem ser classificados de acordo com vários critérios, como o tipo de esforço predominante, a temperatura de trabalho, a forma do material ou produto final, tamanho da região de deformação, o tipo de fluxo do material e o tipo de produto obtido.

A estampagem pode ser dividida em 3 partes principais segundo Folle (2012), sendo geometrias das ferramentas, as propriedades da matéria prima e a interação entre ambas, representado através do coeficiente de atrito. Nos próximos capítulos serão detalhados os principais processos de conformação de chapas, informações importantes sobre as ferramentas de conformação, propriedades mecânicas dos materiais e as condições de atrito.

2.1. Processos de conformação de chapas

O processo de conformação de chapas metálicas é controlado por diversos fatores de natureza mecânica e metalúrgica. Entre os fatores mecânicos estão forma e dimensões da peça, tipo de máquina de conformação empregada, forma e dimensões das ferramentas, e condições de lubrificação conforme afirmado por Rodrigues & Martins (2005). Destacam ainda que estes fatores influenciam diretamente nos estados de tensão e deformação existentes em cada instante do processo e nas diversas regiões da peça em conformação. Nos fatores metalúrgicos, enquadram-se composição química do material, parâmetros do processo de fabricação e laminação da chapa, e tratamentos térmicos.

A mudança de geometria é ocasionada através do deslocamento do volume do material em um espaço tridimensional de forma controlada mantendo a sua massa e composição química originais como definido pela norma DIN 8582.

O processo de conformação em chapas pode ser classificado em quatro principais categorias, sendo eles o corte, a dobra, o estiramento e o embutimento. O presente estudo utilizou o processo de embutimento.

O processo de corte é normatizado pela DIN 8587 e visa obter formas geométricas através de cortes. Ele consiste em pressionar um punção sobre a chapa que está apoiada sobre uma matriz, gerando assim o corte, como ilustrado na Figura 2.1. Neste processo existem apenas tensões cisalhantes e são normalmente realizados, em prensas excêntricas. Dieter (1981) define a força necessária para cortar uma chapa metálica, desprezando o atrito, como sendo o produto do comprimento de corte pela espessura da chapa e a resistência do material ao cisalhamento.

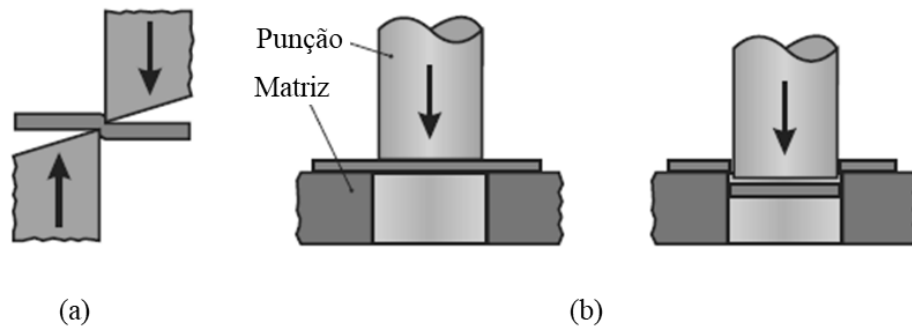


Figura 2.1 – Exemplo de um processo de corte aberto (a) e de contorno (b). [Adaptado de Schuller, 1998]

As formas de seções transversais do punção e matriz determinam a forma da peça a ser cortada. Parâmetros de folga entre punção e matriz são importantes para o projeto da ferramenta e eles são determinados em função da espessura e material a ser cortado.

O processo de dobra é muito utilizado em todos os segmentos de transformação mecânica e ele consiste em dobrar a chapa através do movimento relativo entre um punção e a matriz como ilustrado na Figura 2.2. Dieter (1981) define a dobra como sendo um processo de conformação que transforma segmentos retos em curvos, transformando chapas metálicas em calhas, tambores, cantoneiras, etc. O processo de dobra é normatizado pela DIN 8586 e realizado normalmente, em prensas excêntricas ou prensas viradeiras.

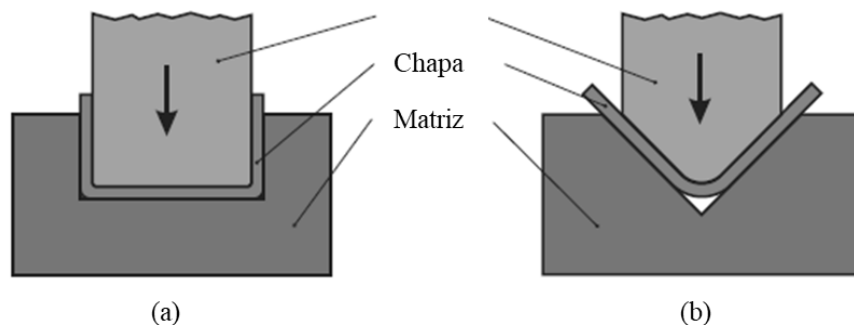


Figura 2.2 – Exemplo de um processo de dobra em U (a) e em V (b). [Adaptado de Schuller, 1998]

No processo de estiramento existem apenas tensões de tração em um estado biaxial de deformação. Ele consiste em tracionar a chapa através de um punção em que as extremidades da chapa estão fixas através de garras, conforme ilustrado na Figura 2.3. Dieter (1981) cita que o estiramento consiste em tracionar uma chapa de maneira a esticar o material sobre uma ferramenta e ressalta que é um processo muito utilizado na indústria aeronáutica para produzir peças com grandes raios de curvaturas. Este processo é normatizado pela DIN 8585.

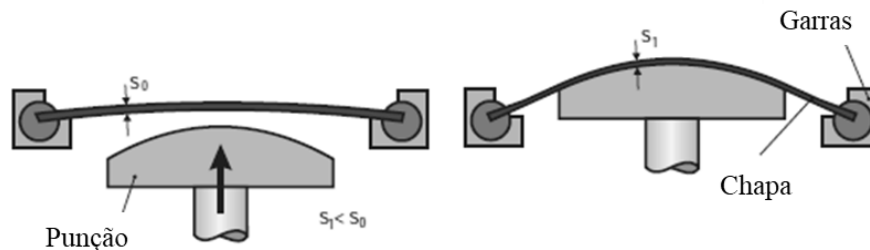


Figura 2.3 – Exemplo de um processo de estiramento. [Adaptado de Schuller, 1998]

O embutimento, também conhecido por estampagem profunda, é um método de conformação em que ocorre uma combinação entre tensões tangenciais de compressão e tensões radiais de tração onde a chapa é transformada através de um punção, uma matriz e sujeitada com um prensa chapa que restringe e controla o fluxo do material conforme ilustrado na Figura 2.4. O processo de embutimento é normatizado pela DIN 8584.

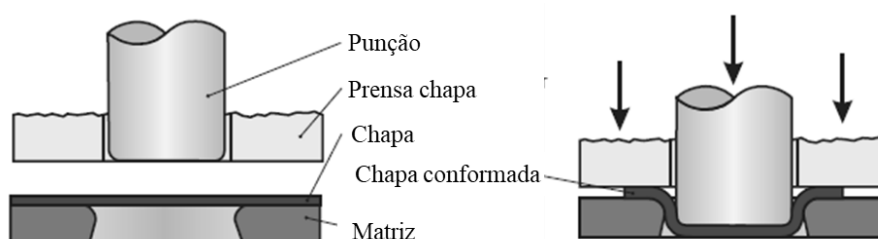


Figura 2.4 – Exemplo de um processo de embutimento. [Adaptado de Schuller, 1998]

Muitas vezes, a fabricação de uma peça pode exigir diversas etapas de embutimento, o que torna necessária a utilização de uma série de ferramentas com diferentes geometrias para punções e matrizes. O número de etapas depende do material da chapa e das formas finais desejadas. A conformação pode ser realizada utilizando prensas excêntricas e hidráulicas.

Segundo Schaeffer (2004), o embutimento é um processo de fabricação cuja matéria prima é uma chapa metálica plana que é transformada em diferentes formas geométricas com saliências profundas ou rasas. Afirma ainda que trata-se de um processo de conformação que envolve uma contínua interação entre ferramenta, lubrificante, material de conformação e equipamento.

2.2. Ferramentas

Em conformação mecânica a geometria da peça é proveniente da forma das matrizes e punções da ferramenta acionados através de uma prensa mecânica ou hidráulica. A forma construtiva das ferramentas e os meios de transferência da peça entre operações é definida em função do tipo, da forma do produto, do tamanho da peça e da quantidade de peças a serem produzidas, como destacado em Schuller (1996).

As ferramentas podem ser divididas em vários tipos, incluindo ferramenta de simples ação, dupla ação, tripla ação, de corte, de estampagem livre, de flangeamento, ferramenta progressiva, com sistema transferência automatizada, dentre outras. O conceito utilizado neste estudo está baseado em uma ferramenta de simples ação conforme ilustrado na Figura 2.5.

A ferramenta de simples ação é um dos tipos mais utilizados na construção do ferramental de estampagem profunda. Ela é composta por uma matriz fixada no conjunto superior móvel da prensa, também conhecido como martelo. O conjunto formado pela base e punção são fixados diretamente na base fixa da prensa conhecida como mesa. Já o componente denominado prensa chapas é suportado por atuadores, normalmente hidráulicos, que exercem uma força com o objetivo de controlar o fluxo de material durante o processo de conformação. Existe ainda a possibilidade de inverter as ferramentas na montagem do conjunto na prensa, desde que o projeto contemple esta condição. Neste caso, a matriz é fixada na mesa da prensa enquanto que, o punção e prensa chapas, no martelo.

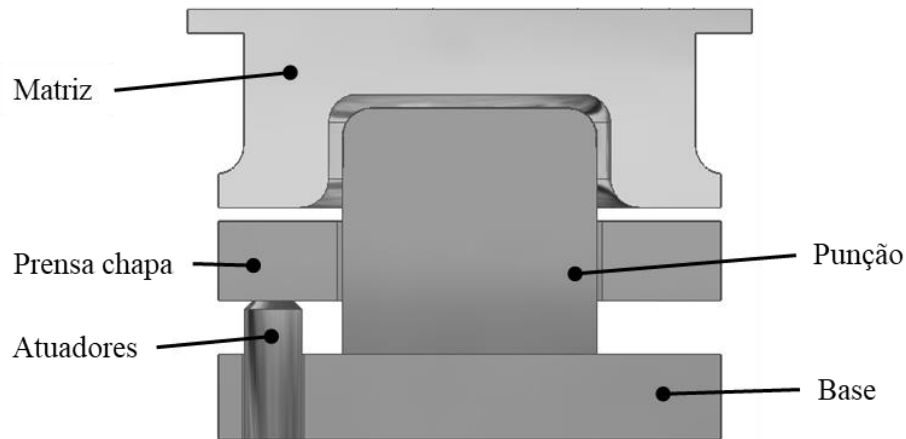


Figura 2.5 – Exemplo de uma ferramenta de simples ação.

Rodrigues & Martins (2005) afirmam que na fabricação da ferramenta é importante obter superfícies lisas e controlar as tolerâncias dimensionais dos componentes das ferramentas. Relatam ainda que estes fatores, associados a uma lubrificação abundante, podem reduzir sensivelmente os esforços na conformação e o desgaste da ferramenta.

Entre todos os componentes de uma ferramenta, podemos citar o punção e a matriz como os itens mais importantes do conjunto em função das solicitações às quais estarão expostos durante a conformação, seja de desgaste, impactos ou fadiga. Neste sentido, os materiais e revestimentos aplicados são escolhidos em função do tamanho e do tipo de ferramenta (corte, dobra ou embutimento), temperatura de trabalho e material da chapa conforme destacado por Rodrigues & Martins (2005), e ainda, pressões de contato atuantes e quantidade de peças a serem produzidas.

Materiais normalmente utilizados para ferramenta são aços micro ligados da categoria “aço ferramenta”, algumas ligas de ferro fundido e aços sinterizados.

2.3. Propriedades mecânicas dos materiais

Uma grande quantidade de materiais estão disponíveis atualmente para diferentes aplicações. Estes materiais podem ser classificados de diferentes formas, sendo por aspectos metalúrgicos ou mecânicos. Dentre os metalúrgicos estão a composição química do material e propriedades oriundas do processo de fabricação e processamento da matéria prima na usina.

Durante o processo de conformação, uma chapa plana é deformada permanentemente até adquirir a forma impressa das ferramentas. A forma final adquirida pela chapa é decorrente das deformações plásticas induzidas por elas. Neste sentido, torna-se necessário o conhecimento do comportamento do material durante a conformação.

As propriedades mecânicas compreendem a resposta dos materiais às influências mecânicas externas, manifestadas pela capacidade de desenvolverem deformações reversíveis e irreversíveis, e de resistirem à fratura. Essas características dos materiais são geralmente avaliadas por meio de ensaios, que indicam dependências de tensão-deformação. A seguir, veremos as principais propriedades mecânicas dos materiais obtidos através de um ensaio de tração e necessárias para caracterizar o modelo de material.

A norma ISO 6892-1 especifica a metodologia de testes de ensaios de tração de metais para obter as propriedades mecânicas dos materiais, como:

Módulo de Elasticidade é a relação entre a tensão e deformação no regime elástico em um ensaio de tração uniaxial e está localizado entre os pontos 0 e 1 da Figura 2.6. Valores típicos para aços são 210 GPa e 70 GPa para alumínio.

O coeficiente de Poisson caracteriza a relação entre deformações longitudinais e transversais no regime elástico do material com valores típicos de 0,3 para os aços assim como para alumínio.

O peso específico é a relação entre a massa e o volume de um material. Valores típicos para aços indicam 7.850 kg/m³ e 2.700 kg/m³ para alumínio. No processo de conformação, o peso específico do material determina os carregamentos gravitacionais e possuem uma grande importância nas etapas de posicionamento da chapa sobre a ferramenta, no fechamento das ferramentas antes da conformação e na etapa de medição do retorno elástico ao final do processo.

O limite de escoamento (σ_0) é uma transição heterogênea localizada entre a deformação elástica e plástica do material, ou seja, é a tensão no início da plasticidade indicado com o ponto 1 na Figura 2.6. A caracterização deste ponto é fundamental no processo de conformação, pois em um produto estampado, normalmente existem regiões no regime plástico e outras, no regime elástico. Callister (2007) cita que para muitos materiais metálicos, a deformação plástica ocorre apenas se a deformação for acima de 0,005 e que a partir deste ponto, a tensão não é mais proporcional à deformação.

Após o escoamento, é necessária uma tensão para continuar deformando plasticamente o material até atingir o ponto máximo, e em seguida, uma queda até atingir uma eventual fratura (Callister, 1940). A tensão no ponto máximo é conhecida como o limite de resistência (R_m), ou seja, é a tensão no instante em que se obtém a carga máxima no ensaio de tração uniaxial (representado no ponto 2 da Figura 2.6). Este ponto representa a carga máxima suportada pelo

material quando a estrutura está sujeita a tensões, e se a carga continuar sendo mantida, haverá a fratura do material, ou seja, a tensão de ruptura (σ_R) é atingida (ponto 3 da Figura 2.6).

Alongamento uniforme (A_g) é o incremento da deformação no regime plástico do material e o seu limite ocorre quando a força máxima é obtida no ensaio de tração, ou seja, no limite de resistência do material. Na conformação, este instante caracteriza o início da estricção e está representado pelo ponto 2 na Figura 2.6.

Alongamento total (A_t) é o alongamento permanente após a fratura do material. A grande maioria das normas dos materiais controlam este fator. No ponto de vista da conformação, o conhecimento do alongamento uniforme é mais importante que o alongamento total.

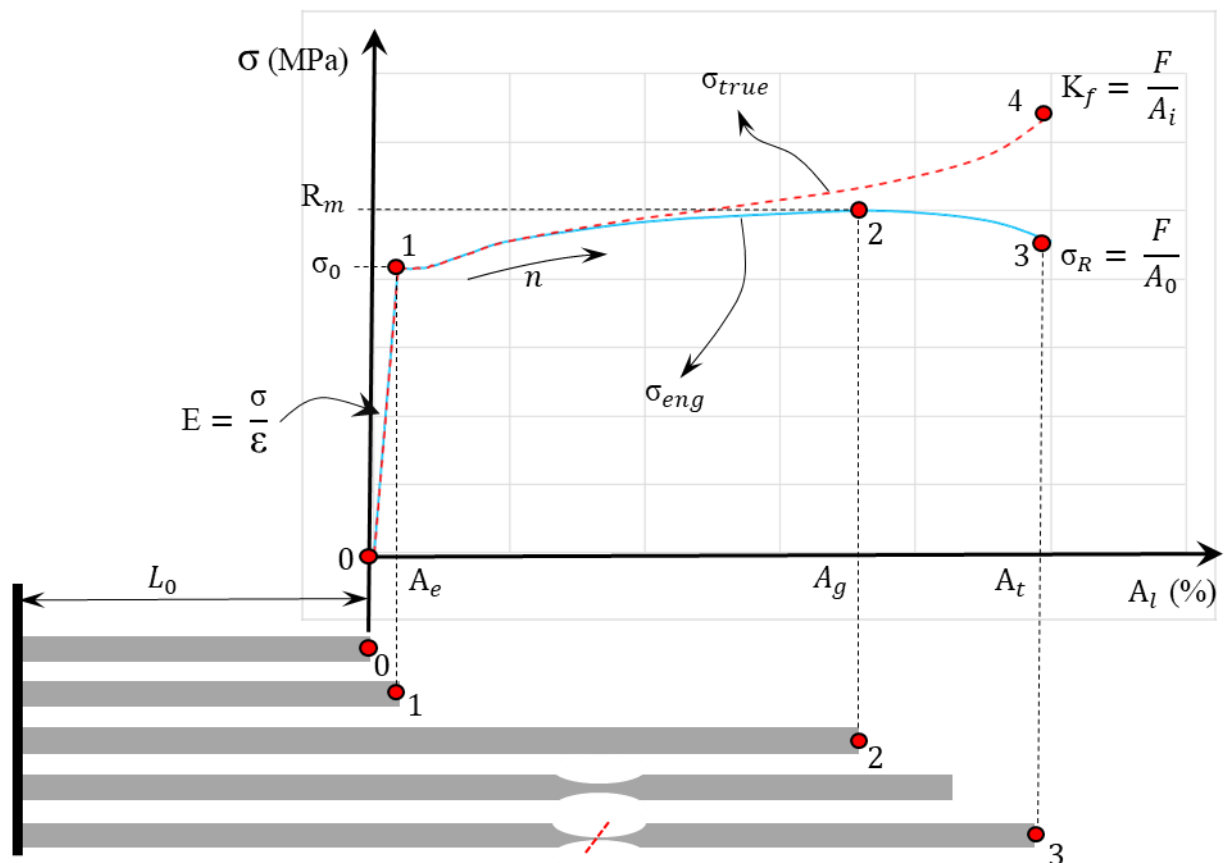


Figura 2.6 – Curva de tensão x deformação.

Dados obtidos através de ensaios de tração, normalmente são as curvas de tensão x deformação de engenharia. A comparação entre as curvas de tensão verdadeira (σ_{true}) e tensão de engenharia (σ_{eng}) mostra que, para valores de deformações pequenos, não há grandes diferenças entre ambas, porém, na medida em que as deformações aumentam, há uma diferença

significativa nos valores de tensão. A razão pelo qual a tensão de engenharia ser inferior se deve ao fato de a tensão ser calculada sobre a área inicial da seção. Para efeitos de simulação, as tensões de engenharia são convertidas para tensões verdadeiras através das equações 2.1 e 2.2 pelos softwares no instante em que o modelo de material é elaborado.

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} (1 + \varepsilon_{eng}) \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln (1 + \varepsilon_{eng}) \quad (2.2)$$

2.3.1. Coeficiente de encruamento (n)

Na conformação de materiais, o coeficiente de encruamento é utilizado para descrever o comportamento do material no regime plástico. Portanto, ela representa o intervalo entre o alongamento uniforme, ou seja, do início do escoamento até o limite de resistência do material. A curva de escoamento é representada pelo expoente de encruamento e ele descreve o quanto o material distribui as deformações ao longo da chapa evitando a formação de falhas localizadas. O procedimento para determinar o expoente de encruamento através de um ensaio de tração uniaxial é regulamentado pela norma DIN EN ISO 10113.

Softwares de simulação utilizam diferentes aproximações matemáticas para descrever o comportamento do material no regime plástico. Estas aproximações, além de caracterizarem, devem extrapolar a curva de deformação até 1 para que não ocorram problemas de convergência nos instantes em que as tensões ultrapassem o limite de resistência e ocorra a falha do material. Dentre as aproximações matemáticas utilizada pelos softwares, podemos citar Ludwik, Swift, Ghost e Hockett-Sherby. O presente estudo utilizou a aproximação de Ludwik (1909), expressa por:

$$\sigma_{true} = \sigma_0 + K \cdot \varepsilon^n \quad (2.3)$$

Em que σ_{true} representa a tensão verdadeira em MPa, σ_0 a tensão de escoamento em MPa, K é o coeficiente de resistência em MPa, ε_{true} é a deformação verdadeira e n é o coeficiente de encruamento.

Quanto maior o valor do coeficiente de encruamento, maior o alongamento uniforme do material e conseqüentemente, melhor conformação mecânica. A Figura 2.7 da esquerda ilustra o resultado de uma simulação com coeficientes de encruamento alto (a) e baixo (b). Estas diferenças também podem ser observados nas curvas tensão x deformação de um ensaio de tração (Figura 2.7 direita).

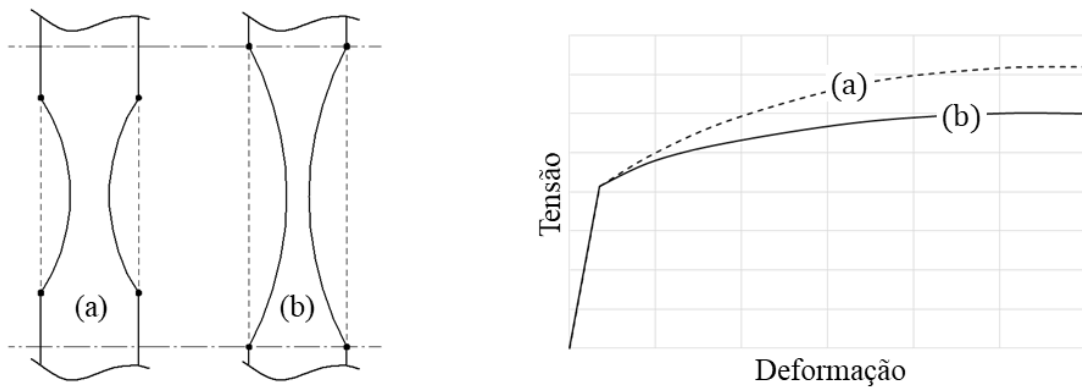


Figura 2.7 – Coeficiente de encruamento alto (a) e baixo (b)

2.3.2. Coeficiente de anisotropia ou de Lankford (r)

A capacidade de uma chapa poder ser estampada profundamente sem o aparecimento de rupturas depende, em grande parte, da resistência ao afinamento durante o processo de conformação. Essa resistência pode ser avaliada pelo coeficiente de anisotropia.

O coeficiente de anisotropia descreve a taxa da deformação plástica do material, ou seja, é a razão entre a deformação verdadeira na largura (ε_w) e na espessura (ε_t). A norma DIN EN ISO 10113 descreve o procedimento para determinar os coeficientes a partir de ensaios de tração uniaxial. Considerando a anisotropia no plano da chapa, geralmente são necessários dois parâmetros: O coeficiente de anisotropia médio e planar.

O coeficiente de anisotropia (r) é calculado através da equação 2.4, enquanto que, a anisotropia média (r_m), é dada pela equação 2.5. O coeficiente de anisotropia médio descreve a estampabilidade de um material:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2.4)$$

$$r_m = \frac{r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4} \quad (2.5)$$

Os valores de r_0 , r_{45} e r_{90} representam os coeficientes de anisotropia nos sentidos de laminação 0° , 45° e 90° , respectivamente.

O segundo parâmetro, é o coeficiente de anisotropia planar (Δ_r). Este valor indica a diferença de comportamento que o material pode apresentar no plano da chapa e é calculado através da equação 2.6.

$$\Delta_r = \frac{r_0 - 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{2} \quad (2.6)$$

Materiais isotrópicos possuem $r_m = 1$ e $\Delta r = 0$. Em processos de embutimento, valores de anisotropia altos são desejados, quanto maior este valor, melhor a conformação mecânica do material. A Figura 2.8 possui um exemplo com resultados de uma simulação usando diferentes valores de anisotropia média e planar.

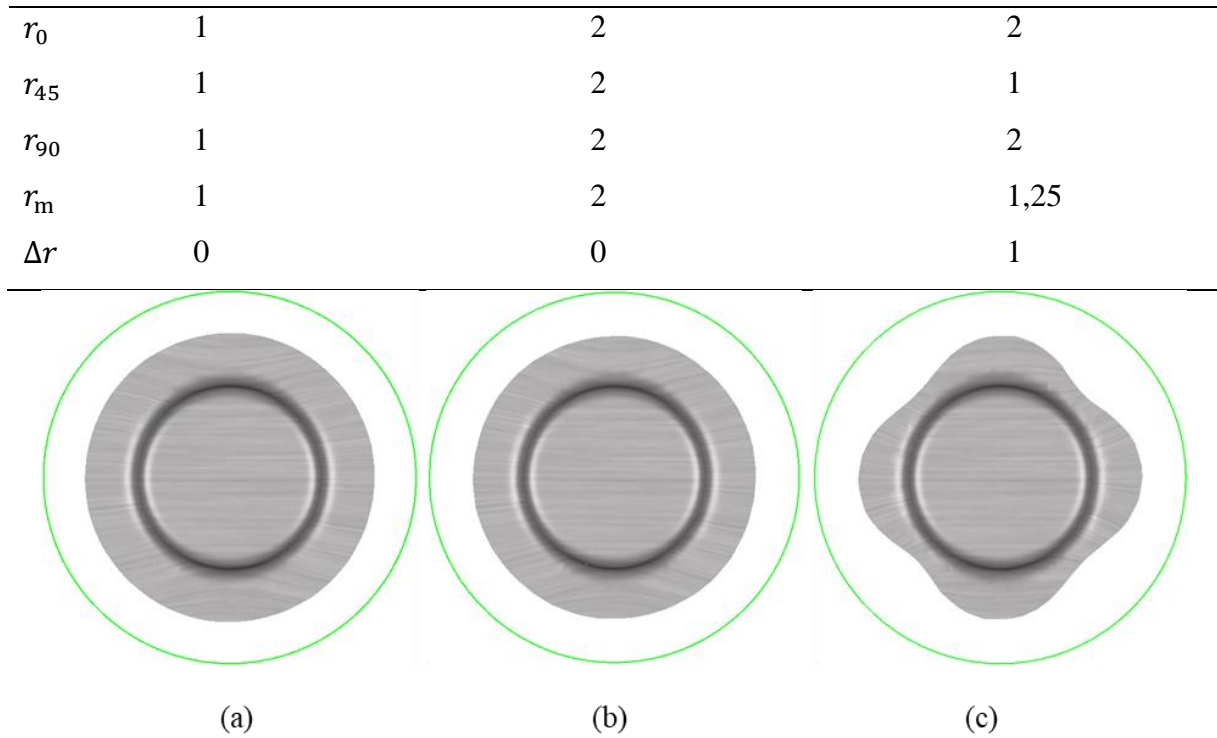


Figura 2.8 – Resultados da conformação para coeficientes de anisotropia média igual a 1 e planar igual a 0 (a), anisotropia média igual a 2 e planar igual a 0 (b) e anisotropia média igual a 1,25 e planar igual a 1 (c)

Os coeficientes de anisotropia são utilizados pelos softwares para as aproximações matemáticas do modelo de plasticidade.

2.3.3. Modelo de plasticidade do material

Com deformações elásticas, o corpo retorna à sua condição inicial quando as tensões são removidas e o estado de tensão e deformação sob carregamentos elásticos estão relacionados à lei de Hooke. Sendo assim, a tensão não causará nenhuma deformação plástica, segundo Hosford *et al.* (2007). Ao contrário da deformação elástica, um corpo submetido a uma tensão superior à tensão de escoamento será deformado plasticamente, mesmo após a remoção do carregamento.

O primeiro modelo de plasticidade foi desenvolvido por Tresca em 1870 e melhorado em 1913 por von Mises. A Figura 2.9 traz uma comparação entre os dois modelos no espaço tridimensional e com a projeção sobre o plano formado por $\sigma_1\sigma_2$.

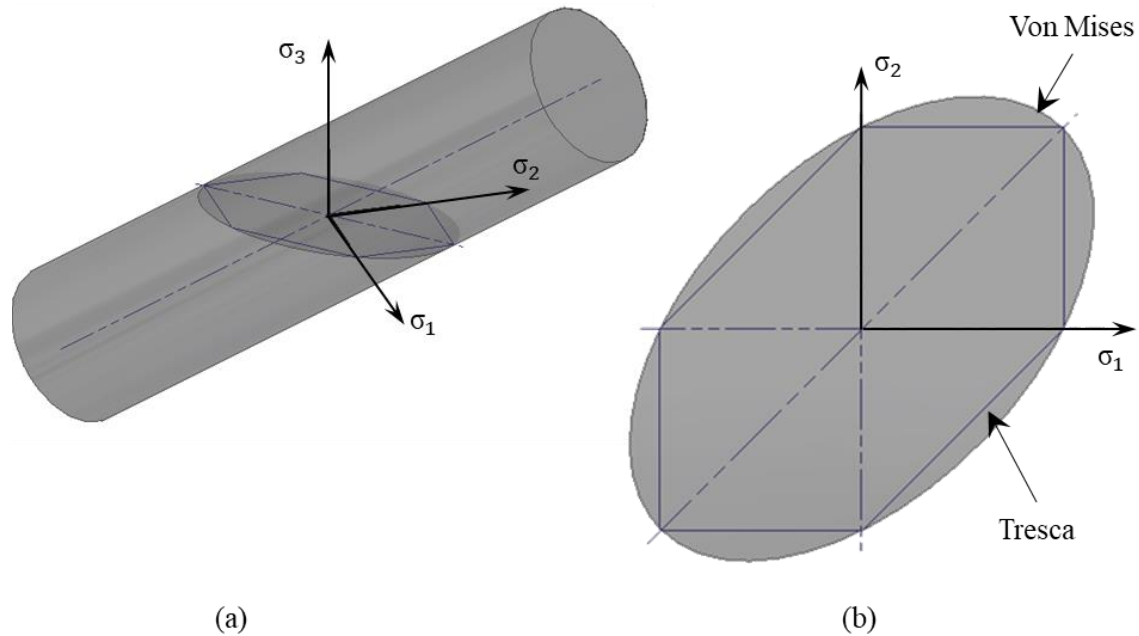


Figura 2.9 – Modelo de plasticidade de Tresca e von Mises no espaço tridimensional (a) e a projeção sobre o plano $\sigma_1\sigma_2$ (b). [Adaptado de Hosford *et al.*, 2007]

Na conformação de chapas, normalmente a componente da espessura é muito menor que as demais dimensões da peça e, portanto, pode ser ignorada no estado tri-axial de tensões, formando assim, um estado plano de tensões formado por σ_1 e σ_2 .

O modelo de plasticidade determina as condições de tensões multiaxiais que causam o escoamento do material. A escolha do modelo é de grande importância para prever falhas durante a deformação, assim como no cálculo do retorno elástico da peça.

A superfície de escoamento pode ser obtida através de uma série de ensaios que caracterizam pontos específicos conforme ilustrado na Figura 2.10.

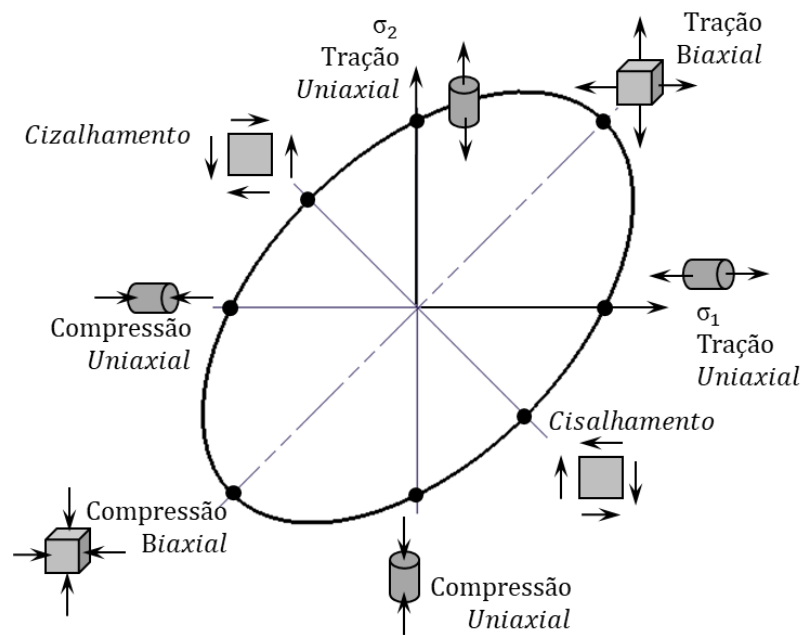


Figura 2.10 – Ensaio para determinar a superfície de escoamento

Modelos matemáticos realizam aproximações utilizando dados obtidos em ensaios de tração uniaxiais. Dentre os modelos disponíveis nos softwares de simulação, podemos citar Hill, Barlat e BBC. O presente estudo utilizou o modelo de Hill, o qual assume que a superfície de escoamento é representada por uma função quadrática definida a partir dos coeficientes de anisotropia nos três sentidos da laminação (r_0, r_{45} e r_{90}) juntamente com a tensão de escoamento obtido no ensaio de tração.

Este modelo foi desenvolvido por Hill em 1990, que propôs uma função de escoamento quadrática melhorada utilizando como referência o modelo de von Mises (Hill, 1990). Atualmente, Hill90, como foi nomeado, é um modelo amplamente utilizado na representação da anisotropia devido à sua formulação simples e facilidade de obter dados a partir de ensaios de tração uniaxiais.

2.3.4. Curva limite de conformação (CLC)

As curvas limites de conformação são utilizadas para avaliar a criticidade das deformações do material durante os processos de conformação, correlacionando os valores de deformações principais máximas e mínimas. Os materiais possuem diferentes comportamentos quando submetidos a uma combinação de deformações, o que torna esta avaliação mais complexa. Neste sentido, as curvas são utilizadas para prever falhas mecânicas no processo comparando as deformações sofridas pelo material com as curvas obtidas em laboratórios.

Existem duas técnicas para obtenção da CLC: a experimental e a teórica. A norma DIN EN ISO 12004-2 descreve dois métodos para determinar esta curva experimentalmente, sendo o ensaio de Nakajima e o de Marciniak. Os ensaios fornecem pontos para as deformações principais, as quais, conectadas, formam a curva limite de conformação. A interseção desta curva com o eixo da deformação principal máxima é chamada de limite inferior da CLC (FLC_0) conforme indicado na Figura 2.11.

As curvas teóricas são estimadas usando-se algumas propriedades mecânicas do material, a análise de critérios de instabilidade e as superfícies de fluências (Fernandes, 1999). Os fatores de maior influência para determinação da curva e translação dela sobre o eixo da deformação ε_1 são a espessura da chapa, a tensão de escoamento, o limite de resistência, a anisotropia e o coeficiente de encruamento.

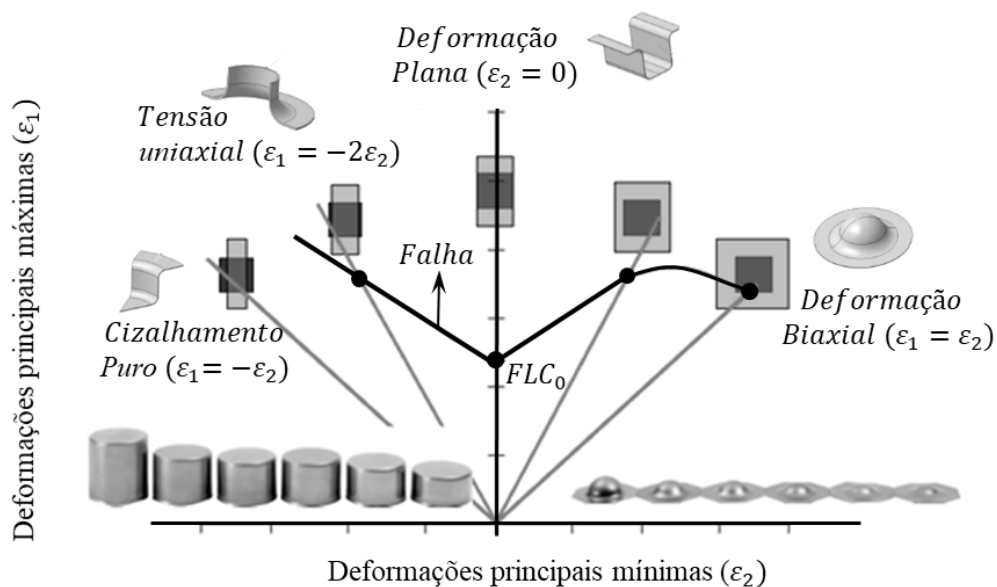


Figura 2.11 – Curva limite de conformação com os modos de deformação

O software de simulação empregado no presente trabalho permite criar a CLC através da importação dos pontos obtidos experimentalmente ou com aproximações de modelos matemáticos. Dois modelos são disponibilizados: Keeler e Arcelor [Autoform, 2019]. O presente estudo adotou o modelo Arcelor (Cayssials *et al.*, 1998).

2.4. Interação entre ferramentas e chapa: Coeficiente de atrito

O conhecimento dos micro mecanismos de contato que envolvem a interação entre as asperezas das superfícies da ferramenta e chapa juntamente com o lubrificante é de grande

importância para o entendimento dos efeitos tribológicos e para a melhoria das técnicas tribológicas no processo de conformação de chapas metálicas (Lenard 2002).

Embora o atrito não seja desejável em muitos casos, ele exerce um aspecto fundamental no processo de conformação mecânica, pois ele auxilia no controle do fluxo de material enquanto a chapa está sendo conformada. Pode-se afirmar ainda que, mais importante que o aumento ou redução do atrito, é o controle sobre ele. Neste sentido, é de grande importância o conhecimento de todos os fatores que o compõem. Helman *et al.* (1993) destacam que na conformação mecânica dos metais o atrito está presente em todos os processos, sendo geralmente considerado nocivo, influenciando no estado de tensões necessário para deformação, gerando fluxos irregulares de metal durante o processo, influenciando na qualidade superficial do produto e aumentando o desgaste das ferramentas dentre outros aspectos citados.

Folle (2012) relata a importância de utilizar modelos mais realísticos para analisar o fenômeno de atrito na estampagem, principalmente em superfícies de grandes dimensões. Destaca ainda que, em alguns casos, as simulações numéricas não oferecem resultados corretos devido ao uso de modelos de atrito muito simplificados.

Gåård (2008) destaca que, do ponto de vista tribológico, as regiões do prensa chapas e raios da matriz são de maior interesse no processo de embutimento, pois estes são locais onde ocorrem as maiores tensões durante o movimento relativo da chapa conforme ilustrado na Figura 2.12, ressaltando ainda que, como os raios da matriz apresentam as maiores pressões de contato, conseqüentemente, serão as regiões de maiores desgastes.

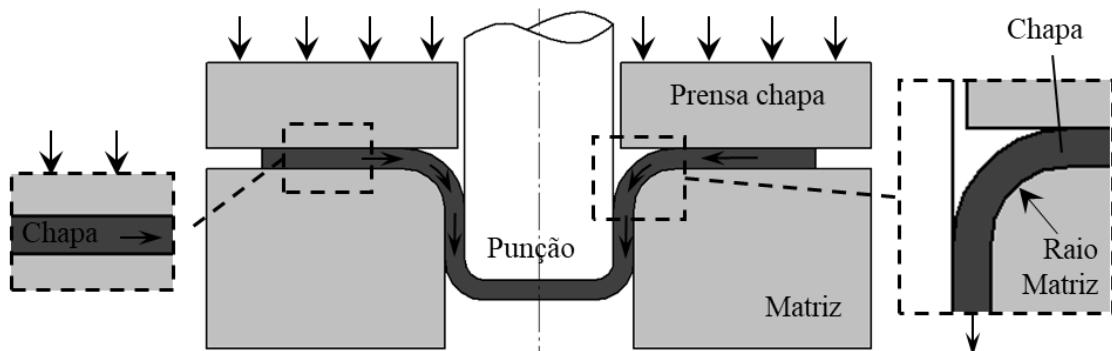


Figura 2.12 – Regiões críticas em um processo de embutimento [Adaptado de Gåård, 2008]

Como aspecto fundamental no processo, o sistema tribológico será abordado no capítulo seguinte.

3. TRIBOLOGIA NA CONFORMAÇÃO

No processo de conformação de chapas, o atrito gerado no contato entre as ferramentas e a chapa é um parâmetro importante que influenciará nos resultados obtidos, principalmente no fluxo do material, falhas, qualidade superficial do produto e na vida útil da ferramenta (Nielsen 2018).

A estrutura de um sistema tribológico é composto basicamente por dois objetos (ferramenta e chapa), um componente intermediário (lubrificante) e o meio ambiente. Sobre eles, atuam os carregamentos e a velocidade de deslizamento relativo. O objeto “ferramenta”, tem como suas principais características o material empregado para fabricação, suas propriedades mecânicas, geometrias, acabamento superficial e revestimento. O objeto “chapa”, também é composto com um material e suas propriedades mecânicas, geometria, acabamento superficial e revestimento, em quanto que, o lubrificante possui características de viscosidade, resistência ao cisalhamento, resistência a pressões e temperatura de trabalho. A contribuição do meio ambiente é com a temperatura e umidade relativa do ar.

Souza (2008) afirma que atrito, desgaste e lubrificação estão presentes durante a operação de conformação de chapas, atuando de formas diferentes em cada região de contato. Ressalta ainda a complexidade em determinar um valor característico para o coeficiente de atrito. Na Figura 3.1 é possível verificar as regiões de contato entre as ferramentas durante um processo de embutimento, onde na região 1a existe a interação entre o prensa chapa, o lubrificante e a chapa. Na região 1b, atuam a matriz, o lubrificante e a chapa. Nas regiões 2 e 4 ocorre o contato da chapa com os raios da matriz e punção respectivamente, e entre elas, há um filme de lubrificante, enquanto que na região 3, existe o contato entre a chapa e o punção com uma camada de lubrificante entre eles.

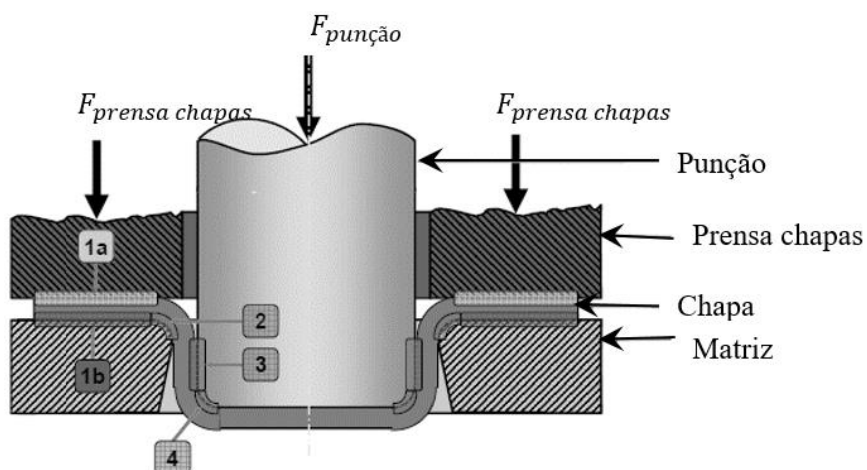


Figura 3.1 – Regiões de contato em um processo de embutimento [adaptado de Souza, 2008]

3.1. Breve revisão histórica do atrito na conformação

Em 1966, H. Peter Jost utiliza pela primeira vez o termo tribologia em um relatório para o comitê do departamento inglês de educação e ciência. Nele constava o termo definido como a ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas, segundo relatado por Sinatora (2005).

O termo tribologia é derivado do grego Τριβο (Tribo – Esfregar, atritar, friccionar) e Λογος (Logos – estudo) que em tradução literal significa “Estudo do Atrito”, ou a ciência que estuda o atrito. A tribologia está presente em todas interfaces onde ocorre um movimento relativo entre duas superfícies e requer conhecimentos multidisciplinares em função dos fenômenos físico/químicos envolvidos simultaneamente. Ela é definida como a ciência e a tecnologia de interação entre superfícies com movimentos entre si e dos fenômenos que disso ocorrem, segundo Kajdas (1990), afirmando ainda, que a tribologia engloba a ciência do atrito, desgaste e lubrificação, explorando aspectos físicos, químicos, mecânicos e metalúrgicos do movimento relativo.

Sinatora (2005) afirma ainda que algumas pinturas rupestres e descobertas arqueológicas testemunham a participação da tribologia na história da humanidade, principalmente para redução do atrito. Relata que em uma tumba egípcia, foi encontrado o que parece ser o primeiro registro pictórico de um tribologista no Egito em 2400 AC conforme ilustrado na Figura 3.2.

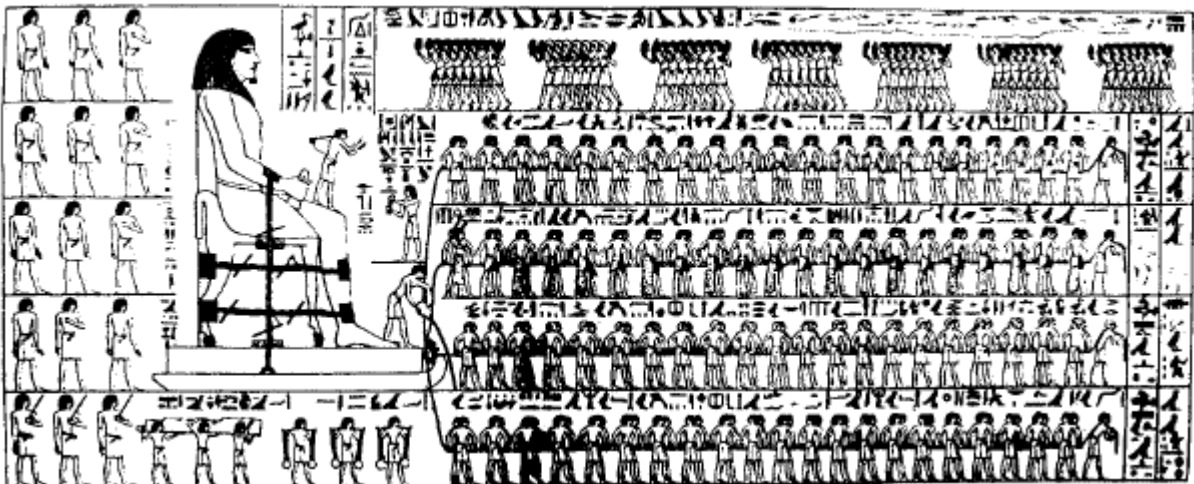


Figura 3.2 – Pintura rupestre encontrada no Egito 2400 AC. [Sinatora, 2005]

Em 2018, Nielsen *et al.* realizaram uma pesquisa buscando os desenvolvimentos realizados no âmbito da tribologia em conformação dos últimos 80 anos e destacam que a teoria da adesão foi a primeira teoria quantitativa sobre o atrito, a qual foi proposta por três diferentes

grupos de pesquisa, por volta de 1940, sendo eles Holm (1938), Ernst e Merchant (1940) e Bowden e Tabor (1942). A teoria foi baseada na análise das deformações plásticas localizadas nas asperezas de duas superfícies metálicas em contato e do cisalhamento durante a adesão do material e soldagem das asperezas. Relatam que Bowden e Tabor observaram que a linearidade entre a pressão de contato normal e o atrito no modelo de Amontons-Coulomb desaparecem quando a pressão de contato é muito alta. Afirmam que a solução deste problema foi proposta por Orowan em 1943, que introduziu a tensão cisalhante como o limite superior, consagrando assim, a contribuição mais importante desde a sua descoberta, no modelamento do atrito na conformação de chapas. Na década de 70 a grande maioria dos estudos estava voltada para determinação da área real de contato em altas pressões de contato, quando a deformação das asperezas ainda não eram previstas. Nos anos 80, destacam-se os estudos voltados para a influência da rugosidade da superfície nos parâmetros de atrito, deformações plásticas das asperezas, e começam a ser estudados os primeiros modelos numéricos relacionados ao atrito. Já na década de 90, os modelos numéricos começam a estudar formas mais complexas principalmente na formulação das asperezas e deformações plásticas em modelos de larga escala. Outros estudos estavam voltados para avaliar a influência das deformações em diferentes direções num âmbito 2D e mais tarde, em 3 dimensões. Após a virada do milênio, os desenvolvimentos em algoritmos numéricos das décadas passadas continuaram crescendo no intuito de realizar simulações numéricas em larga escala, ou seja, em um ambiente industrial ao invés de estudos acadêmicos. As primeiras simulações estabeleciam contatos entre peça e ferramenta com modelos de atrito locais baseado em superfícies rugosas na simulação de processos de embutimento. Na sequência, coeficientes de atrito começaram a ser estimados utilizando a topografia de superfícies reais. Atualmente, é possível criar modelos de atrito baseado em superfícies topográficas para a chapa e ferramenta, introduzindo parâmetros de tipo e quantidade de lubrificante, pressões de contato, velocidades e taxas de deformações, temperatura de trabalho e propriedades mecânicas da chapa. Nielsen *et al.* (2018) relata ainda que a expectativa é de que no futuro os códigos de elementos finitos sejam mais comumente utilizados e melhorados com novos desenvolvimentos para os modelos tribológicos.

3.2. Mecanismos de atrito

Muitos estudos realizados ao longo da história fundamentaram a origem das teorias relativas aos mecanismos de atrito e continuam fomentando a necessidade de novos desenvolvimento com o intuito de conhecer e mensurar todas as variáveis envolvidas nele.

Sabe-se, que as superfícies, de uma forma geral, não são planas conforme já relatado no capítulo 1.1. Superfícies obtidas através de processo de usinagem e fabricação são sempre rugosas e contaminadas por elementos sólidos e líquidos. Essa rugosidade provinda da fabricação, quando em contato com outra superfície, faz com que os picos sejam deformados plasticamente na medida em que aumenta a pressão de contato durante o deslizamento delas. Com base nos estudos dos capítulos anteriores, pode-se afirmar que o fenômeno do atrito não corresponde apenas de propriedades dos materiais envolvidos, mas sim, de diversos fatores tribológicos assim como, de processos.

Vakis *et al.* (2018) destacam que todos os fenômenos tribológicos que ocorrem perto das interfaces entre sólidos são determinados pelas interações atômicas dentro e entre os sólidos, bem como aqueles entre os átomos das substâncias presentes na interface. Estas interações dão origem a teorias e modelos tribológicos da física em macro escala. Destacam ainda que estes modelos são um exemplo de condições multifísicas conforme Figura 3.3 em que são encontrados fenômenos de natureza mecânica (sólida e fluida), térmica, eletromagnética, metalúrgica, quântica entre outras.

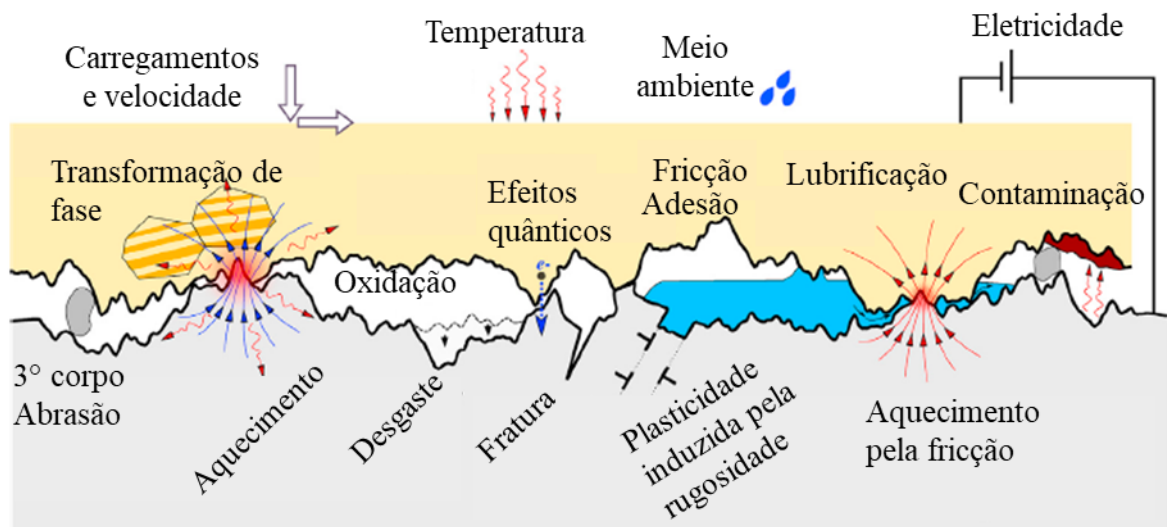


Figura 3.3 – Representação das interações tribológicas de natureza multifísica [Adaptado de Vakis *et al.* 2018]

Segundo Lenard (2002), os mecanismos de atrito dependem das particularidades do sistema em análise, destacando que as causas mais frequentes do atrito são a deformação elástica e plástica das asperezas, a deformação elástica e plástica devido a formação de asparas, o fenômeno de adesão e a deformação das camadas superficiais de óxidos acima da zona de deformação plástica.

3.3. Lubrificação na conformação

Os lubrificantes têm muitos propósitos no processo de conformação de chapas. Alguns lubrificantes são aplicados ainda na siderúrgica no momento da laminação do material, outros são aplicados após o corte das chapas e ainda, os que são aplicados diretamente sobre a chapa durante o processo de conformação. As características necessárias para os lubrificantes normalmente são muitas, como para limpeza, compatibilidade com outras etapas do processo, custo, eficácia para determinado processo, capacidade de armazenamento, soldabilidade, solubilidade, toxicidade e conformação conforme destacado por Soliman (2006).

Em termos de conformação, os lubrificantes possuem duas funções principais: o controle do fluxo do material durante a conformação e criar uma camada protetora entre a chapa e ferramenta com o objetivo de evitar desgastes abrasivos e adesivos da ferramenta. Rodrigues *et al.* (2005) citam que é recomendado a utilização de lubrificantes no processo de conformação de chapas metálicas e eles devem ser determinados de tal forma que satisfaçam todos os requisitos exigidos pelas operações. Destacam ainda que os elementos lubrificantes normalmente encontrados são óleos minerais, óleos naturais ou vegetais, fluídos sintéticos, lubrificantes compostos, aquosos e ainda os revestimentos.

Shaeffer (2005) cita que a lubrificação pode ser caracterizada como uma camada fina de determinado material com baixa resistência ao cisalhamento com a função de reduzir o atrito e desgaste entre as superfícies de corpos sólidos que estejam em movimento, como é o caso dos óleos. Cita ainda que o uso de filmes plásticos é recomendado para operações de embutimento. Wang *et al.* (2014), afirmam que a integridade do filme lubrificante possui uma grande importância no atrito e no desgaste da ferramenta.

Em 2004, Stoeterau classifica a lubrificação em cinco grandes áreas de estudo, sendo, lubrificação hidrodinâmica, elasto-hidrodinâmica, limite, sólida e hidrostática. Entretanto, Ter Haar (1996), Woydt *et al.* (2010) e Folle (2012), caracterizam os regimes de lubrificação em sólido ou limite, na qual não existe lubrificação entre as interfaces de contato, regime de lubrificação mista, onde a chapa está envolta com uma pequena camada de lubrificante e regime hidrodinâmica, acontece quando uma espessa camada de lubrificante está presente entre as interfaces. Estes regimes estão baseados na curva de Stribeck conforme ilustrado na Figura 3.4.

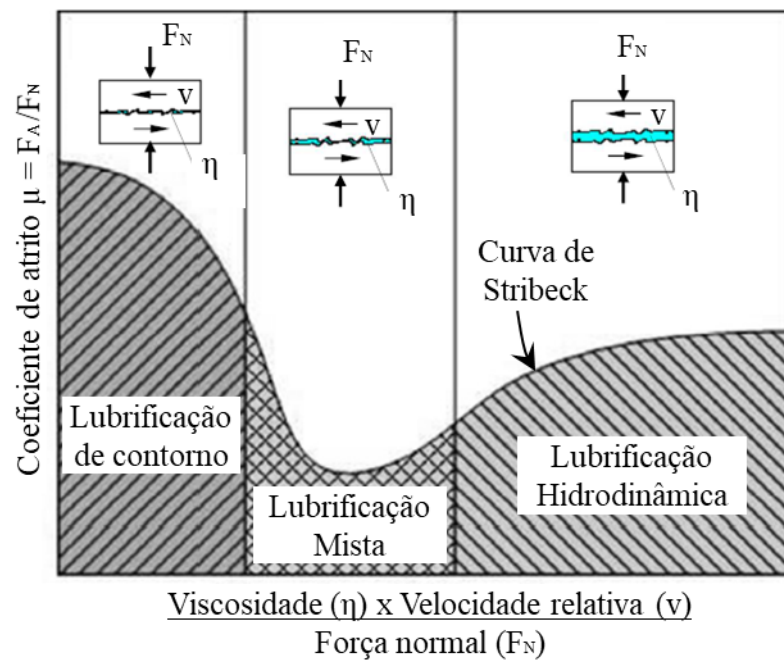


Figura 3.4 – Regimes de lubrificação na curva de Stribeck. [Adaptado de Stribeck. 1902]

Em 1982, Kudo *et al.* descobriram que, a tensão de atrito aumenta com a viscosidade do lubrificante e velocidade de conformação no regime misto de lubrificação, com um ensaio de tracionamento de tiras. O mesmo fenômeno foi observado por Mizuno *et al.*, também em 1982. Eles nomearam este mecanismo de lubrificação como Plasto-Hidrodinâmico.

Nos últimos anos, os estudos da curva de Stribeck foram focados na teoria da inovação e aplicações de simulação introduzindo parâmetros de rugosidade das superfícies micrométricas e regimes de lubrificação em modelos numéricos. Hol, *et al.* (2015) introduziram elementos interfaciais de lubrificação mista nas equações diferenciais que governam o problema e implementaram em um software de elementos finitos voltado à conformação.

3.4. Forças na conformação

A componente de forças resultantes nas ferramentas de um processo de conformação é a somatória de todas as forças envolvidas, seja de conformação, de corte, de atrito, dos atuadores, reações nas ferramentas, entre outras. Existe ainda a componente de forças e tensões atuando sobre regiões específicas da peça durante a conformação, sejam elas de tração quanto de compressão. Folle (2012) comenta que a chapa é submetida a diferentes tipos de tensões e deformações durante a conformação até que o produto atinja a forma final como demonstrado na Figura 3.5.

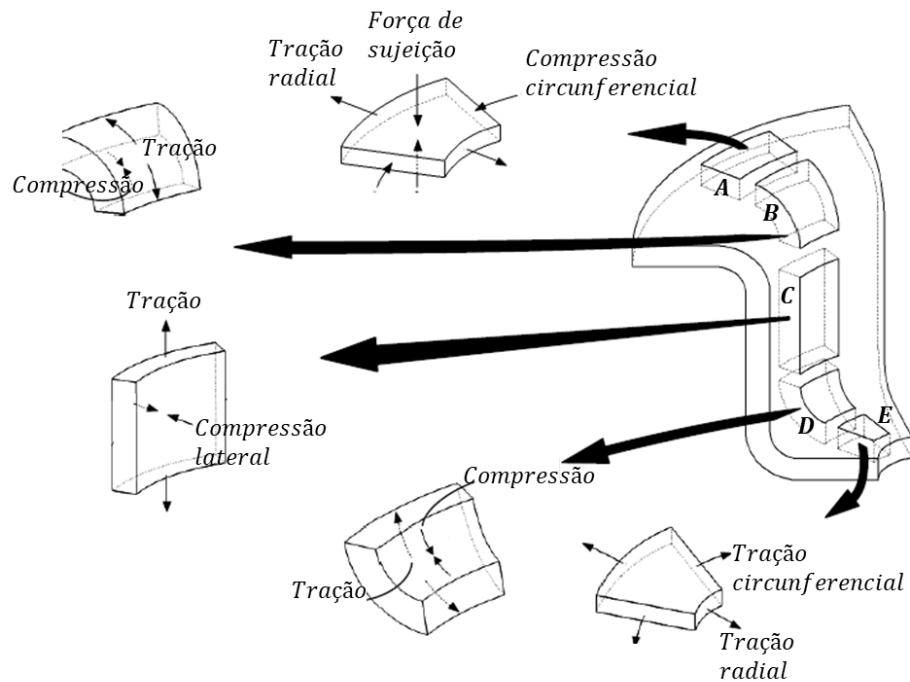


Figura 3.5 – Tensão atuantes em um processo de embutimento. [Adaptado de Folle, 2012]

Garcia *et al.* (2000) cita que em um processo de embutimento, a componente de forças do punção é o somatório de vários fatores, como a força para deformação ideal originada pelo encruamento do material na conformação plástica, 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 visualizado na Figura 3.6.

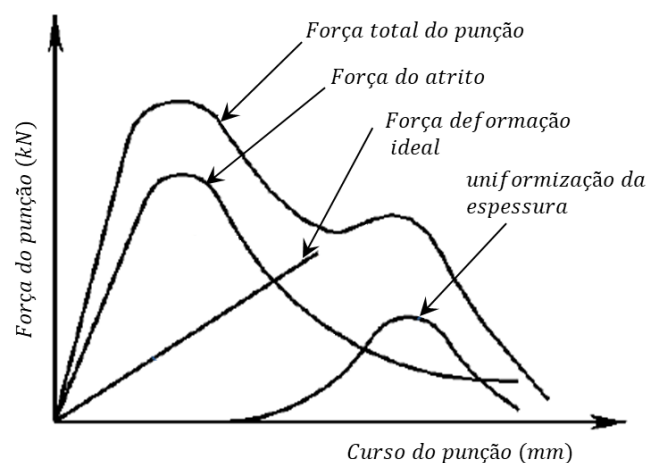


Figura 3.6 – Gráfico de forças resultantes de um processo de embutimento. [Adaptado de Garcia *et al.* (2000)]

De acordo com Bowden e Tabor (1954), o coeficiente de atrito segundo Coulomb é definido através da equação 3.1.

$$\mu = \frac{F_{Atrito}}{F_{Normal}} \equiv \frac{\tau_i \cdot A_r}{p_r \cdot A_r} \quad (3.1)$$

Nesta equação, τ_i representa a tensão cisalhante na interface de contato, A_r é a área real de contato e p_r representa a pressão de contato real.

Stoeterau (2004) constatou que o coeficiente de atrito estático é superior ao coeficiente de atrito cinético. A relação entre a força máxima nas interfaces e a força normal, resulta no coeficiente de atrito estático, crescendo linearmente até o instante em que inicia o movimento relativo entre os corpos. Neste instante, há uma queda na força de reação do atrito, ou seja, uma redução no coeficiente de atrito cinético.

Na simulação, o cálculo da força de atrito para o modelo de Coulomb é considerada linearmente proporcional à força aplicada até o instante em que se inicia o movimento relativo entre as superfícies. A partir deste instante, a força de atrito é reduzida a um valor constante igual ao valor definido como dado de entrada.

3.5. Ensaios para determinação do coeficiente de atrito

No processo de conformação, a peça é formada entre um punção e uma matriz em que o punção conforma a chapa para dentro da cavidade da matriz. As forças de atrito sobre os raios da matriz e nas faces do punção influenciam na deformação da peça. Paralelamente, em muitos casos, forças de atrito são adicionadas à operação para aumentar o nível de deformação da chapa segundo Hao *et al.* (1999), principalmente em situações em que haja raios muito grandes no produto e peças com poucas profundidades de embutimento,.

Em conformação de chapas, as forças de atrito são importantes condições de contorno que devem ser conhecidas para o modelamento analítico e numérico. Cada região do processo possui uma forma diferente de interação entre a chapa e as ferramentas, que podem ser avaliadas separadamente com ensaios tribológicos. Os ensaios podem fornecer informações sobre coeficientes e forças de atrito apuradas para o desenvolvimento e calibração do modelo de atrito.

Em 1978, Ducan *et al.* desenvolveu um teste de tracionamento de tiras que foi largamente utilizado. Neste ensaio, a tira da chapa é posicionada sobre as faces cilíndricas dos pinos para simular o tracionamento e processo de conformação (Figura 3.7). No teste, a tira é fixada em uma das extremidades e as deformações são medidas na outra através de um extensômetro, e é com a leitura destas deformações que são calculadas as forças de tracionamento, utilizando as características de tensão x deformação do material. Assumindo

ainda que o coeficiente de atrito é constante em toda superfície dos pinos, é possível calcular o coeficiente de atrito através das tensões de tracionamento medidas.

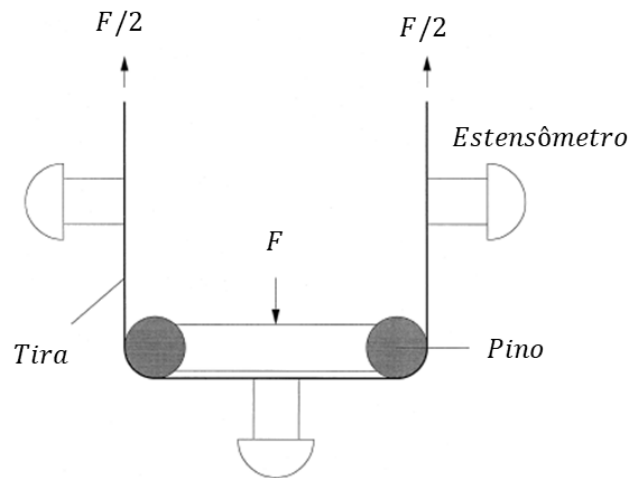


Figura 3.7 – Ensaio de atrito com tracionamento de tiras. [Adaptado de Ducan *et al.*, 1978]

Ter Haar (1996) desenvolveu um dispositivo para testes de atrito tracionando a tira considerando deformações elásticas e fenômenos de deslizamento da chapa através de rolos rotativos conforme ilustrado na Figura 3.8.

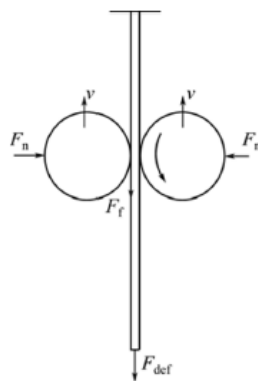


Figura 3.8 – Dispositivo de teste de atrito. [Adaptado de Ter Haar, 1996]

Em 1999, Hao *et al.* desenvolveram dois novos ensaios de tracionamento de tiras para mensurar o coeficiente de atrito de acordo com a deformação da tira sobre uma superfície cilíndrica de pinos. Os dois ensaios denominados teste de atrito em forma de “U” e em forma de “L” estão ilustrados na Figura 3.9, a e b respectivamente. A grande vantagem deste ensaio é que a tensão da tira pode ser medida diretamente, não sendo necessária a medição das deformações para mensurar o coeficiente de atrito.

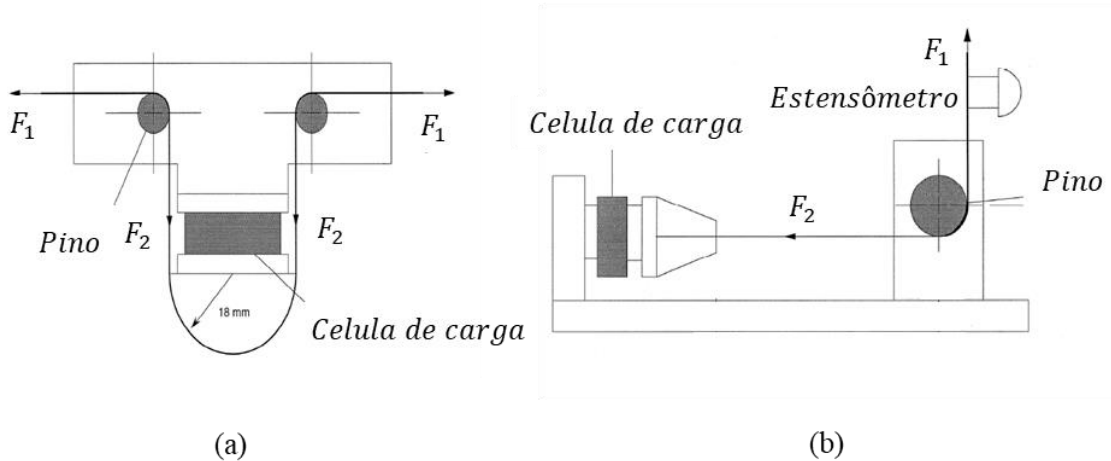


Figura 3.9 – Ensaio de atrito com tracionamento de tiras em formato “U” (a) e “L” (b).
[Adaptado de Hao *et al.*, 1999]

Ainda em 1999 Sanchez propôs um sistema experimental baseado em testes de estiradores, denominados prende rugas. No teste, a tira é fixada entre pinos cilíndricos suportadas por rolamentos, considerando que o coeficiente de atrito dos rolamentos seja baixo o suficiente para ser ignorado, e a tira é tracionada entre os rolos conforme Figura 3.10, medindo a força de tracionamento e a força de resistência ao desdobra da chapa sob condições de atrito.

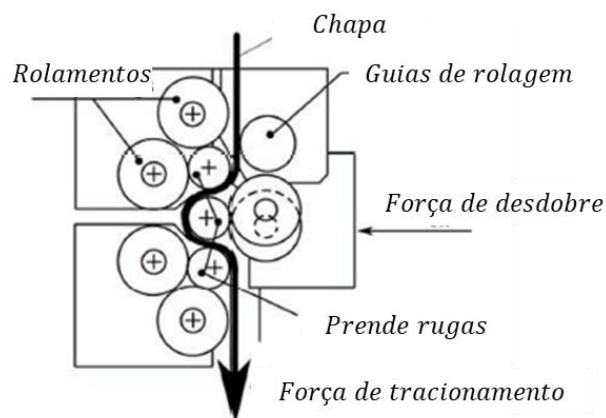


Figura 3.10 – Dispositivo de teste de atrito simulando prende rugas. [Adaptado de Sanchez, 1999]

Bay *et al.* (2008) desenvolveram uma nova forma de realizar testes com simulação das regiões frequentemente encontradas em um processo de conformação. Três dos testes representam condições de atrito localizados nas flanges, denominados tracionamento de tiras (1), de estirador (2) e de tracionamento com compressão tangencial (3) conforme visto na Figura 3.11. As regiões com curvaturas, principalmente de raios da matriz, são representados por ensaios denominados dobramento sob tensão (4), regiões de transição que combinam áreas

de flanges e curvaturas da matriz são representados por um ensaio de dobramento com compressão tangencial (5), as áreas onde ocorrem laminação de parede são representadas por um ensaio de redução de espessura (6) enquanto que, os ensaios de tracionamento sob tensão (7) e estiramento esférico (8) representam um embutimento realizado pelos raios e face inferior do punção, respectivamente. Todos os testes consideram fatores como pressão de contato, velocidade de deslizamento e distância percorrida nos ensaios.

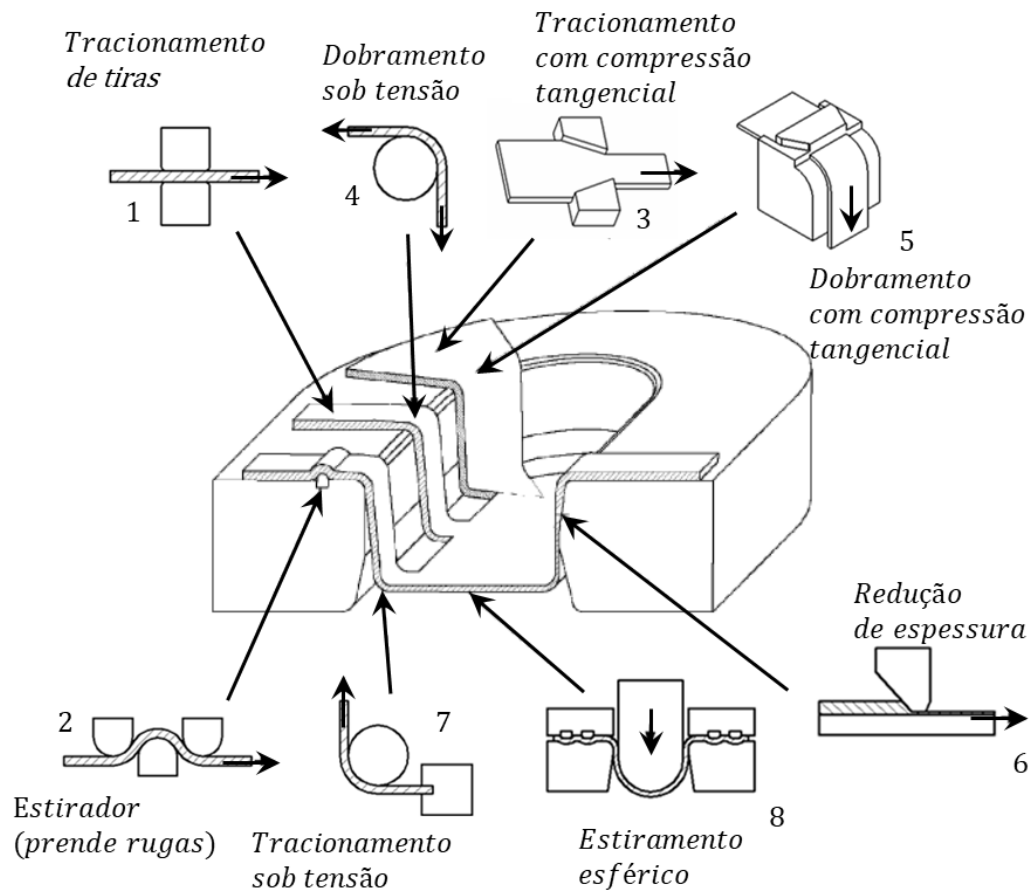


Figura 3.11 – Diagrama cinemático dos testes de atrito. [Adaptado de Bay *et al.*, 2008]

Ao longo dos anos, além de institutos de pesquisa, empresas têm realizados estudos com o objetivo de mensurar e identificar os mecanismos do atrito, como é o caso da empresa Bruning Tecnometal LTDA, que desenvolveu uma máquina para ensaios de atrito do tipo tracionamento de tiras, Figura 3.12. Neste ensaio, a chapa é fixada por uma das extremidades sobre a mesa móvel da máquina. A ferramenta é acoplada no cabeçote móvel e pressionada sobre a chapa através de um cilindro hidráulico. O condicionador de sinais faz a leitura das células de carga que mensuram a força de contato e a reação da força de atrito. O coeficiente de atrito é calculado através da lei de Coulomb com as forças medidas pelas células de carga.

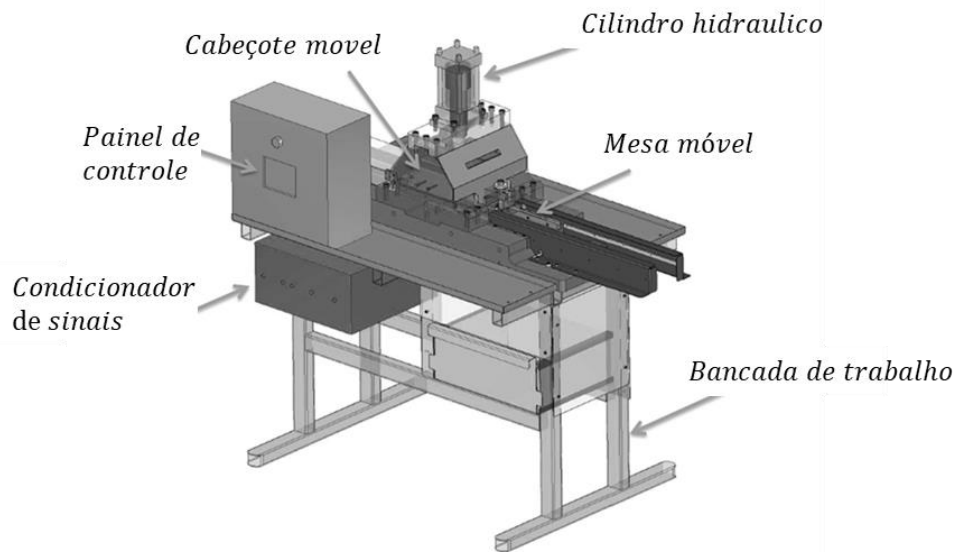


Figura 3.12 – Máquina de ensaios de atrito da empresa Bruning Tecnometal. [Adaptado de Souza *et al.*, 2015]

3.5.1. Modelos de atrito utilizados na simulação

A precisão dos resultados de um modelo de elementos finitos no processo de conformação de chapas é dependente do modelo de material, técnicas numéricas empregadas e dos algoritmos de contato segundo Karupannasamy *et al.* (2014). Os autores relatam ainda que, apesar de as condições de contato entre as ferramentas e a chapa influenciarem no coeficiente de atrito do processo, ele normalmente é adotado como constante utilizando a lei de Coulomb. Entretanto, utilizar modelos baseados em condições de contatos locais e que representem a topografia da superfície se tornam necessários para obter resultados mais realísticos. Da mesma forma, Hol *et al.* (2012) citam que frequentemente o atrito de Coulomb é utilizado em simulações de conformação utilizando valores constantes. Relatam que fatores importantes como a pressão de contato e deformações do material da chapa são desprezados. Ter Haar (1996) afirma que devido à utilização de modelos simplificados de atrito, resultados de simulações numéricas geralmente não forneciam resultados corretos.

Valberg (2010) cita que o atrito é um fator crucial para determinar se um processo industrial pode ser executado com resultados econômicos aceitáveis, e que em alguns casos, as condições reais de atrito não são conhecidas. Ressalta, entretanto, que em casos com pressões de contato mais baixas, o modelo de atrito de Coulomb pode ser apropriado para descrever o atrito entre os corpos em deslizamento.

Os softwares permitem utilizar diferentes modelos de atrito que podem ser escolhidos pelos usuários. Dentre eles, podemos citar o modelo de atrito de Coulomb, o atrito dependente da pressão de contato, e modelos avançados de atrito.

3.5.2. Atrito de Coulomb

Por padrão, é o modelo mais utilizado na simulação de processos de estampagem o qual descreve as condições de atrito entre as superfícies das ferramentas e da chapa. Como visto anteriormente, a lei de Coulomb é uma relação proporcional entre a tensão de cisalhamento de atrito e a tensão normal efetiva na área de contato.

A lei de atrito de Coulomb é válida somente quando a área de contato real aumenta proporcionalmente à força normal aplicada. Essa relação pode ser aplicada somente a pequenas forças normais.

3.5.3. Atrito dependente da pressão de contato

Estudos já relatados no capítulo 1.1 indicam que há uma redução no coeficiente de atrito com o aumento da pressão de contato. O coeficiente de atrito não é constante no processo de conformação.

Lenard (2002) relata que em uma simulação convencional do processo de conformação de chapas, a pressão de contato normal gerada é geralmente menor do que as pressões encontradas na prática. Isso se deve ao fato de que na simulação são plotadas as pressões de contato médias. Contudo destaca que há uma redução no coeficiente de atrito com o aumento da pressão de contato. Wang *et al.* (2016) observaram a dependência do atrito em função da pressão de contato em um ensaio com materiais de alta resistência conforme ilustrado na Figura 3.13.

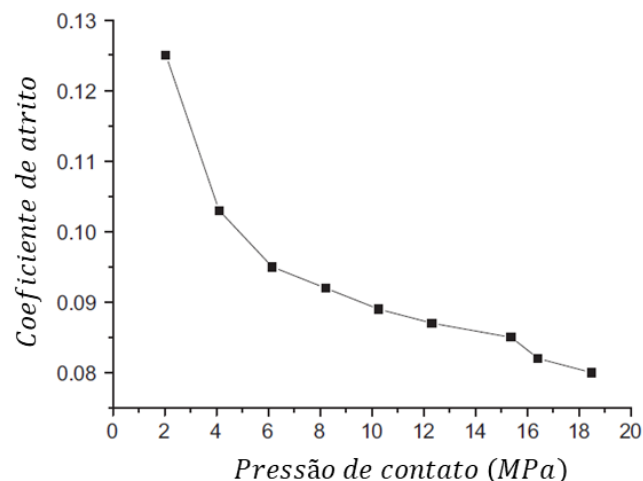


Figura 3.13 – Gráfico do Coeficiente de atrito x Pressão de contato nominal. [Adaptado de Wang *et al.*(2016)]

No software utilizado no estudo, o coeficiente é calculado através da equação 3.2.

$$\mu_{eff} = \mu \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^{(e-1)} \quad (3.2)$$

Em que μ_{eff} representa o coeficiente de atrito dependente da pressão, μ é o coeficiente de atrito nominal, P é a pressão de contato encontrada na simulação, P_{ref} é a pressão de contato nominal para o coeficiente de atrito nominal, e o e representa o expoente de pressão.

3.5.4. Modelos tribológicos utilizados neste trabalho

Algoritmos numéricos começaram a ser estudados na década de 80 conforme relatado por Nielsen *et al.* (2018). Os autores citam que no início do milênio os desenvolvimentos em simulações numéricas têm crescido constantemente. Experimentos com modelos de atrito locais e com ferramentas representando a rugosidade foram realizados para simulação de processos de conformação com efeitos de atrito por Hol *et al.* (2012) e Hol *et al.* (2015).

Para o presente estudo, os modelos tribológicos foram criados no software Triboform® conforme detalhado no capítulo 4.6.4. O Triboform® é um software de uso comercial resultante da pesquisa de Hol *et al.* (2013) em que, um modelo tribológico para simulação de conformação em larga escala baseado nas características micrométricas da superfície foi desenvolvido.

Sigvant *et al.* (2016) destaca que o software permite representar o coeficiente de atrito variável adaptado às condições locais do processo de conformação. O software permite a modelagem do atrito no regime de lubrificação mista acoplando um modelo de atrito com regime de lubrificação limite e um hidrodinâmico. O modelo de lubrificação de limite inclui modelos que representam as mudanças nas propriedades tribológicas durante a conformação devido as cargas normais, deformação massiva de material e deslizamento. Os modelos fornecem uma equação para a área real fracionada utilizada para cálculo do coeficiente de atrito. As tensões cisalhantes na interface são obtidas contabilizando a influência da adesão e abrasão durante o deslizamento e são calculadas em cada fragmento de contato das asperezas da superfície. A somatória das tensões individuais de toda superfície de contato permite obter a tensão de cisalhamento limite (τ_{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 (τ_{lub}) na interface fluido-sólido é calculada com base na distribuição da pressão hidrodinâmica (Hol *et al.* 2015).

Com a tensão de cisalhamento limite (τ_{asp}) e a tensão de cisalhamento viscoso (τ_{lub}) é calculado o coeficiente de atrito (μ) através da equação 3.3.

$$\mu = \frac{\tau_{asp}}{\tau_{lub}} \quad (3.3)$$

Para simulação, inicialmente é formado um sistema tribológico com as especificações da chapa a ser conformada, lubrificante e ferramenta. Os dados de entrada referentes a chapa são a classe de material da chapa, seu revestimento e rugosidade superficial. As informações relacionadas ao lubrificante são o tipo e quantidade, enquanto que, os dados necessários da ferramenta são a classe de material, condições superficiais como o acabamento empregado e a rugosidade.

A Figura 3.14a representa a rugosidade da chapa gerada pelo software antes da simulação do sistema tribológico, enquanto que a Figura 3.14b ilustra a rugosidade da ferramenta.



Figura 3.14 – Rugosidade da chapa (a) e da ferramenta (b). [Fonte: Tribiform, 2013]

Após criação do sistema tribológico, o software realiza uma simulação calculando o coeficiente de atrito em função dos parâmetros de processo, como por exemplo a pressão de contato local, velocidade relativa de deslizamento, deformação plástica da chapa e a temperatura na interface. O resultado fornece um modelo tribológico em 4 dimensões conforme ilustrado na Figura 3.15.

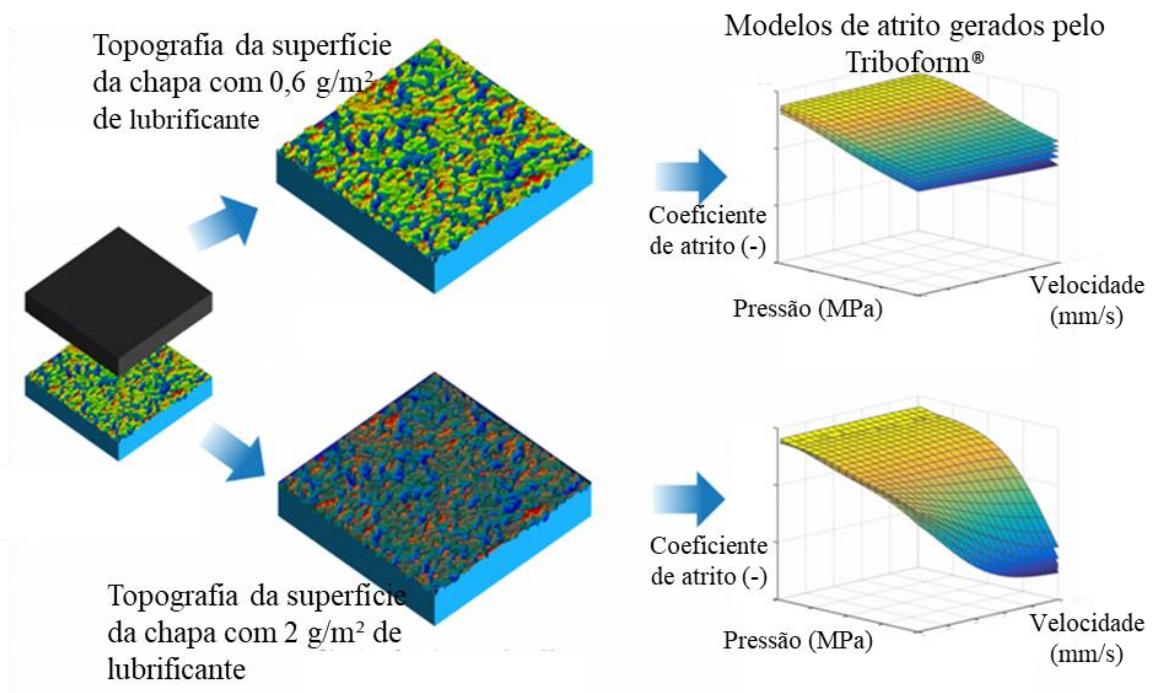


Figura 3.15 – Modelos tribológicos. [Adaptado de Triboform, 2013]

O modelo tribológico gerado possui o coeficiente de atrito dependente da pressão de contato, velocidade de deformação, deformação plástica da chapa, temperatura e quantidade de lubrificante, conforme visualizado na Figura 3.16.

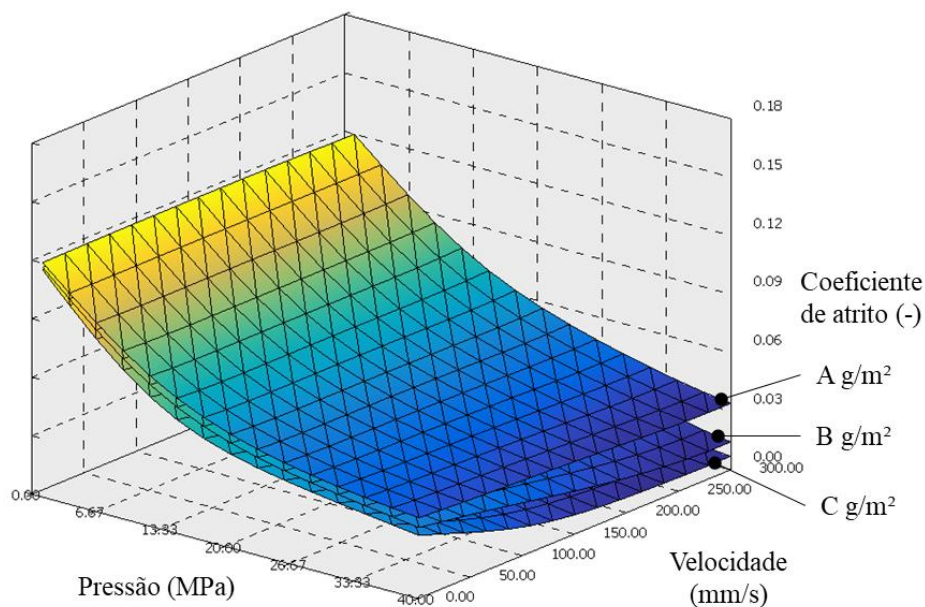


Figura 3.16 – Três modelos de tribológicos gerados pelo Triboform® com as quantidades A, B e C de lubrificante

As alterações na topografia da superfície durante a aplicação da força, deslizamento e suas deformações, e a evolução do coeficiente de atrito durante o arraste e efeitos da adesão são considerados no modelo.

4. DESENVOLVIMENTO NUMÉRICO

Para um bom desempenho e durabilidade da ferramenta de conformação, deve-se fazer uma escolha correta dos materiais para ferramenta a serem utilizados, com base no material a ser conformado e nas suas respectivas solicitações.

Através de estudos preliminares, foram selecionados materiais tradicionalmente utilizados em processos de conformação de chapas. O material utilizado para a ferramenta é o aço AISI D2 temperado e revenido com uma dureza de 59 ± 1 HRC. A composição química do material está ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço ferramenta AISI D2

C	Si	Cr	Mo	V
1,5	0,3	12,0	0,95	0,90

A ferramenta recebeu um polimento manual e revestimento de Balinit Formera (CrAlN). Este revestimento é muito utilizado em ferramentas de conformação que exijam uma boa resistência ao desgaste abrasivo.

4.1. Ensaio das propriedades mecânicas da chapa

O material utilizado no estudo é uma chapa laminada a frio e galvanizada a quente da classe CR4. As propriedades mecânicas do material foram obtidas através de ensaios de tração uniaxial. Amostras da chapa foram extraídas de uma bobina e preparadas conforme norma JIS Z2201: 1998 (corpo de prova para ensaio de tração de materiais metálicos), sendo utilizado o corpo de prova nº5. O ensaio de tração foi realizado conforme norma NBR6892-1 de 04/2013 em uma máquina universal de ensaios EMIC modelo DL-20000 com capacidade máxima de 20 KN.

Ao total, foram ensaiados 9 corpos de prova, sendo que, 3 no sentido de laminação (denominados CP0°), 3 a 45° do sentido de laminação (denominados CP45°) e 3 a 90° do sentido de laminação (denominados CP90°) conforme ilustrado na Figura 4.1.

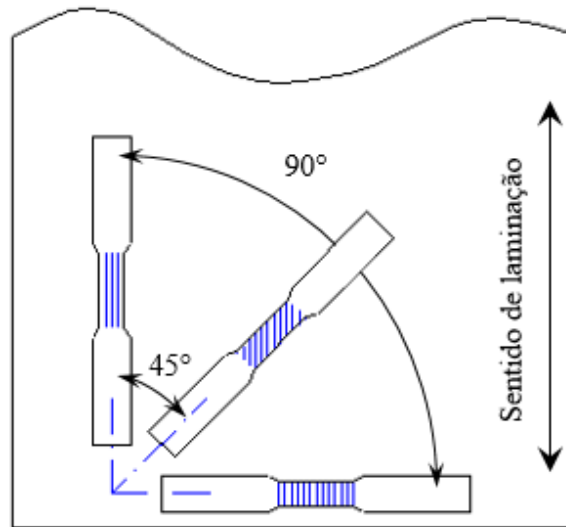


Figura 4.1 – Orientação dos corpos de prova quanto ao sentido de laminação.

As propriedades mecânicas obtidas no ensaio são:

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do material

Corpo de prova	Limite de resistência médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Tensão de escoamento médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Alongamento uniforme médio (%)	Desvio padrão (%)
CP0°	281	6,34	149	2,98	26,68	1,52
CP45°	294	7,21	156	3,01	26,24	2,06
CP90°	287	6,05	147	2,52	22,9	1,23

Através das normas DIN EN ISO10113 e ASTM E-517, foram determinados os índices de anisotropia plástica (r) e o expoente de encruamento (n) 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 3.

Tabela 3 - Coeficiente “n” e “r” para cada direção de laminação

Corpo de prova	Expoente de encruamento médio (n)	Desvio padrão	Índice de anisotropia médio (r)	Desvio padrão
CP0°	0,245	0,015	2,41	0,12
CP45°	0,250	0,02	2,23	0,08
CP90°	0,246	0,01	2,48	0,13

4.2. Definição da geometria do estudo de caso

Hol *et al.* (2012) utilizaram uma geometria similar para testar o desempenho numérico de modelos de atrito por eles desenvolvidos. Em 2015, Hol, *et al.* utilizaram a mesma geometria para realizar estudos experimentais que permitiram validar os resultados numéricos. A geometria utilizada para os testes no presente trabalho foi selecionada por possuir características normalmente encontradas em componentes estampados complexos do meio industrial: 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 reflexiva e regiões suscetíveis à variação significativa de espessura e coeficiente de atrito..

A chapa possui um diâmetro inicial de 160 mm com 0,65 mm de espessura e que após conformada assume a forma detalhada na Figura 4.2. Demais detalhamentos do produto encontram-se no apêndice A.

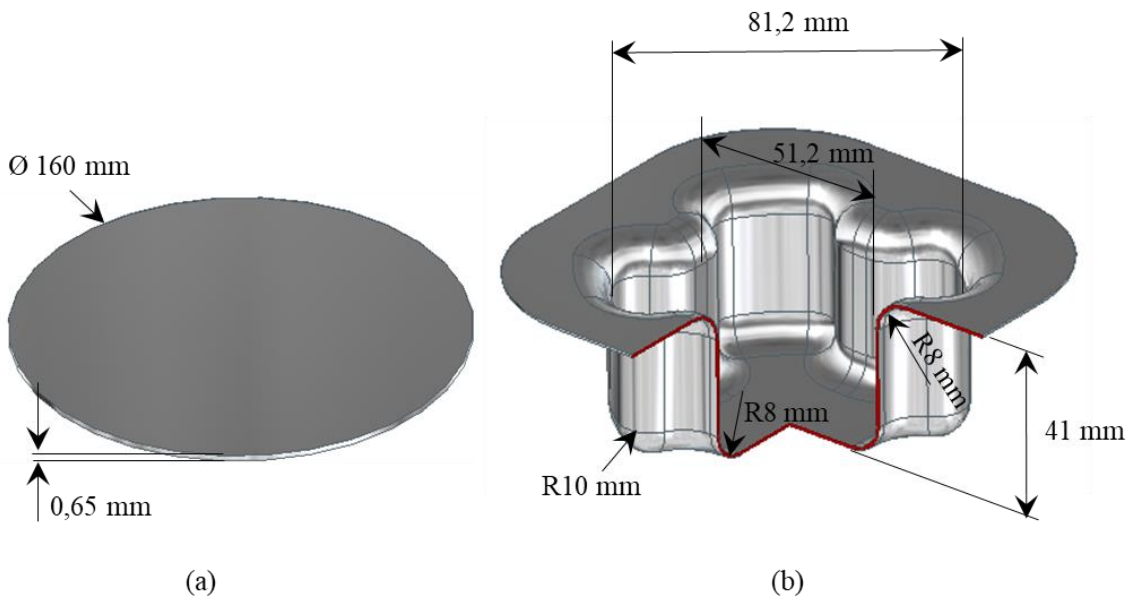


Figura 4.2 – Principais dimensões da chapa (a) e do estudo de caso (b)

4.3. Rugosidade das superfícies

A rugosidade é uma medida topográfica da superfície de interesse, um conjunto de desvios micro geométricos caracterizados pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes na superfície, segundo a norma ABNT NBR ISO4287. As superfícies podem ser classificadas em três tipos:

- Geométrica: Superfície ideal ou teórica, sem imperfeições, isenta de erros de forma ou textura e definida por especificações de desenho;

- Real: É a superfície em estudo que possui algum grau de irregularidades providas do processo de fabricação. Ela não caracteriza imperfeições providas da superfície interior, como de materiais porosos;

- Efetiva: É fruto da medição da superfície real e pode ser obtida através de microscopia eletrônica. O grau de precisão da textura da superfície é dependente da resolução do equipamento utilizado para medição, quanto mais preciso for o sistema, mais esta superfície se aproximará da realidade.

A rugosidade da superfície influenciará diretamente nos coeficientes de atrito e no desgaste adesivo das ferramentas como observado por Dieter (1981), o qual afirma ainda, que as superfícies reais não são exatamente planas e sim formadas por picos e vales.

Assim como as propriedades mecânicas, foi necessário caracterizar a superfície tridimensional da ferramenta e da chapa, para isto, foi utilizado um perfilômetro óptico BRUKER do modelo Contour GT de bancada que possui uma faixa de digitalização de 0,1 mm a 10 mm. A velocidade máxima de digitalização é de 28,1 $\mu\text{m/s}$ com lentes objetivas parfocal de 5X e 20X. Para tratamentos dos dados, foi utilizado o software Vision64®.

4.3.1. Topografia da superfície da ferramenta

Tavares (2019) encontrou através da técnica de perfilometria ótica, os valores médios de rugosidade para ferramenta de 1,3 μm com desvio padrão de 0,04 μm para um total de 9 regiões medidas (3 corpos de prova com 3 medições em áreas diferentes de cada CP). A imagem da Figura 4.3 exemplifica a topografia do trabalho supramencionado.

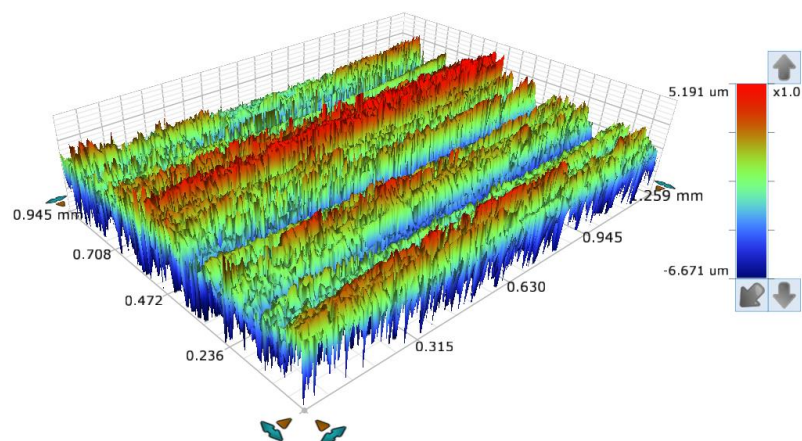


Figura 4.3 – Topografia da superfície da ferramenta com rugosidade de 1,3 μm . [Fonte: Tavares, 2019]

Karapannasamy *et al.* (2014) utilizaram uma rugosidade superficial de $0,08\ \mu\text{m}$ para uma ferramenta lapidada garantindo assim um contato completo com a chapa enquanto que, Hol, *et al.* (2017) utilizou $0,4\ \mu\text{m}$ para superfícies polidas e $0,2\ \mu\text{m}$ para polimento fino para uma ferramenta de ferro fundido nodular.

Com base na rugosidade encontrada na superfície da ferramenta e nas literaturas referenciadas anteriormente, três superfícies de ferramentas foram criados no software Triboform® conforme ilustrados na Figura 4.4.

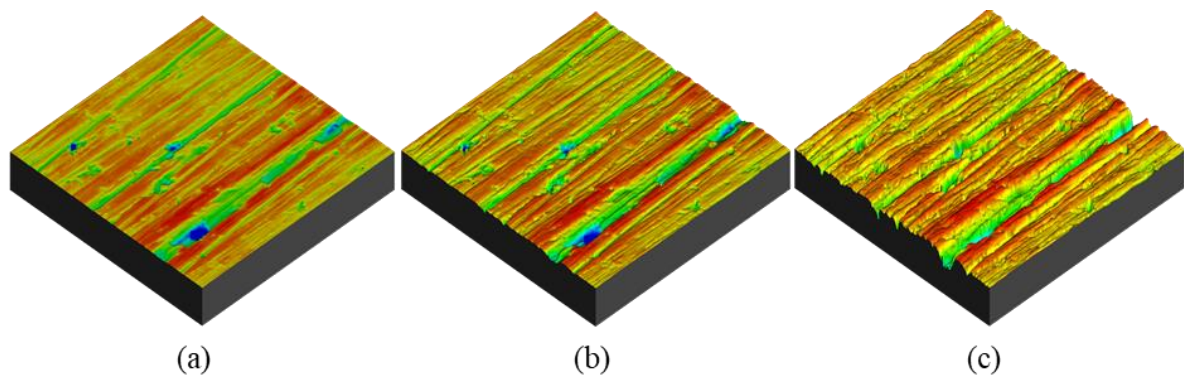


Figura 4.4 – Topografia da superfície da ferramenta com rugosidade de $0,08\ \mu\text{m}$ (a), $0,4\ \mu\text{m}$ (b) e $1,3\ \mu\text{m}$ (c) geradas pelo Triboform®.

4.3.2. Topografia da superfície da chapa

Utilizando a mesma técnica de perfilimetria da ferramenta, Tavares (2019) encontrou os valores médios de rugosidade para chapa de $1,6\ \mu\text{m}$ com desvio padrão de $0,09\ \mu\text{m}$ em um total de 6 áreas avaliadas conforme ilustrado na Figura 4.5a. Com a rugosidade medida, foi gerado a topografia da superfície da chapa utilizando o software Triboform® conforme ilustrado na Figura 4.5b.

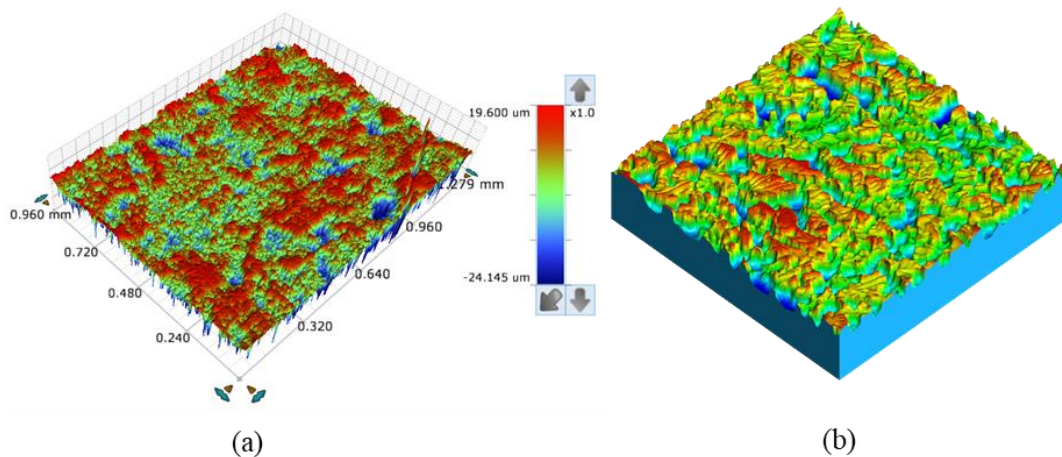


Figura 4.5 – Topografia da superfície da chapa com rugosidade de $1,6\ \mu\text{m}$ (a) e superfície gerada pelo Triboform® (b). [Fonte: Tavares, 2019]

Karapannasamy *et al.* (2014) utilizaram uma chapa DC06 laminada a frio sem revestimento com rugosidade em torno de $1,7 \mu\text{m}$ enquanto que, Hol *et al.* (2016) obtiveram através de experimentos, uma rugosidade de $1,35 \mu\text{m}$ para uma chapa galvanizada a quente e, rugosidade de $1,41 \mu\text{m}$ para uma chapa com revestimento eletro galvanizado.

4.4. Lubrificante

O lubrificante exerce um papel fundamental no processo de conformação de chapas, uma vez que reduz o coeficiente de atrito entre a ferramenta e a chapa aumentando assim, a capacidade de produzir bons resultados de conformação. O lubrificante atua como uma barreira entre as duas superfícies diminuindo a força de contato entre as asperezas.

A escolha da quantidade e tipo de lubrificante é um ponto importante para determinar parâmetros de atrito. A falta de lubrificação ocasionará uma conformação com regime a seco, conforme detalhado no capítulo 3.3, ocasionando um desgaste prematuro da ferramenta e defeitos no produto conformado. Já uma quantidade excessiva, implicará em desperdício de lubrificante e conseqüentemente em custos desnecessários. Podendo ainda, permitir um fluxo elevado de material gerando defeitos com acúmulo de material.

Hol *et al.* (2016) utilizaram quantidades de $0,5 \text{ g/m}^2$ e $1,2 \text{ g/m}^2$ em um ensaio de atrito do tipo tracionamento de tiras enquanto que, Sigvant *et al.* (2018), utilizaram 2 g/m^2 em um estudo de caso envolvendo componentes automotivos estampados realizando assim, uma avaliação numérica e experimental. Em 2017, Hol *et al.* utilizaram quantidades de $0,6 \text{ g/m}^2$ e 2 g/m^2 em cada lado da chapa analisando a influência da quantidade de lubrificante na qualidade final do produto.

Utilizando as referências citadas anteriormente, foram adotados as quantidades de $0,5 \text{ g/m}^2$, $1,2 \text{ g/m}^2$ e 2 g/m^2 de lubrificante para conformação nos estudos de caso.

4.5. Planejamento do sistema tribológico

O estudo contempla uma rugosidade superficial da chapa fixa para todos os estudos de caso. Foram definidos três classes de rugosidades para a ferramenta e três níveis de lubrificação conforme detalhado na Tabela 4.

Tabela 4 – Planejamento do sistema tribológico

Caso	Sa (Chapa) [μm]	Sa (Ferramenta) [μm]	Quantidade lubrificante (g/m^2)
#01	1,6	0,08	0,5
#02			1,2
#03			2
#04		0,4	0,5
#05			1,2
#06			2
#07		1,3	0,5
#08			1,2
#09			2
Coeficiente de atrito de Coulomb			
#10	0,15		

Além dos nove modelos tribológicos gerados, utilizou-se ainda o coeficiente de Coulomb constante e igual a 0,15 o qual foi denominado caso #10.

4.6. 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 ilustrado na Figura 4.6. O sistema tribológico foi simulado utilizando o Triboform® com os dados de entrada detalhados nos capítulos anteriores. Como resultados, foram gerados arquivos contendo os modelos tribológicos. Na simulação do processo de estampagem com o Software Autoform®, foram utilizados os modelos tribológicos criados juntamente com os dados de entrada detalhados nos próximos capítulos.

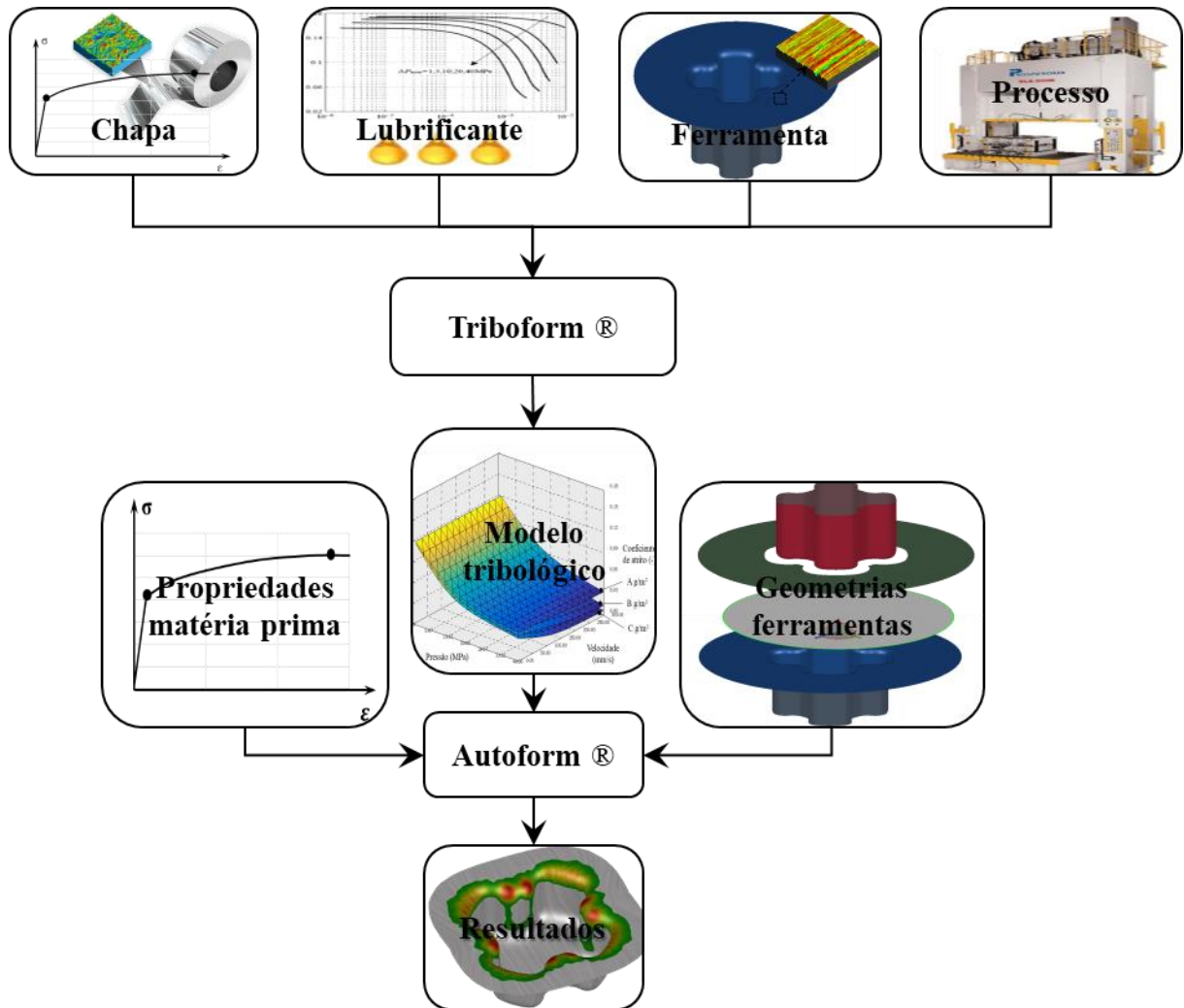


Figura 4.6 – Fluxograma da abordagem dos estudos

O Autoform® é um software de uso comercial desenvolvido pela Autoform Engineering GmbH utilizado para simulação de processos de conformação de chapas. Dentre os principais resultados obtidos em uma simulação podem-se destacar a capacidade de prever falhas na chapa durante a conformação, espessuras do produto após conformado, o estado de tensões resultantes do processo, previsão do retorno elástico da chapa, forças resultantes, pressões de contato, otimização do perfil inicial da chapa e fluxo do material.

O software fornece resultados através de uma solução implícita que resolve as equações de equilíbrio com interações de Newton-Raphson expressas por:

$$M^{t+\Delta t} \ddot{U} = R^{t+\Delta t} - F^{t+\Delta t} \quad (4.1)$$

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 " U " e " \ddot{U} " são os

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

$$M^{t+\Delta t} \ddot{U}_{(i)} + K_{(i-1)}^{t+\Delta t} \Delta U_{(i)} = R^{t+\Delta t} - F_{(i-1)}^{t+\Delta t} \quad (4.2)$$

até que a convergência seja satisfeita, onde

$$U_{(i)}^{t+\Delta t} = U_{(i-1)}^{t+\Delta t} + \Delta U_{(i)} \quad (4.3)$$

e as condições iniciais correspondem ao instante calculado para o tempo t

$$U_{(0)}^{t+\Delta t} = U_{(i-1)}^{t+\Delta t}, \quad F_{(0)}^{t+\Delta t} = F^t, \quad K_{(0)}^{t+\Delta t} = K^t \quad (4.4)$$

O " K " representa a matriz de rigidez e o " i " é índice de contagem das interações não lineares (Soliman *et al.* 2006).

O capítulo seguinte traz as configurações detalhadas da análise.

4.6.1. Parâmetros da simulação

A geometria das ferramentas possui a referência superior da chapa, sendo que o espessamento foi gerado para a matriz. As configurações de importação da geometria possuem um tamanho máximo de elemento igual a 10 mm e uma tolerância de malha de 0,1 mm. Para a chapa, foi utilizado o elemento de casca elasto-plástico com 11 pontos de integração ao longo da espessura. O refinamento automático adaptativo da malha de elementos finitos possui um algoritmo baseado em curvatura, gradiente de deformações e penetração entre chapa e ferramenta. Os parâmetros de acuracidade da malha de elementos finitos estão detalhados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parametros de acuracidade da malha de elementos finitos da chapa

Parâmetro	Valor
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

4.6.2. Parâmetros do material e chapa

O modelo de material foi criado com base nos ensaios e valores detalhados no capítulo 4.1. A curva de encruamento foi criada utilizando a aproximação matemática de Ludwik detalhada no capítulo 2.3 e ilustrado na Figura 4.7a. O modelo de plasticidade de Hill (Hill, 1990) foi utilizado para a superfície de escoamento anisotrópico (Figura 4.7b). A curva limite de conformação foi criada utilizando a aproximação de Arcelor V9 (Cayssials *et al.* 1998) com os limites de resistência de 287 MPa e alongamento uniforme de 22,9% para o CP90° conforme ilustrado na Figura 4.7c.

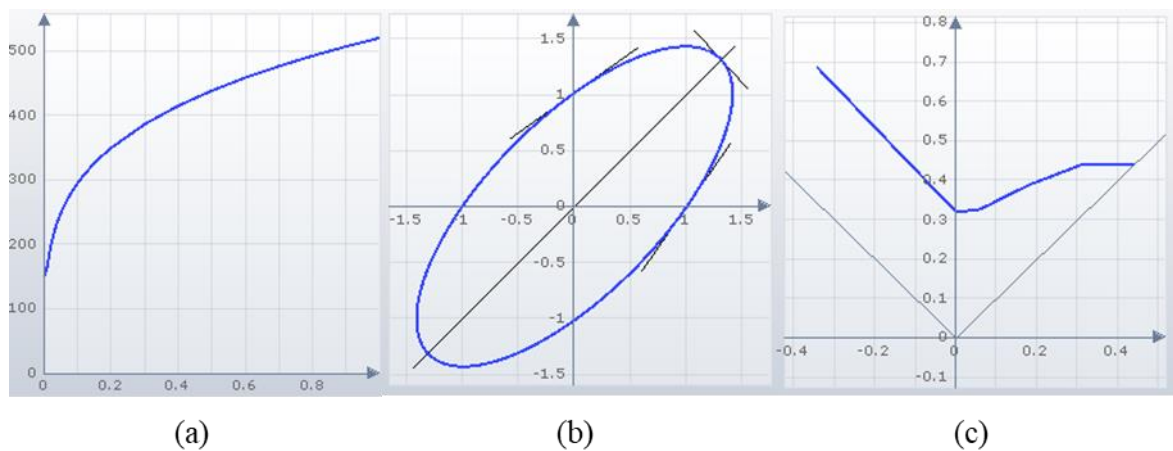


Figura 4.7 – Curva de encruamento (a), superfície de escoamento anisotrópico (b) e Curva limite de conformação do material CR4

A chapa possui um diâmetro inicial de 160 mm com 0,65 mm de espessura. O sentido de laminação está no eixo X, e a temperatura inicial considerada foi de 20°C. O posicionamento inicial é de apoio sobre a matriz conforme ilustrado na Figura 4.8.

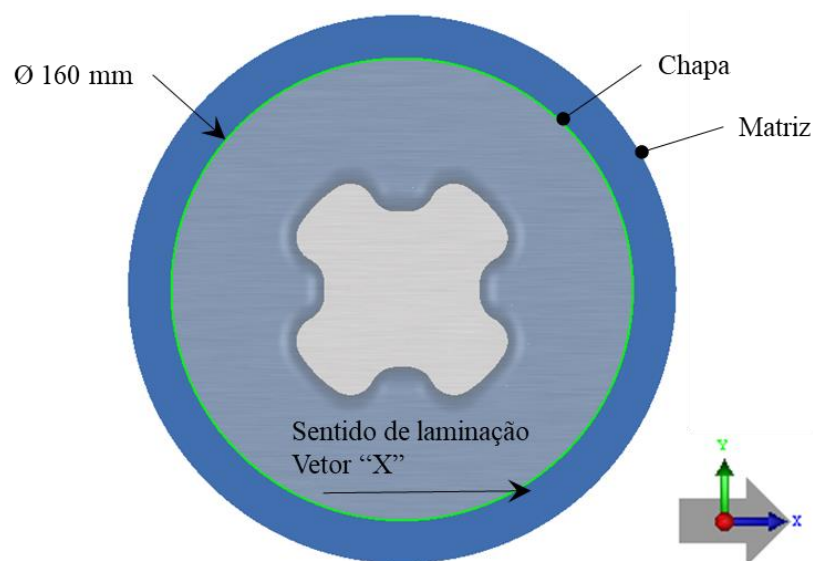


Figura 4.8 – Posicionamento da chapa sobre a matriz

4.6.3. Cinemática das ferramentas

As ferramentas são compostas por geometrias rígidas e possuem a cinemática de um processo de simples efeito conforme descrito no capítulo 2.1. A Figura 4.9 ilustra as ferramentas utilizadas na simulação. O detalhamento completo das geometrias encontra-se nos apêndices B e C.

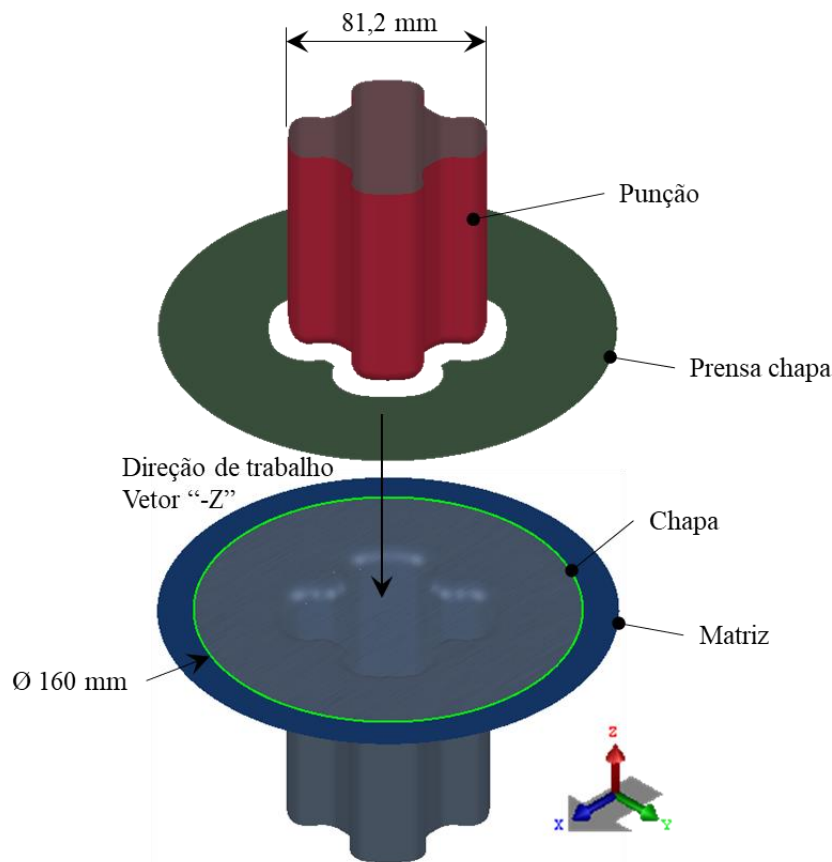


Figura 4.9 – Geometrias das ferramentas

A ferramenta denominada “prensa chapas” possui movimento de corpo rígido com translação no vetor $-Z$. A cinemática é composta de um curso de 41 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 28,76 kN. A ferramenta denominada “matriz” também possui uma geometria rígida e com todos os graus de liberdade fixados. A ferramenta denominada “punção” é composta por uma geometria rígida possuindo movimento apenas no vetor $-Z$. O movimento está delimitado ao curso de 41 mm. A velocidade de deslocamento das ferramentas foi considerada como 200 mm/s.

4.6.4. Coeficientes de atrito

Os coeficientes de atrito foram definidos conforme planejamento do sistema tribológico (Tabela 4 do capítulo 4.5) admitindo que todas as ferramentas possuem o mesmo grau de acabamento. Os modelos tribológicos considerados na análise possuem os perfis detalhados a seguir:

A Figura 4.10 contém os modelos tribológicos dos estudos de caso #01, #02 e #03, onde a rugosidade da ferramenta é igual a $0,08 \mu\text{m}$ e a rugosidade da chapa é igual a $1,6 \mu\text{m}$. Os três modelos são diferenciados pela quantidade de lubrificante utilizado em cada caso, sendo $0,5 \text{ g/m}^2$, $1,2 \text{ g/m}^2$ e 2 g/m^2 . A Figura 4.10a representa os três modelos para uma deformação da chapa igual a 0, ou seja, não há deformação plástica, ocorrendo apenas o deslizamento do material. A Figura 4.10b possui uma deformação da chapa igual a 0,4.

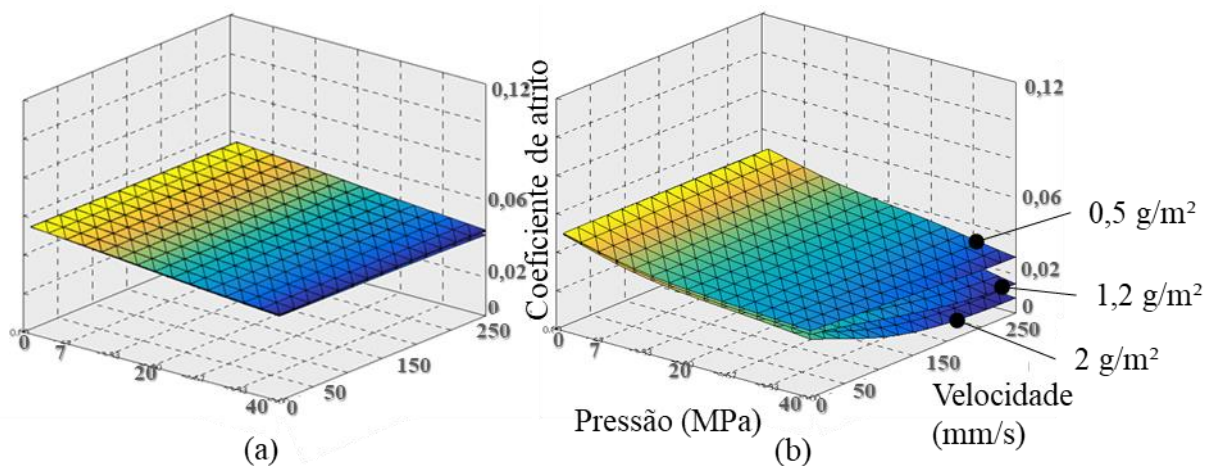


Figura 4.10 – Modelos tribológicos com rugosidade da chapa de $1,6 \mu\text{m}$ e $0,08 \mu\text{m}$ para ferramenta e deformações igual a 0 (a) e 0,4 (b)

Para a ferramenta com rugosidade $0,08 \mu\text{m}$, que segundo Karapannasamy *et al.* (2014) representa uma superfície lapidada, haverá uma variação do coeficiente de atrito entre 0,01 e 0,05 com todas as variações (como pressão de contato, velocidade, quantidade de lubrificante e deformações). Essa variação é muito pequena frente a todas as variáveis envolvidas e isso significa que, as variantes terão pouco impacto nos resultados finais.

A Figura 4.11 contém os modelos tribológicos dos estudos de caso #04, #05 e #06, onde a rugosidade da ferramenta é igual a $0,4 \mu\text{m}$ e a rugosidade da chapa é igual a $1,6 \mu\text{m}$. Os três modelos são diferenciados pela quantidade de lubrificante utilizado em cada caso, sendo $0,5 \text{ g/m}^2$, $1,2 \text{ g/m}^2$ e 2 g/m^2 .

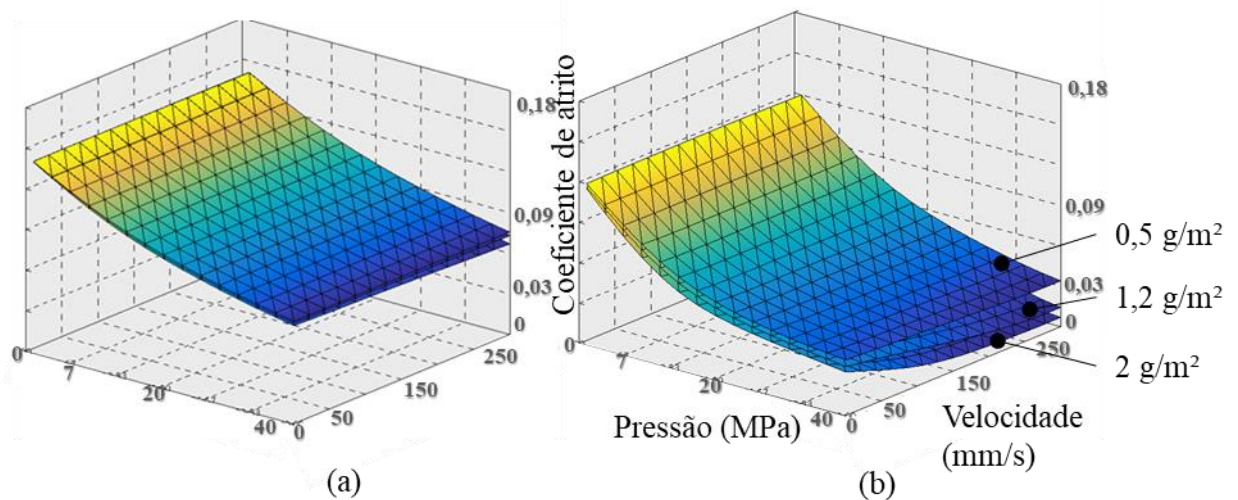


Figura 4.11 – Modelos tribológicos com rugosidade da chapa de 1,6 μm e 0,4 μm para ferramenta e deformações igual a 0 (a) e 0,4 (b)

Através dos modelos tribológicos criados, observa-se que para estas condições superficiais da chapa/ferramenta, haverá uma pequena variação no coeficiente de atrito em função da quantidade de lubrificante utilizada.

A Figura 4.12 contém os modelos tribológicos dos estudos de caso #07, #08 e #09, onde a rugosidade da ferramenta é igual a 1,3 μm e a rugosidade da chapa é igual a 1,6 μm. Os três modelos são diferenciados pela quantidade de lubrificante utilizado em cada caso, sendo 0,5 g/m², 1,2 g/m² e 2 g/m². Pode se observar que para estes casos, há uma variação no coeficiente de atrito entre 0,01 e 0,25. Essa variação é expressiva se tratando de um processo de conformação. O fator de maior impacto no atrito nestas três condições é a pressão de contato, ao contrário da velocidade, que influenciará muito pouco nos resultados finais.

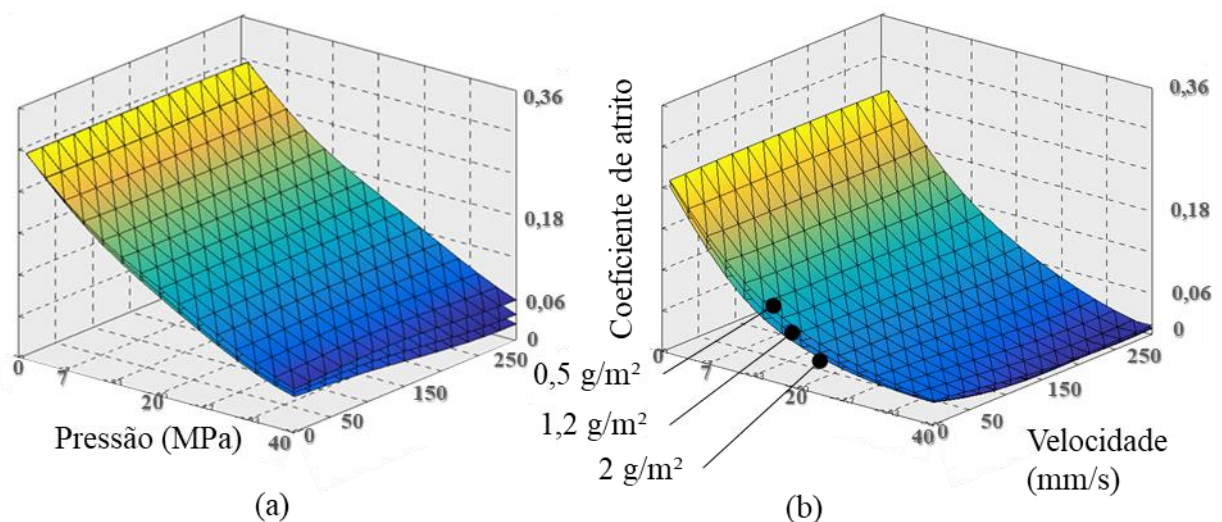


Figura 4.12 – Modelos tribológicos com rugosidade da chapa de 1,6 μm e 1,3 μm para ferramenta e deformações igual a 0 (a) e 0,4 (b)

A Figura 4.13a contém todos os modelos tribológicos, para deformação igual a 0, sobrepostos no gráfico utilizados no estudo juntamente com a projeção do atrito de Coulomb ao valor de 0,15, enquanto que a Figura 4.13b, sobrepõem os nove modelos para a deformação da chapa igual a 0,4.

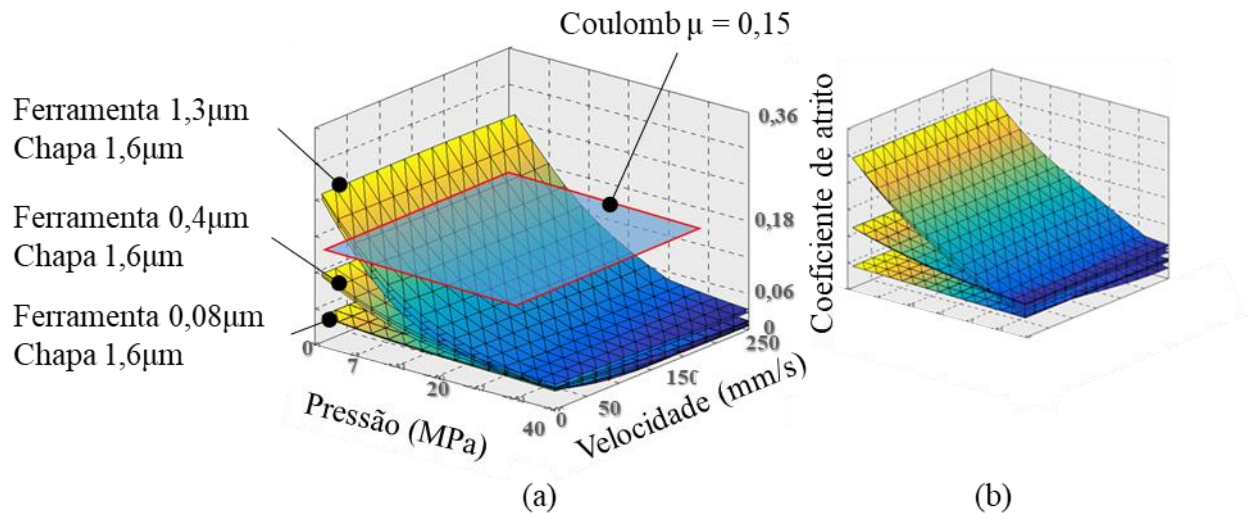


Figura 4.13 – Modelos tribológicos para diferentes rugosidades da ferramenta, quantidades de lubrificante e projeção do coeficiente de atrito de Coulomb com deformações igual a 0 (a) e deformação igual a 0,4 (b)

De uma forma geral, observa-se nitidamente que a rugosidade da ferramenta tem um impacto muito grande sobre os modelos tribológicos gerados. Enquanto que, para a rugosidade de 1,3 μm na ferramenta possui valores máximos de coeficiente igual a 0,25, a ferramenta lapidada com rugosidade de 0,08 μm apresenta coeficientes máximos de 0,05 μm . Observa-se também, que quanto maior a rugosidade da ferramenta/chapa, maior será a variação do coeficiente de atrito durante a conformação, sendo que, o segundo fator mais impactante será a pressão de contato.

Além dos modelos citados anteriormente, no estudo de caso #10, foi utilizado o modelo de Coulomb ao valor constante e igual a 0,15. Este valor representa a interação entre uma ferramenta e uma chapa metálica envolta em um pequeno filme de lubrificante e é normalmente utilizado na simulação de conformação na indústria metal mecânica, conforme relatado por Sigvant et al., (2018).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados todos resultados obtidos no estudo, visando avaliar a propriedade mecânicas do material, rugosidade das ferramentas, coeficientes de atrito, quantidade de lubrificante, forças de conformação, fluxo e corrida da linha de corte.

5.1. Propriedades mecânicas do material

Os ensaios preliminares serviram de base para caracterização das propriedades necessárias para realização do estudo. Para cada ensaio foram utilizados 3 corpos de prova conforme detalhado anteriormente no capítulo 4.1 na Figura 4.1. Os resultados da Tabela 6 são valores médios de cada propriedade ensaiada. Os valores de cada ensaio estão detalhados nas Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas ensaiadas

Propriedade	Ensaio
Limite de Resistência (MPa)	287,3
Tensão de escoamento (MPa)	150,6
Coefficiente de encruamento	0,247
Anisotropia média	2,34
Alongamento total (%)	54,6
Alongamento uniforme (%)	25,27

5.2. Resultados da simulação numérica

Após caracterização do modelo de material e dos modelos tribológicos, foram realizadas as simulações de acordo com o planejamento do sistema tribológico apresentado no capítulo 4.5 e Tabela 4. O coeficiente de atrito constante de Coulomb (Caso #10) foi substituído pelos nove modelos tribológicos criados no Software Tribiform®.

Para facilitar o entendimento, a Figura 5.1 contém as variáveis em estudo. As variáveis, “Diâmetro inicial da chapa” representa as dimensões iniciais da chapa antes da conformação, “Dimensão A” é o valor da largura da peça após conformada, “Dimensão B” representa o fluxo

e corrida do material após conformação, “Força do punção” é a somatória de todas forças de reação atuando sobre o punção e a “Espessura” é a dimensão da espessura final da peça após conformada. Outra variável em estudo é o afinamento da chapa, que representa a redução percentual da espessura.

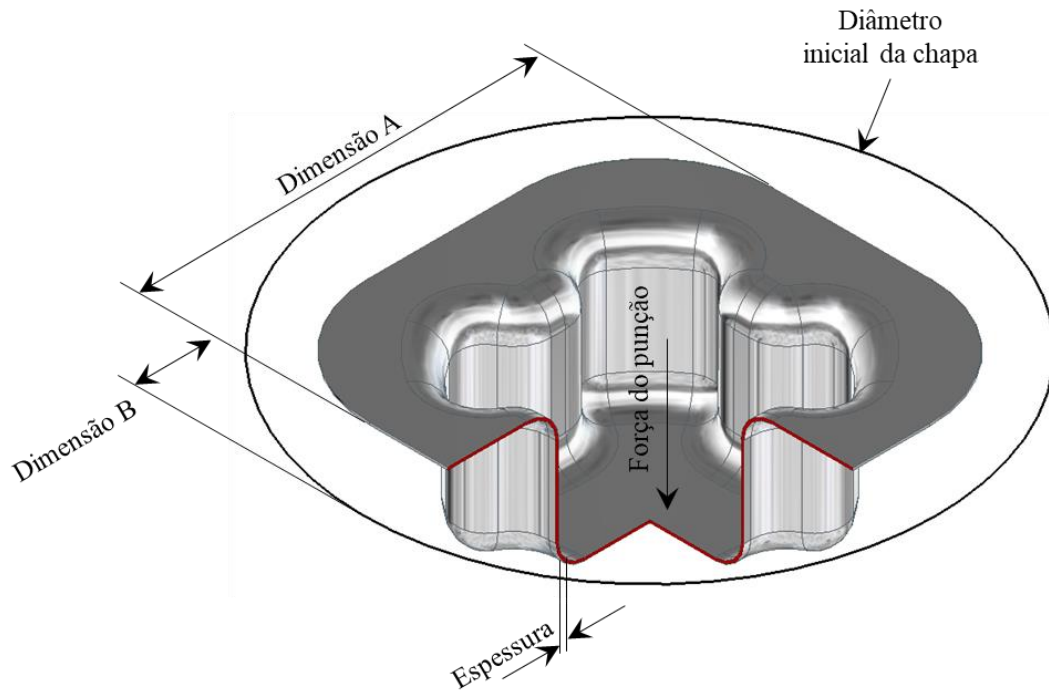


Figura 5.1 – Detalhamento das variáveis em estudo

Todos os resultados obtidos na simulação foram compilados e exibidos na Tabela 7. O detalhamento de cada parâmetro e resultados será visto nos próximos capítulos.

Tabela 7 – Resultados numéricos.

Caso	Rugosidade Chapa [μm]	Rugosidade Ferramenta [μm]	Qt. Lubrificante g/m^2	Espessura (mm)	Afinamento (%)	Força punção (KN)	Dimensão A [mm]	Dimensão B [mm]
#01	1,6	0,08	0,5	0,467	28,20%	56,6	111,08	24,46
#02	1,6	0,08	1,2	0,467	28,20%	56,2	111,06	24,47
#03	1,6	0,08	2	0,468	28,00%	55,6	111,06	24,47
#04	1,6	0,4	0,5	0,459	29,40%	60,3	112,44	23,78
#05	1,6	0,4	1,2	0,458	29,60%	59,8	112,4	23,8
#06	1,6	0,4	2	0,459	29,30%	59	112,2	23,9
#07	1,6	1,3	0,5	0,44	32,30%	64,5	115,36	22,32
#08	1,6	1,3	1,2	0,44	32,30%	63,7	115,18	22,41
#09	1,6	1,3	2	0,444	31,8%	62,5	114,68	22,66
#10	-	-	-	0,442	31,90%	69,5	113,16	23,42

5.2.1. Força de conformação

Conforme detalhado no capítulo 3.4, a força de reação do punção é a somatória de todas as forças envolvidas no processo, sejam forças de atrito, restrições de atuadores e a força necessária para conformação da peça. O gráfico da força máxima do punção em função do seu deslocamento está ilustrado na Figura 5.2. Os resultados das forças de cada estudo de caso estão resumidos na Tabela 7.

O início da conformação se dará com deslocamento em -41 mm conforme detalhado na cinemática das ferramentas na Figura 4.9. O valor máximo de força ocorre com aproximadamente 30 mm de deslocamento do punção, ou seja, no deslocamento - 11 mm, após este instante, o valor da força do punção começa a decair.

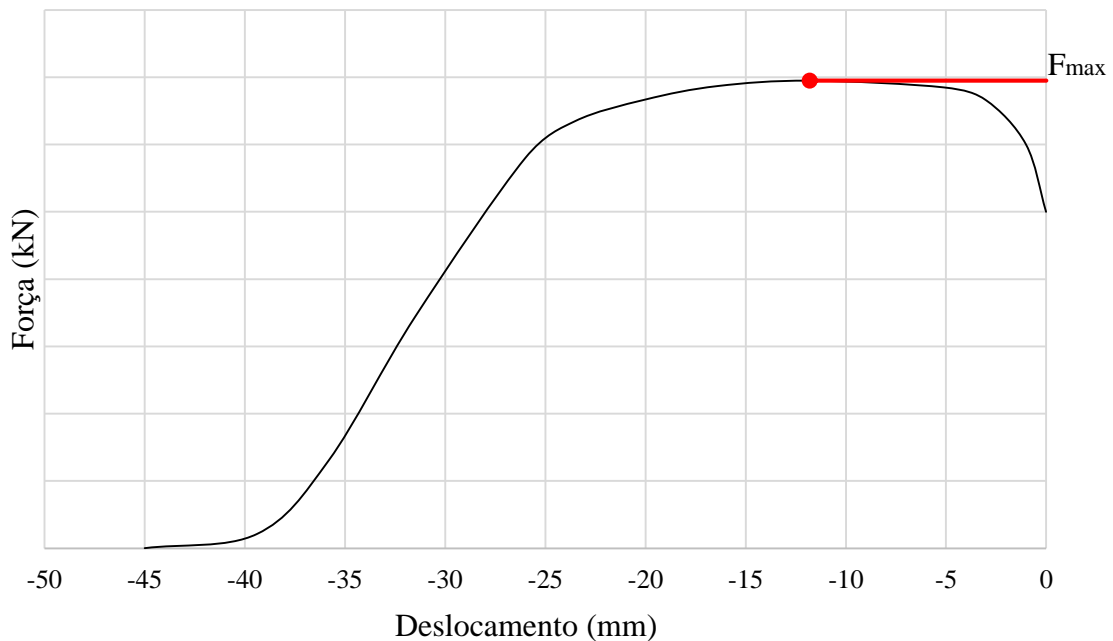


Figura 5.2 – Gráfico da força máxima do punção

O gráfico da Figura 5.3a mostra a evolução da força de acordo com a quantidade de lubrificante empregado para os três níveis de rugosidade da ferramenta, $S_a = 0,08 \mu\text{m}$, $0,4 \mu\text{m}$, $1,3 \mu\text{m}$, e para o atrito de Coulomb. Observa-se que há uma diferença significativa na força entre os casos que utilizam modelos tribológicos para com o modelo de Coulomb. Na Figura 5.3b, observa-se que a força resultante do punção aumenta com superfícies mais rugosas havendo apenas uma pequena variação na medida em que aumenta a quantidade de lubrificante.

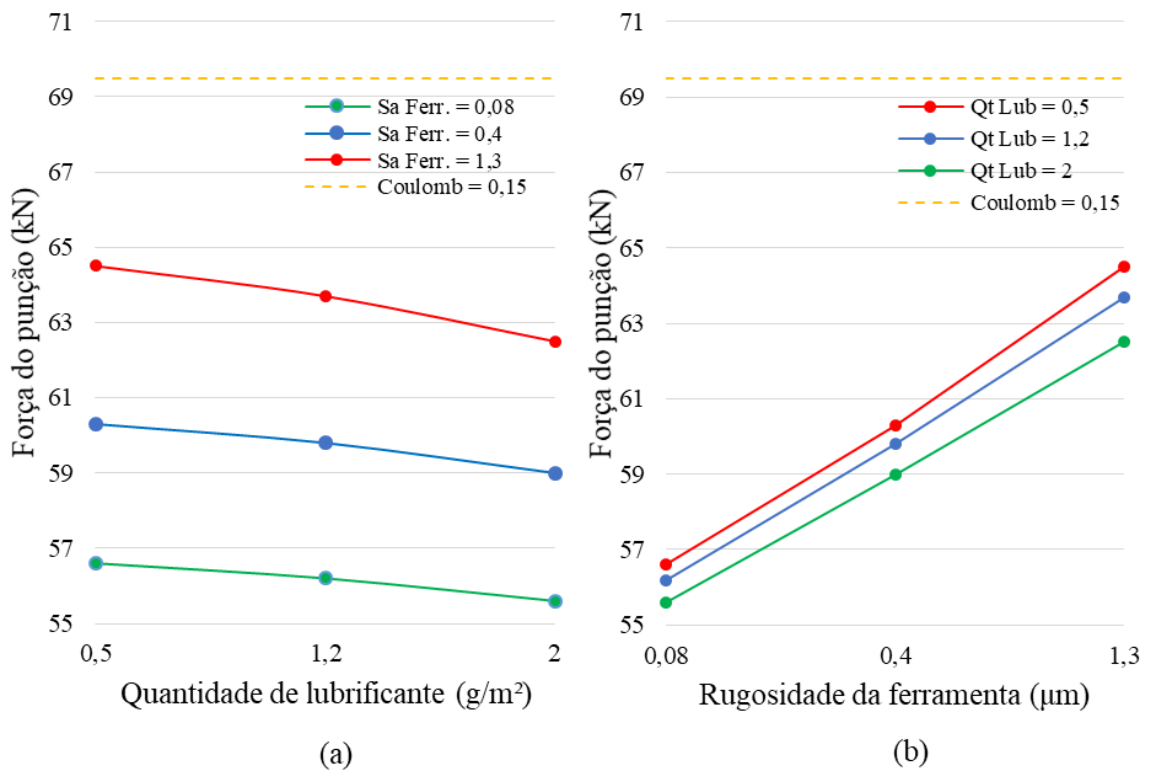


Figura 5.3 – Gráfico da força máxima do punção em função da quantidade de lubrificante para tres rugosidades da ferramenta e para o atrito de Coulomb (a) e a força máxima em função da rugosidade da ferramenta para tres quantidades de lubrificante e para o atrito de Coulomb

A menor força encontrada é igual a 55,6 kN com uma ferramenta de 0,08 μm de rugosidade e 2,0 g/m² de lubrificante, ou seja, do caso #03, enquanto que a maior, foi para o caso #10 que utiliza o coeficiente de atrito constante de Coulomb, ao valor de 69,5 kN. Essa diferença representa uma variação de 6,5% na força. Avaliando a força em relação à quantidade de lubrificante, observa-se na Figura 5.3a, que há uma pequena variação entre os três níveis de lubrificação, sendo que, em todos os casos há uma redução na força na medida em que aumenta a quantidade de lubrificante.

Pode se concluir que o grau de acabamento da superfície das ferramentas é o fator de maior impacto na variável de força para conformação dentre as variáveis estudadas.

5.2.2. Espessura e afinamento do produto

Os maiores afinamentos encontrados estão localizados em uma região na parede lateral conforme ilustrado na Figura 5.4. Esta região apresenta características de um embutimento profundo. Valores de afinamento e espessuras finais são informações muito utilizadas em condições reais de conformação pelo fato de que podem ser mensuradas. A medição pode ser

realizada fazendo cortes no produto e após, medição manual. Ou ainda, medindo utilizando microscópio e/ou ultrassom.

Os valores de espessura e afinamento foram compiladas na Tabela 7, onde observamos que a variação nos resultados entre o caso #10, que utiliza coeficiente de atrito constante, para o caso #03 (maior diferença), é de 0,026 mm, o que representa uma variação de 5,5% no valor da espessura. Os modelos que mais se aproximaram do caso #10, foram os #07, #08, #09, os quais possuem a maior rugosidade de ferramenta, sendo que a maior diferença está nos casos #01, #02, #03 que possuem a menor rugosidade.

Sigvant *et al.* (2018) relatam que em dois estudos de caso realizados por eles, resultados numéricos para espessuras se aproximam dos valores encontrados experimentalmente, principalmente com modelos avançados de atrito, embora que, em muitas regiões das peças, os valores de espessuras foram exatamente os mesmos, utilizando atrito constante ou modelos avançados. Estes resultados também foram observados no presente estudo, e isso ocorre pelo fato de algumas regiões não possuírem sensibilidade ao coeficiente de atrito.

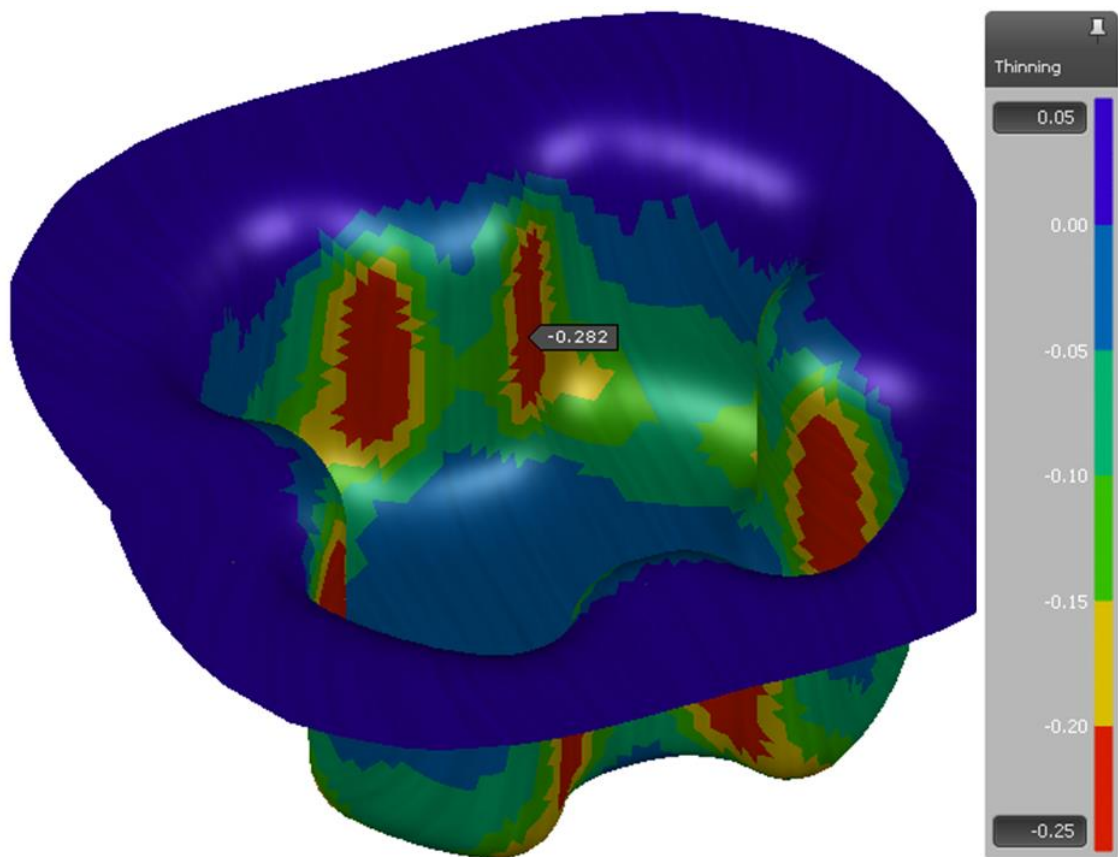


Figura 5.4 – Afinamento na espessura do caso #01

Com a rugosidade da ferramenta igual $0,08 \mu\text{m}$, que representa os casos #01, #02 e #03, os valores de espessuras encontrados foram $0,467 \text{ mm}$ e afinamento de $28,2\%$. Com a rugosidade da ferramenta igual $0,4 \mu\text{m}$, que representa os casos #04, #05 e #06, as espessuras foram de $0,458 \text{ mm}$ e afinamento de $29,5\%$ e, com a rugosidade da ferramenta igual $1,3 \mu\text{m}$, que representa os casos #07, #08 e #09, as espessuras foram de $0,44 \text{ mm}$ e afinamento de $32,3\%$ enquanto que, com atrito constante, caso #10, a espessura foi de $0,442 \text{ mm}$ com afinamento de $31,9\%$. Como a quantidade lubrificante é o que diferencia os três resultados em cada grupo, podemos observar que a quantidade de lubrificante praticamente não influenciou nos resultados de espessura e afinamento (Figura 5.5a), sendo que, a rugosidade da ferramenta é o fator mais impactante nos resultados, quanto maior a rugosidade, maior será o afinamento e menor a espessura final conforme ilustrado na Figura 5.5b.

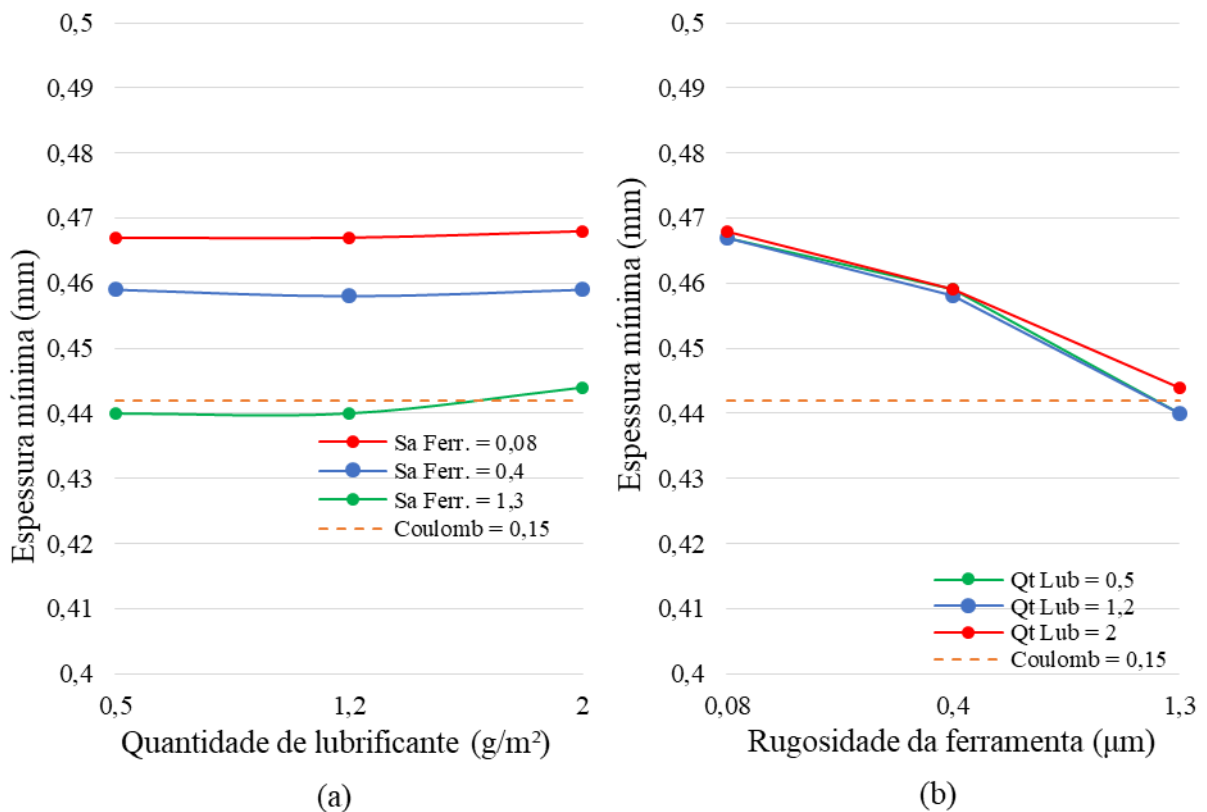


Figura 5.5 – Gráfico da espessura mínima em função da quantidade de lubrificante com as tres rugosidades da ferramenta e para o atrito de Coulomb (a) e espessura mínima em função da rugosidade da ferramenta com as tres quantidades de lubrificante e para o atrito de Coulomb (b)

O estudo de caso #09 foi o que mais se aproximou do caso #10 (Coulomb = $0,15$) como observado na Figura 5.5a.

5.2.3. Dimensões do produto conformado

Como já citado anteriormente (Figura 5.1), a dimensão A representa a largura final do produto enquanto que a dimensão B é o fluxo e corrida do material após conformação. A Figura 5.6a e b contém os resultados encontrados na simulação numérica.

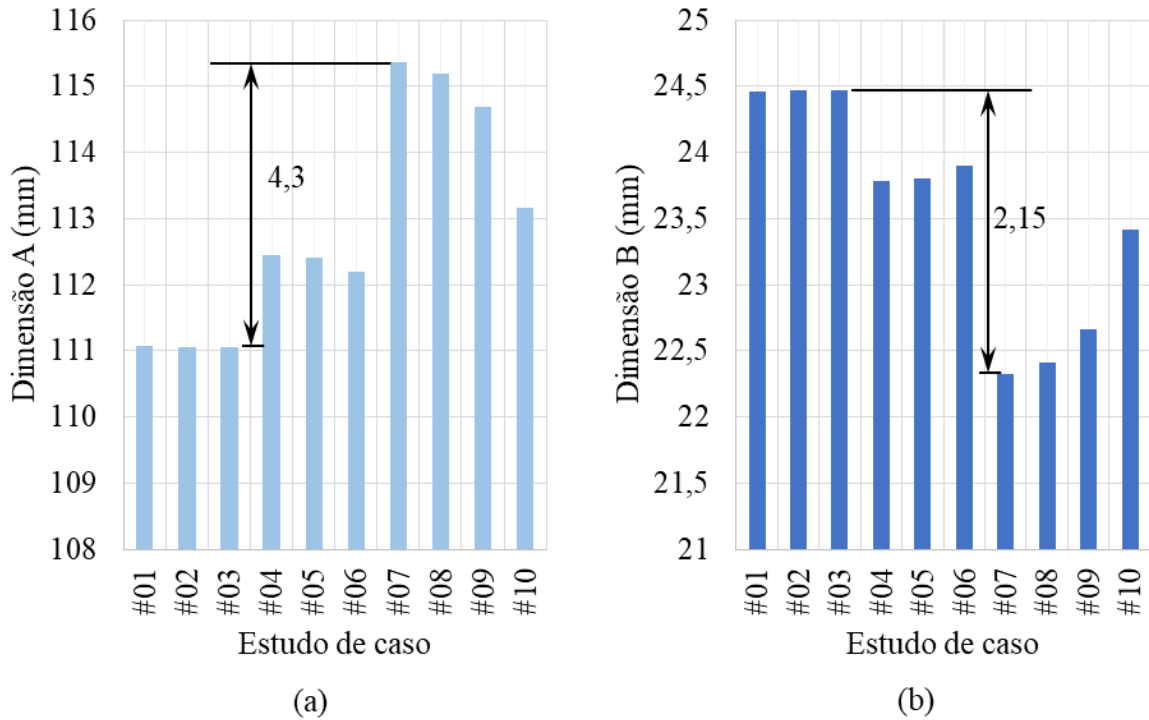


Figura 5.6 – Resultados da dimensão A (a) e dimensão B (b)

O gráfico da Figura 5.7a contém os resultados da dimensão A em função da quantidade de lubrificante para cada uma das três rugosidades para ferramenta ($0,08 \mu\text{m}$, $0,4 \mu\text{m}$ e $1,3 \mu\text{m}$) e para o coeficiente de Coulomb constante igual a $0,15 \text{ mm}$. O resultado permite afirmar que a quantidade de lubrificante praticamente não influenciou na dimensão A para uma ferramenta lapidada com rugosidade de $0,08 \mu\text{m}$, A justificativa para tal diferença está nos modelos tribológicos utilizados como já observado no capítulo 4.6.4 e Figura 4.10. O maior efeito do lubrificante pode ser observado na ferramenta com rugosidade de $1,3 \mu\text{m}$ com uma variação de $0,68 \text{ mm}$.

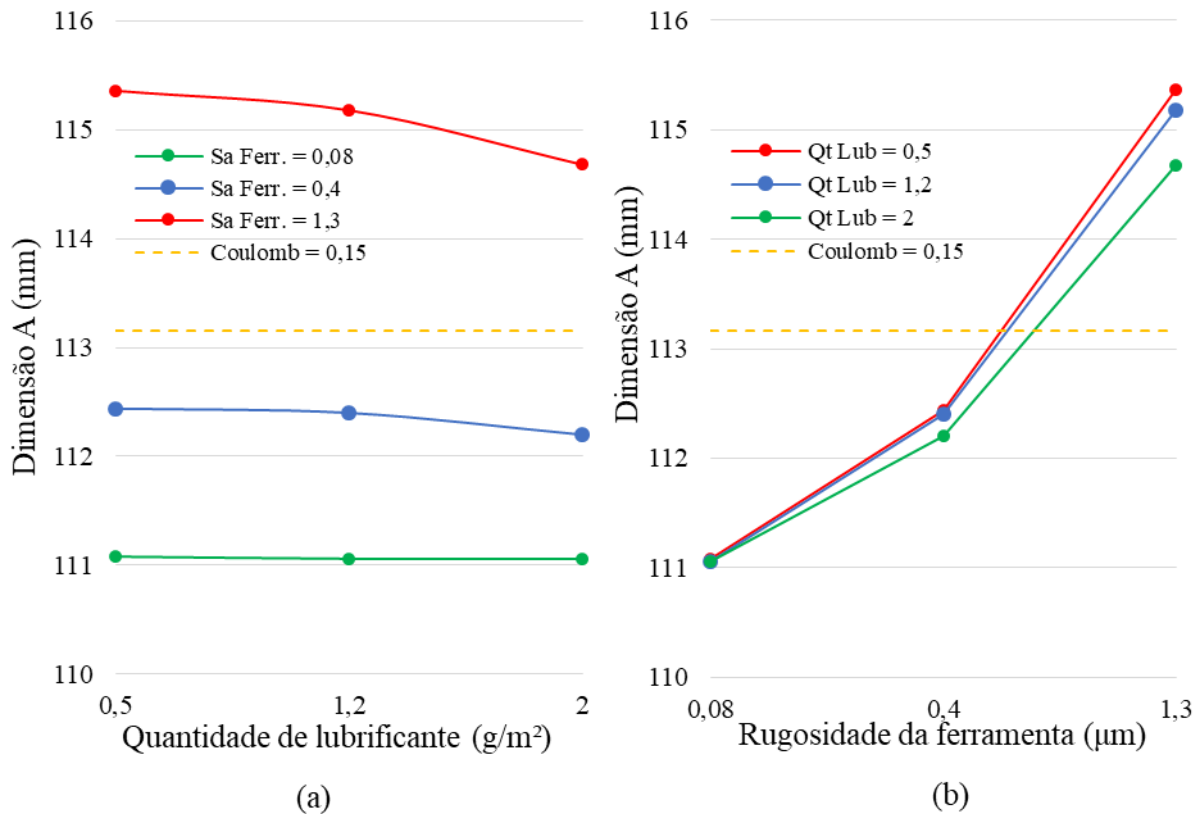


Figura 5.7 – Gráfico da dimensão A em função da quantidade de lubrificante com as tres rugosidades da ferramenta e para o atrito de Coulomb (a) e a dimensão A em função da rugosidade da ferramenta com as tres quantidades de lubrificante e para o atrito de Coulomb (b)

O gráfico da Figura 5.7a demonstra os resultados da dimensão A em função da rugosidade da ferramenta para três níveis de lubrificação ($0,5 \text{ g/m}^2$, $1,2 \text{ g/m}^2$ e 2 g/m^2) e para o coeficiente de Coulomb constante igual a $0,15 \text{ mm}$. Com base nos resultados, observa-se que uma rugosidade maior restringe a corrida do material e conseqüentemente, haverá uma variação maior nos resultados.

O acabamento superficial da ferramenta teve um impacto de $3,7\%$ na variação da dimensão A entre todos os resultados, ou seja, $4,3 \text{ mm}$.

Os gráficos da Figura 5.8a e 68b, com a dimensão B, possuem a mesma avaliação da dimensão A.

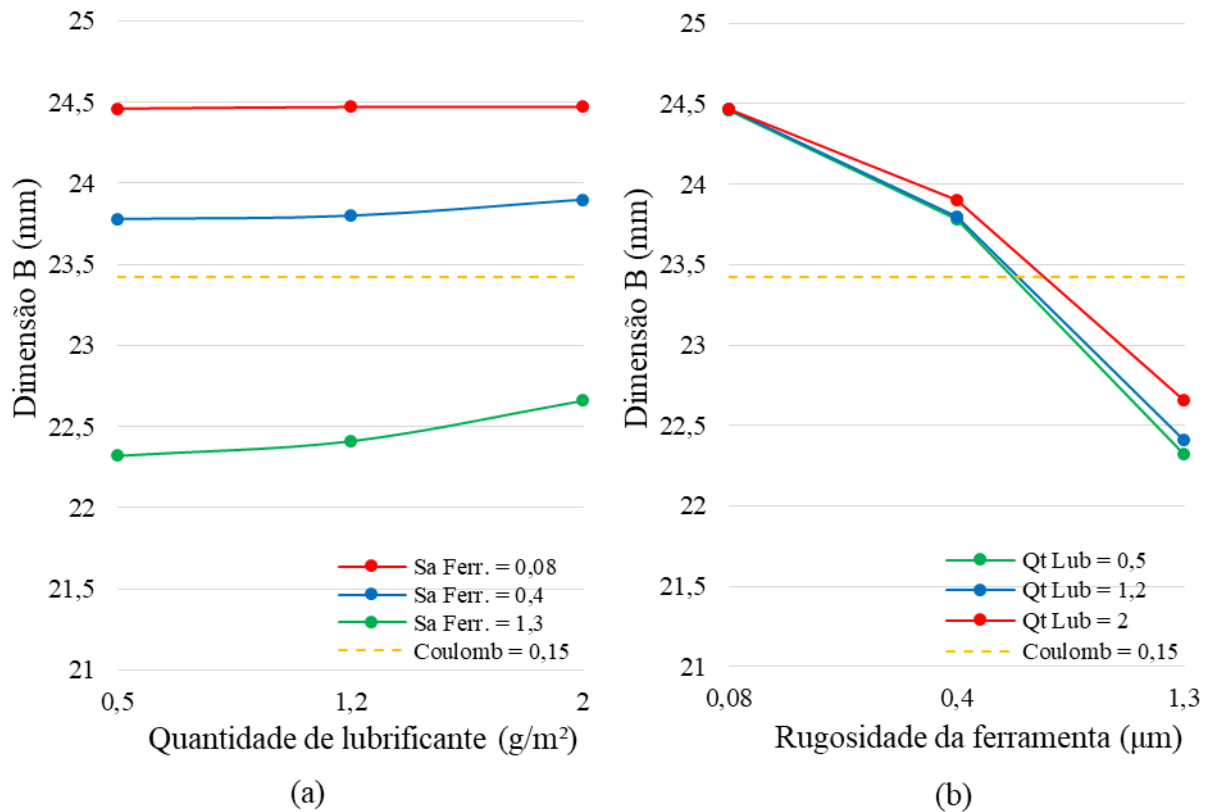


Figura 5.8 – Gráfico da dimensão B em função da quantidade de lubrificante com as tres rugosidades da ferramenta e para o atrito de Coulomb (a) e a dimensão B em função da rugosidade da ferramenta com as tres quantidades de lubrificante e para o atrito de Coulomb (b)

Os resultados da corrida da linha de corte possuem uma grande diferença conforme visto na Figura 5.9. A variação entre o máximo e o mínimo é de 2,15 mm. Utilizando o coeficiente de atrito constante igual a 0,15 como referência, observa-se que a diferença é de 1,2 mm para o modelo de atrito que utiliza uma rugosidade da ferramenta de 1,3 μm , caso #07, e de 0,95 mm para o caso #03 que utiliza uma ferramenta com rugosidade de 0,08 μm . Sigvant *et al.* (2018) também observaram resultados diferentes na corrida de material em um caso experimental, e citam melhores resultados com modelos tribológicos ao invés de valores constantes, destacando ainda que a corrida da linha de corte é influenciada pela pressão de contato exercida pelos sujeitadores, aqui mencionados como prensa chapas.

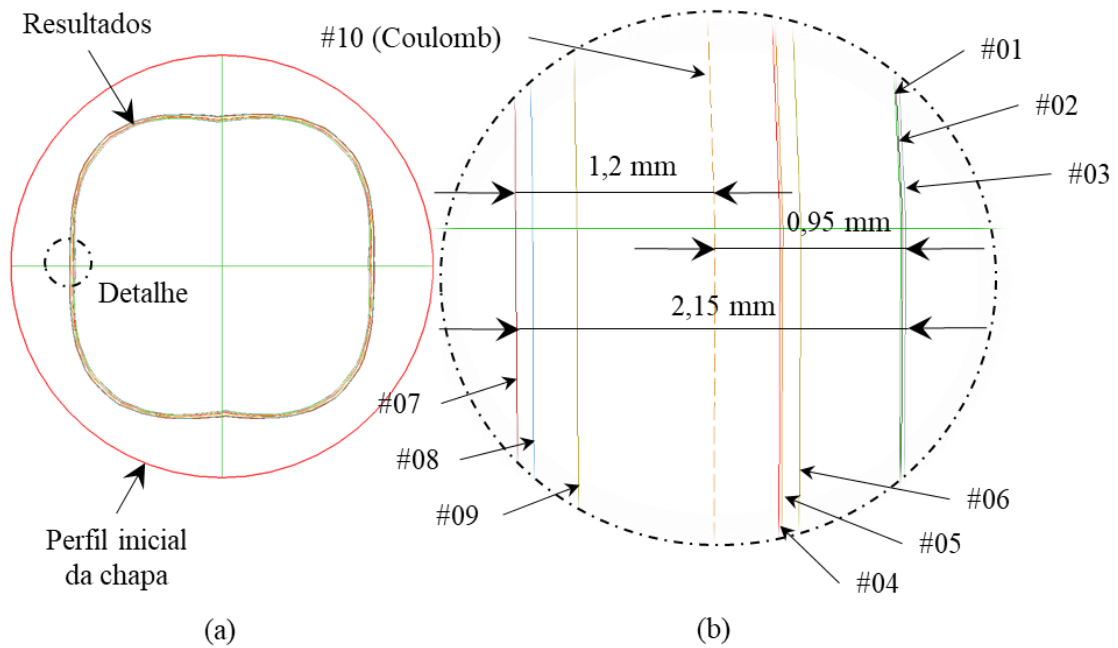


Figura 5.9 – Composição dos resultados (a) e detalhe dos 10 resultados para a dimensão B (b)

5.2.4. Resultados de coeficiente de atrito

Os menores valores de coeficiente de atrito encontrados estão localizados nos raios de dobra da matriz, fato que também foi observado por Pereira *et al* (2010) e Hou *et al.* (2010).

A Figura 5.10 contém os resultados dos coeficientes de atrito localizado na seção do raio da matriz, na face superior da flange e na parede lateral embutida, dos casos #01 (a), #02 (b) e #03 (c). Através deles, podemos observar que no quadrante do raio, o coeficiente se repetiu nas três situações, ao valor de aproximadamente 0,03 enquanto que na flange e na lateral, o valor foi de aproximadamente 0,05 constante em todos os casos.

A Figura 5.11, mostra os resultados para os coeficientes dos casos #04 (a), #05 (b) e #06 (c) e da mesma forma como o grupo anterior, o valor se repete nas três situações ao módulo de 0,04, aproximadamente, no quadrante do raio, porém, na flange e parede lateral, o valor subiu para 0,11 e se manteve constante entre os três casos.

Na Figura 5.12, observamos os resultados dos casos #07 (a), #08 (b) e #09 (c). O coeficiente de atrito no quadrante do raio também apresentou resultados na faixa de 0,03 nas três peças, porém, houve um acréscimo significativo nas regiões de flange e parede lateral, ficando em 0,25.

Entre os nove casos estudados, observa-se que o coeficiente de atrito no quadrante do raio foi praticamente igual para todos, na faixa dos 0,04, enquanto que, nas regiões de flanges

e paredes laterais, o coeficiente foi aumentando na medida em que a rugosidade da ferramenta aumentava.

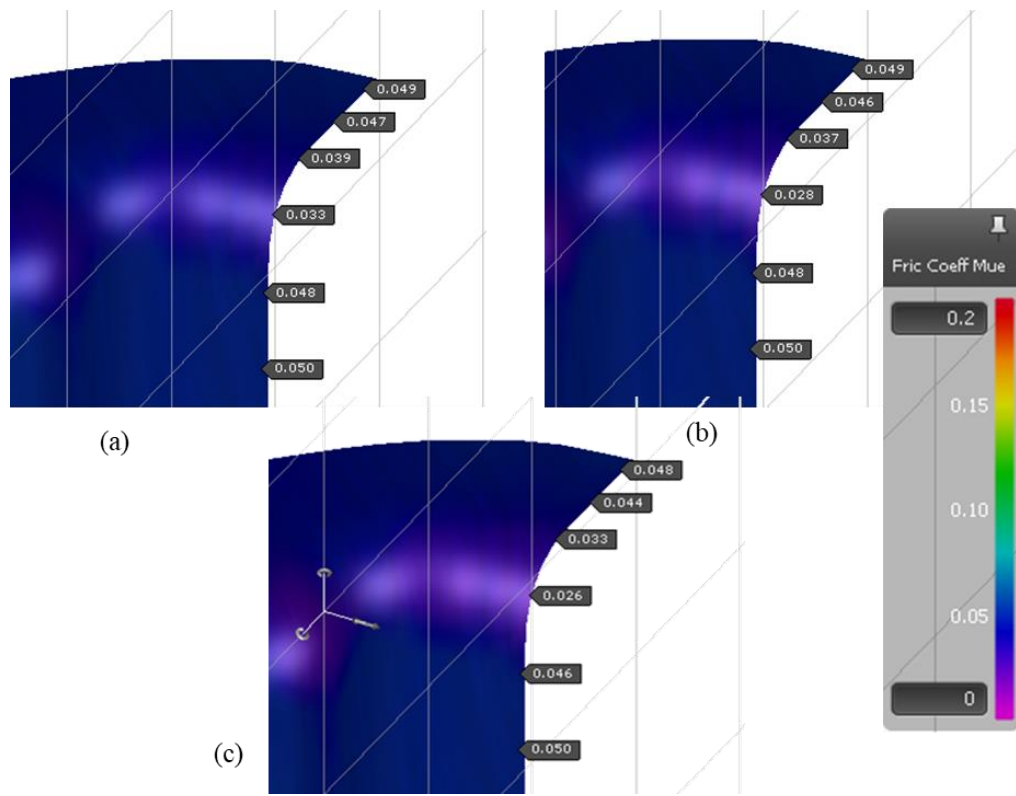


Figura 5.10 – Distribuição do coeficiente de atrito nos raios da matriz para os estudos de caso #01 (a), #02 (b) e #03 (c)

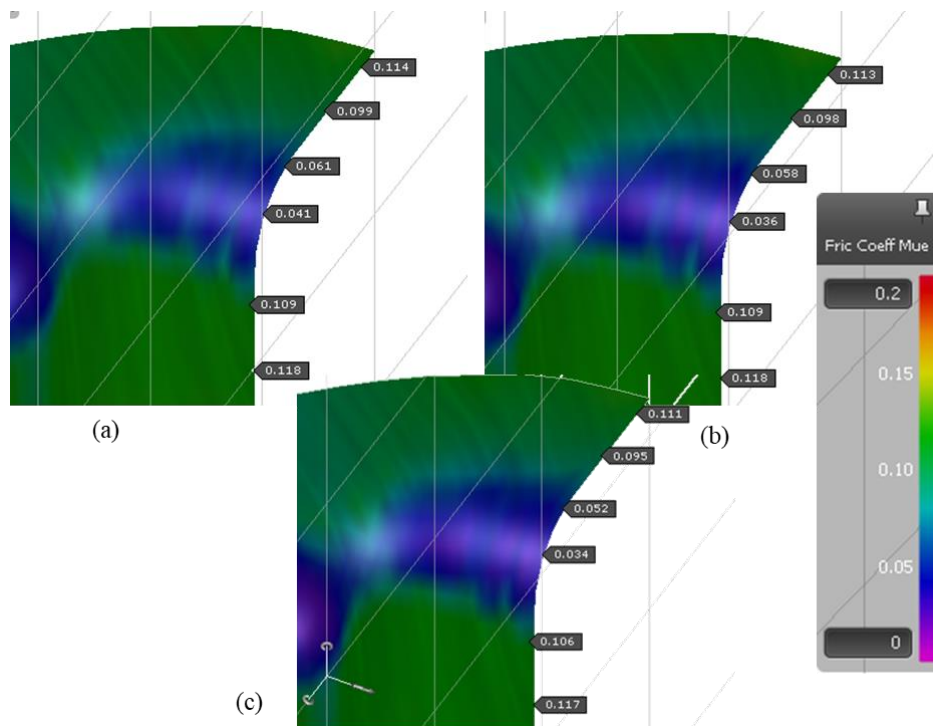


Figura 5.11 – Distribuição do coeficiente de atrito nos raios da matriz para os estudos de caso #04 (a), #05 (b) e #06 (c)

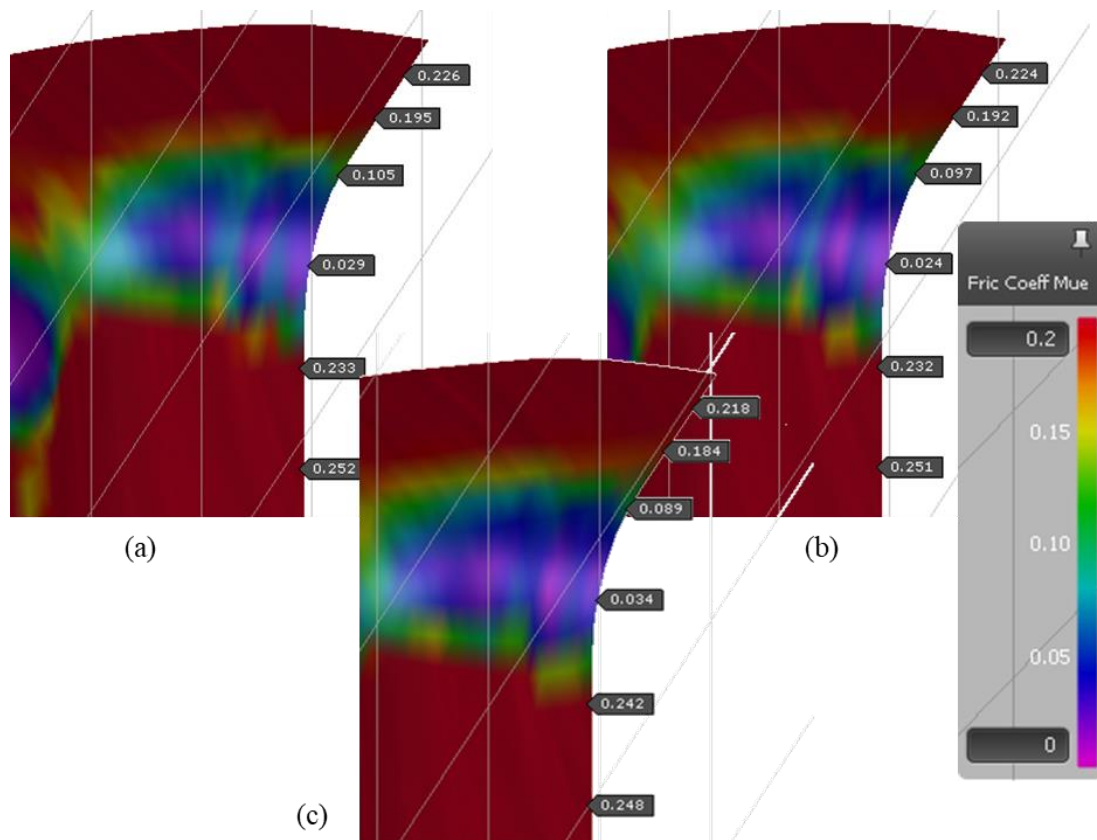


Figura 5.12 – Distribuição do coeficiente de atrito nos raios da matriz para os estudos de caso #07 (a), #08 (b) e #09 (c)

Os resultados do coeficiente de atrito ao longo da seção foram tabelados a fim de avaliar o seu comportamento. No gráfico da Figura 5.14 observa-se os coeficiente de todos os estudos de caso para a seção ilustrada na Figura 5.13.

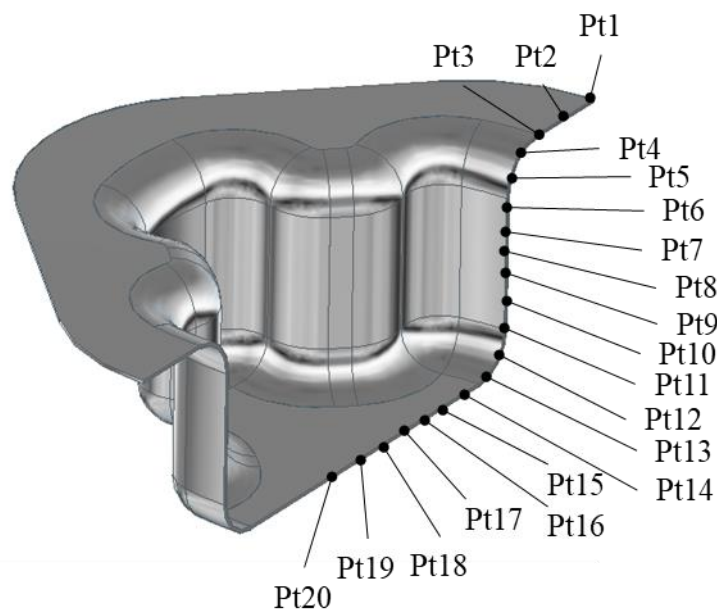


Figura 5.13 – Identificação dos pontos na seção para leitura do coeficiente de atrito

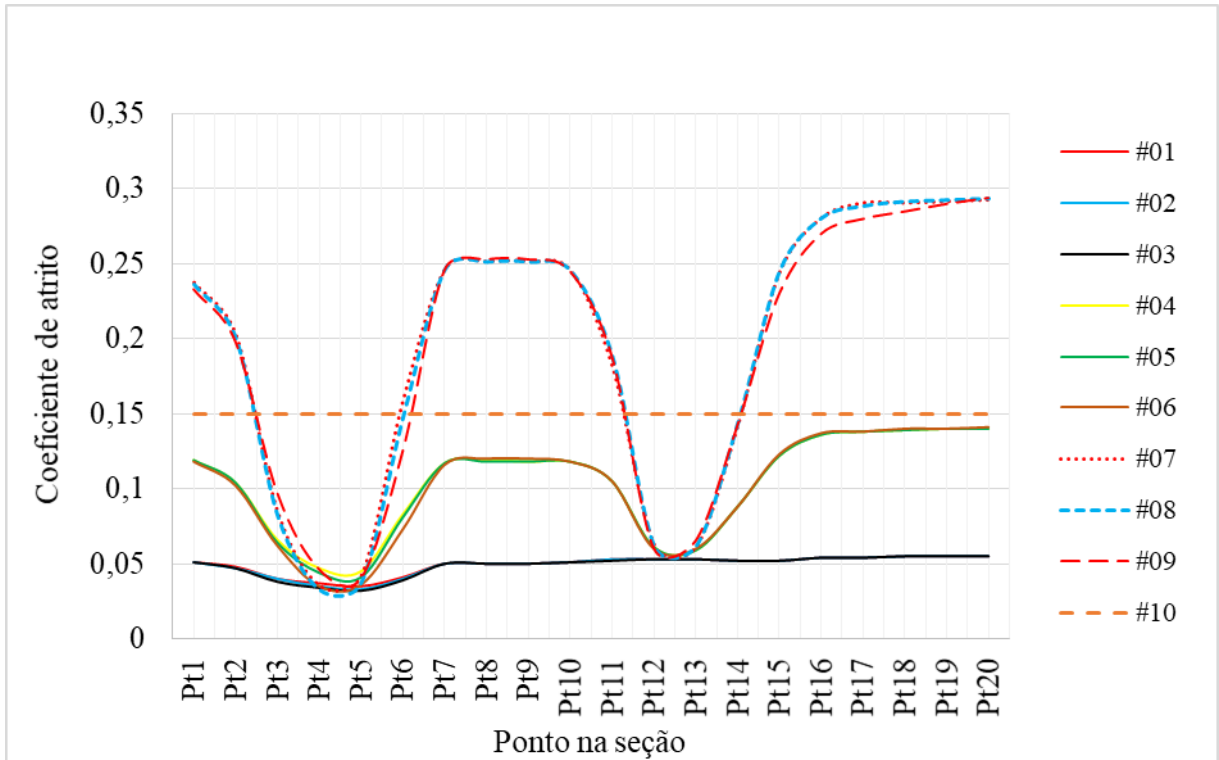


Figura 5.14 – Coeficiente de atrito ao longo da seção para os dez estudos de caso

Pode se observar que nos estudos de caso #04 até #09, nos intervalos dos pontos 4-5 e 12-13, localizados nas regiões dos raios, há uma queda significativa no coeficiente de atrito. Este comportamento acontece pelo fato destas regiões possuírem uma pressão de contato mais elevada como pode ser visto na Figura 5.15. As maiores pressões de contato acontecem nos raios esféricos do punção e da matriz ao valor de aproximadamente 40 MPa.

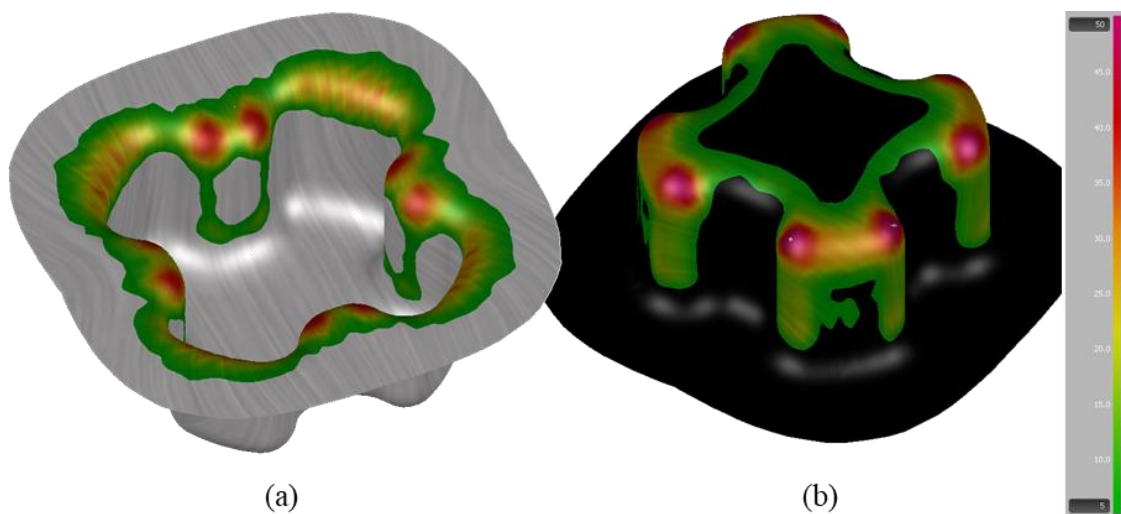


Figura 5.15 – Distribuição das pressões de contato em MPa na matriz (a) e no punção (b)

As pressões de contato nos raios de dobra da matriz estão ilustrados na Figura 5.16, para os estudos de caso #01 (a), #02 (b) e #03 (c), na Figura 5.17 para os estudos de caso #04 (a), #05 (b) e #06 (c) e na Figura 5.18 para os estudos de caso #07 (a), #08 (b) e #09 (c).

Os resultados mostram que os valores de pressão de contato nesta região estão na faixa de 30 MPa aproximadamente, com uma variação de ± 4 MPa entre os estudos.

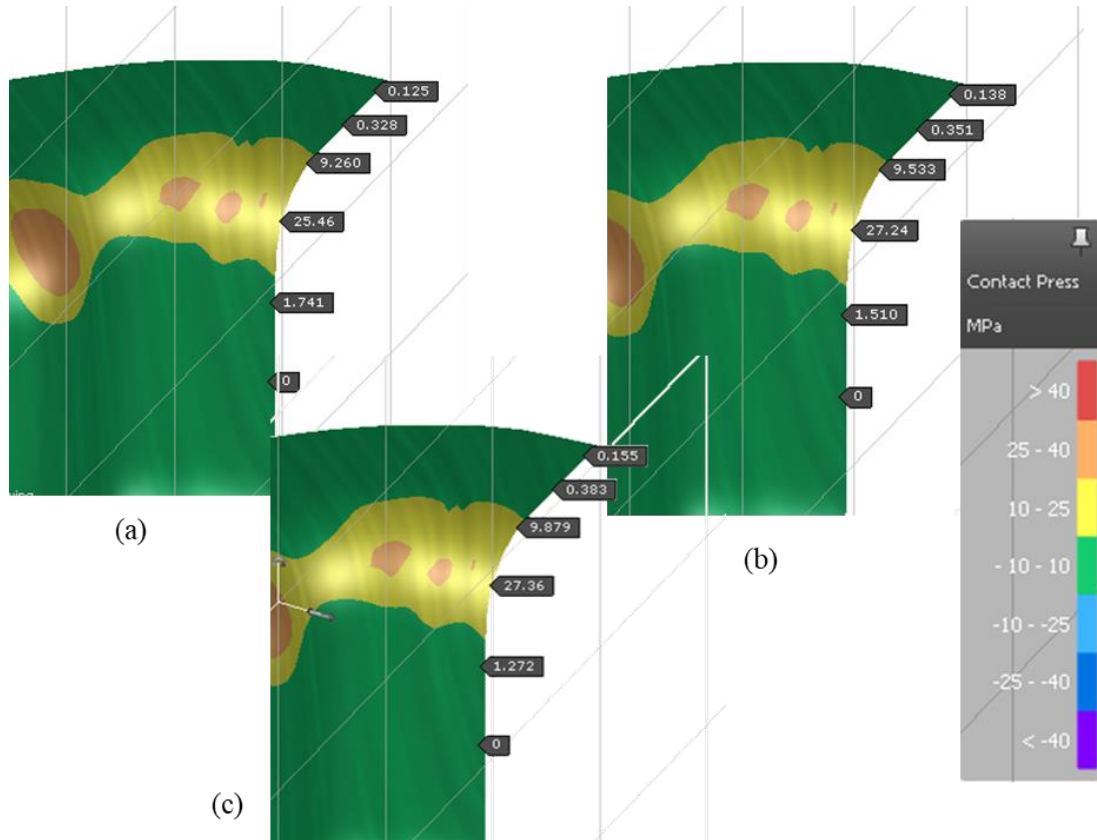


Figura 5.16 – Pressão de contato nos raios da matriz para os estudos de caso #01 (a), #02 (b) e #03 (c)

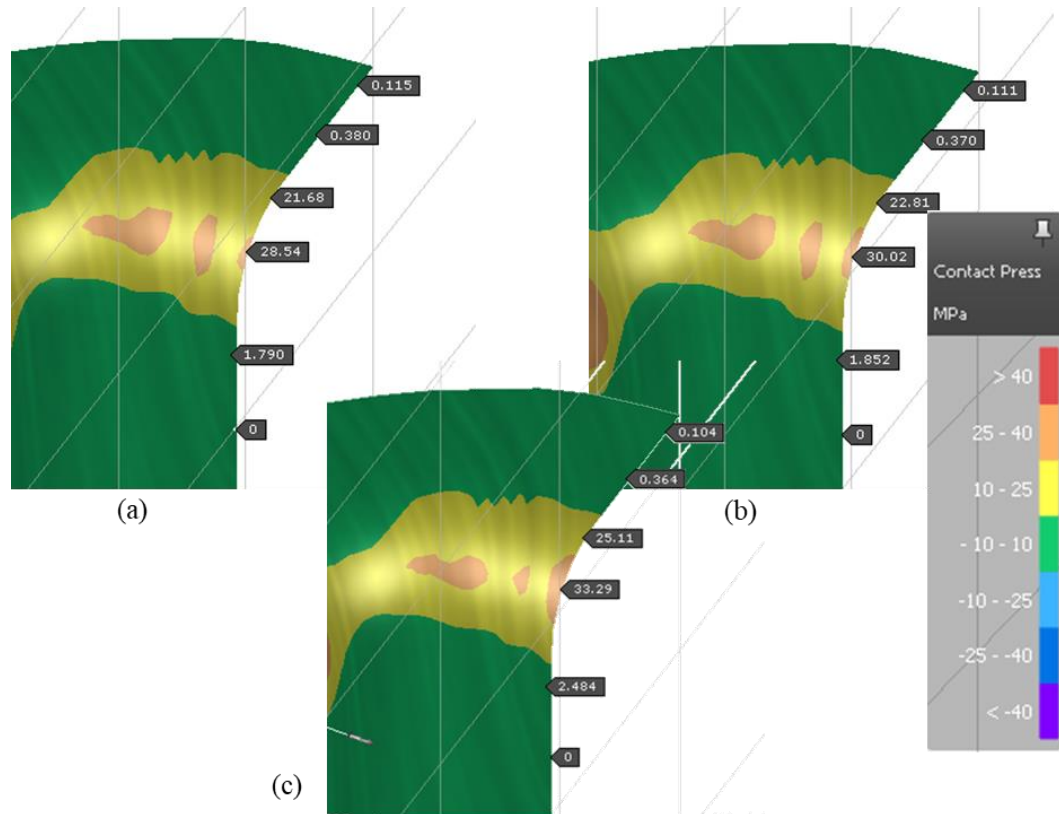


Figura 5.17 – Pressão de contato nos raios da matriz para os estudos de caso #04 (a), #05 (b) e #06 (c)

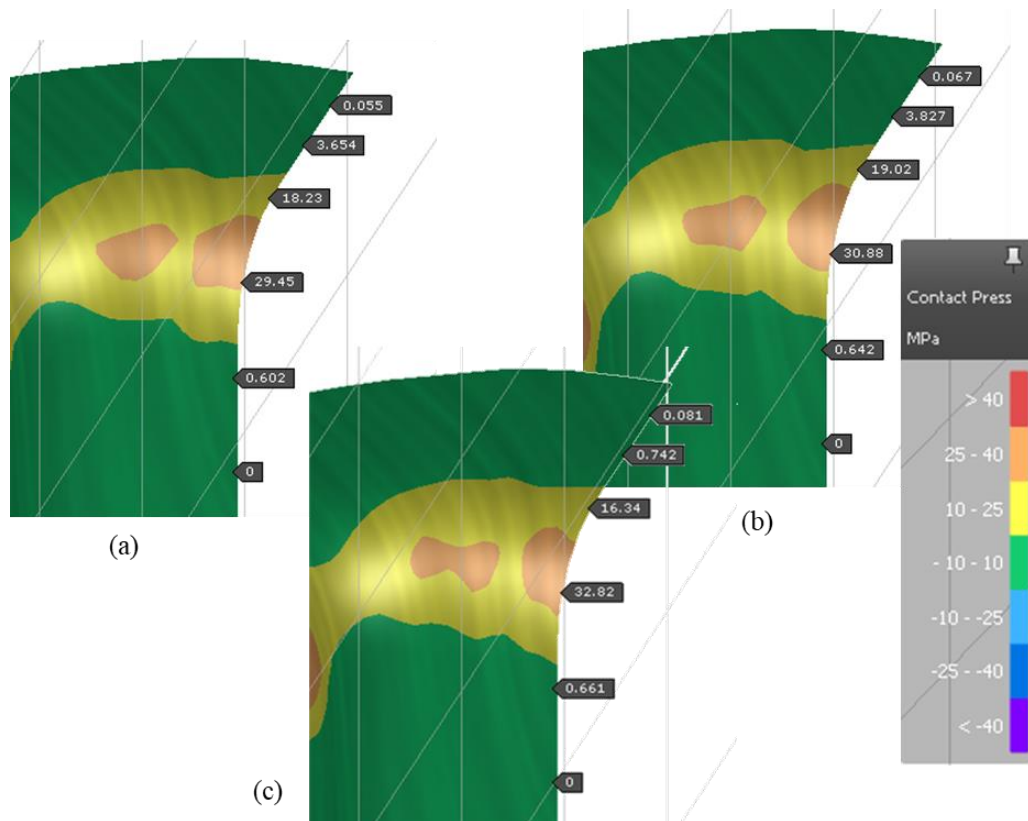


Figura 5.18 – Pressão de contato nos raios da matriz para os estudos de caso #07 (a), #08 (b) e #09 (c)

Os resultados de coeficientes de atrito e pressão de contato apresentados nas figuras anteriores indicam uma relação entre ambos. Este fato já foi relatado e confirmado em vários estudos como é o caso de Gåård (2008), Pereira *et al.* (2010), Hou *et al.* (2010), Drunn *et al.* (2016), Wang *et al.* (2016). Para comprovar esta dependência, 20 pontos ao longo da seção apresentada na Figura 5.13 foram avaliados em resultados de coeficiente de atrito e pressão de contato.

A Figura 5.19 contém a média dos coeficientes de atrito dos casos #01, #02 e #03 representados com a linha amarela, enquanto que, a média dos casos #04, #05 e #06 na linha de cor verde e a médias dos casos #07, #08 e #09 na linha azul. A linha tracejada em cor laranja é o coeficiente de atrito constante de Coulomb. A pressão de contato média de todos os estudos de caso estão sendo representados pela linha de cor vermelha. Através deste gráfico, podemos afirmar que, em superfícies mais rugosas, o coeficiente de atrito é inversamente proporcional à pressão de contato, isto ocorre pelo fato de as asperezas da superfície da chapa/ferramenta estarem sendo deformados plasticamente, aumentando assim, a área real de contato, confirmando o estudo de Drunn *et al.* (2016).

Nas situações em que as superfícies possuam rugosidades menores, como é o caso #07, #08, #09 com $0,08 \mu\text{m}$, não há uma variação significativa no coeficiente de atrito e isto ocorre porque a área aparente da superfície se aproxima da área real, como constatado por Karapannasamy *et al.* (2014).

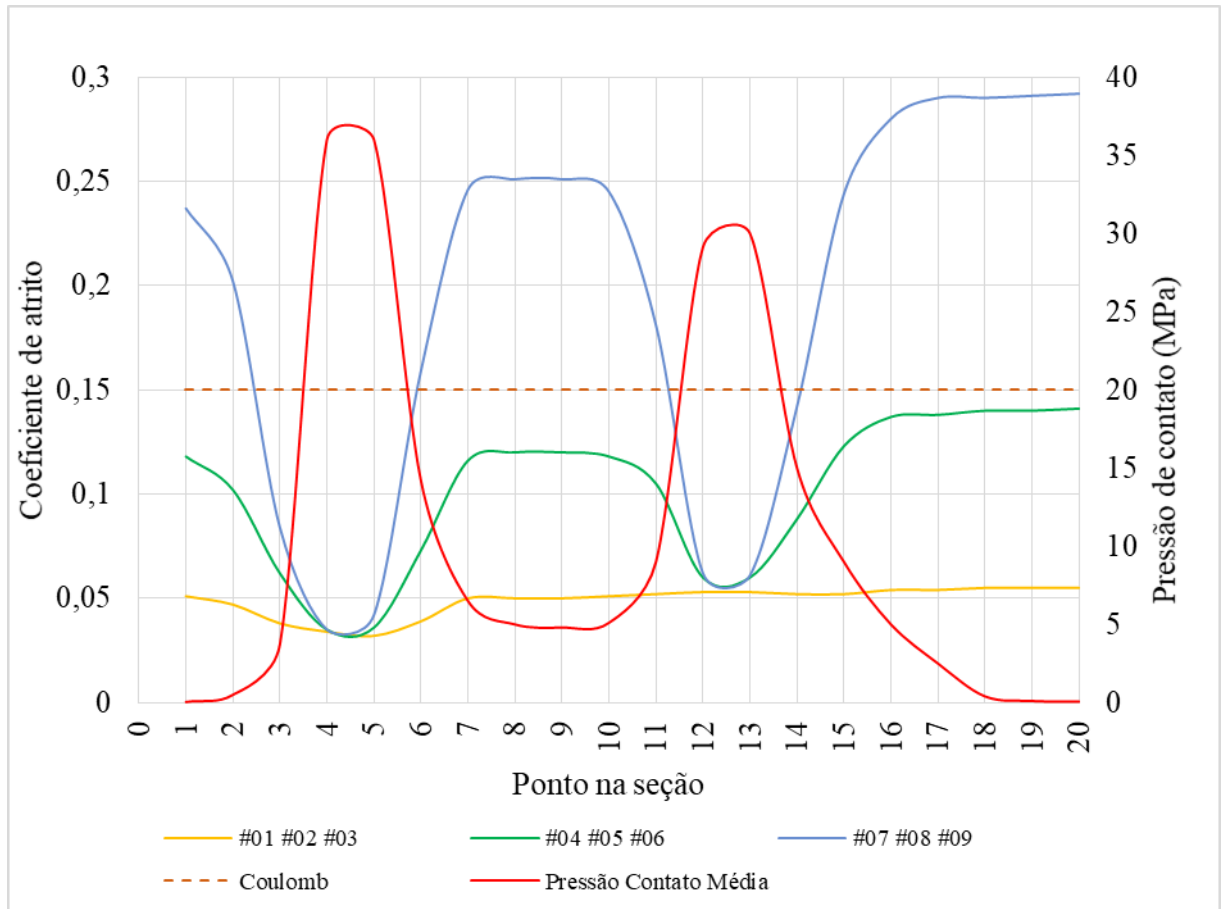


Figura 5.19 – Coeficiente de atrito e pressão de contato ao longo da seção

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre as condições tribológicas no processo de conformação no âmbito numérico. O estudo englobou a caracterização da superfície da chapa e da ferramenta a fim de obter a rugosidade superficial de ambas, a pesquisa sobre quantidades de lubrificantes utilizados no processo, permitindo assim, criar os modelos tribológicos. Os modelos fornecem resultados de coeficientes de atrito dependentes da taxa e velocidade de deformação da chapa, pressão de contato e quantidade de lubrificante empregado. Os modelos tribológicos e o modelo de Coulomb foram utilizados na simulação dos estudos de caso. Os resultados obtidos permitiram as seguintes conclusões:

- Estudos de caso #01, #02 e #03, com rugosidade de $0,08 \mu\text{m}$ para uma ferramenta lapidada, mostra que o lubrificante possui pouco efeito sobre os resultados estudados. Uma ferramenta lapidada praticamente não possui vales e sulcos na superfície o que impede com que o lubrificante fique alojado entre as superfícies;
- Entre os 3 acabamentos estudados para ferramenta, a de rugosidade $0,08 \mu\text{m}$ possui a menor força de conformação;
- Regiões com maiores pressões de contato são as que possuem o menor valor de coeficiente de atrito e estão localizados nos raios de dobra da matriz;
- Para todos casos estudados, observa-se que há diferença nos resultados entre o modelo de coulomb para com os modelos tribológicos;
- Pode se observar que a rugosidade superficial da ferramenta possui grande influência nos resultados de força do punção. Neste estudo a diferença foi de 6,5%.
- O fato da importância da rugosidade superficial possuir um impacto significativo nos resultados pode ser um empecilho para obter resultados precisos na cadeia produtiva em larga escala, pois o processo de preparação de superfícies geralmente não garante a uniformidade em toda a área, principalmente em áreas muito grandes. Uma alternativa para contornar este problema é identificar as regiões mais críticas e sensíveis na

simulação e priorizar o acabamento nestas regiões. Sigvant *et al.* (2019) também relatam que para as perspectivas na simulação, os efeitos da rugosidade da superfície da ferramenta podem aumentar a dificuldade em obter resultados precisos entre simulação e experimental.

- Muitos estudos relatam as vantagens de utilizar modelos tribológicos para descrever o coeficiente de atrito em função da quantidade de variáveis envolvidas, porém, vale destacar a dificuldade em obter dados para caracterizar o modelo tribológico fora do ambiente experimental de laboratório;
- Superfícies com rugosidades muito baixas não favorecem a utilização dos lubrificantes no processo de conformação, pois são expelidos durante o processo.
- De uma forma geral, pode-se observar que houve variações em todos os parâmetros estudados, alguns com maior e outras menor impacto. Wang *et al.* (2016), confirmaram em experimentos práticos que modelos que utilizam o coeficiente de atrito variável e dependente da pressão de contato, descrevem com mais precisão o atrito interfacial e fornecem resultados de retorno elástico mais apurados;

Sugestões para trabalhos futuros:

- Calibração dos modelos tribológicos considerando a velocidade de deformação, pressão de contato, rugosidade superficial das ferramentas e temperatura para chapas comercialmente utilizadas na indústria;
- Realizar um estudo experimental do presente trabalho;
- Realizar estudo com geometrias que apresentem outros comportamentos e/ou solicitações avaliando o retorno elástico da chapa;
- Estudo com diferentes acabamentos superficiais da chapa (galvanizada, oleada, decapada, comercial, com jateamento, dentre outras);

- Estudo com diferentes acabamentos superficiais para ferramentas em função dos tipos de revestimentos (sem revestimento, PVD, Balinit, Nitretação, cromo, dentre outros);
- Estudo com diferentes materiais de ferramenta (Aço ferramenta, sinterizados, ferro fundidos, entre outros);

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 4287, **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.

Al Azraq, S., Teti, R., Ardolino, S., Monacelli, G., **FEM analysis of advanced high strength steel car body drawing process**, Dept. of Materials and Production Engineering, University Of Naples Federico II, Italy, 2005

Altan T. et al., **Conformação de metais: Fundamentos e aplicações**. São Paulo: EESC-USP, 1999. 350 p.

Autoform 7.0.7 **Software Manual**. AutoForm Engineering GmbH, 2019

Bay N., Olsson D. D., Andreasen J. L., **Lubrificant Test Methods for Sheet Metal Forming**. Tribology International, 41: 844-853, 2008.

Bin F., Luo Z.-J., **Finite Element Simulation of the Friction Mechanism in Plastic-Working Tecnology**. Wear 121, 41-51. 1988.

Bowden F. P., Tabor D., **The Friction and lubrication of Solids**. Ney York: Oxford University Press, 1954.

Callister, W. D., **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 7th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2007.

Cayssials F., **A New Metod for Predictive FLC**. In: Proceedings of the 20th IDDRG Congress, Brussels, Belgium, pp. 443-454, 1998.

Czichos H., Habig K.-H., **Tribologie Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik**. Vieweg+Teubner Verlag, 2010.

Dieter G.E., **Atrito e lubrificação**. Metalúrgica mecânica, v.2, cap. 15.7, 1981.

DIN 4760, **Form Deviations: Concepts, Classification System**. Deutsches Institut Fur Normung, 1982-06

DIN 8582. **Manufacturing processes forming – Classification, Subdivision, terms and Definitions.**

DIN 8584. **Manufacturing processes forming under combination of tensile and compressive conditions – Part 3: Deep drawing; Classification, Subdivision, terms and Definitions.**

DIN 8585. **Manufacturing processes forming under tensile conditions – Part 1: General; Classification, Subdivision, terms and Definitions.**

DIN 8586. **Manufacturing processes forming by bending – Classification, Subdivision, terms and Definitions.**

DIN 8587. **Manufacturing processes forming under sheering conditions – Classification, Subdivision, terms and Definitions.**

Drumn J., Rosa A. M., Souza J.H.C. **Análise do comportamento do atrito e desgaste adesivo em ferramentas para conformação de chapas com diferentes pressões de contato**. 36° SENAFOR - 6° Conferência Internacional de Conformação de Chapas, 19° Conferência Nacional de Conformação de Chapas e 3° Congresso Brazilian Deep Drawing Research Group, 2016, Porto Alegre – RS.

Ducan J. L., Shabel B. S., Filho J. G., **A Tensile Strip Test for Evaluating Friction in Sheet Metal Forming**, SAE Technical Paper, n. 780391, 8 pp, 1978

Emmens W.C., **Tribology of flat contacts and its application in deep drawing** [Ph.D. thesis]. University of Twente, 1997.

Fernandes L. F., **Avaliação do Critério de Ruptura na Simulação de Estampagem Baseado em Curvas Limites de Conformação**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

Figueiredo A., Ramalho A., Oliveira M.C., Menezes L. F., **Experimental study of Friction in Sheet Metal Forming**. *Wear*, v.271, 1651-1657, 2011

Folle L.F. **Estudo do coeficiente de atrito para processos de estampagem**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012.

Gåård, A. **Wear Mechanisms in Sheet Metal Forming – Effects Of Tool Microstructure, Adhesion and Temperature**. Karlstad University Studies, 2008

Garcia A., Spim J. A., Santos C. A., **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos LTC, 2000.

Hao S., Klamecki B. E., Ramalingam S. **Friction measurement apparatus for sheet metal forming**. *Wear*, v.224, p.1-7, 1999.

Helman H., Cetlin P. R. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2ª ed. Belo Horizonte: Fundação Chistiano Ottoni, 1993.

Hill R., **Constitutive Modeling of Orthotropic Plasticity in Sheet Metals**. *J. Mech. Phys. Solids* 38, 405-419, 1990

Hillskog T., **Cold Work Tool Steels - Presentation**. Uddeholms AB. Portugal, 2015.

Hilsen R. R., Bernick L. M., **Relationship Between Surface Characteristics and Galling index of Sheet Metal**, ASTM Special Technical Publication 647, pp. 220-237, 1978

Hol J., Meinders V. T., de Rooij M. B., Van Den Boogaard A. H., **Multi-scale Friction Modeling for Sheet Metal Forming: The Boundary Lubrication Regime**. *Tribology International* 81, 112-126, 2015

Hol J., Cid Alfaro M.V., De Rooij M.B., Meinders T., **Advanced friction modeling for sheet metal forming**. *Wear*, 286-287, p.66-78, 2012.

Hol J.H., Wiebenga M., Hörning M., Dietrich F., Dane C. **Advanced friction simulation of standardized friction tests: a numerical and experimental demonstrator**. *Numisheet*, 734, 032092, 2016.

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.

Hol J., Meinders V. T., Geijselaers H. J. M., Van Den Boogaard A. H., **Multi-scale Friction Modeling for Sheet Metal Forming: The Mixed Lubrication Regime**. *Tribology International* 85, 10-25, 2015

Hol J., Cid Alfaro M. V., De Rooij M. B., Meinders T., **Multiscale Friction Modeling for Sheet Metal Forming**, University of Twente, The Netherlands, 2013.

Holmberg K., Erdemir A., **Influence of tribology on global energy consumption, cost and emissions**. *Friction* 5(3), 263-284, 2017

Hosford W. F., Caddell R. M., **Metal Forming: Mechanics and Metallurgy**, 3th ed., Cambridge University Press, New York, 2007

Hou Y.-K., Yu Z.-Q, Li S. **Galling failure analysis in sheet metal forming process**. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, v.15, p.245-249, 2010.

ISO 6892-1. **Materiais Metálicos, Ensaio de Tração, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. 2012.

DIN EN ISO 10113. **Metallic materials – Sheet and strip – Determination of plastic strain ratio**.

Jost H. P., **Economic Implications of Tribology**, Tribology Workshop of the National Research Council of Canada, Associate Committee on Tribology, Montebello, Quebec, November 14 -16, 1984.

Jost R., **Lubrication** (Tribology) Education and Research, Department of Education and Science, HMSO, London, 1966. P.4.

Kajdas C., **Encyclopedia of Tribology**, Vol 15, Amsterdam: Elsevier, 1990.

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.

Kirkhorn L., Bushlya M., Andersson M., Stahl J. E. **The Influence of tool microstructure on friction in sheet metal forming**. *Wear*, v.302, p.1268-1278, 2013.

Korzekwa D. A., Qawson P. R., Wilson W. R. D., **Surface asperity deformation During Sheet Forming**. *Int. J. Mech. Sci.* 34 (7), 521-539, 1992.

Kudo H., Tsubouchi M., Takada H., Okamura K., **An Investigation Into Plasto-Hydrodynamic Lubrication with a Cold Sheet Drawing Test.**, *CIRP Annals*, V. 31/1, p. 175-180, 1982.

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

Ludwik P., **Elemente der Technologischen Mechanik**. Springer-Verlag, 1909

Mizuno T., Okamoto M., **Effects of Lubricant Viscosity at Pressure and Sliding Velocity on Lubricating Conditions in the Compression-Friction Test on Sheet Metals**, *J. of Lubrication Tech.*, V104/1, p. 53-59, 1982.

Makinouchi A., Ike H., Murakawa M., Koga N., **A Finite Element Analysis of Flattening of Surface Asperities by Perfectly Lubrificant Rigid Dies em Metal Working Process.** *Wear* 128, 109-122, 1988.

Nielsen C.V., Bay N., **Review of friction modeling in metal forming processes.** *Journal of materials processing*, 255, pp. 234-241, 2018.

Pereira M. P., Yan W., Rolfe B. F. **Sliding distance, contact pressure and wear in sheet metal stamping.** *Wear*, v.268, p.1275-1284, 2010.

Rodrigues J.; Martins P., **Tecnologia Mecânica – Tecnologia de deformação Plástica V.2: Fundamentos teóricos.** Lisboa: Escolar Editora, 2005.

Sanchez L. R., **Characterisation os a Measurement System for Reproducible Friction Testin on Sheet Metal Under Plane Strain,** *Tribology International*, 32: 375-586, 1999.

Schaeffer L., **Conformação mecânica.** Porto Alegre, Imprensa Livre Editora, Pg 193, 2004.

Schaeffer L., **Conformação de chapas metálicas.** Porto Alegre, Imprensa Livre Editora, 2005

Schuller, **Metal Forming Handbook,** Springer-Verlant. Berlin Heidelberg, 1998.

Seshacharyulu K., Bandhavi Ch., Naik B. B., Rao S. S., Singh S. K., **Understanding Friction in Sheet Metal Forming – A review,** *Materials Today: Proceeding* 5, 18238-18244, 2018.

Sigvant M., Pilthammar J., Hol J., Wiebenga J.H., Chezan T., Carleer B., Boogaard T. van den: **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.

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.

Sigvant M., Pilthammar J., Hol J., Wiebenga J., Chezan T., Carleer B., Boogaard T. V. D., **Friction in Sheet Metal Forming: Influence of Surface Roughness and Strain rate on Sheet Metal Forming Simulations Results**. *Procedia Manufacturing* 29, 512-519, 2019

Sinatora A., **Tribologia: Um resgate histórico e estado da arte**. Prova de Erudição, São Paulo, 2005.

Souza J. H. C., **New Design Approaches for Deep Drawing Tools Using Polymeric Materials**. 127 F. Tese (Doutorado em Engenharia – Área de concentração: Conformação Mecânica). Institut Für Umformtechnik IFU, University Stuttgart, Germany, 2008.

Souza J.H.C., **Influência da pressão de contato e da qualidade da superfície no atrito e no desgaste de chapas de média espessura para conformação**. 35° SENAFOR - 5° Conferência Internacional de Conformação de Chapas, 18° Conferência Nacional de Conformação de Chapas e 2° Congresso Brazilian Deep Drawing Research Group, Porto Alegre – RS, 2015.

Soliman A. A. A., Suliman M., **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.

Stribeck R., **Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager**, *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure* 36 (Band 46) (1902) 1341–1348, 1432–1438, and 1463–1470.

Stoeterau R. L., **Tribologia**. Apostila da disciplina de Tribologia da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2004. Disponível em <imp.ufsc.br/disciplinas/Stoeterau/Tribologia-final-v4.pdf> Acesso em agosto de 2019

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 Materials Processing Technology*, v.210, p.868-876, 2010.

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

Tekkave A. E., **State-of-the-art of mathematical modelling on sheet metal forming**, J. Mater. Process Technol, 103 (1), 1997, pg. 14-22

Ter Haar R., **Friction In Sheet Metal Forming, the influence of (local) contact conditions and deformation**. PhD Thesis. University of Twente. Enschede. 1996.

Triboform, **Virtual Tribology: A new dimension to metal forming simulations**. Disponível em <<http://www.triboform.com/>>. Acesso em 15 de julho 2019.

Vakis A. I., Yastrebov V. A., Scheibert J., Nicola L., Dini D., Minfray C., Almqvist A., Paggi M., Lee S., Limbert G., Molinari J. F., Anciaux G., Aghababaei R., Echeverri R. S., Papangelo A., Cammarata A., Nicolini P., Putignano C., Carbone G., Stupkiewicz S., Lengiewicz J., Costagliola G., Bossia F., Guarino R., Pugno N. M., Müser M. H., Ciavarella M., **Modeling and Simulation in Tribology Across Scales: An Overview**, Tribology International 125, 169-199, 2018.

Valberg H. S., **Applied Metal Forming**, Cambridge University Press, 1st ed., New York, 2010.

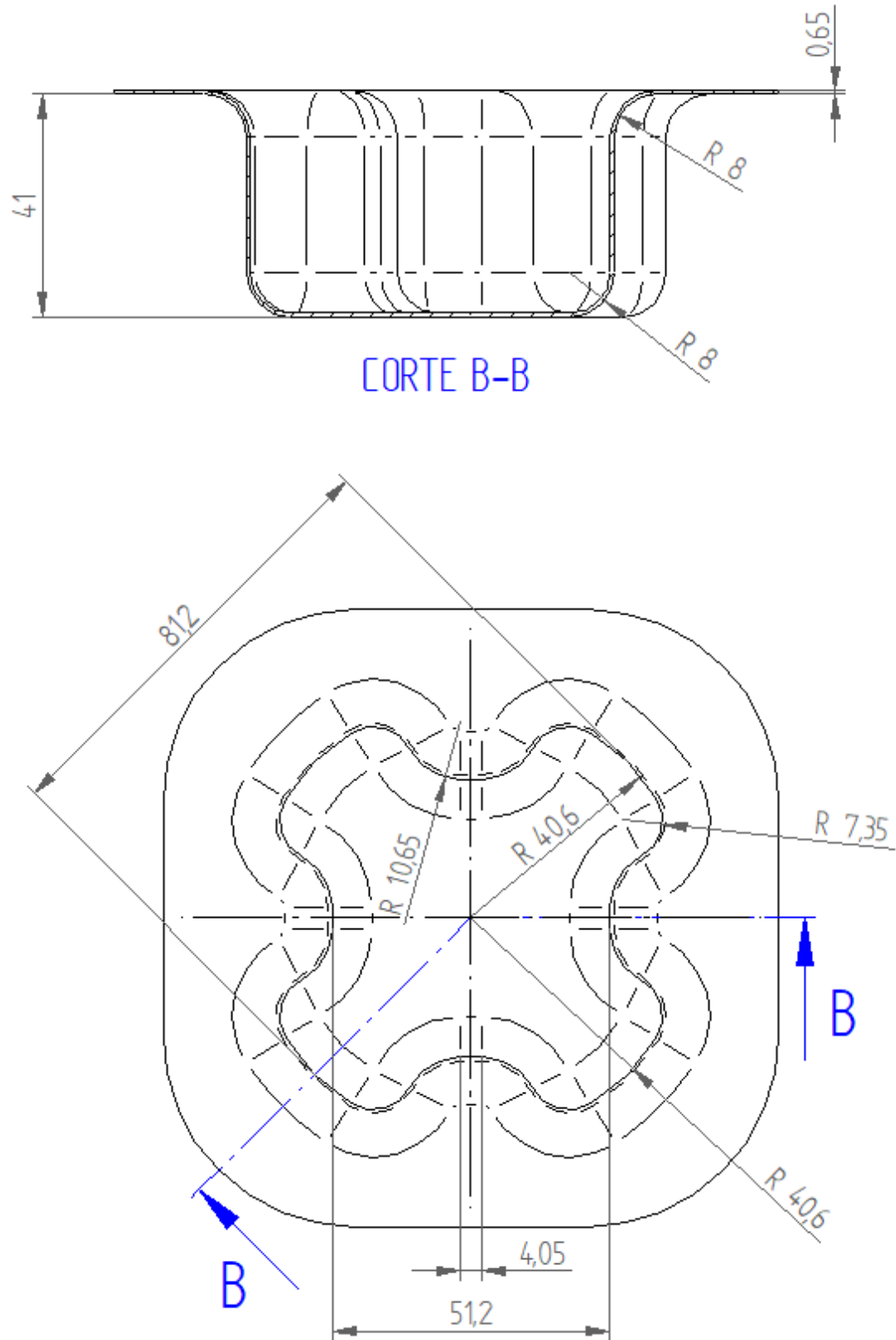
Wang D., Yang H., Li H., **Advanced and Trend of Friction Study in Plastic Forming**, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 24, 1263-1272, 2013.

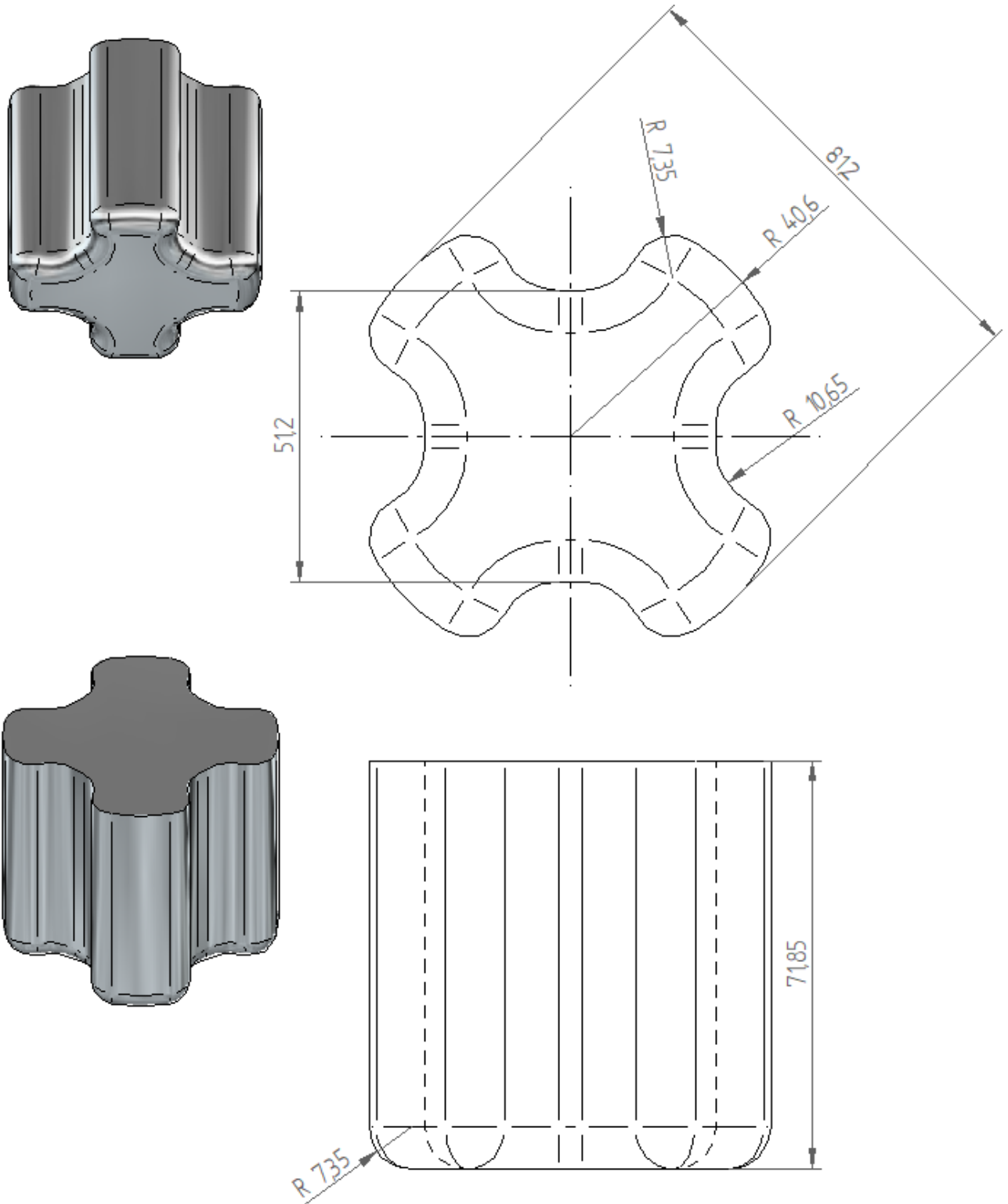
Wang W., Zhao Y., Wang Z., Hua M., Wei X., **A Study on Variable Friction Model in Sheet Metal Forming with Advanced High Strength Steels**, Tribology International 93, 17-28, 2016

Woydt M., Wäsche R., **The History of The Stribeck Curve and Ball Bearing Steels: The Role of Adolf Martens**, Wear, V.268, 1542-1543, 2010

Zhang S., Hodgson P. D., Cardew-Hall M. J., Kalyanasundaram S., **A Finite Element Simulation of Micro-mechanical Frictional Behavior in Metal Forming**. *J. Mater. Process Technol.* 134, 81-91, 2003.

APÊNDICE A – Dimensões das geometrias do estudo de caso



APÊNDICE B – Dimensões das geometrias do punção

APÊNDICE C – Dimensões das geometrias da matriz

