



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CAMPUS TIMÓTEO**

ERIKY MATHEUS DA SILVA CONDESSA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DA CHAPA DE
AÇO AISI 430 EM MATRIZ DE ESTAMPAGEM PLANA**

TIMÓTEO/MG

2024

ERIKY MATHEUS DA SILVA CONDESSA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DA CHAPA DE
AÇO AISI 430 EM MATRIZ DE ESTAMPAGEM PLANA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Valmir Dias Luiz

TIMÓTEO/MG

2024

FOLHA DE APROVAÇÃO

ERIKY MATHEUS DA SILVA CONDESSA

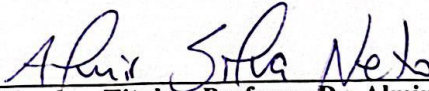
**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DA CHAPA DE
AÇO AISI 430 EM MATRIZ DE ESTAMPAGEM PLANA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

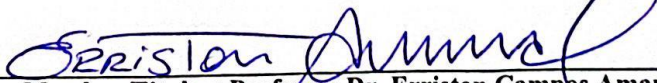
Timóteo, 09 de Setembro de 2024.



Presidente e Orientador: Professor Dr. Valmir Dias Luiz
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Campus Timóteo



Membro Titular: Professor Dr. Almir Silva Neto
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Campus Timóteo



Membro Titular: Professor Dr. Erriston Campos Amaral
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Campus Timóteo

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO

Dedico este trabalho àqueles que sempre estiveram ao meu lado, impulsionando-me e apoiando-me incansavelmente. À minha mãe, Ronisia, uma verdadeira guerreira cujo amor e apoio foram essenciais em cada passo desta jornada. Ao meu pai do coração, Ideraldo, minha maior referência de homem, cuja presença constante moldou quem sou hoje. Às minhas irmãs Erica e Jessica, cujo incentivo e suporte foram fundamentais para que eu pudesse alcançar meus objetivos. À minha avó Catarina, por seu amor incondicional e por ter sido uma figura materna durante um longo período de minha vida. À minha namorada, cujo apoio e encorajamento foram a luz que me guiou nos momentos mais difíceis. A todos vocês, meu mais profundo agradecimento por estarem sempre presentes, por acreditarem em mim e por trabalharem incansavelmente para tornar meus sonhos realidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, fonte de toda sabedoria e força que me permitiu concluir este trabalho, todas as vezes que eu pensei em desistir o Senhor estava comigo me dando ânimo e forças para trilhar essa trajetória tão almejada e difícil ao mesmo tempo, por todos ensinamentos aprendidos durante esse curso.

Agradeço de coração aos meus pais, Ideraldo e Ronisia, cujo amor e apoio inabaláveis foram minha inspiração constante. São vocês que representam para mim a integridade e a determinação, sempre trabalhando incansavelmente para que eu pudesse realizar meu sonho de conquistar o diploma. Vocês são a razão pela qual tudo isso foi possível; sem o apoio de vocês, jamais teria chegado até aqui. Obrigado por serem meu suporte incondicional e por acreditarem em mim em todos os momentos.

Às minhas irmãs, Erica e Jessica, pelo incentivo e suporte incondicionais em cada etapa deste percurso. À minha avó Catarina, por seu carinho e por ter sido um pilar de apoio em minha vida. À minha namorada, cujo amor e compreensão me deram forças nos momentos mais desafiadores.

Aos meus amigos e colegas de curso, por compartilharem esta jornada comigo e por todo apoio mútuo. E por fim, meu sincero agradecimento ao meu orientador, o Professor Doutor Valmir, pela sua orientação valiosa, paciência e dedicação ao longo deste processo. Sem o apoio e contribuição de cada um de vocês, este trabalho não teria sido possível.

RESUMO

Estudos na área de conformação de chapas metálicas sempre enfrentaram grandes desafios, em especial os processos de estampagem, pois o comportamento mecânico e tribológico das chapas durante a estampagem são influenciados por fatores como a pressão, o atrito e a velocidade. Se esses fatores não forem devidamente controlados, podem interferir de forma significativa na produtividade e qualidade dos produtos e, além disso, causar prejuízos ao processo. Neste contexto, o objetivo da presente pesquisa é investigar o comportamento tribológico do aço inoxidável ferrítico AISI 430 com qualidade de estampagem profunda. Para isso, tiras metálicas possuindo 0,8x25x375 mm foram submetidas ao teste simulativo de atrito denominado ensaio de estampagem de tira, o qual simula a mecânica de contato na região do prensa chapa do processo de estampagem profunda. Os ensaios foram conduzidos em regime lubrificado e, além disso, diferentes parâmetros de ensaio foram utilizados no presente estudo, tal como a variação da força normal e a velocidade de teste. O valor do coeficiente de atrito foi determinado e diferentes técnicas de análise foram utilizadas nas amostras antes e após os ensaios, tal como microdureza vickers, rugosidade, perfilometria e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados experimentais revelaram que o coeficiente de atrito, as durezas e rugosidade aumentaram com as variações de forças, ocorreu também o fenômeno de aração quanto se aumentou a força e velocidade. Este trabalho apresentou possibilidades para desenvolvimento e estudo de novas ferramentas para estampagem, contribuindo também para desenvolvimento e melhoria de novas simulações.

Palavras-chave: Conformação de chapas metálicas; Estampagem; Coeficiente de atrito; Aço inoxidável ferrítico AISI 430; Ensaio de Estampagem de tira.

ABSTRACT

Studies in the field of sheet metal forming have always faced significant challenges, especially stamping processes, because the mechanical and tribological behavior of the sheets during stamping is influenced by factors such as pressure, friction, and speed. If these factors are not properly controlled, they can significantly interfere with the productivity and quality of the products and cause detriment to the process. In this context, the objective of the present research is to investigate the tribological behavior of deep drawing quality AISI 430 ferritic stainless steel. For this purpose, metal strips measuring 0.8x25x375 mm were subjected to the strip drawing test, which simulates the contact mechanics in the blank holder region of the deep drawing process. The tests were conducted under lubricated conditions, and different test parameters were used in the present study, such as varying the normal force and test speed. The coefficient of friction was determined, and different analysis techniques were used on the samples before and after the tests, such as Vickers microhardness, roughness, profilometry, and scanning electron microscopy. The experimental results revealed that the coefficient of friction, hardness, and roughness increased with variations in forces. Additionally, the phenomenon of plowing occurred with increased force and speed. This work presented possibilities for the development and study of new tools for stamping, also contributing to the development and improvement of new simulations.

Keywords: Sheet Metal Forming; Stamping; Coefficient of Friction; Ferritic Stainless Steel AISI 430; Strip Drawing Test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama Ferro-Cromo-Carbono.	18
Figura 2 - Formação de outras ligas de aços inoxidáveis derivadas da liga tipo 430.....	19
Figura 3 - Fatores que influenciam na conformabilidade da chapa metálica.	22
Figura 4 - Desenho esquemático da estampagem por estiramento.....	23
Figura 5 - Desenho esquemático da estampagem por embutimento.	23
Figura 6 - Divisão dos processos de estampagem.	24
Figura 7 - Obtenção de um copo na estampagem profunda.	25
Figura 8 - Curva Limite de Conformação (CLC) típica.	27
Figura 9 - Determinação da mudança local de forma usando grade determinística de círculos secantes.....	29
Figura 10 - (a) um corpo deslizando sobre uma superfície com um diagrama de corpo livre e (b) um corpo rolando em uma superfície horizontal; W é a carga (força) normal e F é a força de atrito.	30
Figura 11 - Forças atuando em uma seção elementar da tira.	31
Figura 12 - Diagrama representativo do dispositivo de para o teste de estampagem de tiras (SDT).	32
Figura 13 - Tipos de contato entre a chapa e a ferramenta: (a) Contato plano; (b) Deslizamento sobre uma parte curva da ferramenta; (c) Contato deslizante linear.	34
Figura 14 - Mecanismos básicos de atrito de uma perspectiva microscópica.	35
Figura 15 - Curva de Stribeck mostrando os diferentes regimes de lubrificação (p_{tot} = pressão total, p_c =pressão de contato sólido, p_h =pressão hidrodinâmica, h =espessura do filme lubrificante, h_{cr} =espessura crítica).	38
Figura 16 - Rugosidade das três superfícies ensaiadas: (a)área plana externa (rugosidade baixa) ; (b) área plana interna(rugosidade média); (c) área de raio de trabalho (rugosidade alta).	40
Figura 17 - Fluxograma do procedimento experimental.	42
Figura 18 - Tribossimulador utilizado: desenvolvido: desenvolvido: (1) sensor de torque; (2) sensor de proximidade indutivo; (3) garra; (4) célula de carga; (5) cilindro hidráulico dianteiro; (6) sensor de posição LVDT; (7) estrutura de montagem; (8)unidade hidráulica; (9) computador com software de aplicação; (10) cilindro hidráulico traseiro; (11) sensor de	

torque; (12) interface homem-máquina; (13) painel de controle; (14) porta-ferramentas de pino livre.....	44
Figura 19 - Dispositivo desenvolvido para simular ensaio SDT.....	45
Figura 20 - Sistema de aquisição de dados (SAD) - Loadstar Sensors.	45
Figura 21 - Método de determinação do valor do coeficiente de atrito.....	48
Figura 22 - Gráfico de dispersão de dureza Vickers da chapa AISI 430.	49
Figura 23 - Valores de rugosidade medidos para a chapa de aço AISI 430 no estado conforme recebido: (a) sentido de laminação (b) sentido transversal.....	50
Figura 24 - Curvas características das forças atuantes (F_n e F_t) e do coeficiente de atrito para a tira de aço AISI 430.	51
Figura 25 - Variação do coeficiente de atrito (μ) com a força normal aplicada.....	52
Figura 26 - Dureza Vickers após ensaio SDT.	54
Figura 27 - Rugosidade após ensaio SDT.	55
Figura 28 - Perfil tridimensional juntamente com os perfis bidimensionais da primeira amostra submetida ao ensaio SDT, com menor aplicação de força e velocidade 700N x 1mm/s.	56
Figura 29 - Análise topográfica 3D juntamente com os perfis bidimensionais da amostra ensaiada usando o ensaio SDT onde foram aplicadas maior força e velocidade 2100N x 4mm/s.	57
Figura 30 - Análise MEV superfície ensaiada utilizando os parâmetros: a) F1V1 com ampliação de 500X b) F3V2 com ampliação de 500X.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de composição (% em peso) química entre os aços.	20
Tabela 2 - Composição química padronizada da chapa de aço inoxidável (% em peso).	43
Tabela 3 - Parâmetros operacionais usados no ensaio SDT do aço AISI 430.	47
Tabela 4 - Resultado da medida de espessura da chapa de aço AISI 430.	50
Tabela 5 - Valor do coeficiente de atrito determinado durante o ensaio SDT.	52
Tabela 6 - Dureza vickers das amostras após a realização dos ensaio SDT.	53
Tabela 7 - Rugosidade das amostras após a realização dos ensaio SDT.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIA	Aço Inoxidável Austenítico
AIF	Aço Inoxidável Ferrítico
AISI	American Iron And Steel Institute
BUT	Bending Under Tension
CCC	Cúbica De Corpo Centrado
CCM	Conformação De Chapas Metálicas
CFC	Cúbica De Face Centrada
CLC	Curva Limite Deformação
DBT	Draw Bead Test
DIN	Deutsches Institut Für Normung
Fe-Cr	Ferro-Cromo
Fe-Cr-C	Ferro-Cromo-Carbono
Fe-Cr-Ne	Ferro-Cromo-Níquel
LDR	Limit Drawing Ratio
LDR _{adm}	Limit Drawing Ratio Admissível
SDT	Strip Drawing Test
TCC	Tetragonal de Corpo Centrado
MEV-SE	Microscópio Eletrônico de Varredura acoplado ao Sistema de Elétron Secundário

LISTA DE SÍMBOLOS

μ_b	Coeficiente base
σ_v	Tensão verdadeira aplicada ao corpo-de-prova
ε	Deformação
D_{ef}	Deformação verdadeira sofrida pelo corpo-de-prova
Δ_v	Velocidade relativa
μ	Coeficiente de atrito
D	Diâmetro da geratriz
D	Diâmetro da punção
F_f	Força de atrito entre a peça e ferramenta
F_n	Força normal
F_t	Força tangencial
HV	Dureza vickers
k	Coeficiente de resistência
n	Coeficiente de encruamento
p e p_{ref}	Valor da pressão local e a pressão de referência
s_u	Resistência à tração do material da chapa
μ_{ad}	Adesão
μ_{def}	Deformação
σ	Tensão
τ_{ad}	Tensão de cisalhamento para cortar uma ligação adesiva

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	16
3.1 AÇOS INOXIDÁVEIS.....	16
3.2 AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS.....	17
3.2.1 Classificação dos aços ferríticos	17
3.2.2 Características dos aços ferríticos.....	19
3.3 CONFORMABILIDADE.....	21
3.3.1 Características do processo de estampagem profunda	24
3.3.2 Curva limite de conformação	27
3.4 TRIBOLOGIA.....	29
3.4.1 Conceito de atrito.....	29
3.4.2 Atrito na estampagem profunda	30
3.4.3 Fatores influentes.....	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
4.1 MATERIAIS	42
4.2 EQUIPAMENTOS	43
4.3 MÉTODOS.....	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	49
5.2 FORÇAS ATUANTES.....	50
5.2.1 Coeficiente de atrito.....	51
5.2.2 Dureza.....	53
5.2.3 Rugosidade	54
5.2.4 Perfilometria	55
5.2.5 Mev.....	58
6. CONCLUSÕES.....	60
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são reconhecidos por sua notável resistência à corrosão em comparação com outros tipos de aço. São ligas ferrosas que contêm teores de cromo superiores a 10,5%, desencadeando a formação da camada de passivação que os tornam inoxidáveis. Nestas ligas, é viável introduzir outros elementos de liga para conferir propriedades específicas. Por exemplo, a inclusão de carbono visa aprimorar a sensibilização, fortalecendo a resistência à fluência, enquanto a adição de enxofre ou selênio busca aprimorar a usinabilidade (DAVIES, 1994). Sendo assim, se faz necessário estudar o comportamento destes aços nos processos de Conformação de Chapas Metálicas (CCM).

Os processos de CCM, representam um dos processos tecnológicos mais utilizados no meio da indústria metalúrgica. Atualmente, essa tecnologia é muito utilizada, sendo que diversos componentes são produzidos por esta tecnologia. Esses processos englobam a fabricação de uma ampla variedade de produtos com diferentes tamanhos e formas geométricas, abrangendo desde curvaturas simples até curvaturas duplas, incluindo estampagem profundas e formas altamente complexas. Como exemplo, pode-se citar a produção de carrocerias de automóveis, painéis de aeronaves e até estruturas de eletrodomésticos, como utensílios de cozinha e latas de bebidas. Os processos CCM desempenham um papel preponderante na indústria de manufatura ou metalurgia da transformação, envolvendo o desenvolvimento e a construção de ferramentas, tais como matrizes e punções. Embora as ferramentas sejam geralmente dispendiosas e seu período de construção seja extenso, uma vez confeccionadas, essas ferramentas são capazes de produzir uma grande quantidade de produtos (SINGH e AGNIHOTRI, 2015). Portanto, há várias décadas, a conformação de chapas tem sido o processo responsável pela produção da maioria das peças utilizadas em diversos segmentos, devido principalmente à sua eficiência e simplicidade de execução (SINGH e AGNIHOTRI, 2015).

Entretanto, a avaliação do atrito na estampagem é algo fundamental na indústria de transformação, envolvendo a análise e medição das forças de atrito entre a chapa metálica e as ferramentas de estampagem durante os processos CCM. Essa avaliação é crucial para otimizar a produção, garantindo a qualidade das peças estampadas e reduzindo o desgaste das ferramentas. Diversas técnicas têm sido utilizadas para avaliação da estampabilidade de chapas metálicas finas, por exemplo, o ensaio de Dobramento Sob Tensão (do inglês: *Bending*

Under Tension-BUT), o Ensaio de Estampagem de Tira (do inglês: *Strip Drawing Test-SDT*), dentre outros. Estes tipos de ensaios são frequentemente utilizados para avaliar o atrito e desenvolver estratégias de controle para melhorar a eficiência e a precisão dos processos de estampagem. O ensaio SDT simula de maneira detalhada a mecânica de contato da região plana da prensa chapa utilizada em processos de estampagem profunda ou embutimento. (MAGALHÃES, 2005).

De forma geral, o mercado atual tem buscado melhorias na execução dos processos CCM, desde a estampagem de peças com geometria simples até aquelas consideradas complexas. Desta forma, a necessidade da compreensão de tal tecnologia e a investigação dos efeitos decorrentes do atrito na estampagem de aços, tal como os Aços Inoxidáveis Ferríticos (AIF), em dispositivos que reproduzem o seu comportamento em práticas industriais, contribui para ajustar e manter a competitividade dessa classe de materiais às necessidades do mercado.

Nesse contexto, o presente estudo visa reproduzir, caracterizar e analisar o comportamento tribológico de chapas de aço inoxidável ferrítico AISI 430 DDQ (*Drawing Deep Quality*). Para isso, tiras metálicas deste aço, com dimensões padronizadas (0,8x25x375 mm), foram submetidas ao ensaio de atrito SDT em regime lubrificado. Para alcançar esse objetivo, os ensaios simulativos de atrito foram realizados em um dispositivo adaptado no topo de um tribossimulador de chapas metálicas do laboratório de ensaios mecânicos do CEFET-MG Campus Timóteo. Os efeitos da variação dos parâmetros do processo, tal como a força normal (ou pressão de contato) e a velocidade de deslizamento, sobre o valor do coeficiente de atrito foram investigados.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar o efeito de diferentes parâmetros de estampagem sobre o comportamento tribológico da chapa de aço inoxidável ferrítico AISI 430 com aplicação de estampagem profunda, por meio de um dispositivo capaz de simular a região plana do prensa chapa em processos de embutimento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar o coeficiente de atrito: Medir como o coeficiente de atrito varia com a força normal e a velocidade de deslizamento da tira metálica.
- Medir a dureza superficial: Utilizar um microdurômetro Vickers para avaliar a dureza superficial das amostras.
- Analisar a rugosidade da superfície: Empregar um rugosímetro portátil e um perfilômetro óptico para examinar as variações na topografia da superfície.
- Investigar atrito e desgaste: Usar um microscópio eletrônico de varredura (MEV) para analisar os mecanismos de atrito e desgaste na superfície das amostras.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são aços que apresentam em sua composição, uma faixa de no mínimo 10,5% de cromo. O cromo exerce um papel fundamental melhorando a resistência a oxidação e à corrosão, isto por meio de um fino filme (3 a 5 nm), não visível, mas aderente, chamada de camada passiva, que se regenera na presença de oxigênio. Além disso, o teor de cromo atua melhorando as propriedades mecânicas a elevadas temperaturas. Devido a estas e outras propriedades, fica evidente a importância da aplicação dos aços inoxidáveis em diversos ambientes, desde os mais simples, como talheres, utensílio de cozinha e móveis, até os mais sofisticados, como aqueles expostos em ambientes corrosivos, e até mesmos em ambientes espaciais (DAVIES, 1994; TANURE, *et al.*, 2017; LO, SHEK e LAI., 2019; SILVA e MEI, 2021).

Os aços inoxidáveis podem ser divididos em cinco grupos, onde quatro deles são baseados nos elementos de ligas em sua composição e microestrutura. O quinto é baseado no tipo de tratamento térmico usado, ao invés da microestrutura (CARBÓ, 2008; LO, SHEK e LAI., 2019).

- Os aços ferríticos da série 400, onde apresentam estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), são magnéticos, apresentam em sua composição basicamente Fe-Cr;
- Os austeníticos da série 300, onde os mesmos não são magnéticos, apresentam estrutura cúbica de face centrada (CFC), e se diferenciam pela maior quantidade de níquel ao anterior, liga basicamente de Fe-Cr-Ni;
- Os Martensíticos também pertencentes à série 400, mas se diferem dos ferríticos pelo elevado teor de carbono, apresentam estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC);
- Os Duplex ou dual phase recebe este nome por apresentar em sua composição cerca de 50% de ferrita e 50% de austenita, aproveitando o melhor de cada uma delas, apresenta um elevado teor de cromo (20 a 25,4%), sua estrutura é austeno-ferrítica;
- Os inoxidáveis endurecíveis por precipitação, é definido baseado no tipo de tratamento térmico utilizado.

3.2 AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS

Os aços inoxidáveis ferríticos (AIF), recebem este nome pelo fato de apresentarem em sua maior parte a estrutura ferrítica, acrescida de carbonetos após receberem recozimento. A classe ferrítica é composta por ligas, onde em suas composições são requeridas de 10,5 a 30% de cromo, responsáveis pela fase que classifica esse material, juntamente com outros elementos estabilizantes como alumínio, titânio, níquel e nióbio, que são formadores de austenita (TANURE *et al.*, 2017; SENRA, 2019). Como bem nos asseguraram Davies (1994) e Senra (2019) a principal característica do AIF é sua notável resistência à corrosão, onde sua estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) coincide com a do ferro à temperatura ambiente.

Os AIF's, em sua totalidade, exibem propriedades magnéticas, mas geralmente não respondem bem a tratamentos térmicos. Após o processo de recozimento, esses materiais apresentam resistência mecânica relativamente baixa, na faixa de 275 a 350 MPa, baixa tenacidade e tendem a ser suscetíveis à sensibilização, o que limita sua usinabilidade (DAVIES, 1994; SENRA, 2019).

Como bem nos asseguraram Tanure *et al.* (2017), os aços inoxidáveis ferríticos encontram aplicação em diversos setores em escala global, incluindo eletrodomésticos, arquitetura e indústria automotiva, devido à sua atratividade econômica, menor expansão térmica, elevada condutividade térmica e resistência superior à oxidação em temperaturas elevadas, em comparação com os aços inoxidáveis austeníticos.

Para contornar os efeitos de sensibilização e menor plasticidade dos AIF, foram desenvolvidas novas ligas dentro da classe de aços, afim de melhorar as propriedades citadas acima, onde passaram a ser divididos em AIF de primeira, segunda e terceira geração (DAVIES, 1994).

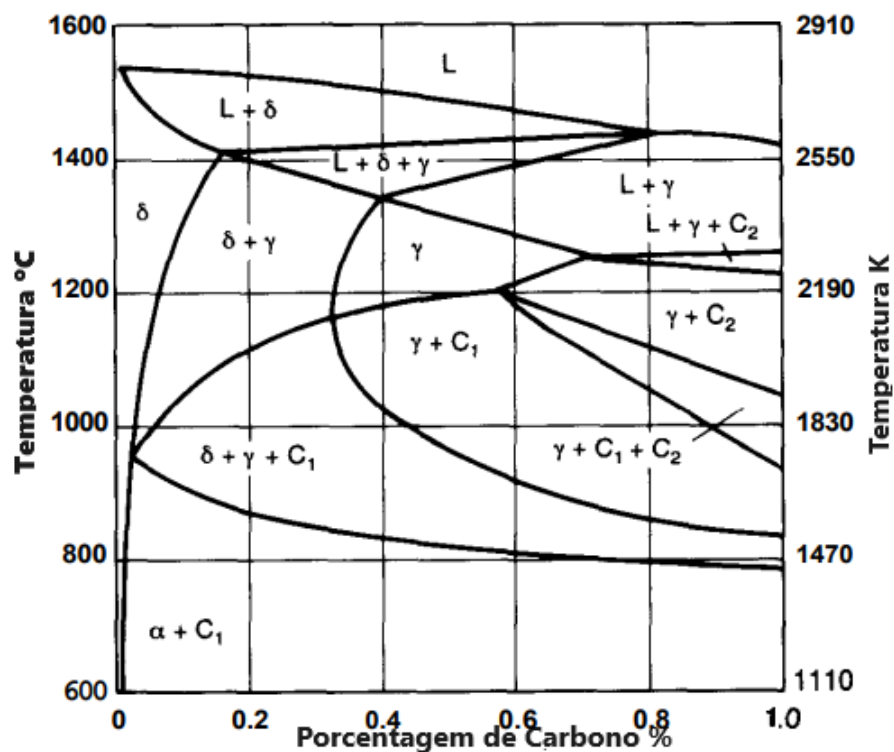
3.2.1 Classificação dos aços ferríticos

A primeira geração de AIF foram desenvolvidas nas primeiras décadas do século 20, onde as ligas exibiam alto teor de carbono, devido a ineficiência da descarbonização. O aço inoxidável protótipo é o tipo 430, com 0,12% de carbono e 17% de cromo. Essa liga apesar de ser chamada de ferrítica, apresenta em altas temperaturas a presença de austenita, o que tem um

impacto benéfico ao retardar o crescimento dos grãos, evitando o enfraquecimento do material (DAVIES, 1994; TANURE *et al.*, 2017).

A Figura 1 apresenta o diagrama Fe-Cr-C, onde é possível observar, que a uma temperatura acima de aproximadamente 1.250 °C (2.280 °F), esse aço se torna completamente ferrítico, enquanto em temperaturas mais baixas, coexistem a ferrita e a austenita até cerca de 1.030 °C (1.890 °F). Com resfriamento adicional, ocorre a formação de carbonetos. Em torno de 920 °C (1.690 °F), a austenita desaparece, deixando somente ferrita e alguns carbonetos à temperatura ambiente, em equilíbrio. Já a segunda geração dos AIF apresenta valores significativamente menores de nitrogênio e carbono, onde são adicionados estabilizadores para fixar o carbono/nitrogênio ali presentes. O protótipo desta geração é o tipo 409. Com cerca de 0,04% de carbono, 11% de cromo e 0,5% de titânio. Onde o titânio fixa carbono e nitrogênio, deixando o cromo livre, resultando em uma liga ferrítica em todas as temperaturas. Enquanto a terceira geração não apresenta austenita em nenhuma temperatura, mas devido a formação de fases intermetálicas a elevadas (DAVIES, 1994).

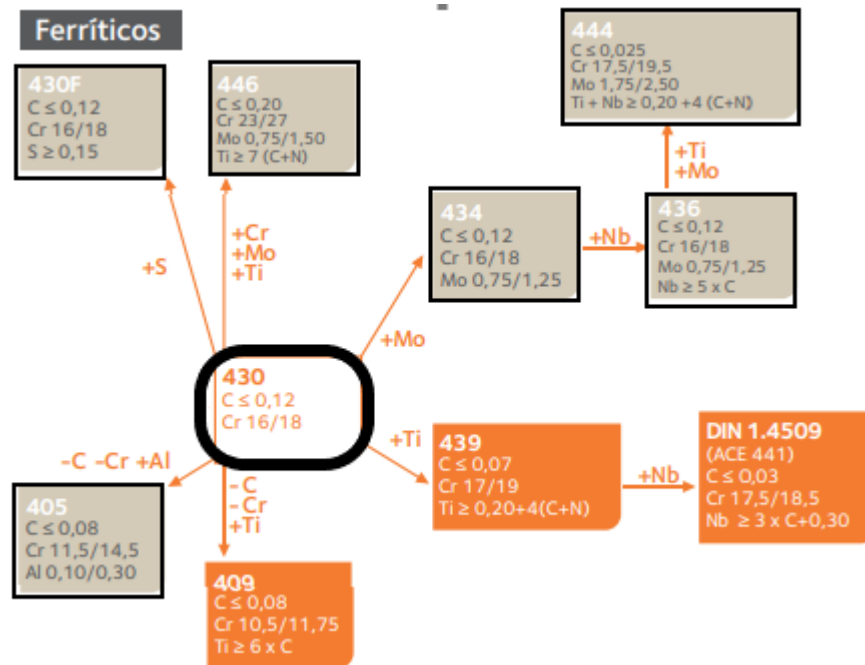
Figura 1 - Diagrama Ferro-Cromo-Carbono.



Fonte: Adaptado de Davies (1994).

Conforme pode ser visto na Figura 2, novas classificações de aços surgiram a partir de diferentes adições de teores ligas usando como base o aço AISI 430, tal como o aço AISI 405, 409, 430F, 434, 436, 439, 444, 446, DIN 1.4509 (CARBÓ, 2008).

Figura 2 - Formação de outras ligas de aços inoxidáveis derivadas da liga tipo 430.



Fonte: Adaptado de Carbó (2008).

Segundo Carbó (2008), no geral dois tipos de aço inoxidáveis 430, podem ser produzidos, sendo um estabilizado com nióbio e outro não. Esse aço estabilizado com nióbio é conhecido, devido a sua utilização para processo de estampagem profunda ou DBQ (*Deep Drawing Quality*).

Os aços inoxidáveis ferríticos devido ao fenômeno de sensibilização, são suscetíveis à corrosão intergranular. A precipitação de carbonetos também ocorre de forma significativamente mais rápida em ligas ferríticas em comparação com as austeníticas, devido ao maior teor de carbono e à menor solubilidade do carbono na matriz ferrítica (KHORRAMI, 2014).

3.2.2 Características dos aços ferríticos

De acordo com diversos autores, os aços inoxidáveis ferríticos comparado aos Aços Inoxidáveis Austeníticos (AIA), apresentam maior resistência à corrosão e menor taxa de endurecimento por trabalho a frio (DAVIES, 1994; KHORRAMI *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2022).

Segundo Carbó (2008) e Cunha, Oliveira e Gonçalves (2009), os aços inoxidáveis ferríticos do tipo 430 estabilizados ao Nióbio, apresentam melhores propriedades para estampagem profunda comparado a outros aços do mesmo grupo. Esta classe de aços apresenta ainda em sua composição, um teor de cromo maior que o mínimo (~10,5%). Além disso, apresentam menor capacidade de passivação comparado ao aço do tipo 304, devido principalmente ao teor de níquel em sua composição.

Na Tabela 1, pode-se observar a diferença entre a composição de Níquel dos aços 304 em comparação ao aço 430, e a diferença entre a composição de cromo dos demais aços ferríticos comparados ao aço 430 estabilizado com nióbio (DAVIES, 1994; CARBÓ, 2008; WANG *et al.*, 2022).

Tabela 1 - Comparação de composição (% em peso) química entre os aços.

AISI	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Outros
405	0,08	1,00	1,00	0,040	0,0030	11,5~14,5		0,10~0,30Al
409	0,08	1,00	1,00	0,045	0,045	10,5~11,75	0,5	6Xc-0,75Ti
430	0,12	1,00	1,00	0,040	0,0030	16,00~18,00		...
430F	0,12	1,25	1,00	0,060	0,15	16,00~18,00	...	...
304	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	18,00~20,00	8,00~12,00	...

Fonte: Adaptado de Davies (1994).

O aço 430, dentre os aços do mesmo grupo, são os mais utilizados, devido à sua resistência a ação de ácidos e à ação da água do mar e, além disso é o único aço do grupo dos ferríticos que apresenta integralmente ferrita em sua estrutura. Os aços do tipo 430, com uma pequena adição de enxofre, dão origem ao tipo 430F, melhorando assim sua usinabilidade e estampabilidade (CHIAVERINI, 2005).

Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam diversas vantagens comparados com os aços austeníticos (SILVA *et al.*, 2008; RAJASEKHAR *et al.*, 2009; ANDRADE *et al.*, 2015).

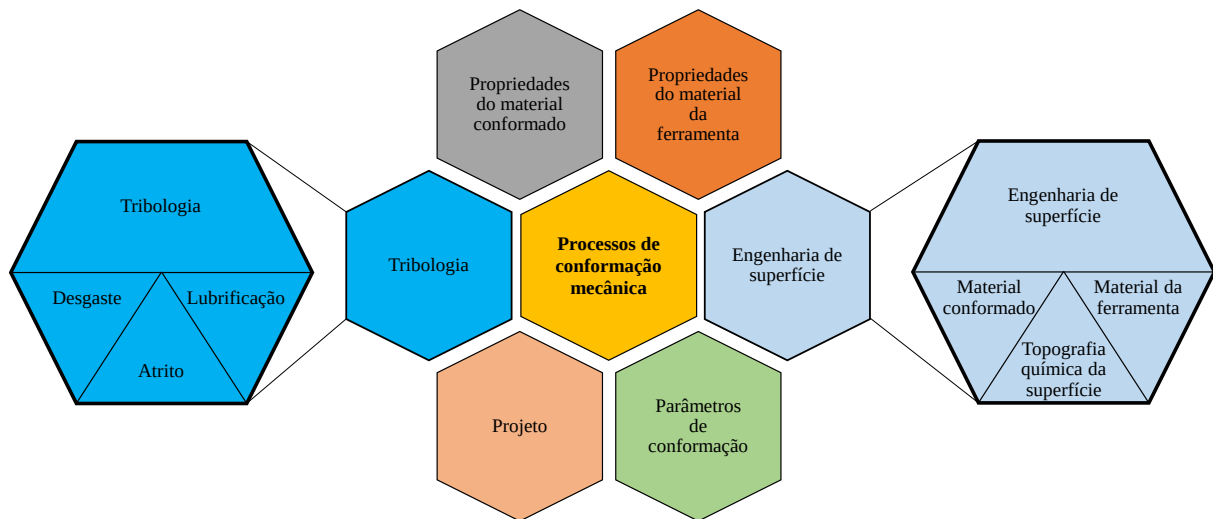
- Fornecem a mesma resistência a corrosão;
- Ausência de níquel em sua composição, fazendo com que fique mais barato;
- Baixa expansão térmica;
- Possuem uma notável capacidade de resistência à oxidação em temperaturas elevadas, sendo menos propensos à descamação do que os aços austeníticos;
- Alta condutividade térmica, quando estabilizado com nióbio (conduzem melhor corrente que os austeníticos);
- Excelente resistência a fluência;
- São significativamente menos susceptíveis à recuperação elástica durante a conformação a frio;
- Os ferríticos são menos suscetíveis à corrosão sob tensão, comparados aos austeníticos.

3.3 CONFORMABILIDADE

Para Bresciani *et al.* (2011) e Luiz (2022), a conformabilidade plástica dos metais está relacionada com a capacidade em que os metais ou ligas apresentam em resistir às deformações plásticas sem desenvolver defeitos ou fraturas na peça resultante. Sendo que para isso, o material deve ser capaz de redistribuir a deformação de maneira uniforme, suportar altos níveis de deformação sem rachar ou fraturar, resistir a tensões compressivas no plano sem criar rugas, manter a forma após a remoção da matriz e preservar uma boa qualidade de acabamento superficial durante o processo de estampagem. Essa propriedade está estritamente relacionada com qualidade do material e o tipo de conformação empregada, por exemplo, técnicas como estampagem, forjamento, extrusão, trefilação, dentre outros métodos específicos.

Ao longo dos anos, diversos estudos que buscam estudar os fatores que afetam a conformabilidade de chapas metálicas têm sido realizados, tais como as condições de atrito, (podendo ser a seco ou lubrificados), anisotropia e deformação do material, propriedades da ferramenta de estampagem e, principalmente, estudos sobre o comportamento do atrito (EVIN, TOMÁŠ, e VÝROSTEK, 2014; GRONOSTAJSKI *et al.*, 2019; TRZEPIECINSKI e LEMU, 2020). A Figura 3 fornece um resumo dos principais fatores que impactam na conformabilidade de chapas metálicas.

Figura 3 - Fatores que influenciam na conformabilidade da chapa metálica.



Fonte: Adaptado de Evin *et al.* (2016).

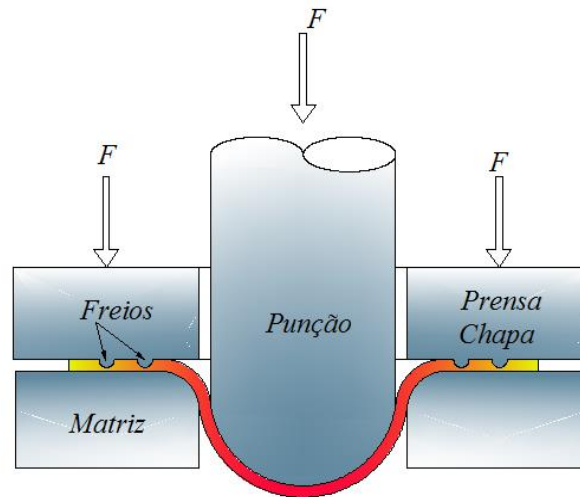
A conformação de chapas metálicas divide-se basicamente em: (MAGALHÃES, 2005; APERAM, 2023).

- Dobramento de chapas e calandragem;
- Embutimento ou estampagem profunda;
- Estiramento de chapas;
- Hidroconformação e conformação por elastômeros.

O processo de estampagem por estiramento assemelha-se muito com o processo de estampagem profunda, o que os diferencia, grosso modo, é que o primeiro utiliza freios de estampagem para restringir o movimento da chapa na região plana da matriz, e o outro não (MAGALHÃES, 2005).

A estampagem por estiramento é marcada por um estado biaxial de deformações, gerado por tensões de tração que atuam em direções perpendiculares entre si, todos no plano da chapa. Conforme mostrado na Figura 4, durante o processo, o *blank* é mantido preso pelo prensa-chapas ou sujeitador, onde são aplicadas forças que impendem que ele seja arrastado para dentro da matriz, garantindo que a chapa sofra apenas esforço de tração durante o processo. Este mecanismo que prende a chapa é comumente conhecido como freio de estampagem (*Draw-bead*) (MAGALHÃES, 2005; LUIZ, 2022; APERAM, 2023).

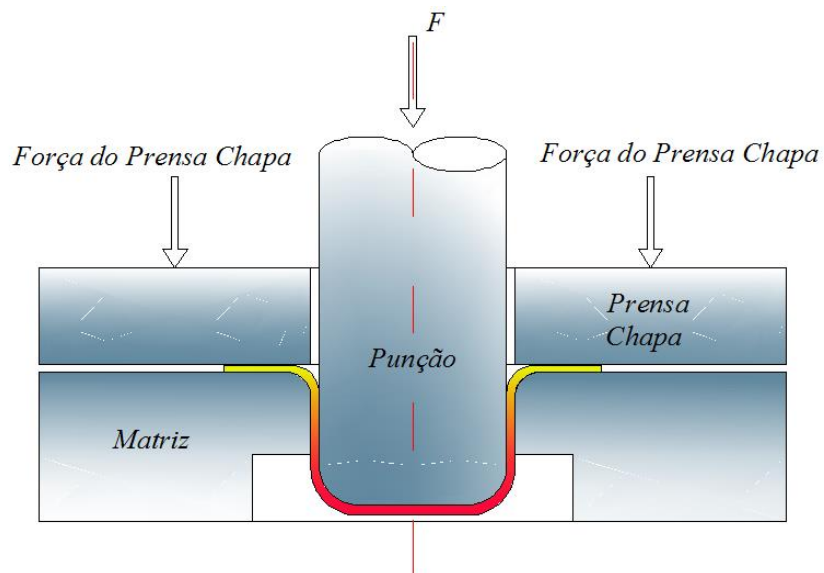
Figura 4 - Desenho esquemático da estampagem por estiramento.



Fonte: Adaptado de Magalhães (2005).

Já o processo de estampagem por embutimento, tem como objetivo assegurar que a peça a fabricada esteja sofrendo a menor variação possível na espessura do material. Para isso, o *blank* tem liberdade de deslizar para dentro da matriz, participando da conformação da chapa, conforme ilustrado na Figura 5. Isso resulta em tensões e deformações compressivas no plano da chapa, mas podendo ocasionar a formação de rugas no flange. A fim de se evitar essas rugas, geralmente utiliza-se um prensa-chapas, de modo que o *blank* deslize suavemente para dentro da cavidade da matriz. Portanto, o processo de embutimento distingue-se do estiramento por não apresentar o freio de estampagem (MAGALHÃES, 2005; LUIZ, 2022; APERAM, 2023).

Figura 5 - Desenho esquemático da estampagem por embutimento.



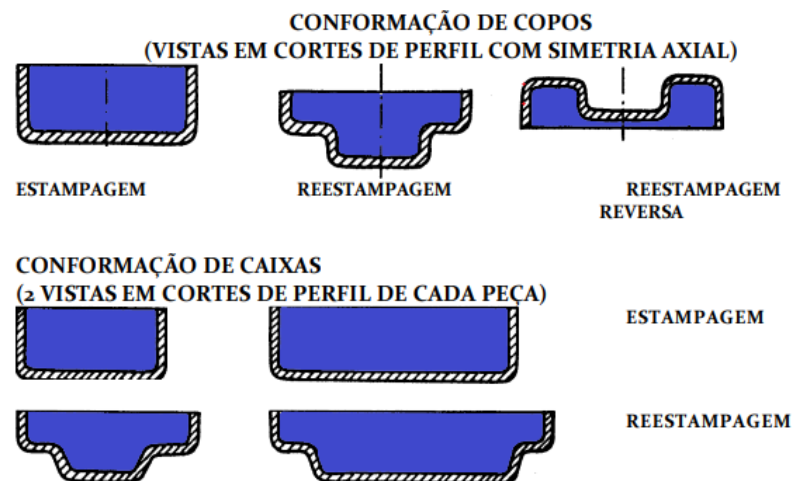
Fonte: Adaptado de Magalhães (2005).

Para Ferro (2015), a estampagem baseia-se em conformar mecanicamente uma chapa metálica, por meio de um conjunto de operações, onde a mesma obtém uma nova forma.

Conforme Figura 6, a estampagem profunda pode ser dividida dentre 5 processos, conformação por estampagem, reestampagem e reestampagem reversa de copos, conformação com estampagem e reestampagem de caixas, conformação rasa com estampagem e reestampagem de painéis, conformação profunda com estampagem de painéis (BRESCIANI *et al.*, 2011).

Conforme nos asseguraram Singh e Agnihotri, (2015), os principais fatores que afetam a estampagem profunda são propriedades dos materiais, geometria das ferramentas e lubrificação. Como consequência desses parâmetros, defeitos podem surgir, tais como ruptura, estiramento, rugas, orelhas e má aparência da superfície. É importante ressaltar que o defeito por enrugamento é específico para estampagem profunda.

Figura 6 - Divisão dos processos de estampagem.



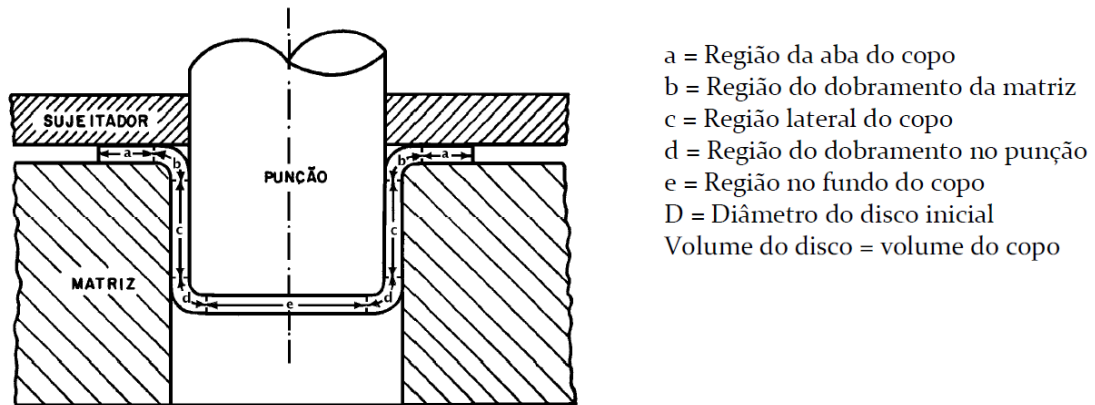
Fonte: Adaptado de Bresciani *et al.* (2011).

3.3.1 Características do processo de estampagem profunda

Para Bresciani *et al.* (2011) e Ghafar *et al.* (2021), existem condições típicas na estampagem profunda quando se parte de um esboço circular a fim de se obter um copo. Durante a estampagem surgem defeitos que só podem ser observados quando terminam a estampagem. O esboço circular, ou disco metálico, sofre deformação em direção à cavidade circular da matriz devido à ação do punção em sua região central, enquanto a aba ou flange, onde o punção não atua, apenas se desloca em direção à cavidade. Isso resulta em uma gradual

redução na circunferência do disco na região da aba à medida que sua região central penetra na cavidade da matriz, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Obtenção de um copo na estampagem profunda.



Fonte: Adaptado de Bresciani *et al.* (2011).

Na região aba ou flange, surgem esforços de compressão circunferencial, que atuam nas direções tangentes aos círculos concêntricos à região central, com potencial para causar rugas na chapa. Conforme salientado, para evitar esse enrugamento, é aplicada uma tensão de compressão por meio de um sujeitador, também chamado de prensa-chapas (BRESCIANI *et al.*, 2011; ROCHA *et al.*, 2022).

De acordo com Schaeffer (2004), existem limites pré-estabelecidos entre a dimensão da geratriz (D) e o diâmetro da punção (d) para estampagem de um corpo. Essa relação é conhecida como razão limite de estampagem (do inglês: *Limit Drawing Ratio- LDR*), que pode ser calculada através da Equação (1).

$$LDR = \frac{D}{d} \quad (1)$$

Para uma melhor aproximação de materiais de alta estampabilidade, pode-se ainda calcular a razão de limite de estampagem admissível (LDR_{adm}), conforme apresentado pela Equação (2).

$$LDR_{adm} = 2,15 - \frac{d}{1000s} \quad (2)$$

Schaeffer (2004) pontua que, na impossibilidade de se estampar em uma única etapa, onde o valor de LDR_{adm} é ultrapassado, existe a possibilidade de se estampar a peça em várias etapas, usando $LDR = 1,2$ para o segundo e terceiro estágio. Ainda, quando existe tratamento térmico intermediário, utiliza-se $LDR = 1,6$.

A força de conformação pode ser calculada através de equações teóricas baseadas na teoria da plasticidade. A Equação (3) empírica relaciona a força de conformação máxima, $Fd_{máx}$, necessária para formar um copo redondo (DAVIES, 1993).

$$Fd_{máx} = n\pi dt s_u \quad (3)$$

Onde:

S_u = resistência à tração do material da chapa (em lb/in²),

d = diâmetro da punção (em in ou mm);

t = espessura da chapa (em in ou mm);

$n = \sigma D/S_u$ é a razão entre a tensão de conformação e a resistência à tração do material de trabalho.

Neves (2013) pontua que existem dois parâmetros a serem medidos quando se trata da avaliação da capacidade do material ser submetido a estampagem profunda: a capacidade de alongamento, que está relacionado a velocidade de endurecimento do material conformado a frio, onde o mesmo é medido pelo coeficiente de encruamento n , que é determinado pela Equação 4, conhecida comumente como Equação de Hollomon, obtida através da curva tensão-deformação. O outro parâmetro a ser observado é a capacidade de embutimento do material, que está relacionado à adição de etapas de embutimento quando se tem uma profundidade de embutimento maior que o diâmetro da chapa metálica.

$$\sigma_v = R D_{ef}^n \quad (4)$$

Onde:

σ_v = tensão verdadeira aplicada ao corpo-de-prova (em MPa);

R = coeficiente de resistência (em MPa);

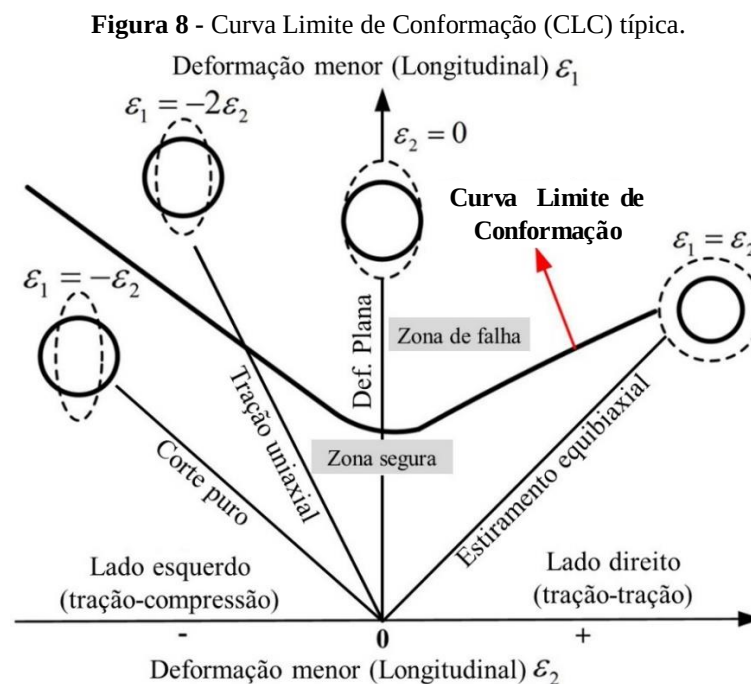
D_{ef} = deformação verdadeira sofrida pelo corpo-de-prova (adimensional);

n = encruamento do material (adimensional).

3.3.2 Curva limite de conformação

A Curva Limite de Conformação (CLC) é reconhecida como um critério de falha, na qual o material sofre estricção, permitindo assim a análise das máximas deformações que o mesmo pode ser submetido sem apresentar falhas, delimitando a fronteira entre deformações aceitáveis e aquelas que podem resultar em falhas catastróficas durante o processo de estampagem de chapas metálicas. Através da CLC, é possível antecipar as deformações que conduzirão o material à ruptura, especialmente nos modos de deformação plástica característicos dos processos de embutimento. Esse método é de suma importância, pois fornece parâmetros essenciais que visam avaliar a viabilidade e aprimorar os processos de estampagem (NETTO, 2004; LIMA *et al.*, 2022; ROCHA, 2022).

Na Figura 8 é mostrada uma CLC típica, onde é possível avaliar a conformabilidade de chapas metálicas finas quando são submetidas à deformação plástica, sendo que as deformações são quantificadas nas regiões de estricção (ou afinamento) e ruptura da chapa. As deformações verdadeiras menores (ε_2) são representadas no eixo X, enquanto as principais deformações verdadeiras maiores (ε_1) são indicadas no eixo Y (YANG *et al.*, 2017). A curva CLC não considera os efeitos de atrito, mas ainda assim é muito importante para os processos de conformação.



Fonte: Adaptado de Yang *et al.*, (2017).

Ferreira *et al.* (2017) afirmaram que os principais parâmetros e/ou critério para determinação de uma CLC são os critérios de escoamento de Von Misses (isotrópico) e Hill (anisotrópico). As principais equações utilizadas para descrever uma CLC são as equações de Holloman (Equação 4), Ludwing (Equação 5) e Sfwit (Equação 6) (FERREIRA *et al.*, 2017).

$$\sigma = \sigma_0 k \varepsilon^n \quad (5)$$

$$\sigma = k(\varepsilon + \varepsilon_0) \quad (6)$$

Onde:

k = coeficiente de resistência;

n = coeficiente de encruamento;

ε = deformação dada por: $\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0}$

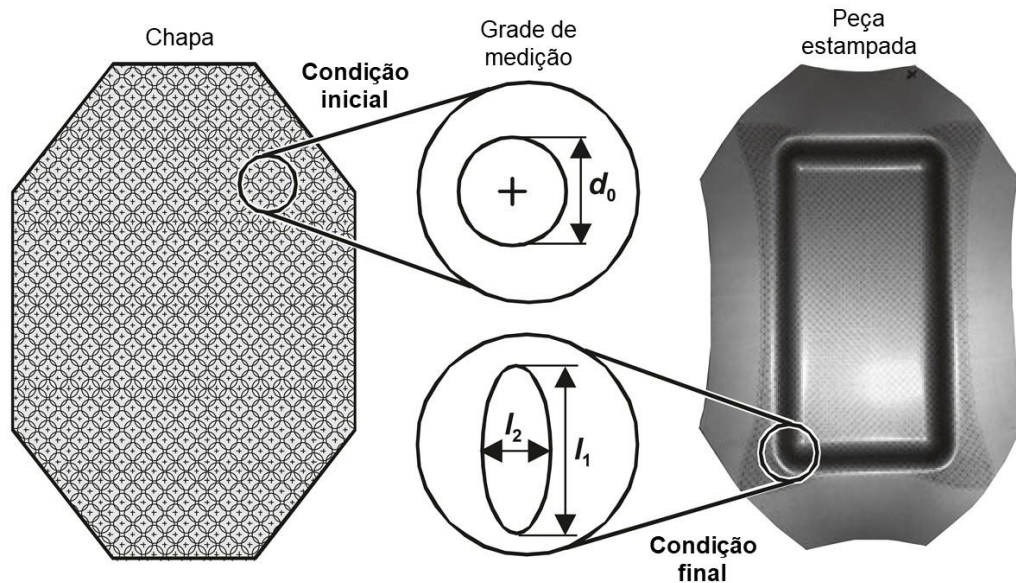
Segundo Luiz (2022), a CLC fornece informações valiosas sobre a conformabilidade de uma chapa, entretanto, não pode ser considerada uma propriedade inerente do processo. Existem diversos fatores que influenciam na sua determinação, tal como a dimensão geométrica da grade determinística, espessura da chapa, velocidade de deformação, propriedades mecânicas da chapa (como coeficiente de encruamento, coeficiente de anisotropia e ductilidade), trajetória de deformação, temperatura, dentre outros.

Como bem nos afirmou Madeira (2014), existem diversos tipos de ensaios para se determinar a CLC, onde basicamente 6 (seis) tipos se destacaram, sendo eles: método de Veerman (1971 e 1972), o método de Bragard (1972), o método do duplo perfil (1975), o método de Hecker (1972), o método de Kobayashi (1972) e o método N° 5 de Zurique (Parniere e Sanz, 1976). Este último baseia-se na medição de grelhas de círculos entrelaçados, sendo que na fase de interpolação, recomenda-se exclusivamente a utilização de círculos adjacentes que apresentem diferenças de deformação de 5%.

Conforme pode ser visto na Figura 9, a grade com círculos entrelaçados ou secantes apresenta uma vantagem por abranger uma área mais extensa na medição de deformação no plano-chapa, outrossim, os círculos tendem se a serem transformados em elipses, o que proporciona uma melhor representação visual das direções principais no plano da chapa, que é uma característica ausente nas grades retangulares. Embora a grade de círculos entrelaçados seja mais difícil e onerosa de se medir manualmente, oferece melhores resultados experimentais,

mas, contrapondo a essa vantagem, a mesma não pode ser medida automaticamente por sistemas computacionais (DOEGE e BEHRENS, 2016).

Figura 9 - Determinação da mudança local de forma usando grade determinística de círculos secantes.



Fonte: Adaptado de Doege e Behrens (2016).

3.4 TRIBOLOGIA

Conforme explicou Ludema (1996) e Brushan (2013), o termo “tribologia” foi citada a primeira vez em 1966 por Jost. A palavra grega “tribos” é derivada de “tribulação”, que significa “atrito”, logo, tribologia é definida com a “ciência do atrito” ou a “ciência do atrito e desgaste”. Portanto, a tribologia está relacionada ao estudo do atrito, da lubrificação e do desgaste.

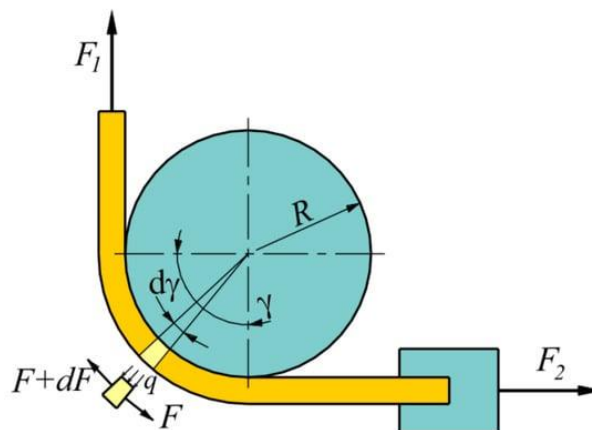
De uma forma geral, a tribologia é um campo da ciência ou engenharia que se dedica ao estudo dos fenômenos existentes entre duas superfícies em contato durante movimento relativo. Durante esse movimento, existe uma força que o restringe, conhecida como força de atrito, que deve ser bem controlada a fim de se evitar defeitos no material e aumentos da força necessária à deformação do material (FOLLE e SCHAEFFER, 2017).

3.4.1 Conceito de atrito

do atrito, necessita controlar os efeitos do atrito, e conhecer os comportamentos mecânicos do material em uma dada direção.

Trzepiecincki (2019) enfatizaram que existem diversos métodos de se avaliar o atrito, sendo que os mais empregados são o ensaio de estampagem de tira (ou ensaio SDT) e o ensaio de dobramento sob tensão (ou ensaio BUT). Na Figura 11 é mostrado o desenho esquemático do ensaio SDT, o qual permite não apenas determinar o coeficiente de atrito, mas também a influência dos parâmetros de processo durante todo estiramento da tira metálica.

Figura 11 - Forças atuando em uma seção elementar da tira.



Fonte: Trzepiecincki (2019).

Este teste baseia-se em esticar a chapa metálica contra uma superfície cilíndrica, sendo que a Equação 7 é usada para determinar o coeficiente de atrito, considerando que o ângulo seja constante (TRZEPIECINSKI, 2019).

$$\mu = \frac{2}{\pi} \ln \frac{F_1}{F_2} \quad (7)$$

Onde:

F_1 = força de atuação

F_2 = força de contra tensão,

(Medidas simultaneamente durante o teste).

O teste SDT baseia-se em colocar uma chapa metálica contra pulsionadores ou prensas não rotativas, geralmente planas, a fim de se observar o fenômeno do atrito que ocorre nas duas superfícies de contato, o que contribui para obter uma maior precisão na medição do

coeficiente de atrito, que é dado pela Equação 8. A Figura 12, representa um diagrama de um dispositivo utilizados para este ensaio. Fatores que afetam a condição de atrito, podem ser considerados, tais como força de pressão das contra amostras, condições de lubrificação, velocidade de tração da amostra, rugosidade da superfície das contra amostras e temperatura (TRZEPIECINSKI, 2019).

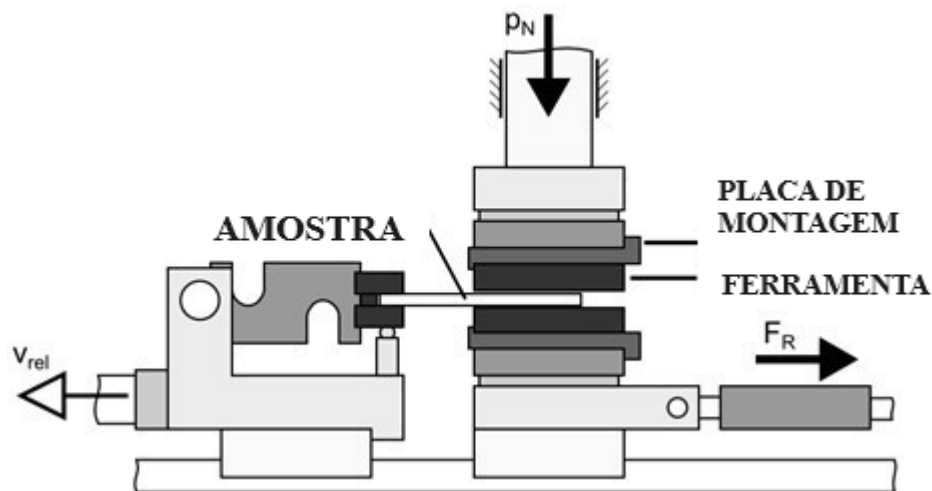
$$\mu = \frac{F_t}{2F_n} \quad (8)$$

Onde

F_t = força tangencial;

F_n = força normal (força de aperto).

Figura 12 - Diagrama representativo do dispositivo de para o teste de estampagem de tiras (SDT).



Fonte : Adaptado de Lenske, A , et al. (2017).

Para Ceron e Bay (2013), as equações de atrito apresentadas anteriormente não são suficientes para determinar o coeficiente de atrito, pois as mesmas podem apresentar erros grandes na estimativa, por isso é necessária uma maior cautela, usando simulação numérica juntamente com os testes de laboratórios citados.

Atualmente, diversas pesquisas têm sido realizadas afim de se otimizar as condições tribológicas na interação entre chapas e a ferramenta. No geral, o atrito gera um desgaste da ferramenta, isso ocorre devido à transferência e acúmulo de material da chapa nas superfícies da ferramenta, conhecido como “*galling*” (GAARD, 2008).

Nielsen e Bay (2018); Luiz (2022) argumentaram que, a deformação plástica na maioria dos processos de conformação de chapas metálicas é fundamentada no movimento relativo entre a

chapa e a ferramenta, uma interação que resulta em forças de atrito. Conforme mostrado pela Equação 9, o coeficiente de atrito (μ) é determinado pela relação entre a força de atrito (F) e a carga normal (N). O valor do coeficiente de atrito na simulação numérica computacional de processos de estampagem profunda, portanto, é imperativo determiná-lo sob condições tribológicas realistas. Isso envolve a consideração da pressão de contato local devido à força normal aplicada, a temperatura na superfície da ferramenta, a rugosidade da superfície da ferramenta e da chapa, além do uso adequado de lubrificação.

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\tau A_r}{p A_r} = \frac{\tau}{p} \quad (9)$$

Onde:

A_r = área de contato real entre as superfícies;

p = pressão de contato ou pressão normal;

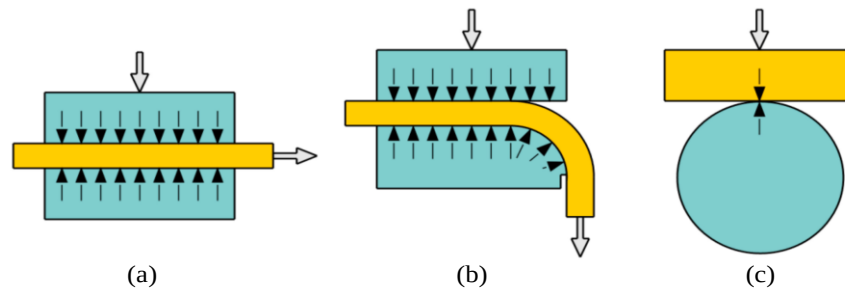
τ = resistência ao cisalhamento da junção.

Para Hutchings e Shipway (2017), a Equação 9 pode ser substituída pela Equação 10, sendo que para uma aspereza deformada plasticamente, a pressão de contato (p) pode ser substituída pela dureza do material (H).

$$\mu = \frac{\tau}{H} \quad (10)$$

Trzepieciniski e Lemu (2019) e Luiz (2022) enfatizaram que até o presente momento não há um ensaio que consiga estudar simultaneamente os comportamentos ocorridos relacionados ao coeficiente de atrito em todas as regiões durante a estampagem. Essa variação é resultado dos diversos tipos de contato entre a chapa e a ferramenta, conforme representado na Figura 13. Esses diferentes tipos de contato geram pressões distintas, estados de tensão e velocidades de deslocamento em áreas específicas da peça estampada.

Figura 13 - Tipos de contato entre a chapa e a ferramenta: (a) Contato plano; (b) Deslizamento sobre uma parte curva da ferramenta; (c) Contato deslizante linear.



Fonte: Trzepieciniski e Lemu (2019).

De acordo com Trzepieciniski (2019), o ensaio de estampagem de tira ou SDT (do inglês: Strip Drawing Test), é de suma importância para modelar o fenômeno do atrito entre a superfície da matriz/chapa metálica/punção em uma operação de estampagem. Para Le e Sutcliffe (2002), o ensaio SDT é utilizado para investigar o comportamento do atrito sob lubrificação com película fina na conformação de chapas metálicas na deformação plástica.

No ensaio SDT, a chapa é tracionada em uma extremidade enquanto a outra fica presa entre duas contra amostras, um formato de presa chapas não rotativos, geralmente planas ou com o formato de cilindros, que representam a superfície da ferramenta, e são pressionadas contra a superfície da chapa com uma força constante a determinada velocidade (TRZEPIECINSKI, 2019).

3.4.3 Fatores influentes

3.4.3.1 Mecanismo de adesão

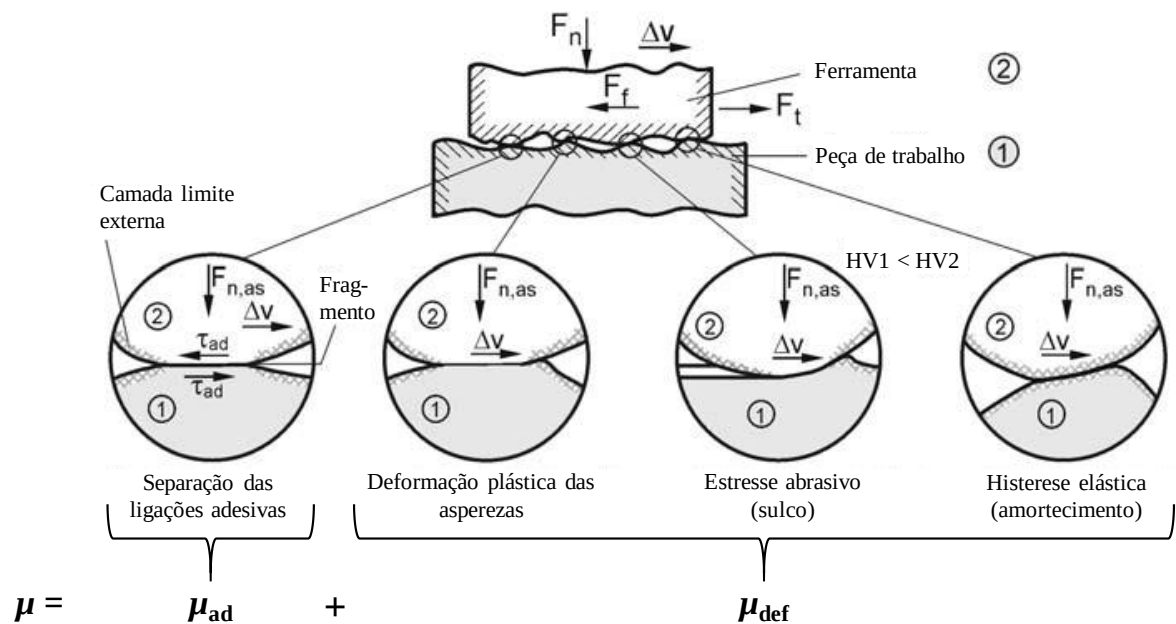
Para Rijeza (2023), o desgaste ou mecanismo de adesão entre duas faces do material é uma componente geradora do atrito, causando a aderência entre elas. Quando duas superfícies em contato sofrem um deslizamento relativo, ocorrem ali deformações plásticas e transferência de material de uma superfície para outra, essa interação e transferência de material gera um aumento no atrito e no desgaste, e, para minimizar esses efeitos, usam-se lubrificantes adequados que reduzem o atrito.

O mecanismo de adesão pode ser entendido como a interação quando dois corpos estão em deslizamento um sobre o outro. Em nível micro, a adesão pode ser vista como um fenômeno

de atrito/molecular, onde a união dos metais ocorre nos pontos de contato áspero da interface, e esses pontos de contato são submetidos a forças de cisalhamento durante o processo de deslizamento, podendo resultar na transferência de material de uma superfície mais macia para uma mais dura, essa união também é conhecida como soldagem a frio. Seu impacto no atrito decorre do fato de que as superfícies reais de contato estabelecem ligações atômicas ou moleculares durante o movimento relativo, as quais precisam ser desfeitas ao serem separadas novamente, resultando na dissipação de energia (STEINHILPER e SAUER, 2008; JEYAPRAKASH e YANG, 2020).

A Figura 14, destaca que em operações de conformação mecânica de chapas, de maneira geral, o coeficiente de atrito (μ) é controlado basicamente por dois mecanismos de atrito: adesão (μ_{ad}) e deformação (μ_{def}) (STEINHILPER e SAUER, 2008).

Figura 14 - Mecanismos básicos de atrito de uma perspectiva microscópica.



Fonte: Adaptado de Steinhilper e Sauer (2008).

Os termos empregados na Figura 14 são: F_n = força normal na área de contato nominal, F_f = força de atrito entre a peça e a ferramenta, F_t = Força tangencial, $F_{n,as}$ = força normal no contato das asperezas, Δv = velocidade relativa, τ_{ad} = tensão de cisalhamento para cortar uma ligação adesiva e HV = dureza Vickers.

Conforme enfatizado por Trzepieciniski (2022), em condições de baixa rugosidade da chapa, o mecanismo preponderante é a adesão entre as superfícies. Por outro lado, em situações de alta rugosidade, o mecanismo de achatamento das asperezas passa a dominar o tribocontato, e a intensidade desse mecanismo aumenta proporcionalmente ao aumento da rugosidade na superfície da chapa deformada, especialmente quando apresenta uma dureza significativamente inferior à do material da ferramenta.

3.4.3.2 Pressão de contato no coeficiente de atrito

Andrade *et.al.* (2013), enfatizaram que no desgaste por deslizamento, duas variáveis são cruciais: a carga normal e a velocidade. Tanto o mecanismo de desgaste quanto as taxas de desgaste são amplamente influenciados por essas variáveis. Os autores fizeram testes para avaliar os parâmetros supracitados, onde foi observado que quanto maior a pressão de contato em ensaios lubrificados, o coeficiente de atrito tende a ser menor, devido principalmente ao alcance dos bolsões de óleo presente nos vales das asperezas da rugosidade dos materiais.

Como demonstrado na Equação 9, o coeficiente de atrito está diretamente relacionado com a força normal (pressão de contato), ele depende diretamente do mesmo, pela equação, deduz-se que quanto maior a força normal, menor será o coeficiente de atrito.

3.4.3.3 Lubrificação

Para Folle e Schaeffer (2017), a lubrificação desempenha um papel fundamental e praticamente indispensável no processo de estampagem de peças, atua mitigando um dos principais defeitos do processo, que é o enrugamento, atua ainda evitando fratura prematura e afinamento excessivo na espessura das peças. A fim de se alcançar tais objetivos os lubrificantes, é imperativo que o lubrificante seja capaz de reduzir o atrito a pequenos níveis, ou mínimos, entretanto, não tais baixos, onde sejam capazes de retornar com o enrugamento. Além disso a lubrificação adequada, reduz o desgaste da ferramenta, prolongando assim sua vida útil.

Lovell *et al.* (2006), afirmaram que o uso de óleos de lubrificação no geral agride o meio ambiente. Com isso os autores desenvolveram uma pesquisa afim de avaliarem o uso de um óleo ecologicamente correto para uso na conformação de chapas, os mesmos constataram que o óleo de canola juntamente com ácido bórico apresenta bom coeficiente de atrito.

Segundo Luiz *et al.* (2022), em sistemas com lubrificação, a rugosidade e aspereza da superfície desempenham um papel fundamental, criando um certo bolsão de óleo, devido a depressões na topografia do material, que servem como reserva de lubrificante na interface de contato, diminuindo assim o atrito. Ainda afirmaram que o aumento da rugosidade em sistemas sem lubrificação, provoca um aumento na interação do material, aumentando assim a resistência ao atrito.

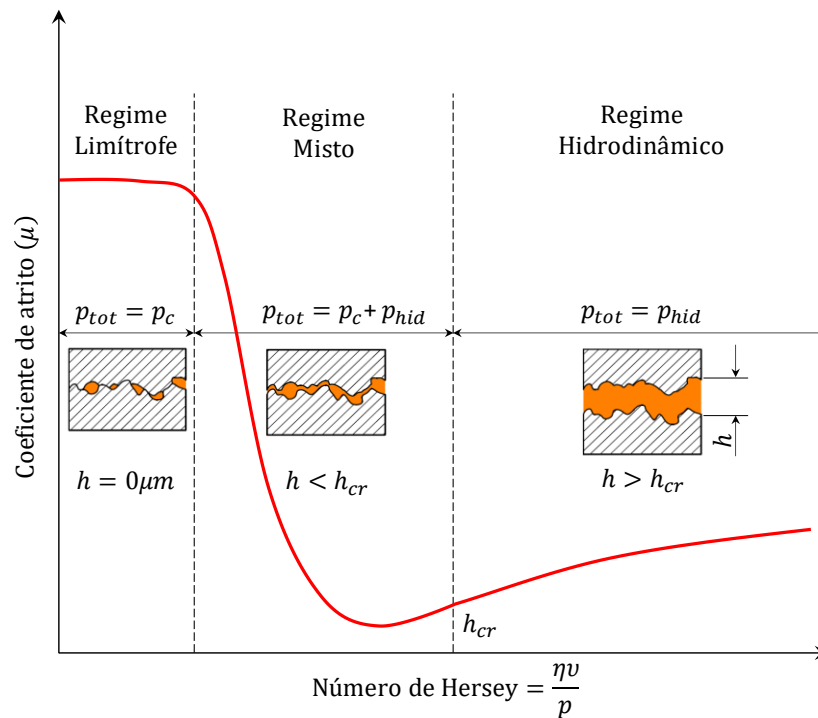
3.4.3.4 Tipos de lubrificação

Na conformação de chapas metálicas, como pode ser visto na Figura 15, diversos tipos de lubrificação podem estar presentes, tais como: condições de lubrificação de filme a seco, lubrificação por limite, lubrificação de película mista e lubrificação hidrodinâmica (KIM e KARDES, 2012).

A condição seca diz respeito à quando não há lubrificação, onde o atrito é alto, geralmente é utilizado em processos de conformação com geometrias simples. Já a lubrificação por limite está relacionada à quando superfícies sólidas estão em contato tão próximas que a interação de superfície entre filmes únicos ou multimoleculares de lubrificantes e as asperezas sólidas domina o contato. A lubrificação de película em camadas mistas é um cenário comum na conformação de chapas metálicas, nessa situação, as pequenas elevações da superfície do metal enfrentam condições de lubrificação de limite, enquanto as pequenas depressões da superfície do metal são preenchidas com o lubrificante. E por último a lubrificação hidrodinâmica é observada em determinados processos de conformação de chapas metálicas, como as operações de laminação de chapas em alta velocidade, nas quais as elevadas velocidades na interface entre o material e a ferramenta geram condições hidrodinâmicas (KIM e KARDES, 2012).

Como bem nos asseguraram Kim *et al.* (2007), os lubrificantes para estampagem podem ser divididos em dois segmentos, lubrificantes à base de óleo (úmidos) e lubrificantes de película seca. Onde os lubrificantes de película seca são melhores aceitos devido a facilidade de limpeza e ainda reduz a poluição, pois é mais ecologicamente correto, o que é algo indispensável nos tempos atuais devido a crescente conscientização ambiental.

Figura 15 - Curva de Stribeck mostrando os diferentes regimes de lubrificação (p_{tot} = pressão total, p_c =pressão de contato sólido, p_h =pressão hidrodinâmica, h =espessura do filme lubrificante, h_{cr} =espessura crítica).



Fonte: Luiz (2022).

3.4.3.5 Influência da lubrificação para o processo de estampagem

Na estampagem, uma adequada lubrificação desempenha um papel de suma importância, a fim de minimizar as rugas, prevenção de fraturas prematuras e controle do desgaste localizado, ainda ajuda a prevenir o desgaste da ferramenta quando se produz em grande volume, os autores ainda fizeram um estudo com uso de 5 lubrificantes distintos, a fim de avaliar o comportamento dos mesmos sob a estampagem profunda, onde o lubrificante líquido teve pior desempenho (KIM *et al.*, 2007).

Para Folle e Schaeffer (2017), a análise e estudo da lubrificação em estampagem é de suma importância, pois buscar melhorar a qualidade dos materiais produzidos. Os autores fizeram ensaios com quatro condições de lubrificação diferentes, sendo com três lubrificantes líquidos de base mineral e um sem lubrificante. Observou-se que durante o teste em atrito seco, houve aumento no coeficiente de atrito ao decorrer do ensaio, esse comportamento se deve ao fenômeno de adesão explicado anteriormente, juntamente com o desgaste da ferramenta ao longo do ensaio. Além disso, observou-se que houve um acúmulo de fragmentos de material na ferramenta de trabalho. Já nos ensaios lubrificados, um lubrificante se destacou, onde não

foi informado qual a composição ou marca do mesmo, mas no geral, o coeficiente de atrito após vencer a força resistente do início do ensaio, teve uma queda significativa em seu valor.

DOU e XIA (2019), avaliaram as condições do coeficiente de atrito na lubrificação limite ($0,1 < \mu < 0,3$), atrito seco ($\mu > 0,3$), lubrificação hidrodinâmica ($0,03 < \mu < 0,1$) e lubrificação mista ($\mu \leq 0,03$), onde percebeu-se que o excesso (lubrificação hidrodinâmica), tanto quanto a falta de lubrificação (atrito seco) não foram boas para os processos de estampagem, logo a melhor condição observada foi a lubrificação mista.

Para Subramonian *et al.* (2011), um lubrificante ideal depende da aplicação, mas no geral devem apresentar propriedades destinadas a reduzir o atrito entre as peças que se encontram em movimento, prevenir o desgaste do material, evitar e/ou eliminar a ocorrência de oxidação, manter inalteradas as condições de lubrificação hidrodinâmicas ou lubrificação limite a altas pressões e temperaturas, dissipar eficazmente o calor gerado durante a deformação (ação refrigerante), impedir a adesão metálica entre a matriz e o metal processado, além do mais deve assegurar a estabilidade térmica em motores.

3.4.3.6 Rugosidade superficial no coeficiente de atrito.

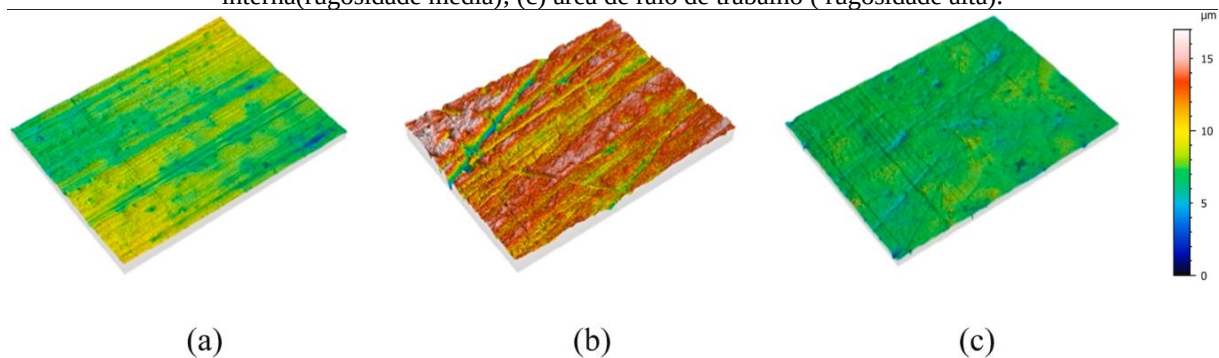
A rugosidade refere-se ao conjunto de irregularidades, que incluem saliências e reentrâncias, presentes em uma superfície. Os tamanhos e a distribuição espacial dessas irregularidades desempenham um papel crucial no desempenho de peças e instrumentos (BIASIBETTI *et.al.*, 2019).

A rugosidade da superfície, e por conseguinte, os parâmetros de aspereza, exercem um papel significativo de influência sobre o coeficiente de atrito durante o movimento (MENEZES; KISHORE e KAILAS, 2008).

Menezes, Kishore e Kailas (2008) avaliaram chapas de aço, onde quatro tipos de texturas superficiais com rugosidades variadas foram encontrados, onde foi observado que a textura da superfície muda significativamente o coeficiente de atrito, mesmo com rugosidades superficiais semelhantes

Ao analisar o comportamento do atrito, no geral a indústria considera o coeficiente de atrito constante em toda a ferramenta, onde não são considerados a rugosidade da superfície e da ferramenta, sendo assim Zabala *et al.* (2022), desenvolveram um estudo de modelagem matemática para se avaliar tal comportamento, onde foi observado que existe uma relação direta entre o coeficiente de atrito com a rugosidade do material, onde os três materiais com rugosidades diferentes, submetidos aos mesmos ensaios apresentaram resistência e coeficiente de atrito diferentes, a Figura 16 representa a rugosidade das três superfícies ensaiadas.

Figura 16 - Rugosidade das três superfícies ensaiadas: (a) área plana externa (rugosidade baixa) ; (b) área plana interna (rugosidade média); (c) área de raio de trabalho (rugosidade alta).



Fonte: Zabala et.al, (2022).

No contexto das medições de rugosidade, geralmente, há parâmetros específicos empregados para avaliar a superfície de um material. Parâmetros como R_a , R_z , R_q e R_t descrevem características da rugosidade superficial em peças ou superfícies metálicas (OLYMPUS, 2023).

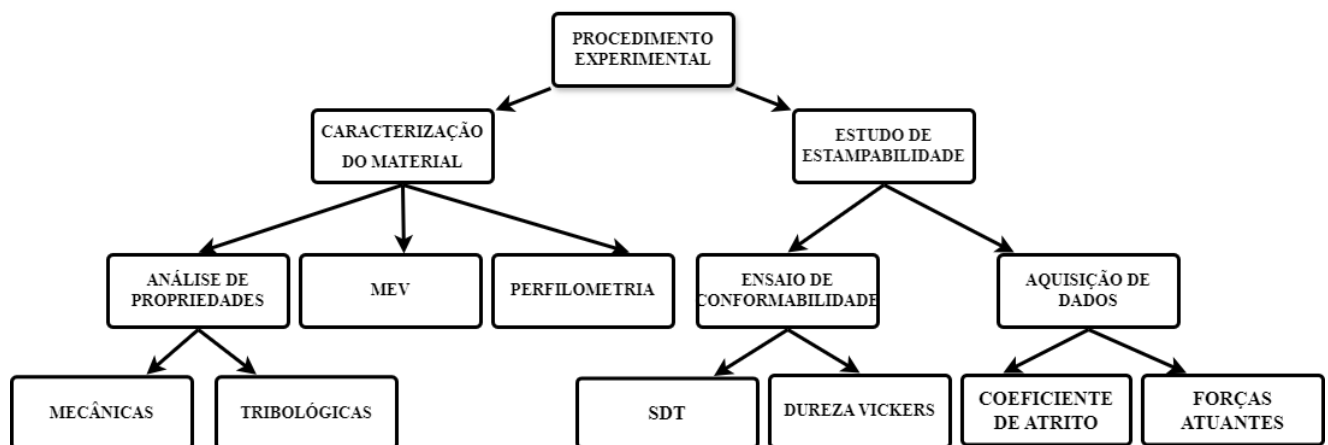
- R_a (Rugosidade Média): representa a média aritmética dos valores absolutos das alturas dos picos e vales na superfície. Quanto maior o valor de R_a , maior a rugosidade média;
- R_z (Altura Máxima): Representa a média das alturas máximas de cinco segmentos consecutivos da linha de medição. Ele é calculado dividindo a linha em cinco segmentos iguais, identificando o pico mais alto e o vale mais profundo em cada segmento, calculando as diferenças entre eles e, finalmente, obtendo a média dessas diferenças;
- R_q (Raiz Quadrada da Média dos Quadrados): representa a raiz quadrada da média dos quadrados das alturas dos picos e vales. É uma medida da dispersão das alturas na superfície;

- Rt (Altura Total): Representa a diferença vertical entre o ponto mais alto (pico) e o ponto mais baixo (vale) ao longo de toda a linha de medição. Ele considera a linha de medição completa e calcula a diferença entre os extremos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada na execução do presente trabalho pode ser dividida em duas etapas, conforme o fluxograma mostrado na Figura 17. A primeira etapa consiste na caracterização da chapa de aço AISI 430, por meio de análise química, análise metalográfica e ensaios físicos para avaliação das propriedades mecânicas e tribológicas. A segunda etapa consiste no estudo de conformabilidade do material por meio de ensaios simulativos de atrito.

Figura 17 - Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Autor (2024).

Vale ressaltar, que todas as etapas ilustradas na Figura 17, com exceção dos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Perfilometria óptica que foram realizados na APERAM SOUTH AMERICA, os demais foram realizados nos Laboratório de Química, Metalografia e de Ensaio Mecânicos do Departamento de Metalurgia e Química (DMQTM) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) Campus Timóteo.

4.1 MATERIAIS

As amostras utilizadas nesta pesquisa foram confeccionadas a partir de chapas de aço AISI 430, com 0,8 mm de espessura, fornecidas pela empresa Aperam South América. Conforme estabelecido pela norma ASTM A480/A480M (2020), o acabamento superficial é classificado como Tipo 2B, indicando que os materiais foram submetidos a um processo de laminação a frio, recozimento, decapagem, seguido por um ligeiro passe de laminação de acabamento e

endurecimento superficial (*skin pass*) com cilindros brilhantes, resultando em uma deformação total de aproximadamente 0,8%. As composições químicas dessas chapas de aço, em conformidade com a norma ASTM A240/A240M (2020), estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química padronizada da chapa de aço inoxidável (% em peso).

Material	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni
AISI 430	≤0,12	≤1,0	≤1,0	≤0,04	≤0,03	16~18	≤0,75

Fonte: ASTM A240/A240M, (2020).

Para a confecção das castanhas foram utilizadas um aço ABNT 1045, que posteriormente foi tratado termicamente por têmpera para aumento de dureza. O lubrificante utilizado em todos os ensaios simulativos de atrito foi um óleo a base mineral típico de conformação a frio da marca GREASE, tipo USI CUT LS 120, com viscosidade cinemática de 120 mPa.s e uma densidade de 0,894 g/cm³.

4.2 EQUIPAMENTOS

Para medição de espessura utilizou-se um micrômetro digital da marca Mitutoyo, com faixa de medição de 0-25mm, com resolução de +/- 0,001 mm. As medidas de rugosidade foram realizadas com o auxílio um rugosímetro digital da marca TESA, modelo Rugosurf 20, fornecendo os parâmetros de rugosidade Ra, Rq, Rt e Rz.

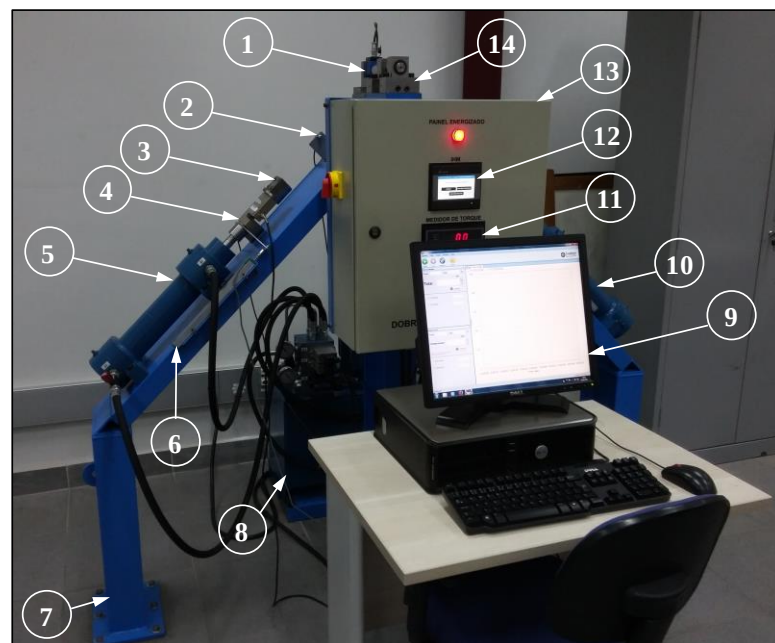
A dureza da tira metálica foi realizada por meio de um microdurômetro Vickers da marca Shimadzu, modelo HMT-2T.

Todos os ensaios simulativos de atrito foram realizados no tribossimulador mostrado na Figura 18, Este tribossimulador é equipado com dois cilindros de trabalho que induzem o movimento das chapas, entretanto, no presente estudo, apenas um dos cilindros foi utilizado (Figura 19).

Para analisar o perfil topográfico das amostras ensaiadas, foram realizados ensaios de perfilometria 3D por meio de um perfilômetro óptico HommelWerke-T8000.

Com o intuito de analisar os mecanismos de atrito de atrito e desgaste ocorridos durante os ensaios SDT, utilizou-se um MEV, acoplado com variação contínua em toda a faixa por Elétrons Secundários (MEV- SE), da marca Philips, modelo XL 30, com resolução 5,0nm e aumento de 20X à 200.000X.

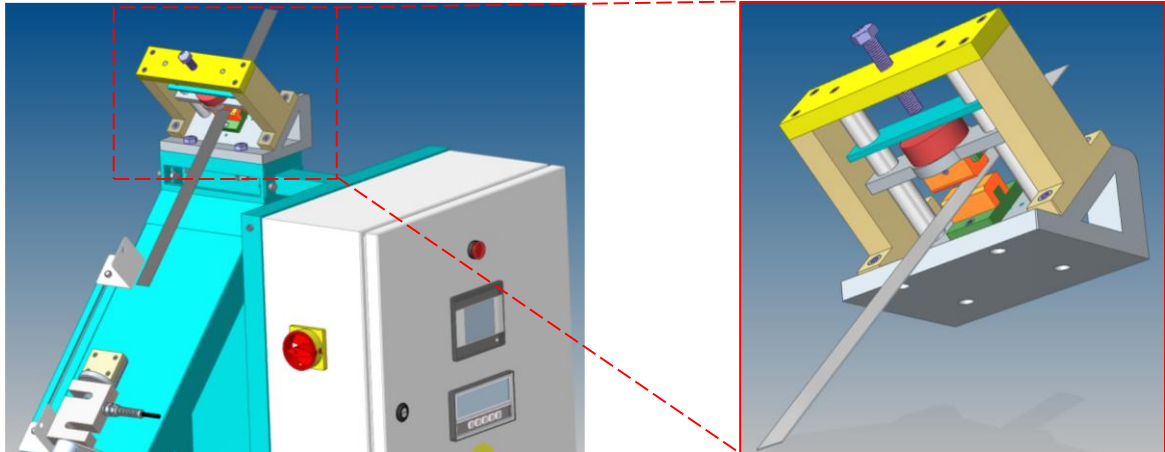
Figura 18 - Tribossimulador utilizado: desenvolvido: desenvolvido: (1) sensor de torque; (2) sensor de proximidade indutivo; (3) garra; (4) célula de carga; (5) cilindro hidráulico dianteiro; (6) sensor de posição LVDT; (7) estrutura de montagem; (8) unidade hidráulica; (9) computador com software de aplicação; (10) cilindro hidráulico traseiro; (11) sensor de torque; (12) interface homem-máquina; (13) painel de controle; (14) porta-ferramentas de pino livre.



Fonte: Luiz (2022).

No entanto, conforme ilustrado na Figura 19, um dispositivo foi construído e adaptado no topo do tribossimulador mostrado na Figura 18 com o propósito simular a mecânica do contato na região plana do prensa chapa no processo de estampagem profunda, ou seja, o ensaio SDT. Este dispositivo utiliza duas diferentes células de carga, uma com capacidade de até 45 kN, e outra com 2,5 kN, as quais são utilizadas na medição da força tangencial e da força normal, respectivamente, ambas com resolução de $\pm 0,05\%$ do fundo de escala.

Figura 19 - Dispositivo desenvolvido para simular ensaio SDT.

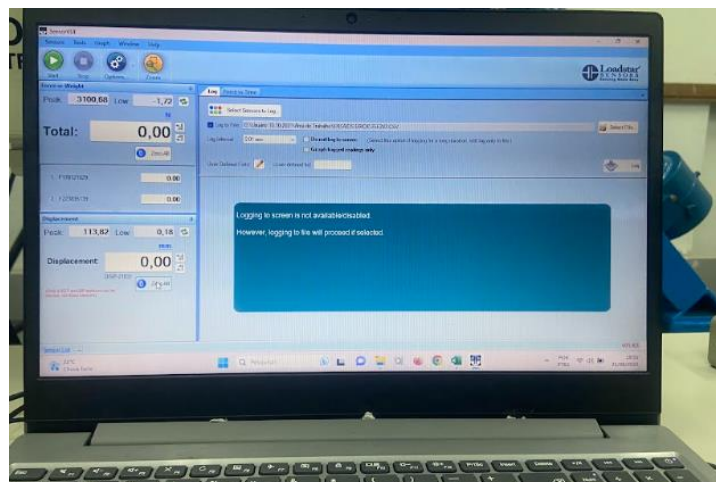


Fonte: Souza (2023).

Para obtenção dos dados experimentais, um sistema de aquisição de dados (SAD) desenvolvido pela empresa Loadstar Sensors foi utilizado. Na Figura 20 é mostrado o software SensorVUE utilizado para a aquisição dos dados em tempo real, os quais serão tratados posteriormente em uma planilha do Excel para determinação dos gráficos e valor do coeficiente de atrito.

Com o intuito de aumentar a dureza das castanhas utilizadas nos ensaios simulativos de atrito, um forno tipo mufla foi utilizado para realizar um tratamento térmico de têmpera. O aumento de dureza das castanhas que região plana da matriz de estampagem faz com que a resistência ao desgaste também aumente, propiciando uma maior vida útil da ferramenta e evitando a interferência nos resultados experimentais.

Figura 20 - Sistema de aquisição de dados (SAD) - Loadstar Sensors.



Fonte: Autor (2024).

4.3 MÉTODOS

Com o objetivo de realizar uma determinação precisa da espessura da chapa, foram executadas dez medições de forma aleatória abrangendo toda a extensão das amostras, sendo que a média das dez medições foi considerada como o resultado final. Essa abordagem sistemática assegura uma avaliação abrangente e confiável da espessura da chapa de aço investigadas

Como a rugosidade tem influência direta no coeficiente de atrito, foram realizadas nove medidas de rugosidade na chapa no sentido de laminação e no sentido transversal. Os dados fornecidos foram os parâmetros Ra, Rq, Rt e Rz, e a média das dez medições foi considerada como o resultado final.

Para avaliar a dureza do material, aplicou-se uma carga de 0,49 N por durante 15 segundos, sendo que nove medições foram realizadas em áreas distintas da chapa de aço, com a finalidade de se obter uma medição mais aproximada do real. A média das dez medições também foi considerada como o resultado final. Neste procedimento, um penetrador com ponta de diamante realiza uma endentação em forma de um losango na superfície do material.

Para aumentar a dureza e resistência ao desgaste, as castanhas que simulam a região plana da matriz de estampagem foram submetidas a um tratamento térmico de têmpera, a partir de 900 °C (solubilizado por 30 min), com resfriamento forçado em água.

Na Tabela 3, são apresentados os parâmetros dos ensaios SDT realizados no tribossimulador, utilizado para avaliar a estampabilidade de chapas metálicas. Todas as combinações de forças e velocidades foram testadas. Para garantir a repetibilidade, cada condição de ensaio foi repetida em pelo menos duas amostras, identificadas como F1V1, F1V2, e assim por diante, até cobrir todas as combinações possíveis. As forças e velocidades utilizadas foram determinadas através do viés em que a célula de carga tem um limite máximo de carga de 2.500 N, sendo assim, foram escolhidas forças menores, médias e uma próxima a máxima suportada pelo equipamento, enquanto as velocidades foram definidas em parâmetros onde não desgastaria em excesso a ferramenta desenvolvida.

Tabela 3 - Parâmetros operacionais usados no ensaio SDT do aço AISI 430.

Parâmetros operacionais	Especificações
Tipo de aço	AISI 430
Dimensões das tiras	450 mm x 25 mm x 0,8 mm
Direção de ensaio	Direção de laminação
Comprimento de deslizamento	120 mm
Velocidade de deslizamento	1 mm/s, 4 mm/s
Forças de aperto	700 N, 1400 N, 2100 N
Rugosidade da ferramenta	Ra = 1,83 μ m, Ra = 0,45 μ m

Fonte: Autor 2024

No tribossimulador, as tiras metálicas são fixadas em uma das extremidades do cilindro enquanto a velocidade é medida por meio de um sensor de deslocamento LVDT, o qual é acoplado à haste do cilindro. A outra extremidade da tira é posicionada entre duas castanhas fixas, permitindo que a tira tensionada deslize, simulando assim, o deslocamento da chapa pelo punção na região plana de uma matriz de estampagem. Antes da realização de cada ensaio, um parafuso de aperto é utilizado para aplicar a força normal que simula a força da prensa chapas. Nesta região, onde as castanhas estão localizadas, que as forças atuantes (F_n e F_p) são medidas e, conseqüentemente, são utilizadas para a determinação do coeficiente de atrito pela Equação 9, conforme ilustrado na Figura 21.

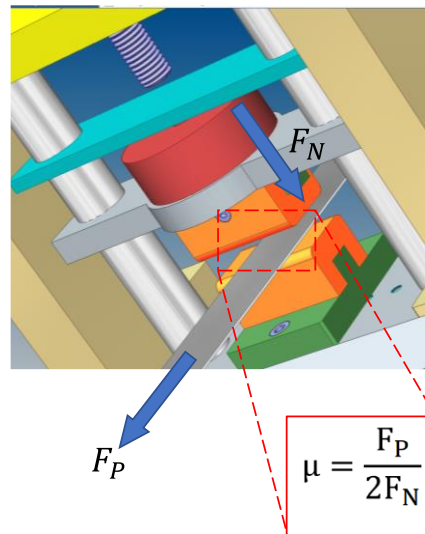
Para analisar o perfil topográfico das amostras ensaiadas, foram realizados ensaios de perfilometria 3D por meio de um perfilômetro. Como exemplo foram analisadas as amostras iniciais (F1V1) e finais (F3V2) após a execução do ensaio SDT. Para a primeira amostra, foram utilizados o perfil de #1/50, ponto 2,57 μ m, em uma escala de 3,18 μ m, com ângulo Alfa de 45° e Beta de 30° já para a segunda amostra o perfil utilizado foi de #1/50, ponto 51,1 μ m e escala de 59,2 μ m, com ângulo Alfa de 45° e Beta de 30°.

Com o intuito de analisar os mecanismos de atrito de atrito e desgaste ocorridos durante os ensaios SDT, utilizou-se um MEV. Onde vale destacar que a análise também foi na superfície das amostras F1V1 (700 N e 1,0 mm/s) e F3V2 (2100 N e 4,0 mm/s) com diferentes ampliações.

Antes de cada ensaio, as chapas foram limpas com acetona e, posteriormente, ambas as superfícies da chapa (superior e inferior) e das castanhas, foram lubrificadas em abundância

com o lubrificante para deformação a frio mencionada na seção 4.1. Na Figura 21 é ilustrado esquematicamente o método empregado na determinação do valor do coeficiente de atrito.

Figura 21 - Método de determinação do valor do coeficiente de atrito.



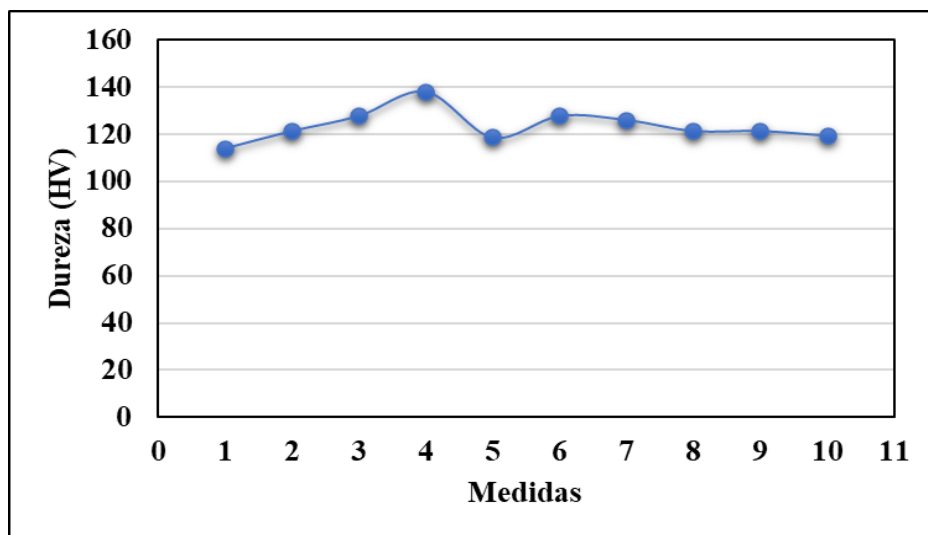
Fonte: Souza (2023).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Na Figura 22 são mostrados os resultados dos ensaios de dureza executados na chapa de aço AISI 430. Observa-se na Figura 22 que houve pouca variação no valor da dureza na superfície do material, onde a média de dureza obtida é da ordem de 123 HV. De acordo com a norma A240/A240M (2020), a dureza deste aço deverá ser ≤ 180 HV, logo, pode-se inferir que a dureza do material está em conformidade com a aludida norma padrão.

Figura 22 - Gráfico de dispersão de dureza Vickers da chapa AISI 430.

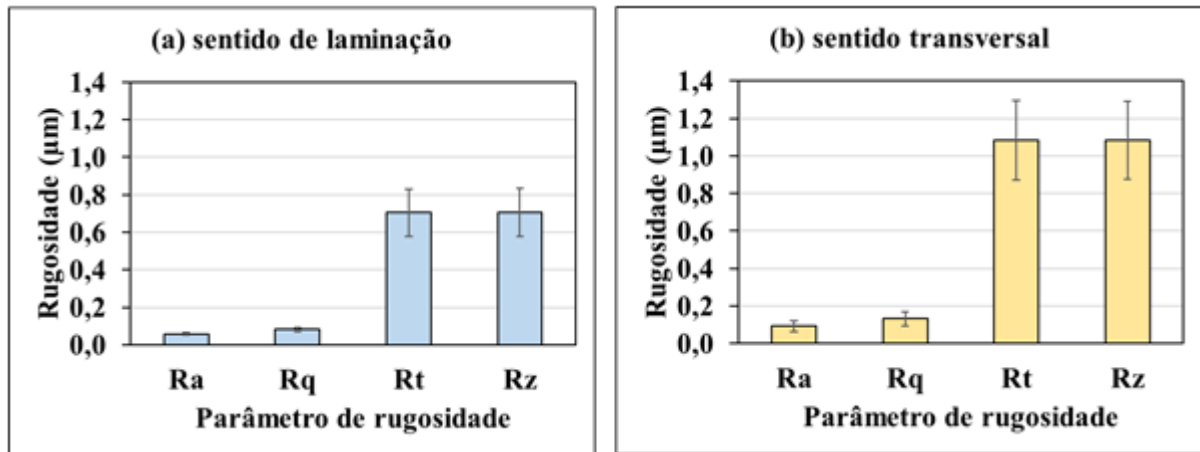


Fonte: Autor (2024).

Na Figura 23 são mostrados os parâmetros de rugosidade medidos (R_a , R_z , R_t e R_q) na superfície da chapa de aço AISI 430 na direção transversal e de laminação. A Figura 23 evidencia que a rugosidade tende ser maior no sentido transversal em comparação com o sentido de laminação devido ao alinhamento das imperfeições superficiais na direção do fluxo de material, e orientação dos grãos durante o processo de laminação.

Na Tabela 4, estão os resultados da medida de espessura da chapa de aço AISI 430. É possível notar que não houve variação significativa entre os valores medidos e aqueles informados pela empresa fabricante do material, denotando uma homogeneidade na espessura do mesmo.

Figura 23 - Valores de rugosidade medidos para a chapa de aço AISI 430 no estado conforme recebido: (a) sentido de laminação (b) sentido transversal.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 4 - Resultado da medida de espessura da chapa de aço AISI 430.

Medida	Espessura(mm)
1	0,811
2	0,813
3	0,808
4	0,807
5	0,801
6	0,81
7	0,807
8	0,806
9	0,809
10	0,809
Média	0,808
Desvio Padrão	0,003

Fonte: Autor (2024).

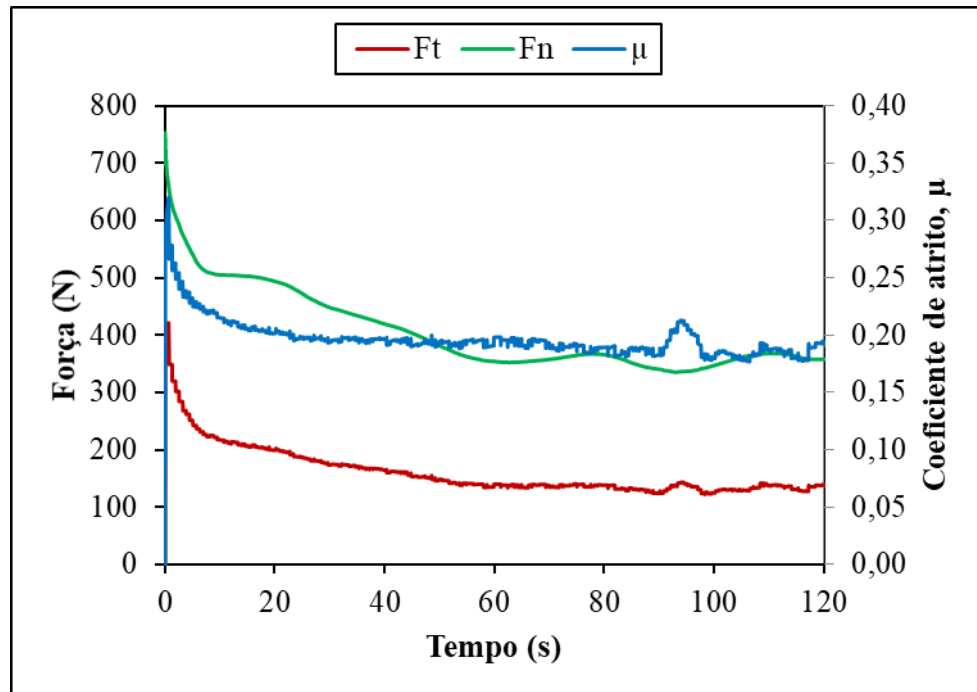
5.2 FORÇAS ATUANTES

Conforme discutido anteriormente, o presente trabalho objetivou estudar o comportamento do coeficiente de atrito (μ), em função da variação da força normal (F_n) e velocidade de deslizamento da tira metálica.

5.2.1 Coeficiente de atrito

Na Figura 24 é mostrada curvas características obtidas no ensaio SDT para a tira metálica usando-se uma força normal 700 N e velocidade de 1 mm/s.

Figura 24 - Curvas características das forças atuantes (F_n e F_t) e do coeficiente de atrito para a tira de aço AISI 430.



Fonte: Autor (2024).

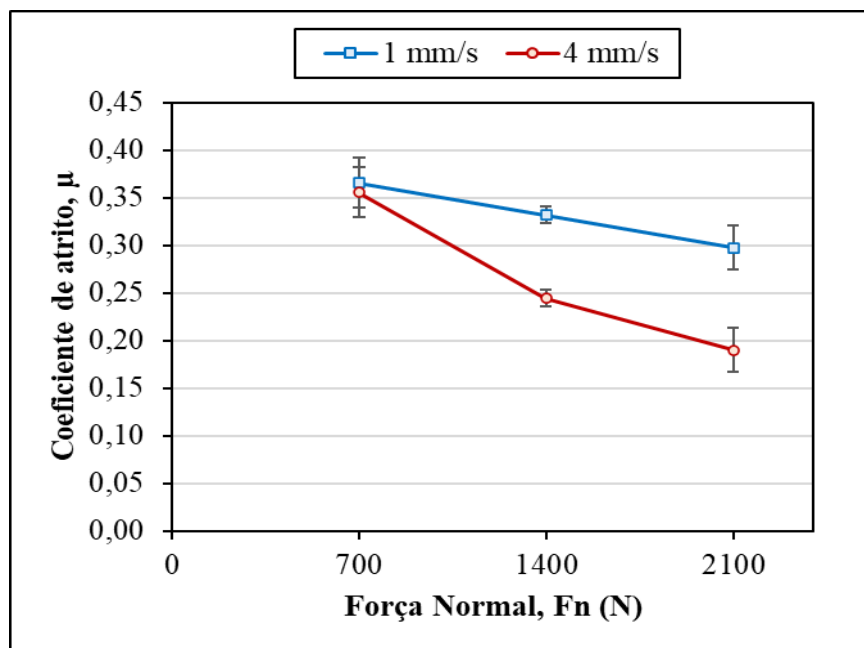
É possível notar nos primeiros instantes do ensaio SDT, que tanto as forças atuantes quanto o valor do atrito foram mais elevados, mas tenderam a diminuir à medida que a chapa deslizou entre as castanhas. Este comportamento é devido ao fato de que é necessário maior força para romper as micro ligações entre as asperezas das superfícies ou "soldagem a frio", que é decorrente do fenômeno de adesão ilustrado na Figura 14. Quando esse fenômeno é superado, a força normal e o coeficiente de atrito começam a diminuir até atingir condições tribológicas estacionárias, ou seja, o regime de atrito dinâmico. Esse fenômeno também pode ser explicado pela Equação 9.

A Tabela 5 e Figura 25 apresentam os valores do coeficiente de atrito das tiras metálicas submetidas ao ensaio SDT sob diferentes parâmetros de ensaio.

Tabela 5 - Valor do coeficiente de atrito determinado durante o ensaio SDT.

Velocidade de ensaio (mm/s)	Força normal(N)	a1	a2	Média	Desvio padrão
1	700	0,347	0,384	0,365	0,026
	1400	0,326	0,338	0,332	0,008
	2100	0,281	0,314	0,297	0,022
4	700	0,342	0,369	0,355	0,019
	1400	0,234	0,255	0,244	0,014
	2100	0,193	0,187	0,189	0,004

Fonte: Autor (2024).

Figura 25 - Variação do coeficiente de atrito (μ) com a força normal aplicada.

Fonte: Autor (2024).

Observa-se por meio da Figura 25 que o valor do coeficiente de atrito (μ) diminuiu à medida que a força normal e a velocidade de ensaio aumentaram. Conforme a velocidade e a força normal aumentam, o regime de lubrificação pode mudar de limite (dominado pelo contato metal-metal) para misto ou hidrodinâmico (dominado pelo filme de lubrificante), onde o atrito é significativamente menor, ou ainda pelo fato da mudança de viscosidade do lubrificante de acordo com o aumento da força, melhorando a formação do filme lubrificante. Diversos autores como Trzepieciński e Fejkiel (2017), Szpunar *et al.* (2017), e Trzepieciński e Lemu (2019) e Trzepieciński, Szewczyk e Sz wajka (2022) observaram este mesmo fenômeno de decréscimo do coeficiente de atrito.

Szpunar *et al.* (2017) e Trzepieciński e Lemu (2019) esclareceram que a queda observada no coeficiente de atrito está intrinsecamente relacionada ao aumento da força normal aplicada. Esse fenômeno desencadeia a formação de bolsões de óleo na superfície do material, uma resposta direta à sua rugosidade. A natureza irregular da superfície propicia a criação de vales, locais onde o óleo se acumula. Ao intensificar a pressão de contato, ou seja, a força normal aplicada, ocorre um impacto direto nos picos das asperezas, os quais são achatados ou deformados pela ação da aspereza dura da ferramenta, provocando uma participação mais ativa do óleo no processo de deslizamento. Esse fenômeno tem como consequência uma redução significativa na resistência do material ao deslizamento. O aumento da pressão de contato permite uma maior interação entre o óleo presente nos vales e pares tribológicos, resultando em uma diminuição acentuada do coeficiente de atrito. Portanto, a compreensão desse mecanismo de atrito é crucial para otimizar o desempenho tribológico dos materiais em condições específicas de força e velocidade, contribuindo para a eficácia e eficiência de sistemas que envolvem interações superficiais sob diferentes cargas e condições operacionais.

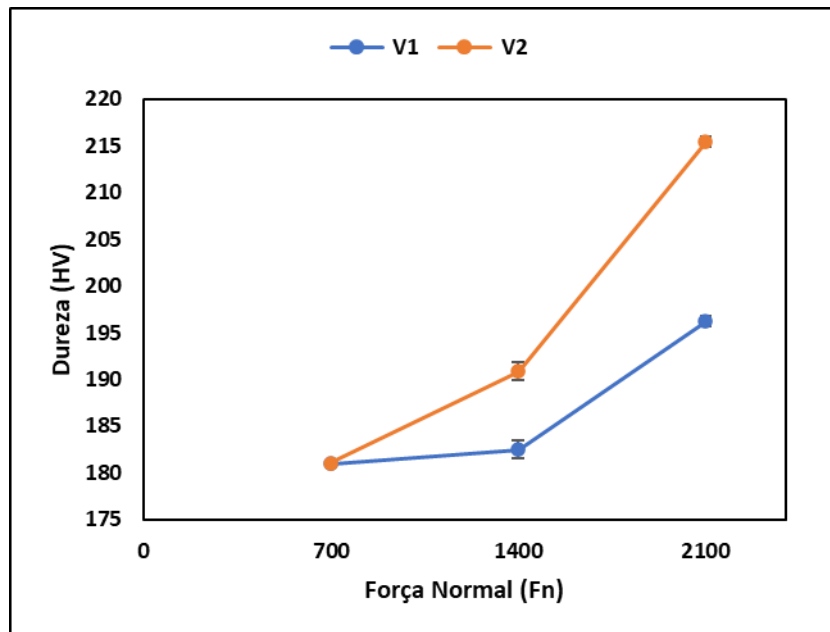
5.2.2 Dureza

Na Tabela 6 e na Figura 26 são apresentados os resultados de dureza dos corpos de prova após o ensaio SDT. Observa-se que o valor de dureza tira da metálica aumenta significativamente à medida que força normal também aumenta. Essa correlação indica que as condições tribológicas mais severas, caracterizadas por maiores cargas e velocidades, promovem um endurecimento superficial dos corpos de prova, possivelmente devido a mecanismos de deformação plástica e endurecimento por trabalho a frio.

Tabela 6 - Dureza vickers das amostras após a realização dos ensaio SDT.

Velocidade(mm/s)	Força normal(N)	a1	a2	Média	Desvio padrão
V1	700	180,8	181,1	180,95	0,212
	1400	181,8	183,2	182,5	0,989
	2100	196,6	195,8	196,2	0,565
V2	700	181	181,1	181,05	0,070
	1400	191,6	190,1	190,85	1,060
	2100	214,8	216	215,4	0,848

Fonte: Autor (2024).

Figura 26 - Dureza Vickers após ensaio SDT.

Fonte: Autor (2024).

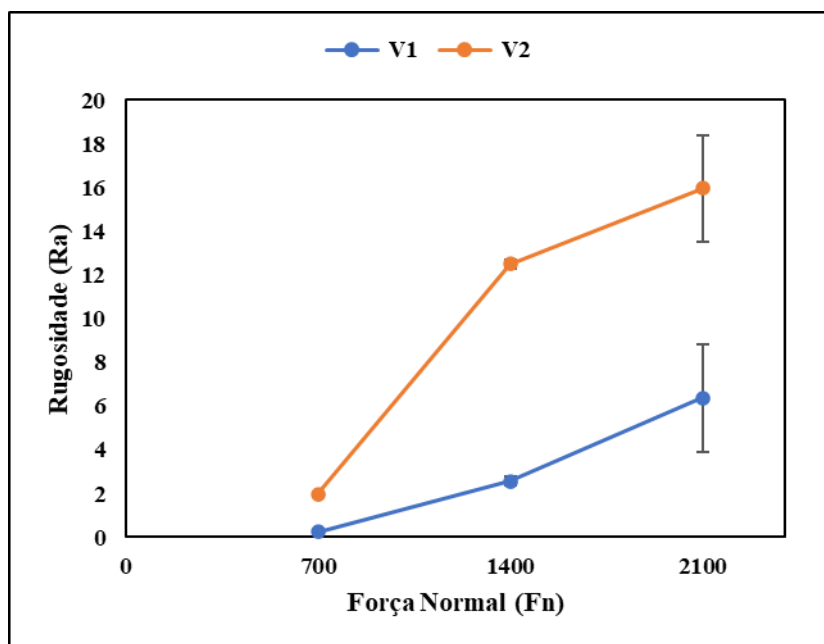
5.2.3 Rugosidade

Na Tabela 7 e na Figura 27, são apresentados os valores de rugosidade R_a medidos após a realização dos ensaios SDT. Esses dados permitem uma análise detalhada das alterações na superfície das amostras submetidas ao ensaio. Observa-se que a rugosidade R_a tende a aumentar proporcionalmente com o incremento da força e da velocidade aplicadas durante o ensaio. Este comportamento sugere que, com o aumento dessas variáveis, há uma intensificação do desgaste na superfície do material, resultando em uma maior rugosidade. Esse aumento é um indicativo do grau de desgaste sofrido pelas amostras durante o ensaio SDT. Em forças de 2.100N foram observados maiores desvios padrões, isso se deve ao fenômeno conhecido como aração, que será explicado mais adiante.

Tabela 7 - Rugosidade das amostras após a realização dos ensaio SDT.

Velocidade (mm/s)	Força normal(N)	a1	a2	Média	Desvio padrão
V1	700	0,275	0,237	0,256	0,026
	1400	2,406	2,70	2,554	0,208
	2100	4,641	8,106	6,374	2,449
V2	700	1,772	2,173	1,972	0,283
	1400	13,743	11,269	12,506	1,749
	2100	12,063	19,864	15,964	5,515

Fonte: Autor (2024).

Figura 27 - Rugosidade após ensaio SDT.

Fonte: Autor (2024).

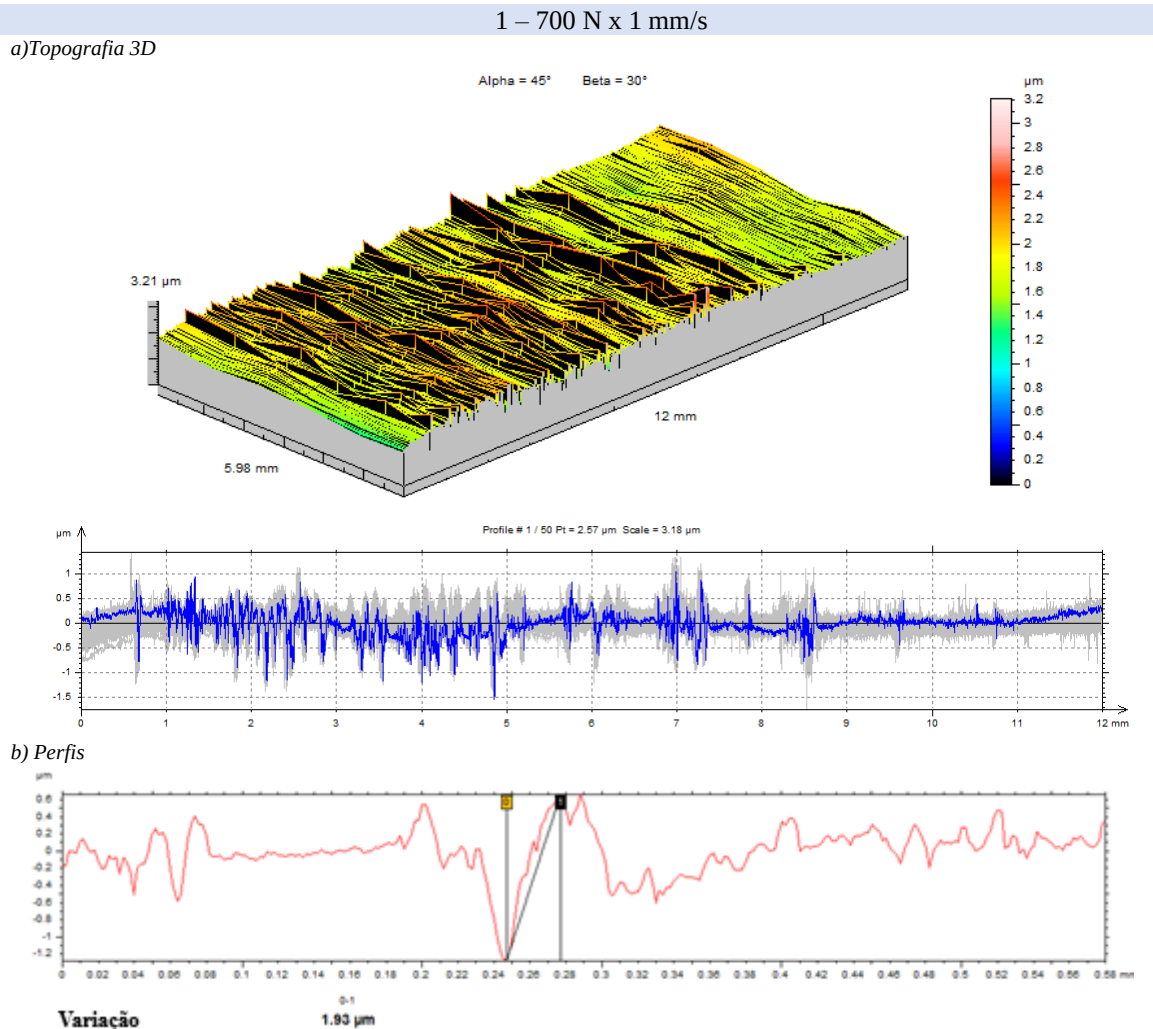
5.2.4 Perfilometria

Nas Figuras 28 e 29 são exibidos os resultados obtidos por perfilometria óptica (topografia tridimensional e perfil bidimensional) na superfície de tiras metálicas submetidas ao ensaio SDT.

Na Figura 28, verifica-se um comportamento linear e uniforme na rugosidade, indicando estabilidade. Este comportamento é atribuído à força aplicada, insuficiente para deformar

grande parte das rugosidades/asperezas da superfície da chapa, resultando em um coeficiente de atrito mais elevado.

Figura 28 - Perfil tridimensional juntamente com os perfis bidimensionais da primeira amostra submetida ao ensaio SDT, com menor aplicação de força e velocidade 700N x 1mm/s.



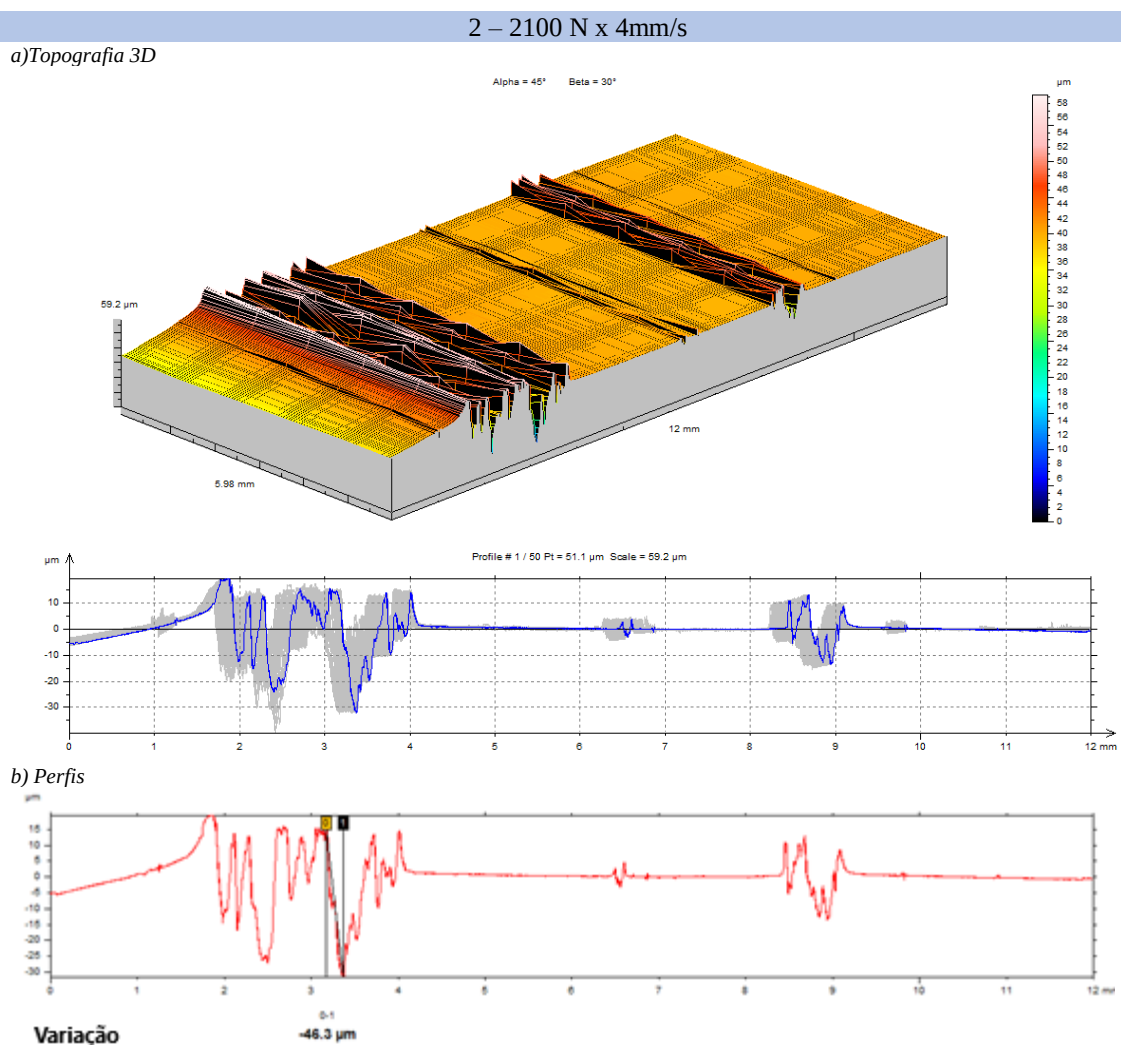
Fonte: Autor (2024).

Na análise detalhada da Figura 29, é possível identificar uma expressiva deformação superficial conhecida como aração, conforme conceituado por Trzepieciński, Szewczyk e Sz wajka (2022). Esse fenômeno é diretamente influenciado pela magnitude da força normal aplicada durante o processo. Conforme essa força aumenta, intensifica-se a interação entre os picos mais elevados da superfície da ferramenta e a região já achatada da chapa, ocasionando o arraste de material e a consequente obtenção de uma superfície com aspecto liso. Ainda em correlação entre as Figuras 28 e 29, é possível observar que na Figura 28, há uma maior

quantidade de sulcos de baixa profundidade, enquanto na Figura 29, os sulcos são em menor número, mas apresentam maiores profundidades.

A dinâmica descrita promove uma maior eficácia na ativação dos bolsões de óleo presentes na superfície da chapa metálica, contribuindo para uma redução notável do coeficiente de atrito entre as superfícies em contato. Conforme observado anteriormente no gráfico da Figura , essa redução é de aproximadamente 36%. Esse comportamento reforça a relação direta entre os parâmetros operacionais e as propriedades superficiais resultantes, destacando a importância da compreensão desses fenômenos para o desenvolvimento de processos e otimização de processos de manufatura de conformação de chapas metálicas.

Figura 29 - Análise topográfica 3D juntamente com os perfis bidimensionais da amostra ensaiada usando o ensaio SDT onde foram aplicadas maior força e velocidade 2100N x 4mm/s.



Fonte: Autor (2024).

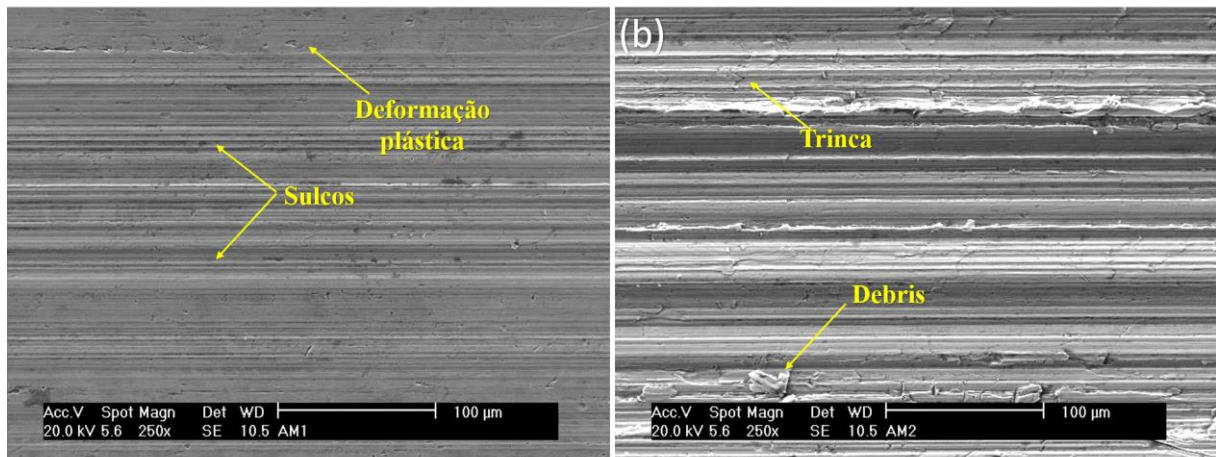
5.2.5 Microscopia eletrônica de varredura

Adicionalmente, imagens via MEV foram obtidas na superfície das amostras supracitadas, conforme a Figura 30 (A e B), a diferença na intensidade dos mecanismos de atrito nas superfícies das chapas ensaiadas aumentam os parâmetros de força e velocidade aplicados durante o ensaio. Este fenômeno sugere uma correlação entre tais parâmetros e as características topográficas observadas, indicando a influência direta dos fatores de processo na morfologia superficial das amostras.

Na Figura 30 (A), a micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde a forma da ferramenta foi transferida para o material, o que resultou em sulcos orientados na direção horizontal do ensaio. Nota-se que esses arranhões e sulcos não são profundos, indicando que a chapa não sofreu arraste significativo de material. Esses defeitos estão localizados próximos à superfície de contato entre a chapa e a ferramenta, sugerindo uma penetração superficial mínima. A amostra usando 700N x 1 mm/s mostrou riscos mais finos com contornos suaves e sem evidência visual de levantamento de material

Por outro lado, na Figura 30 (B), a micrografia MEV mostra uma maior profundidade de penetração na superfície da chapa. Aqui, observa-se um arraste de material mais pronunciado, o que evidencia o fenômeno de aração discutido anteriormente e ilustrado na Figura 33. Esse fenômeno de aração é caracterizado por sulcos mais profundos e uma remoção considerável de material da superfície da chapa, resultando em uma superfície significativamente alterada e com maior rugosidade. Em contraste, a amostra 2100 N x 4 mm/s apresentou riscos significativamente mais profundos e pronunciados, com arrastamento e acúmulo de material nas bordas dos riscos, ainda é possível observar fenômenos como trincas, e “debris”, que são particulados que se desprenderam durante o ensaio e ficaram encrustados na superfície da chapa.

Figura 30 - Análise MEV superfície ensaiada utilizando os parâmetros: a) F1V1 com ampliação de 500X b) F3V2 com ampliação de 500X.



Fonte: Autor (2024).

6. CONCLUSÕES

O estudo do comportamento tribológico da chapa de aço inoxidável ferrítico AISI 430 com qualidade de estampagem profunda foi investigado por meio do ensaio SDT. As principais conclusões são resumidas a seguir:

- A força tanto quanto o atrito são resumidas a seguir: o coeficiente de atrito diminuiu com o aumento da força normal e da velocidade deslizamento. Este comportamento foi devido à superação das micro ligações superficiais, com isso, atrito tendeu a diminuir à medida em que se aumentou a força normal ou a pressão de contato. Muito provavelmente, este comportamento se deve ao achatamento das asperezas, atingindo os bolsões de óleo que atenuou o efeito da resistência ao atrito durante o movimento relativo da tira metálica
- As análises tridimensionais e bidimensionais por meio da perfilometria mostraram variações significativas na rugosidade superficial. Forças menores resultaram em uma superfície mais uniforme, enquanto forças maiores causaram deformação significativa, conhecida como aração, melhorando a eficácia dos bolsões de óleo e reduzindo o atrito.
- As micrografias de MEV revelaram que amostras submetidas a menores forças apresentaram riscos finos, enquanto forças maiores causaram sulcos profundos e arraste de material.
- Os resultados de dureza indicaram um aumento significativo com forças e velocidades maiores, devido à deformação plástica e endurecimento por trabalho a frio.

Este estudo destaca a importância de entender e controlar as condições tribológicas para otimizar processos de fabricação, melhorando a qualidade final dos produtos. Podendo ser utilizado por meio industriais como ferramenta de apoio para realização de estampagem.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- **Análise de Outros Tipos de ligas metálicas:** Expandir o estudo para incluir diferentes tipos ligas metálicas, como aço carbono e alumínio, a fim de comparar o comportamento tribológico em condições semelhantes de estampagem profunda.
- **Variação dos Parâmetros de Estampagem:** Estudar o impacto da variação de diferentes parâmetros de estampagem, como velocidade, pressão e acabamento superficial, no atrito e desgaste entre a chapa de aço AISI 430 e a matriz.
- **Simulação Computacional:** Implementar simulações computacionais usando softwares de elementos finitos para prever o comportamento tribológico sob diferentes condições de operação e validar os resultados experimentais com esses modelos.
- **Influência de Lubrificantes:** Avaliar o efeito de diferentes tipos de lubrificantes utilizados no processo de estampagem sobre o comportamento tribológico da chapa e da matriz, verificando quais proporcionam melhor desempenho em termos de redução do atrito e desgaste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A240/A240M**. Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications. ASTM International, West Conshohocken, 2020.

ANDRADE, P. J.; FALQUETO, L.E.; STREY, N.F.; JUNIOR BALARINI, R.; SCANDIAN, C. Influência da Carga Normal no Desgaste Por Deslizamento De Aços1020. **Congresso Anual da ABM** , 2013.

ANDRADE, T.C.; SILVA, C.C.; MIRANDA; H.C.; MOTTA, M.F.; FARIAS; J.P.; BERGMAN; L.A; SANTOS; J.F. Microestrutura de uma Solda Dissimilar entre o Aço Inoxidável Ferrítico AISI 410S e o Aço Inoxidável Austenítico AISI 304L Soldado pelo Processo FSW. **Soldagem & Inspeção**, v. 20, n. 4, p. 467–478, dez. 2015.

APERAM. **Conformação-Processos: Estampagem por Embutimento e Estiramento**. Disponível em: <https://www.aperamservicos.com.br/wp-content/uploads/2020/09/Caderno3.pdf>. Acesso em 20 de nov de 2023.

BIASIBETTI, G. R.S.; NUNES, R.M.; CAVALER, L.C.C.; ROCHA, A.S. Análise da rugosidade superficial de barras de aço SAE 1045 após torneamento. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 1, 2019.

BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I.B.; BUTTON, S.T. **Conformação Plástica dos Metais**. 6ªed. EPUSP, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf>>. Acesso em: 20 out 2023.

BRUSHAN, B. **Introduction to Tribology**, 2ªEdição. [s.l.] John Wiley & Sons, 2013.

CARBÓ, H.M. **Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações**. ArcellorMittal, 2008.

CERON, E.; BAY, N. Determination of Friction in Sheet Metal Forming by Means of Simulative Tribo-Tests. **Key Engineering Materials**, v. 549, p. 415–422, abr. 2013.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. [s.l.] Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais-ABM, 2005.

CUNHA, M. A.; OLIVEIRA, T. R.; GONÇALVES, I. N. ESTRIAMENTO (ROPING) EM AÇOS INOXIDÁVEIS FERRÍTICOS AISI 430 ESTABILIZADOS AO NIÓBIO. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v. 5, n. 3, p. 150–155, 2009.

DAVIES, J.R. **ASM Speciality Handbook Stainless Steels**. [S.l.]: ASM International, 1994.

DAVIES, J.R. **ASM Speciality Handbook Alumiun**. [S.l.]: ASM International, 1993.

DOEGE, E.; BEHRENS, B.A. **Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen**. Springer-Verlag, Berlin, 2016.

DOU, S.; XIA, J. Analysis of Sheet Metal Forming (Stamping Process): A Study of the Variable Friction Coefficient on 5052 Aluminum Alloy. **Metals**, v. 9, n. 8, p. 853, 3 ago. 2019.

EVIN, E.; TOMÁŠ,M.; VÝROSTEK, M. Verification the Numerical Simulation of the Strip Drawing Test by its Physical Model. **Acta Mechanica Slovaca**, v. 20, n. 1, p. 14–21, 31 mar. 2016.

FERREIRA, J.L.; TEPEDINO, J.O.A.; WOLF; M.A.; MOREIRA, L.P. **Curva Limite de Conformação Independente da Trajetória De Deformação**: Descrições Nos Espaços De Tensões E De Deformações. 1 set. 2017.

FERRO, D.A. **Caracterização e Estampabilidade de um aço SAE 1080 fosfatizado**. 2015. 189p. Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, Brasil, 2015.

FOLLE, L. F.; SCHAEFFER, L. Avaliação das condições tribológicas em estampagem de chapas através do ensaio de dobramento sob tensão. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 2, 2017.

GÅÅRD, A. **Wear mechanisms in sheet metal forming**. 2008. 53f. Dissertação. Mestrado em Faculty of Technology and Science Materials Engineering, Karlstad University, Karlstad, Sweden, 2008.

GHAFFAR, A.A.; ABDULLAH, A.B.; JOHAN, A. Experimental and numerical prediction on square cup punch–die misalignment during the deep drawing process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 113, n. 1-2, p. 379–388, 25 jan. 2021.

GRONOSTAJSKI, Z.; PATER, Z.; MADEJ, L.; GONTARZ, A.; LISIECKI, L.; SOŁEK, A.L.; ŁUKSZA, J.; MRÓZ, S.; MUSKALSKI, Z.; MUZYKIEWICZ, Z.; PIETRZYK, M.; ŚLIWA, R.E.; TOMCZAK, J.; WIEWIÓROWSKA, S.; WINIARSKI, G.; ZASADZIŃSKI, J.; ZIÓŁKIEWICZ, S. Recent development trends in metal forming. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 19, n. 3, p. 898–941, 1 maio 2019.

HUTCHINGS, I. M.; SHIPWAY, P., **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2017.

JEYAPRAKASH, N.; YANG, C-H. **Friction, Lubrication, and Wear**. In: PATNAIK, A.; SINGH, T.; KUKSHAL, V. (editors). *Tribology in Materials and Manufacturing: Wear, Friction and Lubrication*. 1st ed. IntechOpen, London, 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.93796>>. Acesso em: 07 nov 2023.

KHORRAMI, M.S.; MOSTAFAEI, M.A.; POURALIAKBAR, H.; KOKABI, A.H. Study on microstructure and mechanical characteristics of low-carbon steel and ferritic stainless steel joints. **Materials Science and Engineering**, v. 608, p. 35–45, Jul 2014.

KIM, H. SUNG, J.H.; SIVAKUMAR, R.; ALTAN, T. Evaluation of stamping lubricants using the deep drawing test. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 14, p. 2120–2132, nov. 2007.

KIM, H.; KARDES, N. Friction and Lubrication. **ASM International eBooks**, p. 89–103, 1 jan. 2012.

LENSKE, A., MÜLLER, T., PENTER, L., SCHNEIDER, M., HAUPTMANN, M., AND MAJSCHAK, J. (2017). "**Evaluating the factors influencing the friction behavior of paperboard during the deep drawing process**," *BioRes.* 12(4), 8340-8358.

LE, H.; SUTCLIFFE, M. P. F. Measurements of friction in strip drawing under thin film lubrication. **Tribology International**, v. 35, n. 2, p. 123–128, 1 fev. 2002.

LIMA, A.C.S.; DAGOSTIM, D.K.; ZAAGE, L.A.; CASAGRANDE, P.A.S.; DALEFFE, A. **Levantamento da curva limite de conformação do aço SAE 1006 / Survey of the forming limit curve of SAE 1006 steel**. v. 8, n. 4, p. 31555–31562, 28 abr. 2022.

LO, K. H.; SHEK, C. H.; LAI, J. K. L. Recent developments in stainless steels. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 65, n. 4-6, p. 39–104, 29 mai 2009.

LOVELL, M.; HIGGS, C.F.; DESHMUKH, P.; MOBLEY, A. Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly lubricants. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 177, n. 1-3, p. 87–90, jul. 2006.

LUDEMA, K. C. **Friction, wear, lubrication : a textbook in tribology**. Boca Raton: Crc Press, 1996.

LUIZ, V. D.; AMARAL, E.C.; SOUZA, V.P.; RODRIGUES, P.C.M. Influência da velocidade de estampagem e anisotropia no comportamento tribológico e fratura de uma chapa de aço AISI 430Nb. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 1, 2022.

LUIZ, V.D. **Estudo Do Comportamento Mecânico, Tribológico E Fratura Da Chapa De Aço AISI 430 Sob Dobramento E Estiramento**. 2022. 202p. Tese. Doutorado em Engenharia de Manufatura e Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2022.

MADEIRA, T.F. **Caracterização de chapa metálica para a Indústria Automóvel**. 2014. 96p. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Materiais. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2014.

MAGALHÃES, F.C. **Estudo Numérico e Analítico das Evoluções da Força e da Espessura em Chapas de Aço Livre de Intersticiais Durante Processamento por Embutimento e Ironing**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

Medição da rugosidade de superfícies — Parâmetros | Olympus. Disponível em: <<https://www.olympus-ims.com/pt/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>>. Acesso em: 25 nov. 2023.

MENEZES, P. L.; KISHORE; KAILAS, S. V. Influence of roughness parameters on coefficient of friction under lubricated conditions. **Sadhana**, v. 33, n. 3, p. 181–190, jun. 2008.

NETTO, S.E.S. **Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação**. 2004. 90p. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004.

NIELSEN, C. V.; BAY, N. Overview of friction modelling in metal forming processes. **Procedia Engineering**, v. 207, p. 2257–2262, 2017.

RAJASEKHAR, A.; REDDY, G.M.; Mohandas.T.; Murti, V.S.R. Influence of austenitizing temperature on microstructure and mechanical properties of AISI 431 martensitic stainless steel electron beam welds. **Materials & Design**, v. 30, n. 5, p. 1612–1624, maio 2009.

RIJEZA, M. **Desgaste por Adesão**. São Leopoldo: [s.n.]. 2023. Disponível em: <<https://rijeza.com.br/blog/desgaste-por-adesao-o-que-e-e-como-prevenir/>>. Acesso em 30 de set de 2023.

ROCHA, R. P.; RIFFEL, M.H.; SANTOS. T.G.; ROSIAK, A.; SCHAEFFER, L. Determinação das curvas limite de conformação dos aços inoxidáveis Aisi 304 e Aisi 430

para diferentes condições superficiais de lubrificação. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 7, p. 54251–54273, 28 jul. 2022.

SCHAEFFER, L. **Conformação de chapas metálicas**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SENRA, A.L. **IN SITU STUDY OF AISI 304 AND AISI 430 STAINLESS STEEL USING SYNCHROTRON LIGHT**. 2019. 144f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) STATE UNIVERSITY OF PONTA GROSSA, Ponta Grossa, PARANÁ, Brasil, 2019.

SILVA, A. L.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**, 4. ed. São Paulo, Blucher, 2021.

SILVA, C. C; FARIAS, J.P.; MIRANDA, H.C.; GUIMARÃES, R.F.; MENEZES; J.W.A; NETO; M.A.M. Microstructural characterization of the HAZ in AISI 444 ferritic stainless steel welds. **Materials Characterization**, v. 59, n. 5, p. 528–533, maio 2008.

SINGH, C.P.; AGNIHOTRI, G. Study of Deep Drawing Process – A Review. **International Journal of Scientific and Research Publications**, BHOPAL, v. 5, n. 2, Feb 2015.

STEINHILPER, W.; SAUER, B. **Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben**, 6th edn. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.

SUBRAMONIAN, S.; KARDES, N.; DEMIRALP, Y.; JURICH, M.; ALTAN, T. Evaluation of Stamping Lubricants in Forming Galvannealed Steels for Industrial Application. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 133, n. 6, 1 dez. 2011.

SZPUNAR, M.; TRZEPICÍŃSKI, T.; ŻABA, K.; OSTROWSKI, R.; ZWOLAK, M. Effect of Lubricant Type on the Friction Behaviours and Surface Topography in Metal Forming of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Sheets. **Materials**, v. 14, n. 13, p. 3721–3721, 2 jul. 2021.

TANURE, L.; ALCÂNTARA, C.M.; OLIVEIRA, T.R.; SANTOS, D.B.; GONZALEZ, B.M.; VERBEKEN, K. Microstructure, Texture and Microhardness Evolution during Annealing Heat Treatment and Mechanical Behavior of the Niobium-Stabilized Ferritic Stainless Steel

ASTM 430 and Niobium-Titanium-Stabilized Ferritic Stainless Steel ASTM 439: a Comparative Study. **Materials Research**, v. 8, p. 4048-4065, Sep 2019. ISSN 5.

TRZEPIECIŃSKI, T. A Study of the Coefficient of Friction in Steel Sheets Forming. **Metals**, v. 9, n. 9, p. 988, 6 set. 2019.

TRZEPIECIŃSKI, T. Polynomial Multiple Regression Analysis of the Lubrication Effectiveness of Deep Drawing Quality Steel Sheets by Eco-Friendly Vegetable Oils. **Materials**, v. 15, n. 3, p. 1151, 2 fev. 2022.

TRZEPIECIŃSKI, T.; FEJKIEL, R. On the influence of deformation of deep drawing quality steel sheet on surface topography and friction. **Tribology International**, v. 115, p. 78–88, nov. 2017.

TRZEPIECIŃSKI, T.; LEMU, H. G. Effect of Lubrication on Friction in Bending under Tension Test-Experimental and Numerical Approach. **Metals**, v. 10, n. 4, p. 544, 23 abr. 2020.

TRZEPIECIŃSKI, T.; SZEWCZYK, M.; SZWAJKA, K. The Use of Non-Edible Green Oils to Lubricate DC04 Steel Sheets in Sheet Metal Forming Process. **Lubricants**, v. 10, n. 9, p. 210, 30 ago. 2022.

WANG, Z.; DIRRENBERGER, J.; LAPOUGE, P.; DUBENT, S. Laser treatment of 430 ferritic stainless steel for enhanced mechanical properties. **Materials Science and Engineering: A**, v. 831, p. 142205–142205, 1 jan. 2022.

YANG, L.; TANG, D.; HE, Y. Describing tube formability during pulsating hydroforming using forming limit diagrams. **Journal Strain Analysis**, p. 1-9, 2017.

ZABALA, A.; ARGANDOÑA, E.S.; CAÑIZARES, D.; OTEGI, N.; MENDIGUREN, J. Numerical study of advanced friction modelling for sheet metal forming: Influence of the die local roughness. **Tribology International**, v. 165, p. 107259–107259, 1 jan. 2022.