



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

FELIPE DE SOUZA LEAL

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DA CHAPA DE AÇO AISI 304
EM MATRIZ DE ESTAMPAGEM PLANA**

Timóteo

2025

FELIPE DE SOUZA LEAL

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DA CHAPA DE AÇO AISI 304
EM MATRIZ DE ESTAMPAGEM PLANA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Coleti

Coorientador: Prof. Dr. Valmir Dias Luiz

Timóteo

2025

L435e Leal, Felipe de Souza.
Estudo do comportamento tribológico da chapa de aço AISI/304 em matriz de estampagem plana / Felipe de Souza Leal. – 2025.
83 f. : il.
Orientador: Jorge Luis Coleti.
Coorientador: Valmir Dias Luiz.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Timóteo, 2025.
Bibliografia.

1. Tribologia - Testes. 2. Aço inoxidável austenítico. 3. Conformação de metais. 4. Engenharia de materiais. I. Coleti, Jorge Luis. II. Luiz, Valmir Dias. IV. Título.

CDU: 620.1-034.14



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 17 / 2025 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.039151/2025-95

Belo Horizonte-MG, 23 de julho de 2025.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

*ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DA CHAPA DE AÇO AISI 304
EM MATRIZ DE ESTAMPAGEM PLANA*

Autor: Felipe de Souza Leal

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Coleti

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou em 24 de julho de 2025 esta Dissertação:

Prof. Dr. Jorge Luís Coleti (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Valmir Dias Luiz (COORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Leonel Muniz Meireles (EXAMINADOR INTERNO)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

Dr.^a Géssica Seara Faria (EXAMINADOR INTERNO)
Aperam South America - APERAM

(Assinado digitalmente em 25/07/2025 09:22)
JORGE LUIS COLETI
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMQTM (11.63.04)
Matrícula: 1212397

(Assinado digitalmente em 24/07/2025 19:05)
LEONEL MUNIZ MEIRELES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DFGTM (11.63.03)
Matrícula: 1095529

(Assinado digitalmente em 24/07/2025 17:19)
VALMIR DIAS LUIZ
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMQTM (11.63.04)
Matrícula: 1809797

(Assinado digitalmente em 24/07/2025 16:49)
GESSICA SEARA FARIA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.656-##

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: 17, ano: 2025, tipo: ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO, data de
emissão: 23/07/2025 e o código de verificação: cc225b5ec0

RESUMO

Um dos principais desafios nos processos de conformação de chapas metálicas é garantir a fabricação de peças com elevada precisão dimensional e livres de defeitos que comprometam a qualidade e funcionalidade do produto final. Dentre os fatores críticos envolvidos, os aspectos tribológicos influenciam diretamente tanto a eficiência do processo quanto a integridade da peça conformada. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo investigar o comportamento tribológico da chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304 em processo de estampagem profunda sob condições lubrificadas. Foram avaliados os efeitos da força normal (90, 175, 350, 700, 1400 e 2100 N), da velocidade de deslizamento (1,0; 2,5 e 4,0 mm/s) e da rugosidade das contraamostras (0,45 e 1,83 μm) sobre o coeficiente de atrito, por meio de ensaios de estampagem de tira realizados em dispositivo desenvolvido para simular a região plana do prensa-chapas. As superfícies das amostras foram caracterizadas após os testes por meio de microscopia eletrônica de varredura, difração de raios-X, perfilometria e ensaios de dureza. Os resultados indicaram que o aumento da força normal reduziu o coeficiente de atrito em até 21%, com predomínio do mecanismo de atrito adesivo e abrasivo em baixas cargas, e deformação plástica das asperezas em altas cargas. A rugosidade das amostras aumentou após os ensaios SDT, entretanto, com acréscimo de força normal houve uma redução dos parâmetros de R_a e R_q , devido o mecanismo de deformação plástica. Observou-se também que o coeficiente de atrito diminuiu com o aumento da velocidade de deslizamento e da rugosidade das contraamostras. Alterações microestruturais associadas ao efeito TRIP contribuíram para o aumento da dureza superficial. Acima de 700 N, o coeficiente de atrito apresentou tendência de estabilização. Os resultados obtidos são relevantes para o avanço científico no entendimento dos mecanismos tribológicos e oferecem subsídios valiosos para a indústria, especialmente na otimização de processos de estampagem e na calibração de modelos de simulação computacional.

Palavras-chave: Conformação de chapas metálicas; Aspectos tribológicos; AISI 304; Ensaio de estampagem de tiras; Coeficiente de atrito.

ABSTRACT

One of the main challenges in sheet metal forming processes is to ensure the manufacture of parts with high dimensional accuracy and free of defects that compromise the quality and functionality of the final product. Among the critical factors involved, tribological aspects directly influence both the efficiency of the process and the integrity of the formed part. In this context, the present work aimed to investigate the tribological behavior of AISI 304 austenitic stainless-steel sheet in a deep drawing process under lubricated conditions. The effects of normal force (90, 175, 350, 700, 1400 and 2100 N), sliding speed (1.0, 2.5 and 4.0 mm/s) and countersamples roughness (0.45 and 1.83 μm) on the coefficient of friction were evaluated by means of strip drawing tests performed in a device developed to simulate the flat region of the sheet metal press. The surfaces of the samples were characterized after the tests by means of scanning electron microscopy, X-ray diffraction, profilometry and hardness tests. The results indicated that increasing the normal force reduced the coefficient of friction by up to 21%, with a predominance of the adhesive and abrasive friction mechanisms at low loads, and plastic deformation of the asperities at high loads. The samples roughness increased after the SDT tests, however, with increasing normal force, a reduction in the Ra and Rq parameters was observed, which can be attributed to the plastic deformation mechanism. It was also observed that the coefficient of friction decreased with the increase in the sliding speed and the countersamples roughness. Microstructural changes associated with the TRIP effect contributed to the increase in surface hardness. Above 700 N, the friction coefficient showed a tendency to stabilize. The results obtained are relevant for scientific advancement in the understanding of tribological mechanisms and offer valuable subsidies for the industry, especially in the optimization of stamping processes and in the calibration of computational simulation models.

Keywords: Sheet metal forming; Tribological aspects; AISI 304; Strip drawing tests; Coefficient of friction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de tensão – deformação de aço AIA estável e metaestável.	21
Figura 2 - Micrografias ópticas de microestruturas para (a) original; (b) 10% CR; (c) 30% CR; (d) 50% CR do aço AISI 316LN.	22
Figura 3 - (a) Comportamento da tensão de engenharia em relação à deformação, 10%, 30%, 50%, 70% e 90%; (b) variação do limite de escoamento/resistência médios e alongamento, e (c) dureza Vickers em função da redução à de laminação à frio. .	22
Figura 4 - Dobra de linha reta de chapa.	24
Figura 5 - Desenho esquemático da estampagem profunda.	25
Figura 6 - Esforços atuantes nas diversas regiões do copo.	26
Figura 7 – Áreas de estudo da tribologia.	27
Figura 8 - Aplicação de uma força F_n necessária para superar o atrito e causar movimento, (a) rolando ou (b) deslizando.	28
Figura 9 - Mecanismos básicos de atrito em visão microscópica.	29
Figura 10 - Superfície da amostra.	31
Figura 11 – Bolsões de óleo fechado e abertos.	31
Figura 12 - Curva de Stribeck mostrando os diferentes regimes de lubrificação (p_{tot} = pressão total, p_c = pressão de contato sólido, p_{hid} = pressão hidrodinâmica, h = espessura do filme lubrificante, h_{cr} = espessura crítica).	32
Figura 13 - Desenho esquemático do ensaio PSD.	33
Figura 14 – Modelos de ensaios tribológicos representando as condições de contato nas áreas específicas da peça estampada: (a) tribômetro de pino sobre disco; (b) dobramento sob tensão ou BUT; (c) estampagem com compressão tangencial; (d) dobramento com compressão tangencial; (e) ensaio de estampagem de tira plana; (f) ensaio de freio de estampagem; (g) ensaio de tração de tira ou STT; (h) estiramento hemisférico; (i) ensaio de redução de tira.	34
Figura 15 - Dobramento sob tensão em conformação de tiras metálicas.	35
Figura 16 - Tribossimulador desenvolvido.	36
Figura 17 - Representação esquemática do ensaio STT.	37
Figura 18 - Tribossimulador para ensaio de estampagem de tira.	38
Figura 19 – Desenho esquemático da metodologia utilizada no presente trabalho.	40
Figura 20 – Desenho esquemático do CP para ensaio SDT (unidades em mm).	42

Figura 21 - Amostras fabricadas para os ensaios SDT.	42
Figura 22 - Representação esquemática da geometria dos CPs (espessura = 0,8mm) utilizados no ensaio de PSD.....	43
Figura 23 – Desenho esquemático do dispositivo utilizado na execução dos ensaios SDT.	44
Figura 24 - Desenho esquemático das contraamostras planas.....	45
Figura 25 – Imagem real das contraamostras que foram fabricadas para execução dos ensaios SDT: (a) $R_a = 1,83 \mu\text{m}$; (b) $R_a = 0,45 \mu\text{m}$	45
Figura 26 - Sistema de aquisição de dados (SAD) - Loadstar Sensors.....	47
Figura 27 - Desenho esquemático do CP usado no ensaio de tração uniaxial.	48
Figura 28 - Representação esquemática da geometria dos CPs utilizados no ensaio de tração para determinação dos coeficientes r , rb e Δr	49
Figura 29 - (a) desenho esquemático do contato mecânico do prensa chapas; (b) esquema do processo de estampagem profunda.	49
Figura 30 - Fluxograma do procedimento experimental.	51
Figura 31 – (a) Tribômetro de Pino Sob Disco (PSD); (b) amostra emergida ao óleo lubrificante.	52
Figura 32 – Tribossimulador de chapas metálicas (a), dispositivo de matriz plana montado no tribossimulador (b).....	53
Figura 33 - Tribossimulador utilizado: (1) dispositivo de matriz plana; (2) painel de controle; (3) interface homem-máquina; (4) sensor de torque; (5) computador com software de aplicação; (6) cilindro hidráulico; (7) sensor de posição LVDT.	54
Figura 34 - Microestrutura da chapa de aço AISI 304: (a) $50 \mu\text{m}$ e (b) $100 \mu\text{m}$	56
Figura 35 - Imagens da superfície da chapa de aço AISI 304 como recebida: (a) perfilometria 3D e perfil de rugosidade; (b) Imagem MEV.	58
Figura 36 - Resultados de coeficiente de atrito (a) e taxa de desgaste (b) do ensaio PSD.....	59
Figura 37 - Curvas características do aço AISI 304 submetido ao ensaio SDT: a) forças aplicadas (FT e FN) e b) coeficiente de atrito (μ). Parâmetros de processo: força normal = 350 N, velocidade de deslizamento = 1,0 mm/s e rugosidade da ferramenta = $0,45 \mu\text{m}$	61
Figura 38 - Efeito da força normal com o valor do coeficiente de atrito da chapa de aço AISI 304 submetida ao ensaio SDT: rugosidade da ferramenta igual a (a) $0,45\mu\text{m}$ e (b) $1,83\mu\text{m}$	63

Figura 39 – Imagens de MEV das chapas de aço AISI 304 depois dos ensaios SDT (1,0 mm/s e 0,45 μm) mostrando escoriações na superfície da chapa (a) e (b) 90N; (c) e (d) 350 N; (e) e (f) 1400N.	66
Figura 40 - Análise de DRX destacando as fases presentes na superfície da chapa de aço AISI 304 sob diferentes condições de ensaio: velocidade de 1,0 mm/s, com rugosidade igual a (a) $R_a = 0,45 \mu\text{m}$ e (b) $R_a = 1,83 \mu\text{m}$	68
Figura 41 - Distribuição percentual das fases para diferentes parâmetros de ensaios: velocidade de 1,0 mm/s, com rugosidades das contraamostras (a) $R_a = 0,45 \mu\text{m}$ e (b) $1,83 \mu\text{m}$	69
Figura 42 - Efeito da força normal nos valores de dureza das chapas de aço AISI 304 submetidas ao ensaio SDT: rugosidade das contraamostras igual a (a) $0,45 \mu\text{m}$ e (b) $1,83 \mu\text{m}$	70
Figura 44 - Topografia das amostras no estado como recebido (a) e ensaiadas com força normal igual a 90 N (b), 350 N (c) e 1400 N (d).	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química padronizada da chapa de aço AISI 304 (% em peso).	42
Tabela 2 - Dimensões das cotas do CP usado no ensaio de tração uniaxial.	48
Tabela 3 – Parâmetros operacionais do ensaio SDT.....	50
Tabela 4 - Parâmetro operacionais usados no ensaio PSD.	52
Tabela 5 - Composição química da chapa de aço AISI 304 (% em peso).	55
Tabela 6 - Propriedades mecânicas da chapa de aço AISI 304.	57
Tabela 7 - Parâmetros de rugosidade nos materiais utilizados no ensaio.	59
Tabela 8 - Parâmetros básicos da rugosidade superficial das chapas de metálicas após os ensaios SDT.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIA	Aço Inoxidável Austenítico
AIISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CP	Corpo de Prova
COF	Coeficiente de Atrito (<i>Coefficient of Friction</i>)
CuK α	Radiação monocromática de cobre, linha K α
DMQTM	Departamento de Metalurgia e Química do CEFET-MG Timóteo
DRX	Difração de Raios X
HV	Dureza Vickers (<i>Hardness Vickers</i>)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO	Microscopia Óptica
PSD	Pino Sob Disco
Ra	Rugosidade Média Aritmética
Rz	Altura Máxima do Perfil
SAD	Sistema de Aquisição de Dados
Sa	Altura Média Aritmética da Superfície (3D)
SDT	Ensaio de Estampagem de Tira (<i>Strip Drawing Test</i>)
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
Sq	Desvio Quadrático Médio da Altura
Sku	Curtose da Superfície
Ssk	Assimetria da Superfície

Sp	Altura Máxima do Pico do Perfil
Sv	Profundidade Máxima do Vale do Perfil
Sz	Altura Total da Superfície ($Sp + Sv$)

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A	Área de contato aparente	mm ²
A_r	Área de contato real	mm ²
b	Largura da tira	mm
d_p	Diâmetro do pino no ensaio PSD	mm
D	Diâmetro externo da trilha de desgaste	mm
F	Força de tração ou resultante	N
F_n	Força normal	N
F_t	Força tangencial	N
F_f	Força de atrito	N
H	Dureza Vickers	HV
L	Comprimento da tira	mm
L_d	Distância de deslizamento	m
m	Massa perdida	g
P	Pressão aplicada ou total	MPa
Ra	Rugosidade média	μm
Rz	Altura máxima do perfil de rugosidade	μm
S_a	Altura média aritmética 3D	μm
S_q	Desvio quadrático médio da altura	μm
S_{sk}	Assimetria da superfície	—
S_{ku}	Curtose da superfície	—
S_p	Altura máxima dos picos da superfície	μm
S_v	Profundidade máxima dos vales	μm
S_z	Altura total ($S_p + S_v$)	μm
T	Torque induzido por atrito	Nm
t_0	Espessura inicial da chapa	mm
t_f	Espessura final após ensaio	mm
V	Velocidade (geral)	mm/s ou m/s
v_t	Velocidade tangencial	m/s

ΔV	Perda de volume	mm ³
ρ	Densidade do material	g/cm ³

Letras gregas

μ	Coeficiente de atrito	—
μ_{ad}	Coeficiente de atrito por adesão	—
μ_{def}	Coeficiente de atrito por deformação	—
μ_l	Coeficiente de atrito sob lubrificação	—
μ_s	Coeficiente de atrito a seco	—
ε	Deformação (geral)	%
ε_r	Alongamento relativo	%
ε_e	Deformação de estiramento	%
ε_b	Deformação de dobramento	%
σ	Tensão (geral)	MPa
σ_1	Tensão principal maior (comprimento)	MPa
σ_2	Tensão principal menor (largura)	MPa
σ_3	Tensão na espessura	MPa
α', ε	Fases martensíticas	—
γ	Austenita	—
τ	Tensão de cisalhamento	MPa
ω	Velocidade angular	rad/s

Sumário

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo Geral.....	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS	18
2.1.1 Aços inoxidáveis autênticos (AIA).....	19
2.1.2 Características e Propriedades dos AIA	19
2.1.3 Comportamento sob deformação plástica nos AIA	20
2.2 CONFORMABILIDADE	23
2.2.1 Definição.....	23
2.2.2 Processos de conformação mecânica	24
2.2.3 Estampagem profunda (Estiramento)	24
2.2.4 Forças e tensões atuantes durante a estampagem	25
2.3 ASPECTOS TRIBOLÓGICOS NA CONFORMAÇÃO DE CHAPAS	27
2.3.1 Coeficiente de atrito	28
2.3.2 Lubrificação	29
2.4 ENSAIOS TRIBOLÓGICOS	32
2.4.1 Ensaio Pino Sob Disco	32
2.4.2 Ensaio de estampabilidade	34
3 METODOLOGIA	40
3.1 MATERIAIS	41
3.2 EQUIPAMENTOS.....	44
3.2.1 Projeto do dispositivo para ensaio SDT	44
3.2.2 Caracterização e análise das amostras	46
3.2.3 Sistema de aquisição de dados do ensaio SDT	46
3.3 MÉTODOS	47
3.3.1 Caracterização microestrutural	47
3.3.2 Caracterização mecânica	47
3.3.3 Caracterização tribológica	49

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO PARA ENSAIO SDT	53
4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	55
4.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	56
4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA.....	57
4.5 CARACTERIZAÇÃO TRIBOLÓGICA	58
4.5.1 Caracterização das superfícies dos materiais	58
4.5.2 Ensaio pino sob disco.....	59
4.6 ENSAIO SDT.....	61
4.6.1 Análise do coeficiente de atrito	62
4.6.2 Análise das amostras após ensaios	66
5 CONCLUSÕES.....	74

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o estudo das características tribológicas dos materiais tem se tornado fundamental para garantir a qualidade de fabricação, durabilidade e aplicabilidade de componentes, máquinas e equipamentos que é utilizado no dia a dia de todos. A indústria vem demandando cada vez mais assertividade nos processos de fabricação e no que se refere à conformação mecânica, contudo, existem poucas metodologias de caracterização para este fim.

Os processos de conformação de chapas metálicas (CCM) são de suma importância para o desenvolvimento da sociedade, pois sem eles não seria possível a produção de máquinas, equipamentos e bens de consumo na quantidade, qualidade e aplicações nos dias de hoje. Muitos produtos e máquinas que são utilizados hoje, só são viáveis economicamente por conta da produtividade e simplicidade de alguns processos de conformação mecânica.

Como os componentes fabricados requerem um alto padrão de qualidade sem trincas, arranhões e deformações inadequadas, o controle deste processo é muito importante. De acordo com Luiz (2022), diversos fatores e variáveis podem causar esses tipos de defeitos, por exemplo, inclusões metálicas indesejadas, material da ferramenta, rugosidade da superfície de contato, carga e velocidade de estampagem inadequada, entre outros.

O aço AISI 304 é um aço inoxidável austenítico utilizado para fabricação de produtos de diversos setores da indústria, por exemplo, painéis, bojos de pias e tanques, tubos de escapamentos automotivos, peças decorativas, utensílios para laboratórios, entre outras aplicações (CARBÓ, 2008). Vários destes produtos são fabricados a partir do processo de conformação mecânica por estiramento e embutimento, ou ambos. O processo de embutimento também é conhecido como repuxo ou estampagem profunda. Fundamentalmente, este processo consiste em mudar a forma plana de uma chapa metálica em um produto oco, sobretudo, através da aplicação de deformação plástica.

Uma das principais características do aço AISI 304 é o aumento da resistência mecânica ao ser deformado plasticamente, causado principalmente pela transformação martensítica. Segundo Lischika (2013) durante a deformação dos aços autênticos (AIA) a microestrutura pode se transformar em martensítica, aumentando assim consideravelmente sua resistência mecânica. Portanto, faz necessário entender previamente como será o comportamento mecânico e tribológico deste material em condições diversas.

Para investigação das características mecânicas e tribológicas de chapas de aço geralmente são utilizadas diversas técnicas de investigação, como ensaios de dobramento sob tensão ou BUT (*Bending Under Tension*), ensaio de estiramento de tira ou STT (*Strip-Tension Test*) e ensaio de estampagem de tira ou SDT (*Strip Drawing Test*). Diversos autores trazem estudos destes ensaios relacionando diversas variáveis que objetivam caracterizar previamente os materiais que serão submetidos aos processos CCM (KIM e KARDES, 2012; Luiz, 2022; TRZEPICINSKI, 2019; MAKHKAMOV, 2017).

O ensaio SDT permite uma análise precisa do comportamento tribológico na região plana da chapa, reproduzindo aspectos como velocidade de estampagem, força normal e a rugosidade da superfície de contato das ferramentas. Trzepieciniski (2019) e Makhkamov (2017) elaboraram tribossimuladores que reproduziam estas condições diferentes do processo de estampagem profunda, para análise tribológica da superfície plana das chapas.

O presente trabalho teve como objetivo investigar o comportamento tribológico da chapa de aço AISI 304 durante o processo de estampagem profunda em condições lubrificadas. Para isso, foi desenvolvido um dispositivo específico, adaptado a um tribossimulador de chapas metálicas, permitindo a simulação precisa da mecânica de contato na região do prensa-chapas. Além disso, avaliou-se o efeito de diferentes parâmetros de processo sobre o coeficiente de atrito, incluindo a força normal, a velocidade de deslizamento e a rugosidade das contraamostras (ou ferramentas) com geometria plana.

Com os resultados obtidos será possível identificar os melhores parâmetros de velocidade de estampagem, força normal e a rugosidade ideal das ferramentas, para que se possa realizar o processo de estampagem profunda sem gerar qualquer dano físico ao material.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Investigar o comportamento tribológico da chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304 submetida a ensaios de estampagem de tira que simulam as condições de contato na região plana do prensa-chapas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um dispositivo para ser adaptado em um tribossimulador de chapas metálicas, e assim realizar ensaios SDT;
- Determinar o coeficiente de atrito variando parâmetros operacionais (velocidade de ensaio, força normal e rugosidade das contraamostras de compressão), através do ensaio de estampagem de tira;
- Realizar ensaio de pino sob disco (PSD) na chapa de aço AISI 304 para comparar com os resultados obtidos no ensaio SDT;
- Avaliar a topografia da superfície das amostras através de perfilometria óptica;
- Analisar a superfície de contato das amostras para identificar os mecanismos de atrito e desgaste por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Identificar as mudanças microestruturais das amostras por meio da análise de raios-x (DRX) e microscopia óptica;
- Medir a dureza superficial por meio do ensaio de microdureza Vickers.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro e carbono (Fe-C) com percentuais de cromo (Cr) a partir de 10,5%. O Cr é o principal elemento de composição do aço inoxidável, porém existem outros elementos que trazem características importantes para este material, são eles o níquel (Ni), molibidênio (Mo), titânio (Ti), nóbio (Nb) dentre outros. A principal característica do aço inoxidável é a sua resistência à corrosão, isso só é possível graças à formação da camada passiva de óxidos de cromo resultante da reação com o oxigênio de espessura de 3 a 5 nm, protegendo-o contra os efeitos corrosivos do ambiente (SILVA E MEI, 2010; CARBÓ, 2008).

Os aços inoxidáveis podem ser divididos em 3 famílias básicas, são elas: os aços martensíticos, os aços ferríticos e os aços austeníticos, em que cada tipo de família tem características e aplicações diferentes. Além desses, existem mais duas classes especiais de aços inoxidáveis, que são: os duplex e os endurecíveis por precipitação (EPP).

As principais características das diferentes classes de aços inoxidáveis, são descritas, resumidamente, no texto a seguir (MESQUITA E RUGANI, 1997; CARBÓ, 2008):

- aços inoxidáveis martensíticos (série 400): são aços magnéticos, que podem ser endurecidos por tratamento térmico e possuem ótima resistência mecânica. Suas aplicações na indústria são: cutelaria, correntes para máquinas, discos de freios, entre outras;
- aços inoxidáveis ferríticos (série 400): também são magnéticos e possuem um teor de cromo superior aos aços martensíticos, o que aumenta sua resistência à corrosão. Suas principais aplicações são na fabricação de utensílios de cozinha, pias, sistemas de exaustão de gases, moedas, entre outros;
- aços auteníticos (série 300): São aços não-magnéticos, a sua resistência à corrosão pode ser aumentada com a adição de níquel (Ni), é facilmente conformado à frio e tem excelente soldabilidade. Podem ser utilizados tanto para fabricação de utensílios de cozinha quanto para fins estruturais,

equipamentos para indústria alimentícia, aeronáutica, ferroviária, civil, entre outros.

2.1.1 Aços inoxidáveis auteníticos (AIA)

Os aços inoxidáveis austeníticos são caracterizados, principalmente, pela presença de níquel (Ni) na sua composição. Estes aços são classificados de acordo com a norma AISI como série 300, em que o mais comum deles é o aço 304 (18%Cr – 8% Ni), suas principais características são: a excelente resistência à corrosão, ductilidade e soldabilidade o que permite a sua utilização em diversas aplicações no mercado (CARBÓ, 2008).

2.1.2 Características e Propriedades dos AIA

As principais características dos AIA são a sua elevada ductilidade, capacidade de encruamento, excelente soldabilidade e resistência à corrosão. Esta última é obtida a partir de um balanço dos elementos estabilizadores da ferrita com os da austenita. Da mesma forma que o cromo estabiliza a ferrita, o níquel contribui fortemente para a estabilidade da austenita (PADILHA E GUEDES, 1996). Estes aços também podem ser utilizados em várias faixas de temperatura, variando entre temperaturas criogênicas até altas temperaturas (1.150 °C) (CARBÓ, 2008).

Porém uma limitação importante deste aço é corrosão intergranular, quando exposto a tratamentos térmicos impróprios, causando a redução do Cr nas regiões adjacentes ao contorno de grão devido à precipitação de carboneto de cromo ($Cr_{23}C_6$), este processo é chamado de sensitização. Quando se tem regiões empobrecidas de Cr, estas se tornam mais dúcteis do que o restante do material, permitindo assim uma maior deformação (PAULA *et. al*, 2012).

Em ambientes ricos em cloretos, estes aços podem apresentar um elevado nível de corrosão por pites, por frestas ou sob tensão. Para evitar este problema, geralmente é adicionado molibdênio (Mo) entre 2% a 3%, além de aumentar a faixa de Cr e Ni,

mudando a sua classificação de AISI 304 para AISI 316, que é um aço inoxidável muito mais resistente a esse tipo de corrosão (CARBÓ, 2008).

2.1.3 Comportamento sob deformação plástica nos AIA

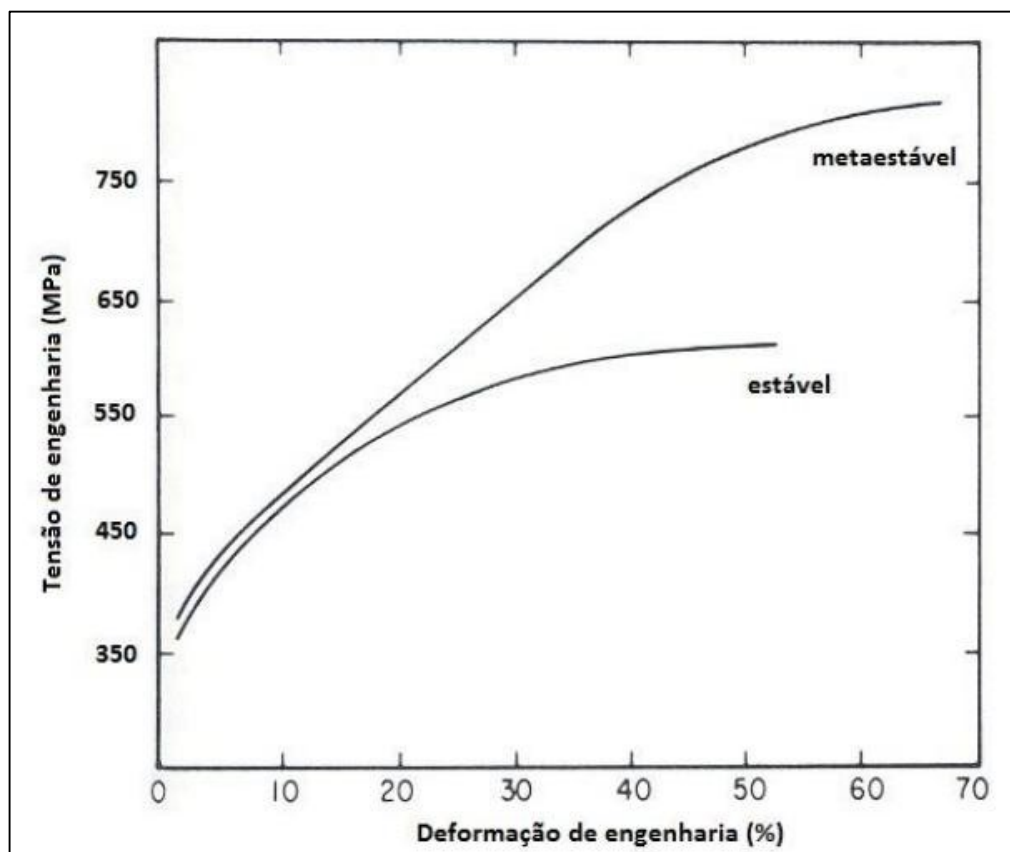
Ao serem deformados, os AIA podem sofrer modificações na sua estrutura cristalina, com a transformação da austenita em martensita induzida, dependendo do seu nível de estabilidade termodinâmico. Esta alteração estrutural é chamada de *Transformation Induced Plastic* (TRIP), que gera um aumento na dureza das chapas, promovendo a deformação por plasticidade (ROCHA, 2006).

Isto permite que diversos produtos sejam fabricados a partir de processos de conformação de chapas metálicas, garantindo a resistência e aplicabilidade no nosso dia a dia. Porém, este acréscimo de dureza deve ser controlado, de modo a não gerar defeitos como trincas e fragilidade excessiva.

Os AIA se dividem em dois grupos diferentes em relação à estabilidade da austenita: os estáveis e os metaestáveis. As ligas estáveis têm a característica de manter a sua estrutura inicial, enquanto as metaestáveis podem ter transformações martensíticas induzidas por deformação. A distinção destes dois aços pode ser percebida como um conceito um tanto subjetivo, pois a quantidade de martensita induzida por deformação também pode ser influenciada significativamente pela temperatura e pela composição da liga (ROCHA, 2006; FISHER *et al.*, 2000; LISCHIKA, 2013).

Na Figura 1 pode-se comparar o comportamento mecânico destes dois tipos de ligas durante o ensaio de tração. Observa-se que a liga metaestável apresenta um maior aumento na resistência à tração em relação à estável. De acordo com Lischika (2013), este aumento é devido à transformação parcial da austenita em martensita, uma das estruturas mais duras do aço, contribuindo fortemente para o aumento de sua resistência e dureza.

Figura 1 - Curva de tensão – deformação de aço AIA estável e metaestável.

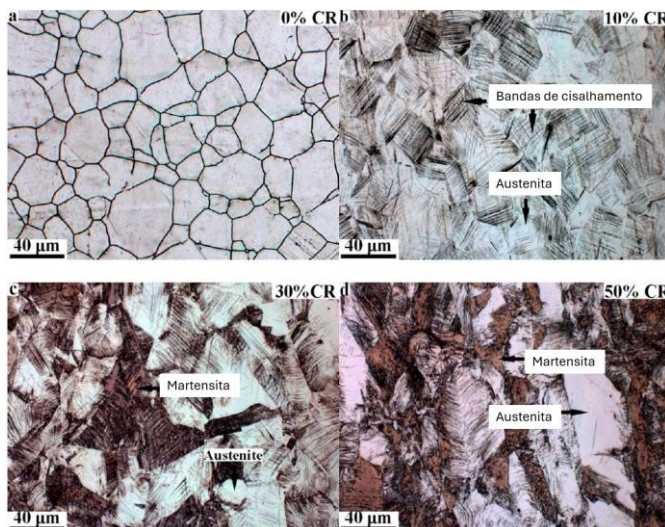


Fonte: Lishicka (2013).

Durante a deformação de aços inoxidáveis austeníticos metaestáveis, podem-se formar dois tipos de martensita: martensita ε (hexagonal compacta) martensita α' (cúbica de corpo centrado). A martensita α' altera drasticamente as propriedades mecânicas do aço o que afeta a conformabilidade destes materiais (LISHICKA, 2013).

Na Figura 2, é observável que de acordo com o nível de deformação plástica dos AIA laminados a frio “cold-rolled” (CR), há uma transformação dos grãos de austenita para grãos de martensita. Além disto, a medida que o nível de deformação plástica é aumentado, mais grãos de martensita são induzidos e a austenita residual é refinada, gerando assim um ganho de resistência mecânica considerável (XU *et al.*, 2018).

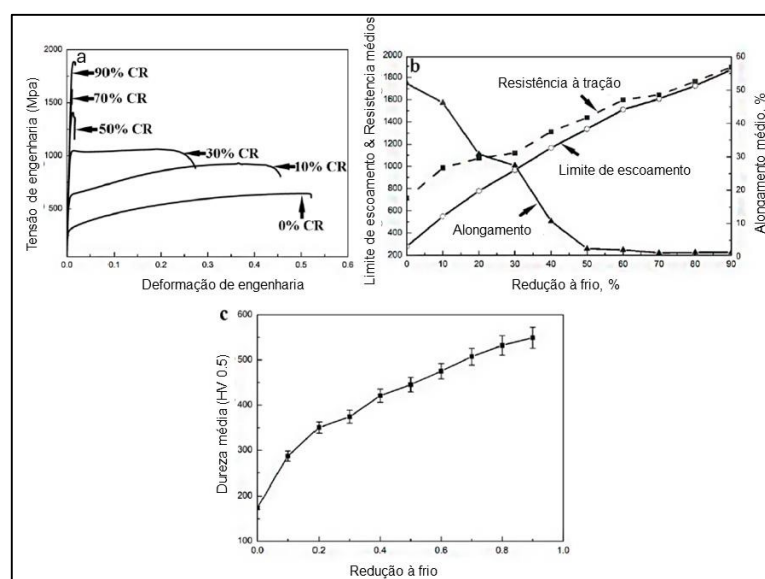
Figura 2 - Micrografias ópticas de microestruturas para (a) original; (b) 10% CR; (c) 30% CR; (d) 50% CR do aço AISI 316LN.



Fonte: Adaptado de Xu *et. al.* (2018).

Segundo Xu *et. al.* (2018), para AIA, quanto maior for a redução de espessura na laminação à frio, há um aumento nos valores de dureza, limite de escoamento, limite de resistência e da tensão de engenharia. Entretanto, na Figura 3 pode-se observar que à medida que a redução à frio aumenta, há uma diminuição do alongamento percentual do material.

Figura 3 - (a) Comportamento da tensão de engenharia em relação à deformação, 10%, 30%, 50%, 70% e 90%; (b) variação do limite de escoamento/resistência médios e alongamento, e (c) dureza Vickers em função da redução à de laminação à frio.



Fonte: Xu *et. al.* (2018).

Em processos de conformação mecânica dos aços austeníticos metaestáveis o efeito TRIP é o principal fator que permite a conformabilidade do material, porém a maioria dos trabalhos realizados sobre as propriedades destes aços buscam uma forma adequada de estabilizar a austenita. Alguns elementos como níquel (Ni) e cobre (Cu), contribuem para a redução da taxa de endurecimento dos aços inoxidáveis austeníticos. Segundo Gonzalez (2003) a substituição parcial do Ni pelo Cu, traz diferenças significativas nas características de transformação da austenita em martensita o que reduz a taxa de formação da martensita em relação ao aumento de deformação.

Às vezes, a conformabilidade torna-se um requisito tão importante quanto a resistência à corrosão. Peças conformadas por estiramento, como pias, são um exemplo do uso de classes de aços austeníticos metaestáveis, enquanto as classes altamente estáveis são usadas para peças estampadas profundamente ou para componentes onde se busca baixa permeabilidade magnética (MCGUIRE, 2001).

2.2 Conformabilidade

2.2.1 Definição

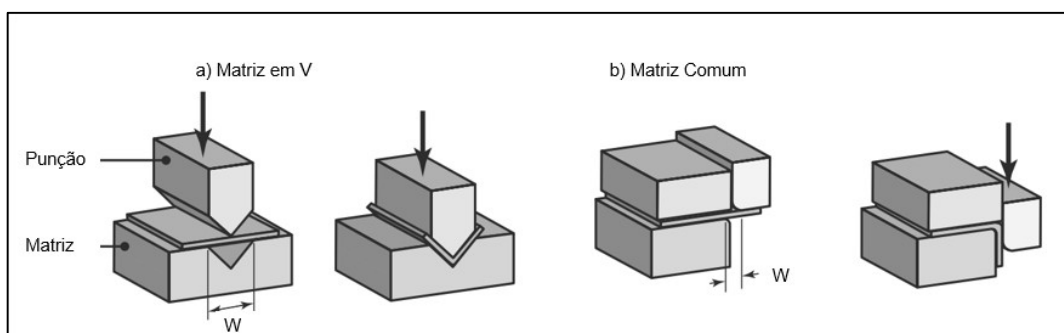
A conformação de chapas metálicas (CCM) é um processo que se baseia em deformar plasticamente um material até um formato desejado, utilizando ferramentas e equipamentos específicos. Existem diversos tipos de processos de CCM, desde os mais simples como o dobramento até os mais complexos como estapagem profunda e estampagem incremental (LUIZ, 2022).

Uma das principais características de um processo CCM é a conformabilidade, que consiste no grau de deformação que um material pode ser exigido sem criar um defeito indesejado. O material deverá ser capaz de redistribuir a deformação de maneira uniforme de modo que possa atingir deformações elevadas sem se romper ou fraturar (LUIZ, 2022).

2.2.2 Processos de conformação mecânica

Existem diversos processos CCM, sendo o dobramento de chapas o mais simples. Conforme Figura 4, este processo consiste em posicionar um lado da chapa sobre uma matriz plana e, posteriormente, aplicar uma força por meio de um punção em superfície, deformando-a plasticamente. É importante ressaltar que mesmo em um processo simples como este, as propriedades mecânicas do material são de suma importância. Por exemplo, se a ductilidade da chapa for muito baixa, trincas ou rupturas podem se formar na superfície da chapa. (KALPAKJIAN E SCHMID, 2014).

Figura 4 - Dobra de linha reta de chapa.



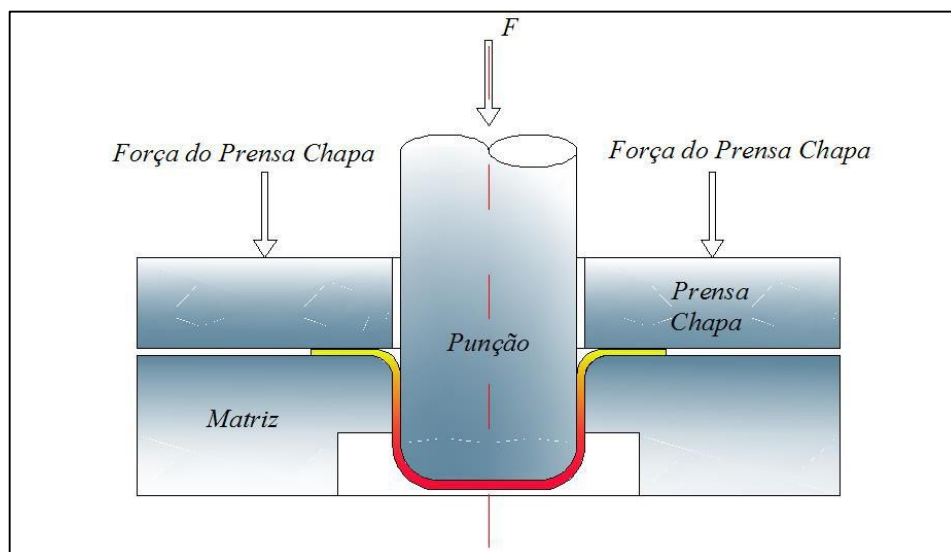
Fonte: Adaptado Kalpakjian e Schmid (2014).

2.2.3 Estampagem profunda

Dentre os diversos processos CCM, o embutimento ou estampagem profunda, é utilizado para modelar chapas planas em peças ocas, é um processo muito comum para fabricação de copos, pias, tanques de cozinha, dentre outras diversas aplicações.

Como ilustrado na Figura 5, a chapa metálica é fixada por um prensa-chapa que exerce uma força contra a matriz, assim, quando o punção atua sobre ela, a chapa desliza entre as duas superfícies, o que gera um atrito elevado. Alguns fatores como forma de lubrificação, tipo de lubrificante, espessura inadequada, a força de compressão exercida pelo prensa-chapa e raio inadequado da matriz favorecem o aparecimento de defeitos na superfície do material (MARCINIAK *et. al.*, 2002).

Figura 5 - Desenho esquemático da estampagem profunda.



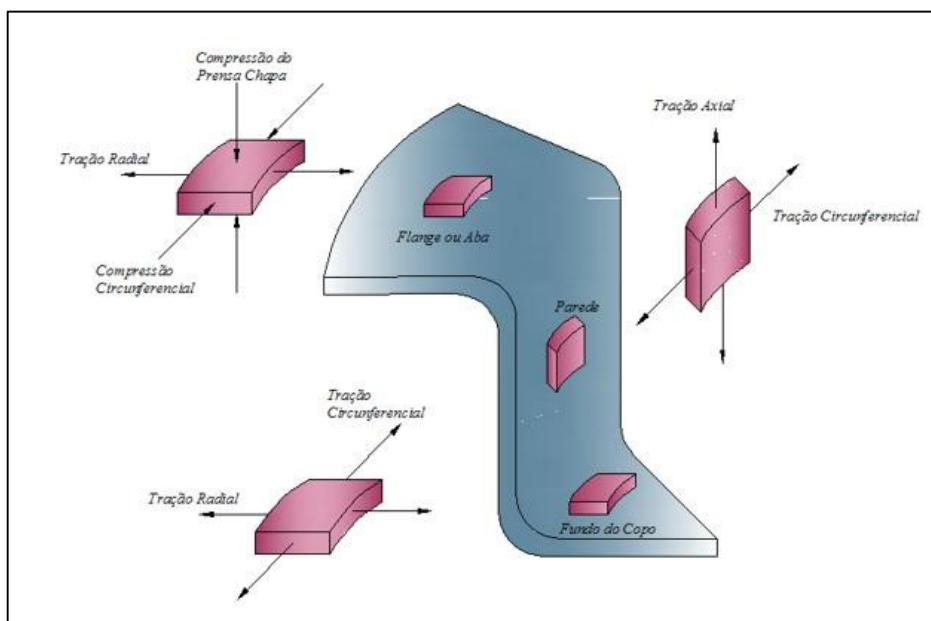
Fonte: Magalhães (2005).

Segundo Marciniak (2002), durante o processo de estampagem, as forças de tração da chapa serão resistidas pela tensão de compressão exercidas pelo prensa-chapa sobre a matriz, o que permite a deformação ao longo do processo. Assim, a deformação é gerada pelas forças transmitidas ao longo da chapa, e não pelo contato direto do punção no material.

2.2.4 Forças e tensões atuantes durante a estampagem

Conforme ilustrado na Figura 6, durante o processo de estampagem profunda, diferentes áreas da peça estampada estão sujeitas a diferentes estados de tensão. Observa-se que a chapa é submetida a vários esforços, com intensidade e direções distintas. Conhecer como estas tensões e forças impactam na conformabilidade do material, é primordial para garantir a produtividade e qualidade do processo.

Figura 6 - Esforços atuantes nas diversas regiões do copo.



Fonte: Magalhães (2005).

Magalhães (2005) explica que, quando um elemento específico estiver posicionado na aba ou flange, ele experimentará uma tensão radial causada pelo punção, que pressiona a chapa para dentro da cavidade da matriz. Essa tensão é acompanhada por uma força compressiva exercida pelo prensa-chapa e uma tensão compressiva circunferencial induzida. Quando o elemento estiver na parte cilíndrica do copo, estará sujeito a uma tensão axial de tração devido à força no fundo do copo e à ação do prensa-chapa na aba do copo, responsável pelo estiramento da parede do copo. Além disso, haverá uma tensão de tração circunferencial devido à restrição do material pelo punção. Para o elemento no fundo do copo, as únicas forças aplicadas serão as trativas, relacionadas à força do punção sobre a chapa.

Segundo Schaeffer (2004), existem limites pré-determinados entre a dimensão do blank (D) e o diâmetro do punção (d) para estampagem de um corpo. Essa relação é conhecida como estampabilidade, razão limite de estampagem ou *LDR* (*Limit Drawing Ratio*), que pode ser calculada através da Equação 1.

$$LDR = \frac{D}{d}$$

(1)

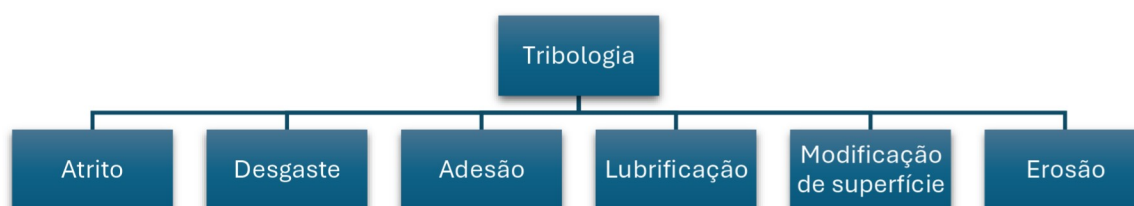
O LDR fornece uma indicação, embora grosseira, da severidade de uma dada operação de estampagem. Quanto maior esta relação, mais severa pode ser a operação. Kalpakjian e Schmid (2014) recomendam $LDR \leq 2,0$ para que se tenha uma estampagem segura. Schaeffer (2004) considera uma razão de limite de estampagem admissível (LDR_{adm}), que pode ser calculada pela Equação 2.

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

2.3 Aspectos tribológicos na conformação de chapas

O deslocamento de uma superfície sólida em relação a outra desempenha um papel crucial no desempenho de uma variedade de mecanismos. A tribologia é caracterizada como "o campo científico e tecnológico dedicado à interação de superfícies em movimento relativo e temas correlatos" (HUTCHINGS E SHIPWAY, 2017). Conforme ilustrado na Figura 7, a tribologia é subdividida em vários campos de estudo como: atrito, desgaste, adesão, lubrificação, superfície e erosão.

Figura 7 – Áreas de estudo da tribologia.



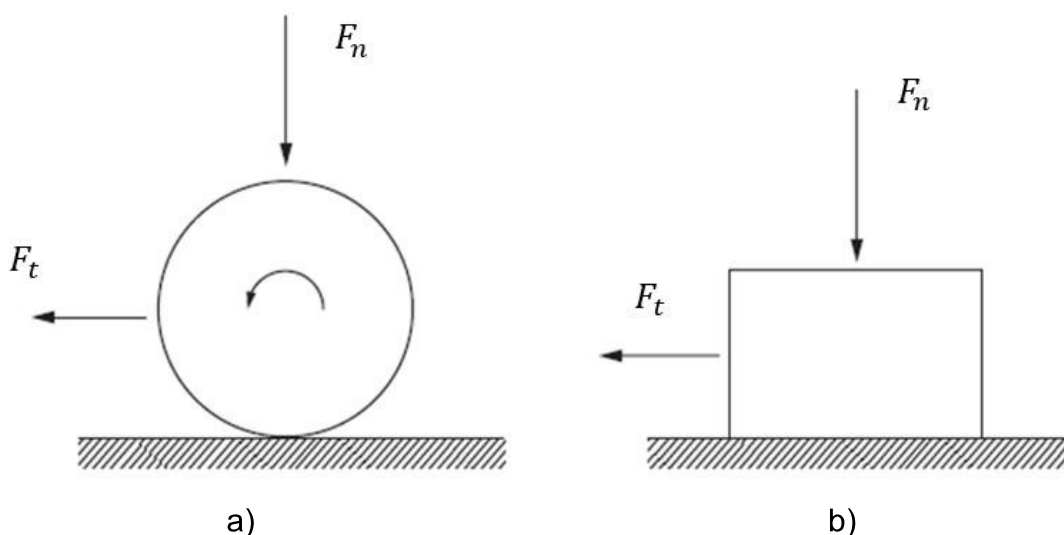
Fonte: Adaptado de Katiyar *et al.* (2020).

Segundo Katiyar *et al.* (2020), o atrito gerado na interface pelo movimento relativo de dois corpos eventualmente resulta em desgaste em um ou ambos os corpos. No entanto, a aplicação de lubrificantes pode atenuar o atrito e o desgaste entre esses corpos. No ambiente, substâncias como o ar e a água atuam como lubrificantes, reduzindo o atrito e aumentando a resistência ao desgaste. As próximas seções abordam atrito, desgaste e lubrificação de forma mais detalhada.

2.3.1 Coeficiente de atrito

A força de atrito pode ser definida como a resistência que um corpo encontra ao se mover em relação a outro. Essa definição ampla engloba duas categorias essenciais de movimento: rolamento (Figura 8a) e deslizamento (Figura 8b). Embora a distinção entre atrito de deslizamento e de rolamento seja útil, esses dois tipos não são completamente independentes, e mesmos casos aparentemente simples, geralmente envolvem algum grau de deslizamento (HUTCHINGS E SHIPWAY, 2017).

Figura 8 - Aplicação de uma força F_n necessária para superar o atrito e causar movimento, (a) rolando ou (b) deslizando.



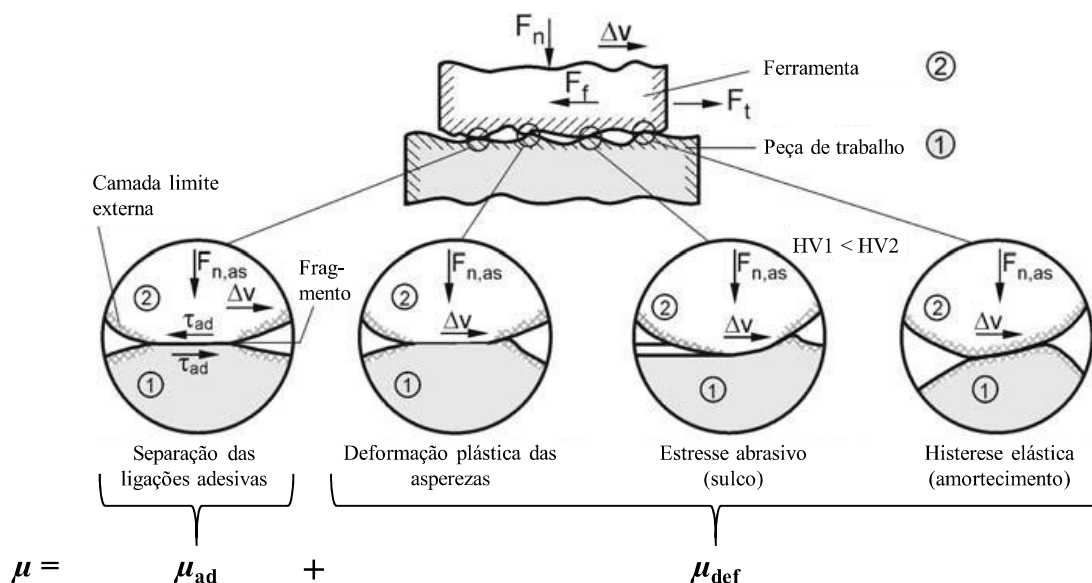
Fonte: Adaptado de Hutchings e Shipway (2017).

A relação entre a força de atrito ou tangencial (F_t) e a força normal (F_n) é conhecida como coeficiente de atrito, sendo geralmente escrito pelo símbolo μ , conforme Equação 3.

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (3)$$

Luiz (2022) ressalta que de forma geral, nos processos CCM, o coeficiente de atrito (μ) é definido por dois mecanismos de atrito, que são: adesão (μ_{ad}) e deformação (μ_{def}), como mostrado na Figura 9 .

Figura 9 - Mecanismos básicos de atrito em visão microscópica.



Fonte: Steinhilper e Sauer, 2008 apud Luiz, 2022.

Os termos da Figura 9 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 destacado por Trzepieciniski (2022), em condições de baixa rugosidade na chapa, o mecanismo preponderante é a adesão entre as superfícies. Por outro lado, em situações de alta rugosidade, o mecanismo de deformação é predominante no tribocontato, sendo que a intensidade desse mecanismo aumenta proporcionalmente ao aumento da rugosidade na superfície da chapa deformada e à presença de uma dureza significativamente inferior em comparação com o material da ferramenta.

2.3.2 Lubrificação

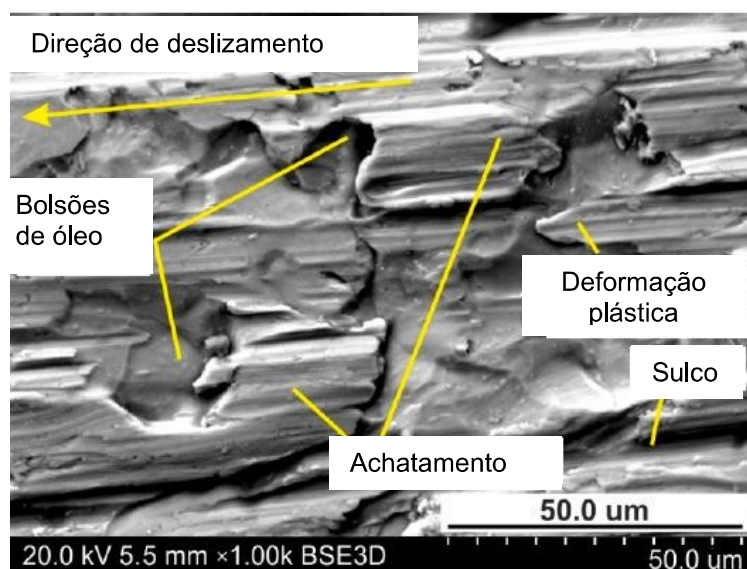
A lubrificação desempenha um papel crucial na redução do atrito e desgaste entre duas superfícies em contato e com movimento relativo. A escolha apropriada de lubrificação é determinada pela aplicação específica e pelas condições em que é empregada. Os lubrificantes têm como principais funções o controle da fricção e do desgaste, a regulação da temperatura interfacial e a prevenção da corrosão.

Adicionalmente, podem ser utilizados para a remoção de partículas indesejadas entre as superfícies, formando uma película fluida que contribui para a diminuição do atrito e desgaste.

Katiyar, Ramkumar e Rao (2020) enfatizam que diversos parâmetros são impactados pela ação do lubrificante, incluindo suas propriedades físicas, químicas e tribológicas. Além disso, a eficácia do lubrificante também depende de variáveis externas, como a temperatura da superfície, a pressão entre os contatos e a velocidade relativa. O desenvolvimento de um filme fluido na contraface é um fenômeno determinante nesse contexto. Existem vários regimes de lubrificação definidos, cada um com características específicas.

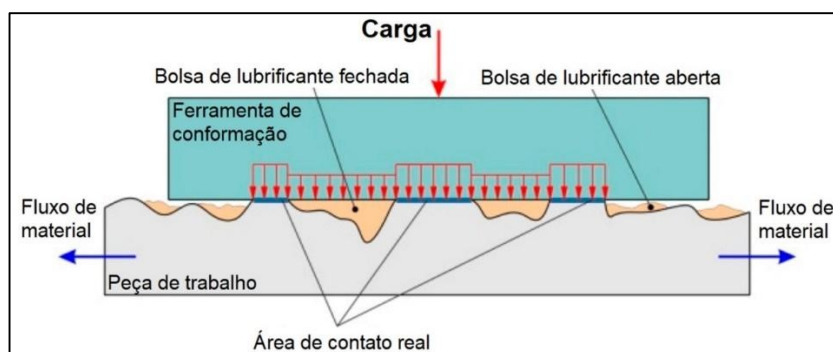
De acordo com Luiz (2022), em sistemas tribológicos lubrificados, a rugosidade e aspereza da superfície têm um papel crucial. Elas contribuem para a formação de um bolsão de óleo devido às depressões na topografia do material, funcionando como uma reserva de lubrificante na interface de contato. Esse mecanismo tem como resultado a redução do atrito.

Na Figura 10 os bolsões de óleo podem ser claramente observados. Durante o deslizamento entre superfícies, as asperezas se deformam afetando a topografia da chapa, então um pequeno volume de óleo fica retido nos vales das asperezas, formando assim estes bolsões. De acordo com Szpunar *et al.* (2021), o óleo retido na superfície da chapa cria uma espécie de amortecedor hidrostático que absorve parte da carga, gerando assim uma redução do coeficiente de atrito.

Figura 10 - Superfície da amostra.

Fonte: Adaptado de Szpunar *et al.* (2021).

Na Figura 11 pode-se observar duas formações diferentes de bolsões de óleo, fechados e abertos. Os abertos são formados na borda da chapa e não são capazes de armazenar o lubrificante, o que gera uma redução menor do coeficiente de atrito. Já os fechados são capazes de ajudar na lubrificação da superfície de contato, reduzindo assim o COF (SZPUNAR *et al.*, 2021).

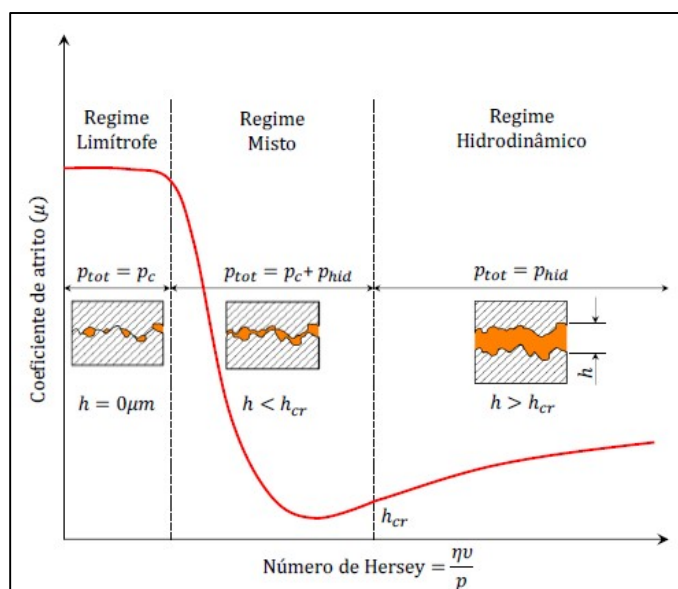
Figura 11 – Bolsões de óleo fechado e abertos.

Fonte: Adaptado de Szpunar *et al.* (2021).

Na Figura 12 é apresentada a curva de Stribeck, um conceito fundamental no campo da tribologia. Essa curva demonstra que o atrito em contatos lubrificados com fluido é uma função não linear do número de Hersey, que é a relação da carga de contato (p), da viscosidade do lubrificante (η) e da velocidade de entrada (v) do lubrificante. Portanto, qualquer alteração em um desses parâmetros implica em uma mudança no

regime de lubrificação e, conseqüentemente, no comportamento do atrito. (ALTAN e TEKKAYA, 2012; HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

Figura 12 - Curva de Stribeck mostrando os diferentes regimes de lubrificação (p_{tot} = pressão total, p_c = pressão de contato sólido, p_{hid} = pressão hidrodinâmica, h = espessura do filme lubrificante, h_{cr} = espessura crítica).



Fonte: Luiz (2022).

2.4 Ensaios tribológicos

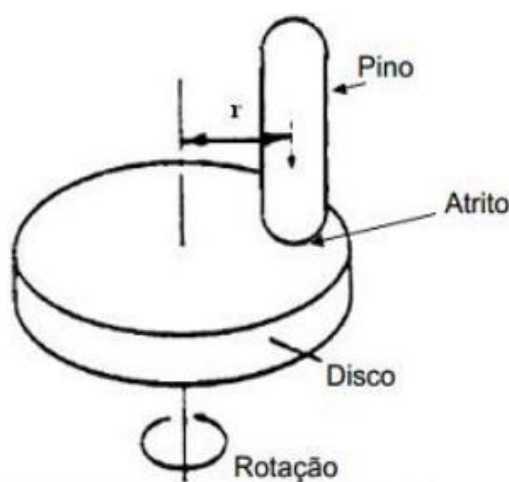
2.4.1 Ensaio Pino Sob Disco

O ensaio pino sob disco (PSD) é uma das metodologias mais aplicadas para a caracterização de fenômenos tribológicos sob condições de deslizamento contínuo. Sua popularidade deve-se à estrutura experimental simples, ao controle preciso de variáveis e à variabilidade das condições operacionais de contato mecânico, o que permite a simulação de pares tribológicos em contextos laboratoriais com grande fidelidade (VIANA, 2023; CASTRO et al., 2015).

No método PSD, um corpo de prova com geometria de pino é pressionado contra a superfície de um disco rotativo, como pode ser observado na Figura 13. A carga normal é aplicada de modo constante, seja por meio de pesos mortos, seja por acionamento pneumático e o sistema tribológico é monitorado em tempo real para

registrar parâmetros como força de atrito, temperatura e desgaste volumétrico (BRITO, 2025). Essa configuração permite avaliar o comportamento tribológico de materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos sob condições controladas, tanto a seco quanto lubrificada, como especificado pela norma ASTM G99. Segundo Brito (2025), esse tipo de ensaio possibilita não apenas a quantificação do desgaste, mas também a avaliação dos mecanismos tribológicos dominantes, como desgaste adesivo, abrasivo ou por fadiga superficial.

Figura 13 - Desenho esquemático do ensaio PSD.



Fonte: ASTM G99-04 (2004).

A partir dos dados obtidos pelo ensaio PSD, a taxa de desgaste introduzida por Archard (1953) pode ser determinada usando a equação 4.

$$K_s = \frac{\Delta V \cdot H}{F_n \cdot L_d} \quad (4)$$

Onde K_s é a constante adimensional de Archard, ΔV é a perda de volume, H é a dureza do material mais macio, F_n é a carga aplicada e L_d é a distância de deslizamento.

De acordo com a norma ASTM G99-05 (2010), a perda de massa deve ser convertida para perda de volume conforme equação 5.

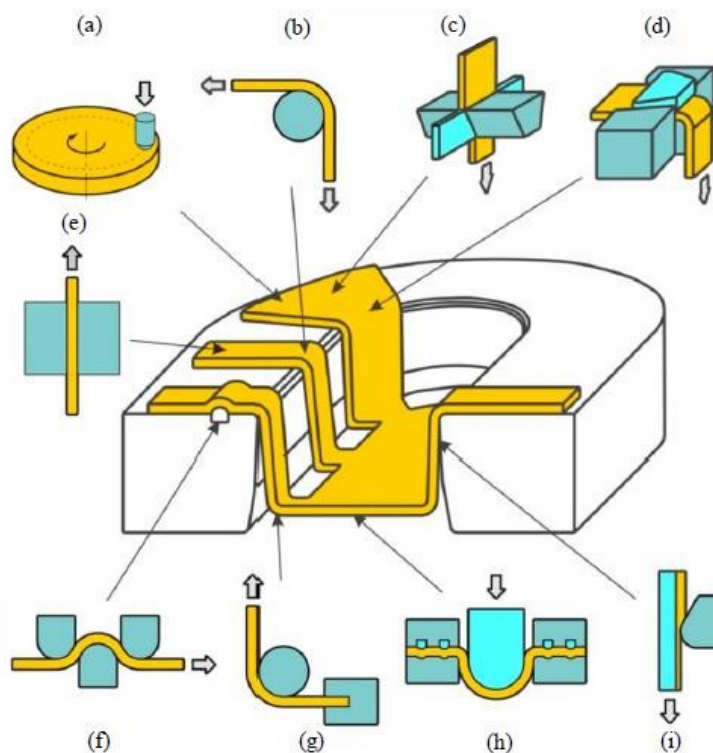
$$\Delta V = \frac{m}{\rho_a} \times 1000 \quad (5)$$

Onde ΔV é a perda de volume (em mm^3), m é a perda de massa (em g) e ρ_a é a densidade do material (em g/cm^3).

2.4.2 Ensaios de estampabilidade

Na Figura 14 são apresentados diversos modelos de ensaios tribológicos para caracterização de condições de estampabilidade. Trzepieciniski e Lemu (2020) realizaram um estudo muito completo sobre os ensaios tribológicos para processos CCM convencional e incremental.

Figura 14 – Modelos de ensaios tribológicos representando as condições de contato nas áreas específicas da peça estampada: (a) tribômetro de pino sobre disco; (b) dobramento sob tensão ou BUT; (c) estampagem com compressão tangencial; (d) dobramento com compressão tangencial; (e) ensaio de estampagem de tira plana; (f) ensaio de freio de estampagem; (g) ensaio de tração de tira ou STT; (h) estiramento hemisférico; (i) ensaio de redução de tira.



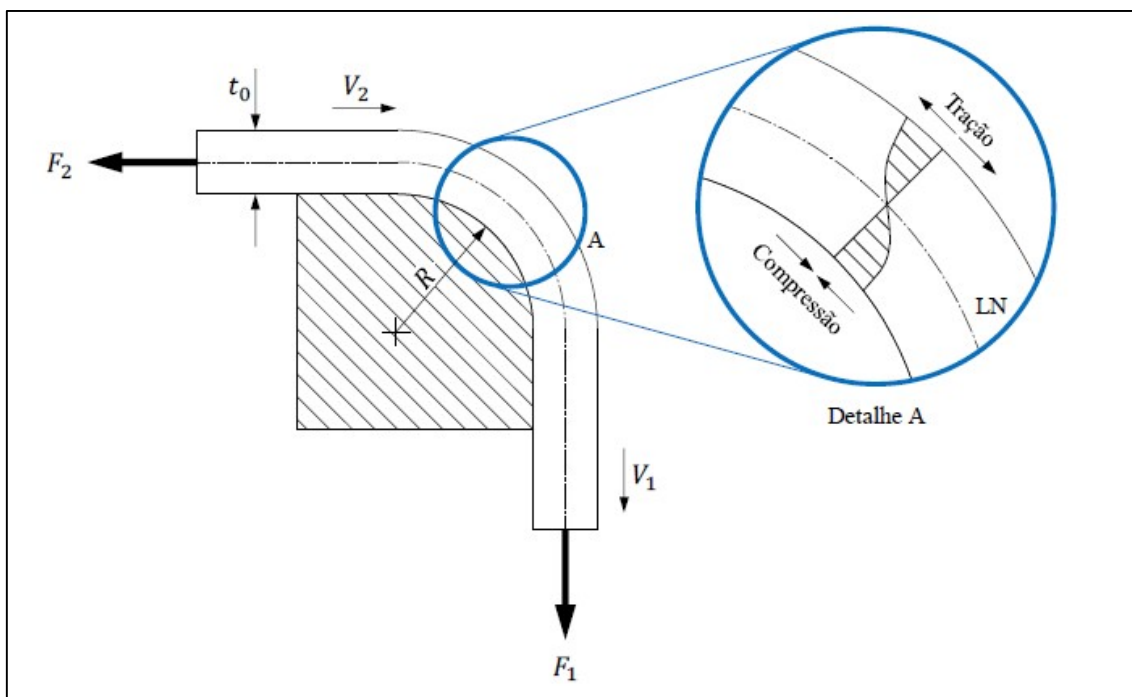
Fonte: Trzepieciniski e Lemu (2020).

2.4.2.1 Ensaio de dobramento sob tensão

O ensaio de dobramento sob tensão pode ser conhecido também como BUT (*Bending Under Tension*), que consiste em dobrar e deslizar uma chapa metálica sobre uma ferramenta circular com um raio especificado, o que simula a ferramenta de estampagem (LUIZ, 2022).

Em um processo de estampagem profunda, na região dos raios da peça ocorre uma deformação causada pela combinação de dobramento e estiramento, que é conhecido como dobramento sob tensão ou BUT. Na Figura 15 pode-se ter a compreensão exata de como esta deformação é obtida através da atuação da força F_1 em oposição à força F_2 , onde V_1 é velocidade frontal, V_2 é a velocidade traseira, T_0 é a espessura inicial e R é o raio da matriz (LUIZ, 2022).

Figura 15 - Dobramento sob tensão em conformação de tiras metálicas.



Fonte: Luiz (2022).

De início, o ensaio foi desenvolvido por Littlewood e Wallace (1964) para reproduzir o contato e a deformação plástica de uma chapa metálica em uma ferramenta cilíndrica. Contudo, nos últimos anos vários estudos e tribossimuladores foram desenvolvidos para possibilitar a caracterização dos aspectos tribológicos e físicos na CCM,

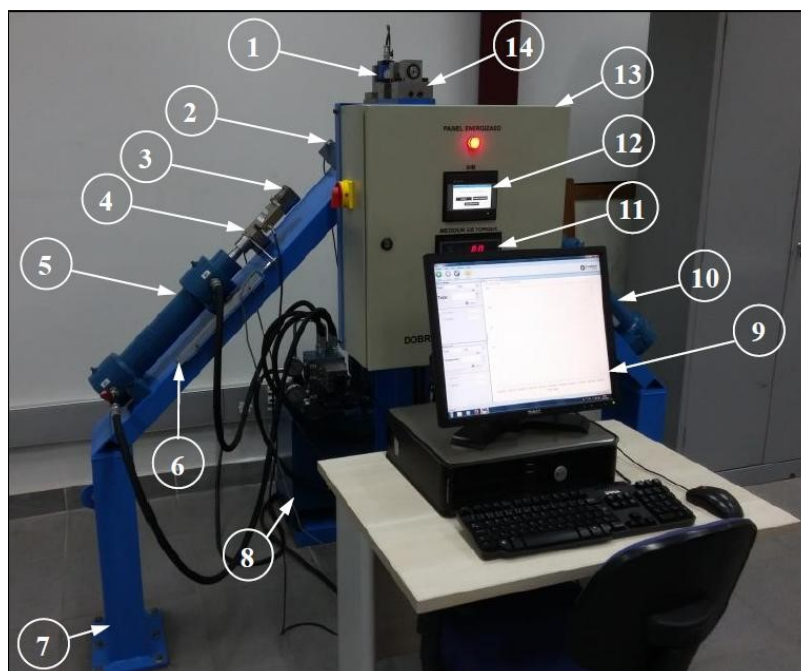
permitindo determinar o desempenho de lubrificantes, eficiência de revestimentos superficiais, identificação de parâmetros de processo e fratura de materiais metálicos (VEGA *et al.*, 2019; TRZEPICINSKI, 2020; FOLLE, 2010; WAGONER *et al.*, 2013).

Lemu e Trzepieciński (2013), trazem uma abordagem sobre o cálculo do coeficiente de atrito em relação à força frontal F_1 e a força traseira F_2 , onde o valor exato pode ser determinado conforme Equação 6:

$$\mu = \frac{2}{\pi} \ln \left(\frac{F_1}{F_2} \right) \quad (6)$$

Luiz (2022) desenvolveu um tribossimulador que tem a capacidade de realizar ensaios BUT, STT e DBF (*Draw-Bend Fracture*), para estudos do comportamento tribológico e mecânico em chapas metálicas. Na Figura 16 pode-se observar o tribossimulador contruído e instalado no Laboratório de ensaios mecânicos do CEFET-MG, campus Timóteo.

Figura 16 - Tribossimulador desenvolvido.



Fonte: Luiz (2022).

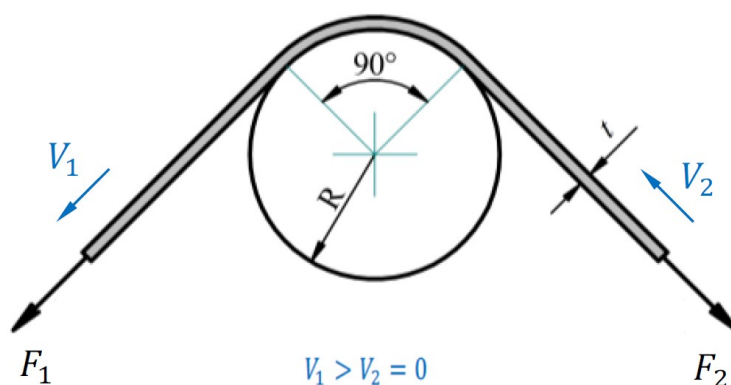
Os componentes indicados na Figura 16 são: (1) sensor de torque; (2) sensor de proximidade indutivo; (3) garra; (4) célula de carga; (5) cilindro hidráulico dianteiro; (6)

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.

2.4.2.2 Ensaio de estiramento de tira

O ensaio de estiramento de tira que também é conhecido como STT (*Strip-Tension Test*), consiste em tracionar uma tira metálica sobre uma ferramenta cilíndrica, conforme ilustrado na Figura 17. Isto faz com que a tira seja tracionada e se deforme sobre a ferramenta, reproduzindo a deformação plástica que é obtida no processo de estampagem profunda (LUIZ, 2022).

Figura 17 - Representação esquemática do ensaio STT.



Fonte: Luiz (2022).

Trzepieciniski e Lemu (2020) explica que durante a deformação da tira metálica (t) em torno do raio da ferramenta (R), uma força (F_1) é aplicada em uma extremidade com velocidade V_1 constante, enquanto a outra extremidade permanece fixa (F_2). O ângulo entre as forças atuantes deve ser igual a 90° para este ensaio.

2.4.2.3 Ensaio de estampagem de tira

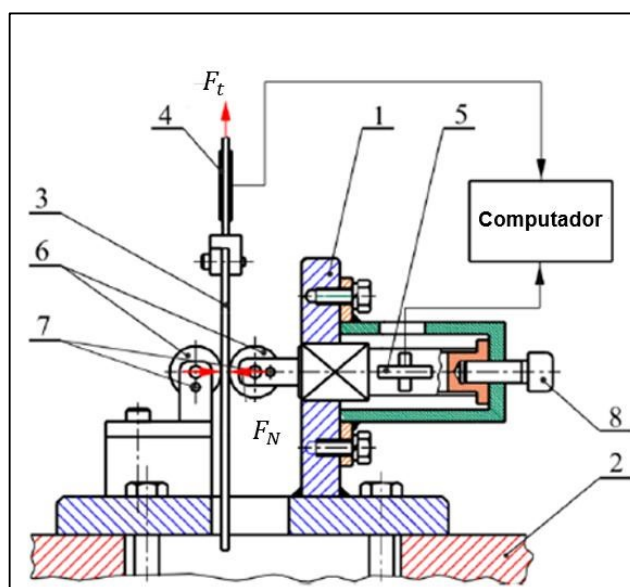
Conforme destacado por Trzepieciniski (2019), o ensaio de estampagem de tira, também conhecido como SDT (*Strip Drawing Test*) em inglês, desempenha um papel

fundamental na modelagem do fenômeno de atrito entre a superfície da matriz, o prensa chapas, a chapa metálica e a punção durante uma operação de estampagem.

No ensaio SDT, a chapa é tracionada em uma extremidade, enquanto a outra extremidade fica presa entre duas contraamostras (ŽABA, *et al.*, 2023; SLOTA *et al.*, 2024). Essas contraamostras assumem a forma de presas não rotativas, frequentemente planas ou com formato cilíndrico, representando assim a superfície da ferramenta. Elas são pressionadas contra a superfície da chapa com uma força constante, há uma determinada velocidade (TRZEPICINSKI, 2019).

Trzepieciniski (2019) projetou e construiu um tribossimulador (Figura 18) para ensaios SDT adaptado em uma máquina de tração, que permitiu simular os aspectos tribológicos da região do prensa chapas em um processo de estampagem profunda. Os parâmetros que influenciam na variação da resistência ao atrito incluem a força de aperto das contraamostras, as condições de lubrificação, a velocidade de extração da amostra, a rugosidade da superfície das contra-amostras e a temperatura.

Figura 18 - Representação esquemática do dispositivo para ensaio SDT: 1 – Estrutura; 2 – Mesa de apoio; 3 – Corpo de prova; 4 – Célula de carga vertical; 5 – Célula de carga horizontal; 6 – Contraamostras cilíndricas; 7 – Pinos de fixação; 8 – Parafuso de fixação.



Fonte: Adaptado de Trzepieciniski (2019).

De acordo com Trzepieciniski (2019), no ensaio SDT o coeficiente de atrito é calculado de acordo com a Equação 7:

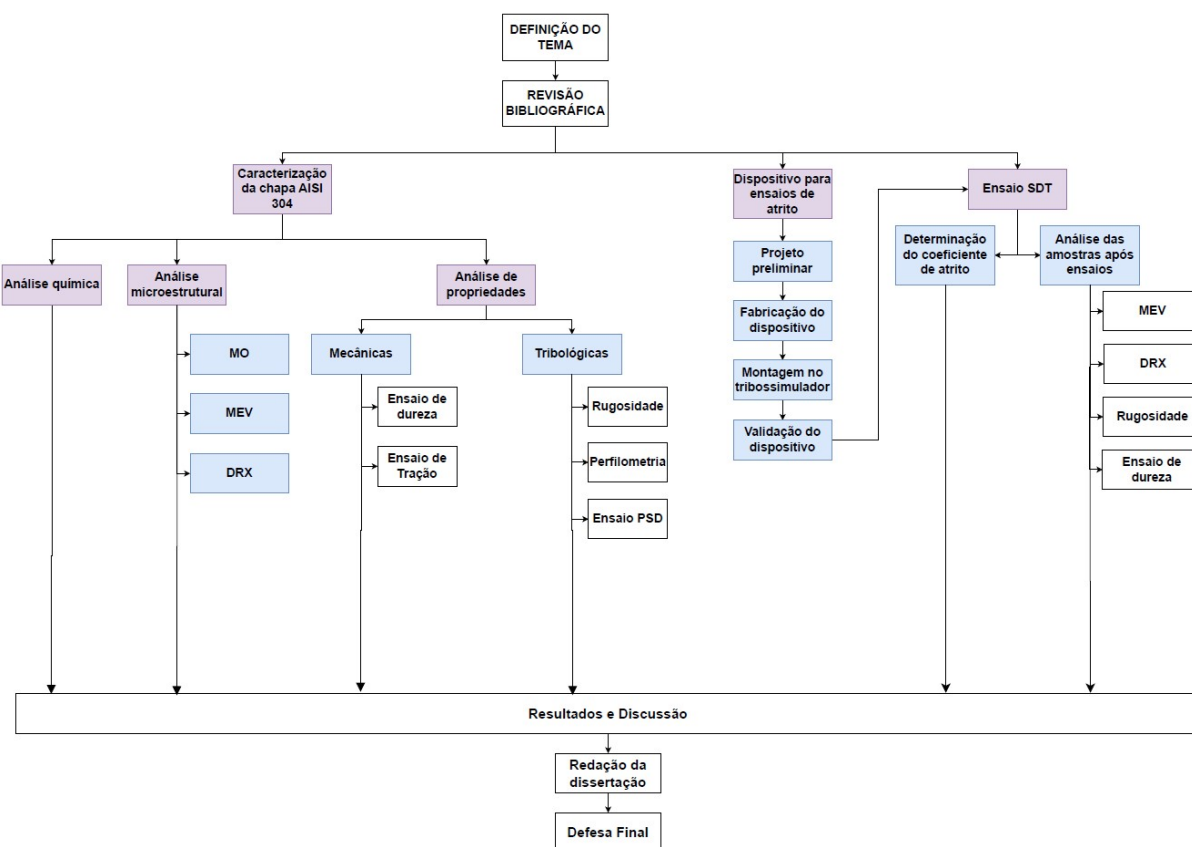
$$\mu = \frac{F_t}{2F_N} \quad (7)$$

Este ensaio tem se mostrado eficaz para a investigação do comportamento tribológico de chapas metálicas em diferentes condições operacionais, possibilitando analisar o coeficiente de atrito em função das variáveis do processo de estampagem profunda, além de permitir avaliar a influência dessas condições sobre os aspectos físicos e tribológicos da superfície da chapa.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa foi estruturada a partir das etapas de redação da dissertação, desenvolvimento e construção do dispositivo de matriz plana, caracterização da chapa de aço AISI 304, ensaio SDT e análise das características físicas e tribológicas das amostras ensaiadas, conforme ilustrado na Figura 19. Inicialmente, foi desenvolvido um dispositivo com geometria de matriz plana, projetado para ser acoplado a um tribossimulador previamente existente, com a finalidade de reproduzir o tribocontato entre a chapa metálica e a ferramenta de conformação. Em seguida, realizou-se a caracterização detalhada do material das amostras, incluindo análises químicas, metalográficas e a determinação de propriedades mecânicas e tribológicas, visando compreender o comportamento do aço sob diferentes condições de contato. Por fim, foram conduzidos ensaios SDT, complementados por análises físicas, tribológicas e microestruturais, para estabelecer correlações entre os parâmetros de processo e o desempenho tribológico observado.

Figura 19 – Desenho esquemático da metodologia utilizada no presente trabalho.



Fonte: O autor (2025).

A etapa de projeto e construção do dispositivo de matriz plana, foi desenvolvida conforme descrito abaixo:

- fabricação do dispositivo de matriz plana – TECMEN (Governador Valadares);
- usinagem e retífica das contraamostras – Oficina de usinagem do SENAI (Ipatinga);
- aquisição da célula de carga de compressão - Loadstar Sensors (Fremont, CA, EUA);
- montagem e ajuste do dispositivo no tribossimulador – Laboratórios de ensaios mecânicos do CEFET-MG *Campus* Timóteo.

A caracterização da chapa de aço AISI 304, antes e após os ensaios SDT, contou com análise química, metalográfica e de propriedades mecânicas e tribológicas. Os ensaios foram realizados nos seguintes laboratórios:

- Laboratório de Conformação Mecânica e de Tribologia do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG);
- Laboratório de Química, Metalografia e de Ensaio de Materiais do Departamento de Metalurgia e Química (DMQTM) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) *Campus* Timóteo;
- Laboratório de Caracterização do Departamento de Materiais (DEMAT) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) *Campus* Belo Horizonte;
- Laboratório de Análise Química e Metalográfica do Centro de Pesquisa da Aperam South America (Timóteo/MG);

3.1 Materiais

As amostras utilizadas nesta pesquisa foram confeccionadas a partir da chapa de aço AISI 304, com espessura de 0,8 mm, fornecidas pela empresa Aperam South America. O acabamento superficial da chapa é do Tipo 2B, significando que foi laminado à frio, recozido e decapado, seguido de passe de laminação de acabamento e endurecimento superficial com cilindros brilhantes, conforme diretrizes da norma

ASTM A480/A480M (2020). A composição química padrão desta chapa de aço é mostrada na Tabela 1 .

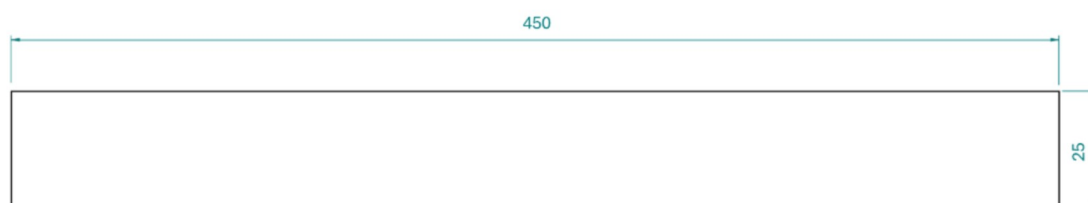
Tabela 1 - Composição química padronizada da chapa de aço AISI 304 (% em peso).

Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
AISI 304	≤0,08	≤2,0	≤0,75	≤0,045	≤0,03	18,0-20,0	8,0-10,5

Fonte: (ASTM A240/A240M, 2020).

As amostras utilizadas no ensaio SDT foram preparadas por meio de cortes realizados de acordo com o desenho esquemático apresentado na Figura 20. A distância de deslizamento adotada, entre 120 e 130 mm, foi definida com base nos estudos de Makhkamov (2017).

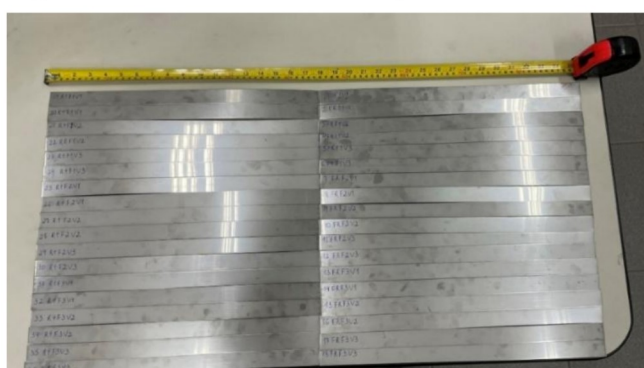
Figura 20 – Desenho esquemático do CP para ensaio SDT (unidades em mm).



Fonte: O autor (2025).

Ao todo foram confeccionadas 72 amostras para realização dos ensaios SDT, permitindo assim a variação de parâmetros como força normal, rugosidade das contraamostras e velocidade de deslizamento. Na Figura 21 é mostrada algumas das amostras que foram fabricadas para realização da presente pesquisa.

Figura 21 - Amostras fabricadas para os ensaios SDT.



Fonte: O autor (2025).

Os CPs da chapa de aço AISI 304 utilizados no ensaio PSD, foram confeccionados de acordo com a geometria mostrada esquematicamente na Figura 22.

Figura 22 - Representação esquemática da geometria dos CPs (espessura = 0,8mm) utilizados no ensaio de PSD.



Fonte: O autor (2025).

É importante destacar que foram confeccionados dois conjuntos distintos de contraamostras, com o intuito de investigar a influência da topografia da ferramenta no valor do coeficiente de atrito. A rugosidade média R_a das superfícies foi quantificada utilizando um rugosímetro portátil (Tesa SA, modelo Rugosurf 20). Os valores medidos foram: para a chapa de aço, $R_a = 0,112 \mu\text{m}$; e para as contraamostras, $R_a = 0,45 \mu\text{m}$ e $1,83 \mu\text{m}$.

O material utilizado para fabricação das contraamostras e dos pinos para o ensaio PSD foi o aço VND (DIN: 1.2510), tratado termicamente através do processo de têmpera a 800°C , resfriamento a óleo e 2 passes consecutivos de revenimento a 260°C . A dureza das contraamostras após este processo de tratamento térmico foi de $746 \pm 11 \text{ HV}$. Este material é amplamente utilizado para fabricação de ferramentas de estampagem e repuxo e pode alcançar durezas elevadas após têmpera.

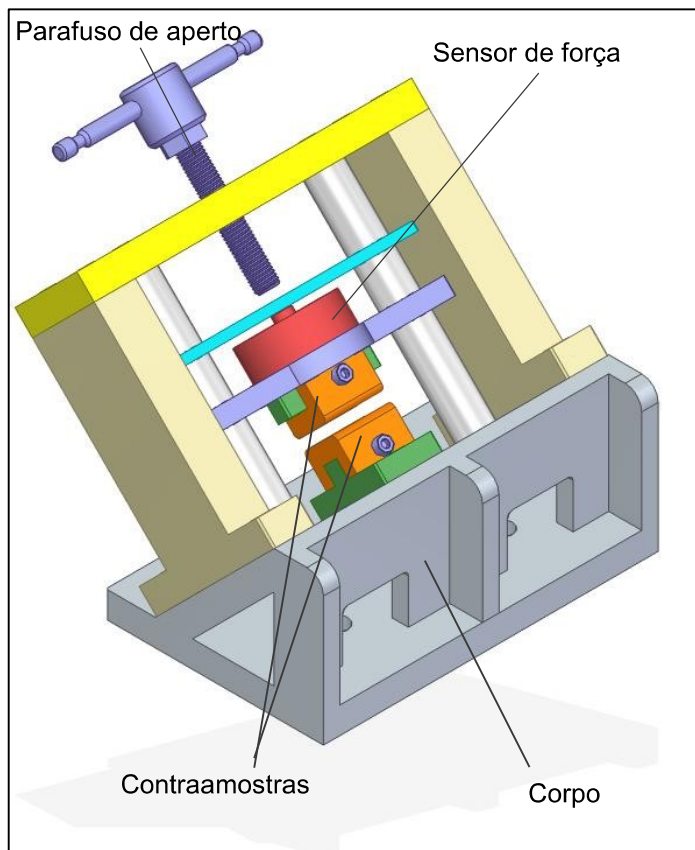
Nesta pesquisa, todos os ensaios foram conduzidos em regime lubrificado, com as superfícies de contato sendo abundantemente lubrificadas para avaliar a variação do coeficiente de atrito no ensaio SDT. O lubrificante utilizado nos ensaios foi o óleo a base mineral típico de conformação à frio (Lubrificantes GREASE, tipo USI CUT LS 120), com viscosidade cinemática de 120 mPa.s a 40°C e densidade de $0,894 \text{ g/cm}^3$.

3.2 Equipamentos

3.2.1 Projeto do dispositivo para ensaio SDT

Na Figura 23 é mostrado o desenho esquemático do dispositivo projetado para a execução dos ensaios SDT. É importante destacar que este dispositivo é composto por uma estrutura em aço carbono tratado superficialmente com oxidação preta, um parafuso de aperto que realiza a força normal sobre as contraamostras, uma célula de carga com capacidade de 2,5 kN.

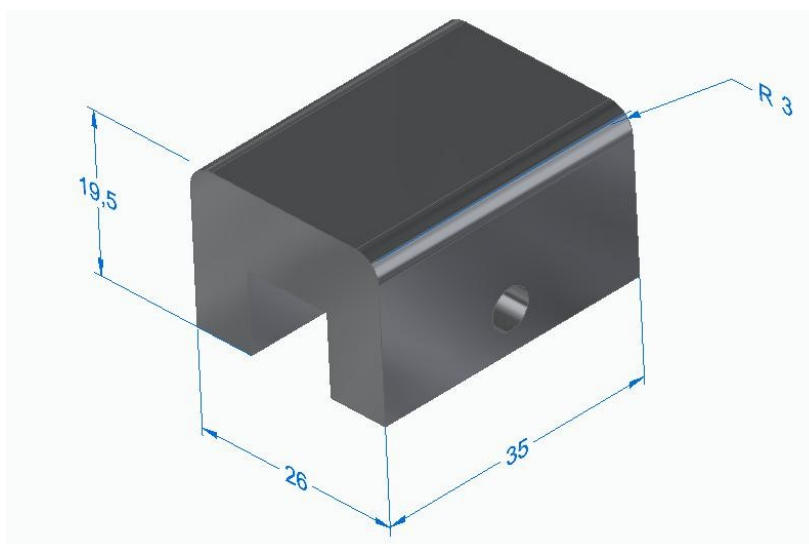
Figura 23 – Desenho esquemático do dispositivo utilizado na execução dos ensaios SDT.



Fonte: O autor (2025).

Na Figura 24 é mostrado o desenho esquemático da contraamostra utilizada nos ensaios SDT.

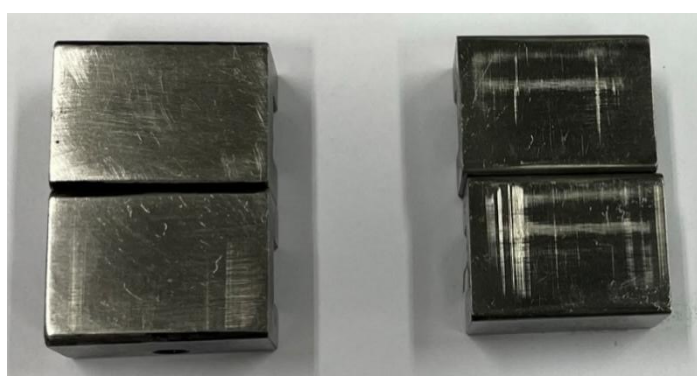
Figura 24 - Desenho esquemático das contraamostras planas.



Fonte: O autor (2025).

Na Figura 25 é apresentada uma imagem real das contraamostras planas que foram fabricadas. Destaca-se que a superfície da contraamostra mostrada na Figura 25a foi submetida a um processo de lixamento com lixas de granulação 200 e 1200 mesh, a fim de atingir uma rugosidade de $1,83\text{ }\mu\text{m}$.

Figura 25 – Imagem real das contraamostras após os ensaios SDT: (a) $R_a = 1,83\text{ }\mu\text{m}$; (b) $R_a = 0,45\text{ }\mu\text{m}$.



a)

b)

Fonte: O autor (2025).

3.2.2 Caracterização e análise das amostras

Para análise da composição química das chapas de aço no estado conforme recebido, os teores de C e S foram determinados pela técnica de absorção de infravermelho (Leco, modelo CS4440), o teor de N por termo condutividade (Leco, TC4360). Os demais elementos químicos por espectrometria de fluorescência de raios-X (ThermoARL, modelo 9900).

As propriedades mecânicas de tração das chapas de aço foram determinadas em uma máquina universal de ensaios (Emic, modelo DL30000 e com capacidade de até 300kN) do Laboratório de Ensaios Mecânicos do DMQTM (CEFET-MG).

A dureza e a rugosidade média dos materiais foram determinadas por um durômetro Vickers da marca Shimadzu, modelo HMV-2T e a rugosidade por um rugosímetro portátil (Taesa AS, modelo Rugosurf 20), respectivamente.

A morfologia da superfície das chapas foram examinadas usando um microscópio eletrônico de varredura (MEV) (Philips, modelo XL-30). Já as fases presentes nas amostras de aço AISI 304 foram identificadas em um Difrátômetro de Raios-X (DRX) (Philips, modelo PW 1710).

Além disso, também foi caracterizada a topografia da chapa antes e depois dos ensaios de atrito utilizando um perfilômetro 3D marca HOMMEL-WERKE modelo T8000, seguindo os requisitos descritos pela norma ISO 4287. Os parâmetros básicos determinados foram: rugosidade média aritmética (R_a), assimetria (R_{sk}), nitidez dos picos e vales ou curtose (R_{ku}), altura máxima do pico do perfil (R_p), profundidade máxima do vale do perfil (R_v), altura total do perfil (R_t), desvio quadrático (R_q), altura máxima do perfil (R_z) e altura média do perfil (R_c).

3.2.3 Sistema de aquisição de dados do ensaio SDT

Para coletar os dados experimentais, empregou-se um sistema de aquisição de dados (SAD) desenvolvido pela empresa Loadstar Sensors e um software chamado

SensorVUE®, conforme pode ser visto na Figura 26. Posteriormente os dados foram processados em uma planilha eletrônica para a elaboração e análise dos gráficos.

Figura 26 - Sistema de aquisição de dados (SAD) - Loadstar Sensors.



Fonte: LoadStar Sensors (2025).

3.3 Métodos

3.3.1 Caracterização microestrutural

Para realização do ensaio de MO, as amostras do aço AISI 304 foram submetidas ao polimento eletroquímico e atacada com reagente Behara (100 mL de solução estoque: 48g NH_4HF_2 , destilado água e 400 mL de HCL, 1g de KHSO_3). Com base nas diretrizes definidas pela norma ASTM E112-13 (2021), o tamanho e diâmetro médio do grão foi obtido pelo método intercepto (Hilliard/Abrams), onde foram realizadas três medições e as médias destas foram consideradas.

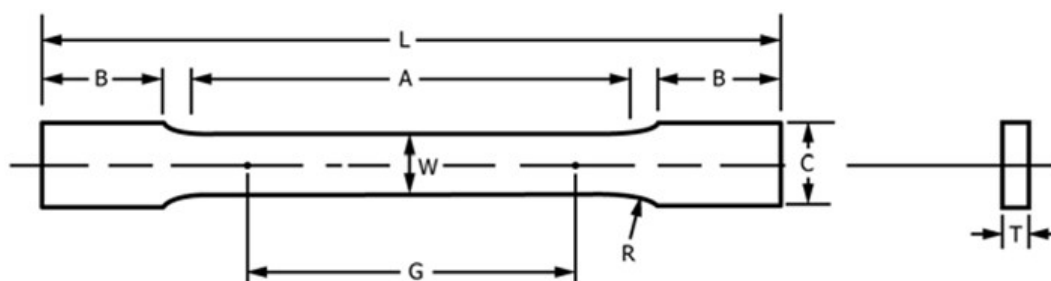
As fases microestruturais do aço AISI 304, obtidas após os ensaios SDT foram identificadas através de análises de DRX, onde utilizou-se uma fonte de radiação monocromática Cu- $\text{K}\alpha$, com tensão de 50 kV e uma corrente de 35 mA. As medidas varreram a superfície do aço na faixa entre 30° - 120° (2θ) e com passo de $0,02^\circ/\text{s}$.

3.3.2 Caracterização mecânica

A dureza superficial das chapas de aço foi medida através de um durômetro Vickers utilizando uma carga de 4,9 N e tempo de permanência de 15 s, onde os valores finais foram obtidos pela média de dez medições de endentações.

As propriedades mecânicas da chapa de aço foram medidas através de ensaio de tração uniaxial, realizados em uma máquina de teste universal, com uma taxa de deformação de $17 \times 10^{-4} s^{-1}$ e sob condições de temperatura ambiente de 25°C. As amostras de teste foram preparadas em conformidade com a norma ASTM E8/E8M-16^a, sendo extraídas em três orientações distintas (0°, 45° e 90°) em relação a direção de laminação. A fim de garantir maior confiabilidade aos resultados experimentais, foram testadas amostras em triplicata. Na Figura 27 e Tabela 2 são mostrados o desenho e as cotas dos corpos de prova, respectivamente.

Figura 27 - Desenho esquemático do CP usado no ensaio de tração uniaxial.



Fonte: Adaptado de ASTM E8/E8M, 2021.

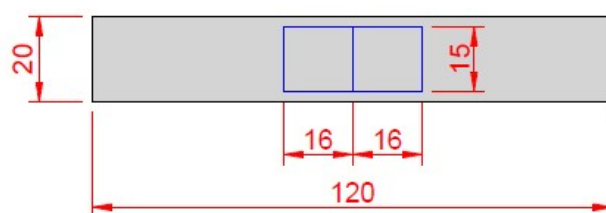
Tabela 2 - Dimensões das cotas do CP usado no ensaio de tração uniaxial.

Cota	G	W	T	R	L	A	B	C
Dimensão (mm)	50±0,1	12,5±0,2	0,8	12,5	200	57	50	20

Fonte: ASTM E8/E8M, 2021.

Os coeficientes de anisotropia plástica normal (r), coeficiente de anisotropia médio (r_b) e índice de anisotropia planar (Δr), foram determinados a partir dos CPs com a geometria mostrada esquematicamente na Figura 28. Na sequência, foi traçada uma grade retangular com o auxílio de um riscador com ponta de diamante, para medições das linhas tanto no sentido da largura, quanto do comprimento da amostra. Esta grade retangular foi medida antes e depois da deformação com o auxílio do *software* Image-Pro Plus (versão 6.0) e os ensaios de tração foram realizados a uma taxa de deformação de $17 \times 10^{-4} s^{-1}$ (velocidade do cabeçote de 5 mm/min, comprimento útil do CP de 50 mm e alongamento máximo de 12%).

Figura 28 - Representação esquemática da geometria dos CPs utilizados no ensaio de tração para determinação dos coeficientes r , r_b e Δr .



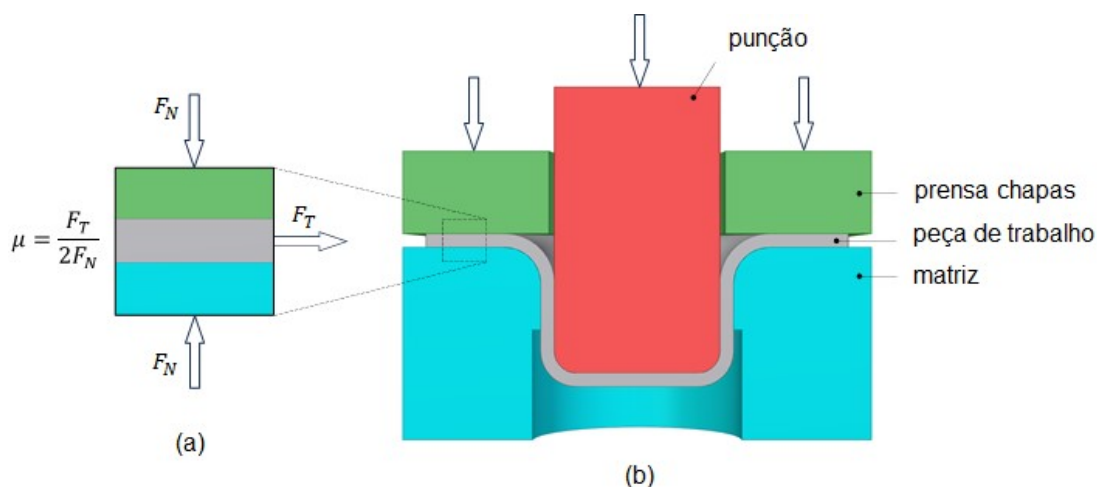
Fonte: O autor (2025).

3.3.3 Caracterização tribológica

3.3.3.1 Ensaio de estampagem de tira

Os ensaios de atrito foram conduzidos através do ensaio SDT, que reproduz a mecânica de contato na região do prensa chapa (Figura 29a) em processo de estampagem profunda (Figura 29b). Conforme discutido anteriormente este teste consiste em tracionar uma chapa metálica entre duas contraamostras planas, permitindo avaliar os efeitos da variação de parâmetros como força normal, rugosidade das superfícies das contraamostras e a velocidade de deslizamento (ŽABA, *et al.*, 2023; SLOTA *et al.*, 2024).

Figura 29 - (a) desenho esquemático do contato mecânico do prensa chapas; (b) esquema do processo de estampagem profunda.



Fonte: O autor (2025).

Os parâmetros operacionais adotados para o ensaio SDT são descritos na Tabela 3.

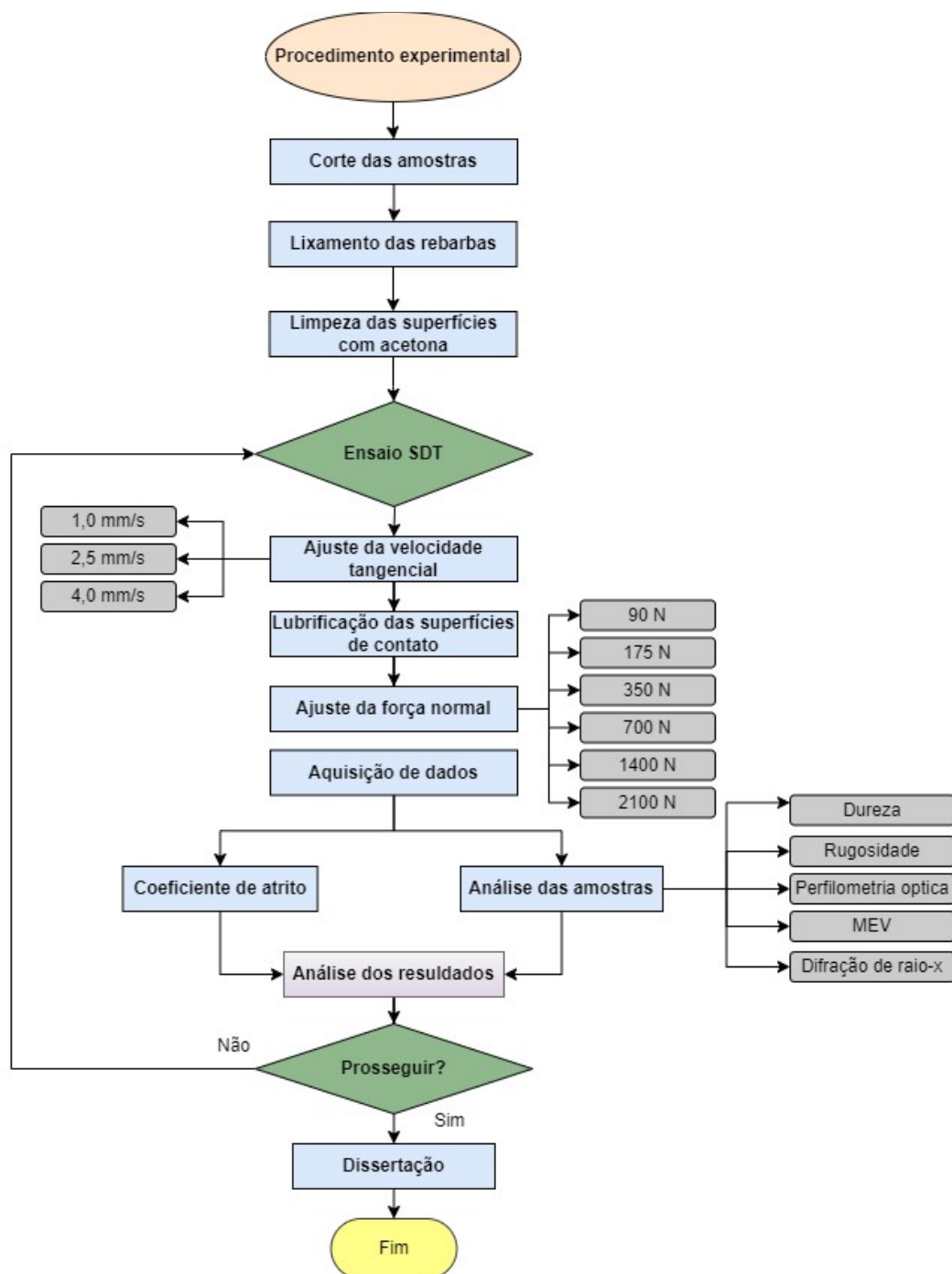
Tabela 3 – Parâmetros operacionais do ensaio SDT.

Parâmetros Operacionais	Especificação
Tipo de ensaio	SDT
Material da amostra	AISI 304
Direção de ensaio da amostra	0° (direção de laminação)
Dimensões da amostra	0,8x25x450 mm
Rugosidade das contraamostras	Ra = 1,83 µm; Ra = 0,45 µm
Força Normal	90, 175, 350, 700, 1400 e 2100 N
Velocidade de deslizamento	1,0; 2,5 e 4 mm/s
Condição de contato	Lubrificado
Equação de atrito	$\mu = \frac{F_t}{2F_N}$

Fonte: O autor (2025).

O procedimento experimental adotado para o ensaio SDT são detalhados na Figura 30. Vale ressaltar, que para conferir a confiabilidade das medições foram realizados dois ensaios para cada parâmetro, onde a média obtida destes valores foi considerada como o resultado. As rebarbas de corte nas amostras foram eliminadas utilizando uma lixa número 600 e as superfícies do sistema tribológico (chapas metálicas e contraamostras) foram limpas com acetona antes do ensaio. A lubrificação das chapas durante o ensaio foi feita em regime de lubrificação abundante, utilizando um óleo típico para operações de conformação a frio.

Figura 30 - Fluxograma do procedimento experimental.



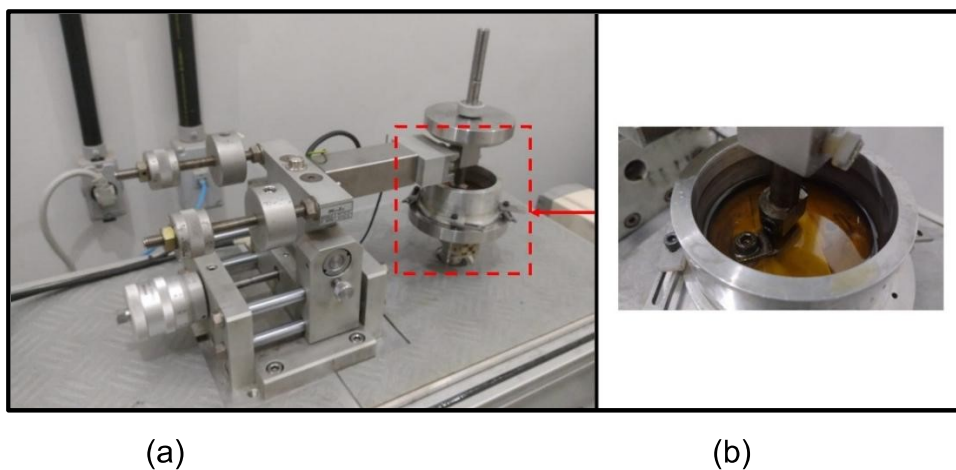
Fonte: O autor (2025).

3.3.3.2 Ensaio de pino sobre disco

Os ensaios PSD foram realizados em um tribômetro (Figura 31a) de acordo com as diretrizes estabelecidas pela norma ASTM G99-05 (2010). Conforme ilustrado na Figura 31b, um recipiente contendo lubrificante foi empregado para a realização dos

ensaios sob condições lubrificadas. Para a aquisição de dados utilizou-se o software NANOVEA (versão 1.5), com filtros para reduzir os ruídos durante a elaboração das curvas de coeficiente de atrito. O valor final dos resultados corresponde à média de três medições.

Figura 31 – (a) Tribômetro de Pino Sob Disco (PSD); (b) amostra emergida ao óleo lubrificante.



Fonte: O autor (2025).

Os parâmetros operacionais usados para execução dos ensaios PSD são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetro operacionais usados no ensaio PSD.

Nomenclatura	Parâmetros Operacionais	Especificação
F_n	Força normal	30 N
D_p	Diâmetro do pino	6,0 mm
V_t	Velocidade tangencial	0,2 m/s e 0,6 m/s
ω	Velocidade de rotação	100 rpm e 300 rpm
R_{td}	Raio da trilha de desgaste	10 mm
L_d	Distância de deslizamento	120 m

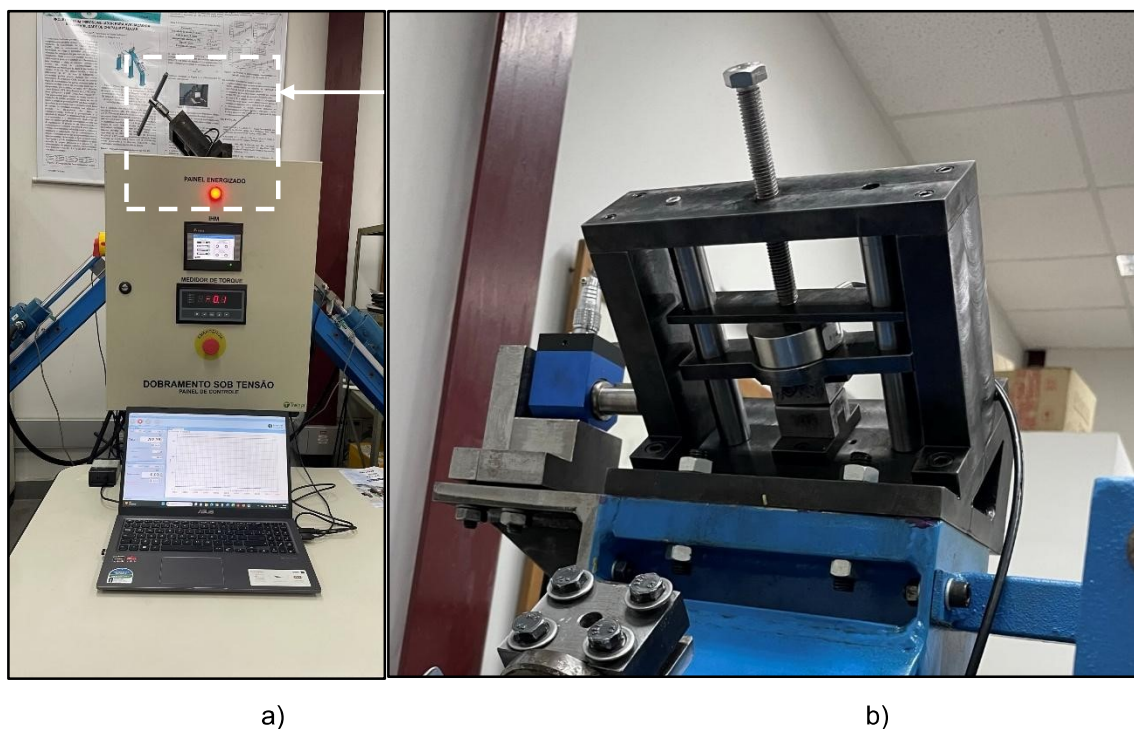
Fonte: O autor (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fabricação do dispositivo para ensaio SDT

Na Figura 32 é mostrado o dispositivo fabricado. Após a instalação do dispositivo de matriz plana no tribossimulador de chapas metálicas, foram realizados diversos testes que demonstraram o funcionamento satisfatório do equipamento, assegurando a repetibilidade dos ensaios. O desvio padrão obtido foi de $0,02 \mu\text{m}$.

Figura 32 – Tribossimulador de chapas metálicas (a), dispositivo de matriz plana montado no tribossimulador (b).



Fonte: O autor (2025).

Na Figura 33 é possível observar o dispositivo de matriz plana montado no tribossimulador de chapas metálicas. Foram aproveitados o sistema hidráulico, os sensores e o software adquirido para captação dos dados.

Figura 33 - Tribossimulador utilizado: (1) dispositivo de matriz plana; (2) painel de controle; (3) interface homem-máquina; (4) sensor de torque; (5) computador com software de aplicação; (6) cilindro hidráulico; (7) sensor de posição LVDT.



Fonte: O autor (2025).

Além de excelente repetibilidade dos resultados, a seguir são apresentadas as vantagens significativas em relação a outros dispositivos para ensaios SDT existentes:

- realização de ensaios SDT em chapas planas de materiais diversos;
- ampla capacidade de variação da força de aperto e velocidade de deslizamento da tira;
- possibilidade de testar outras geometrias de contraamostras, como as de formato cilíndrico e esférico;

Portanto, pode-se inferir que o dispositivo projetado para a realização dos ensaios SDT apresentou desempenho compatível com os requisitos de precisão e repetibilidade, além de demonstrar viabilidade técnica e econômica.

4.2 Caracterização química

A composição química da chapa de aço AISI 304 no estado como recebido é apresentada na **Tabela 5**.

Tabela 5 - Composição química da chapa de aço AISI 304 (% em peso).

Elemento químico	% em peso
C	0,0218
Mn	1,0579
Si	0,2689
P	0,0397
S	0,001
Cr	18,2293
Ni	8,122
Mo	0,0831
Al	0,0033
Cu	1,5371
Co	0,1823
V	0,0429
Nb	0,0042
Pb	0,0011
B	0,0005
Ti	0,0032
Sn	0,0027
W	0,0205
N	0,0206

Fonte: O autor (2025).

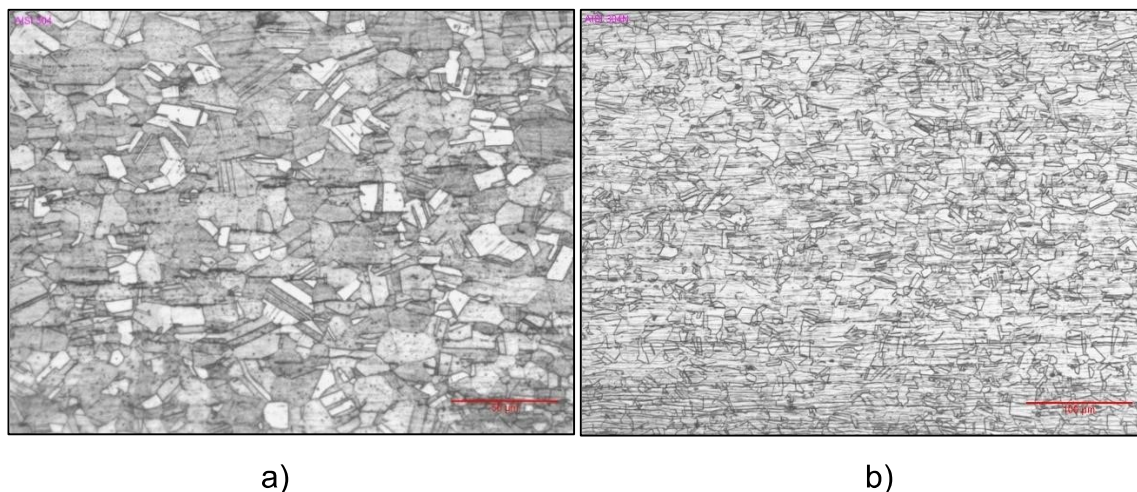
Analisando comparativamente a Tabela 1 e 5, nota-se que a composição química da chapa de aço AISI 304 apresentou resultado compatível com as faixas recomendadas pela norma padrão.

O aço AISI 304 se caracteriza principalmente pelo alto teor de Cr e Ni, onde a presença do Cr é responsável pela sua ótima resistência a oxidação e corrosão atmosférica, que em contato com o oxigênio forma uma camada passiva de óxidos de cromo (Cr_2O_3), o protegendo da oxidação. Já o Mo é adicionado para aumentar a resistência à corrosão por pites e o Ni é responsável pela sua estrutura austenítica (Lo, K.H. *et al.*, 2009). O N atua como elemento intersticial na matriz austenítica, elevando a resistência ao escoamento por meio do fortalecimento por solução sólida e da intensificação das tensões internas geradas na rede cristalina (YUAN et al. 2008).

4.3 Caracterização microestrutural

Na Figura 34 é mostrada a micrografia da chapa de aço inoxidável AISI 304 na forma como recebida. É uma microestrutura tipicamente austenítica (CFC), apresentando tamanho de grão ASTM N° 8 e diâmetro médio $21,5 \pm 3 \mu m$. A microestrutura apresenta-se homogênea, com grãos de morfologia poligonal e sem a presença de inclusões não metálicas.

Figura 34 - Microestrutura da chapa de aço AISI 304: (a) 50 μm e (b) 100 μm .



Fonte: O autor (2025).

Não foram observadas fases secundárias como ferrita delta, precipitados de carbonetos ou compostos intermetálicos no contorno de grão, o que indica que o material apresenta boa estabilidade microestrutural.

4.4 Caracterização mecânica

As propriedades mecânicas da chapa de aço AISI 304 obtidas pelo ensaio de tração uniaxial são mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas da chapa de aço AISI 304.

Direção de laminação	S_y (MPa)	S_u (MPa)	e_u (%)	e_t (%)	n	r	r_b	Δr
0°	276,8	605,2	64,2	70,7	0,433	0,876		
45°	276,6	590,0	63,9	71,3	0,422	1,272	1,076	-0,393
90°	281,2	603,8	63,7	71,2	0,434	0,882		

Fonte: O autor (2025).

Os dados obtidos pelo ensaio de tração foram, S_y : limite de escoamento, S_u : limite de resistência, e_u : alongamento uniforme, e_t : alongamento total, n : coeficiente de encruamento, r : coeficiente de anisotropia normal, r_b : coeficiente de anisotropia normal média, Δr : coeficiente de anisotropia planar.

A resistência à deformação depende diretamente do valor de r_b , quanto maior a anisotropia normal média, maior é a resistência à deformação na espessura durante a operação de estampagem. Por outro lado, o menor valor de Δr proporciona menores índices de orelhamento na chapa durante a estampagem (DAVIES *et al.*, 1974; ALEKSANDROVIĆ *et al.*, 2009). Em comparação com outros aços austeníticos, o aço AISI 304 possui melhor estirabilidade do que o aço AISI 430, em contrapartida, possui uma embutibilidade menor (LUIZ, 2022).

Nos aços austeníticos, especialmente em alguns tipos de aços inoxidáveis metastáveis (como os tipos AISI 301 e 304), a austenita (fase γ , estrutura CFC) pode se transformar em martensita (fase α' -estrutura CCC ou fase ε -estrutura HC) durante a deformação plástica a frio. Esse fenômeno é chamado de efeito TRIP (Transformation-Induced Plasticity ou plasticidade induzida por transformação) e refere-se à capacidade do material de sofrer transformações de fase induzidas

mecanicamente, contribuindo para uma combinação notável de resistência mecânica e ductilidade (LUIZ e RODRIGUES, 2022; ROCHA, 2006; GONZALEZ, 2003).

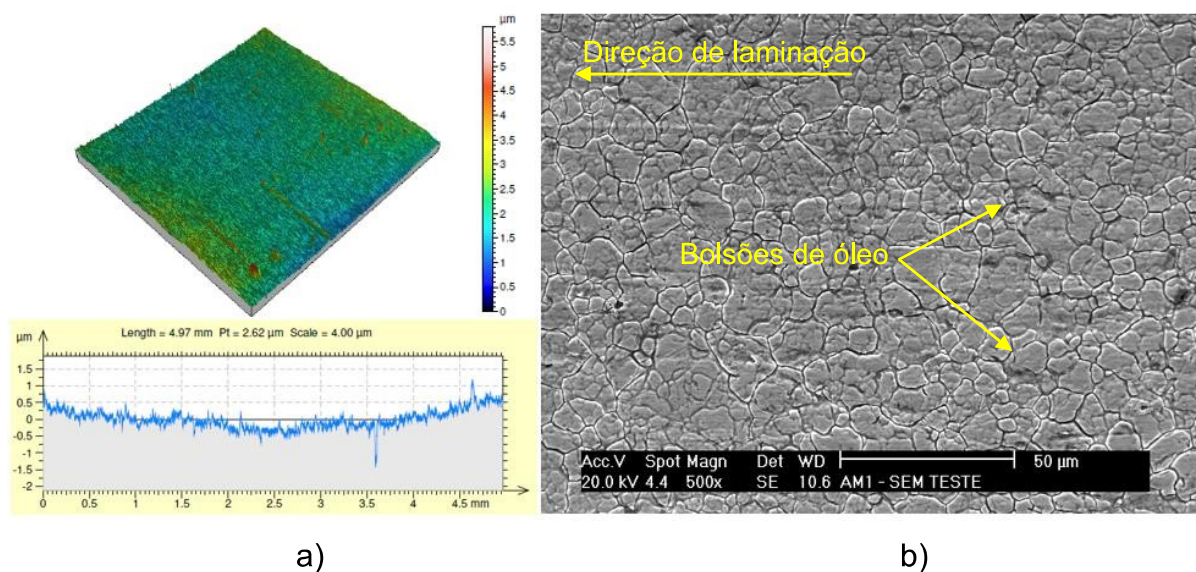
Ressalta-se que a diferença entre a martensita α' (alfa linha) e a martensita ϵ (épsilon) está principalmente na estrutura cristalina, mecanismos de formação, e condições de transformação. A martensita α' é dura e frágil, resultando de uma transformação martensítica direta da austenita (γ - CFC) sob deformação plástica intensa, geralmente em temperaturas mais baixas. Por outro lado, martensita ϵ apresenta dureza moderada em comparação à anterior e surge como uma fase intermediária durante a deformação da austenita, especialmente em estágios iniciais ou em condições de deformação moderada (OKAYASU e TOMIDA, 2016; SHEN *et al.*, 2012).

4.5 Caracterização tribológica

4.5.1 Caracterização das superfícies dos materiais

A Figura 35 apresenta a textura de rugosidade (a) e a morfologia da chapa AISI 304 (b) na condição inicial, respectivamente.

Figura 35 - Imagens da superfície da chapa de aço AISI 304 como recebida: (a) perfilometria 3D e perfil de rugosidade; (b) Imagem MEV.



Fonte: O autor (2025).

Na Figura 35 é possível observar regiões de depressões na superfície da chapa, que podem aprisionar um pequeno volume de óleo e servirem como reservatório de lubrificante durante o tribocontato entre as superfícies, estas depressões são conhecidas como bolsões de óleo (SZPUNAR *et al.* 2021, TRZEPIECIŃSKI, 2019, TRZEPIECIŃSKI e LEMU, 2020).

Na Tabela 7 são mostrados os valores de rugosidade dos CP's e pinos utilizados no ensaio.

Tabela 7 - Parâmetros de rugosidade nos materiais utilizados no ensaio.

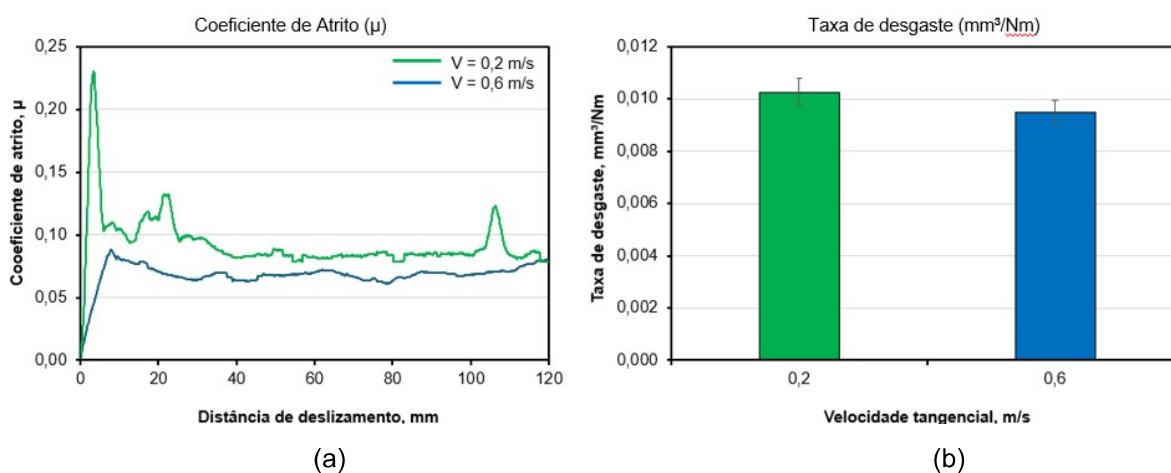
Material	Parâmetros de rugosidade (μm)			
	R_a	R_q	R_t	R_z
AISI 304	$0,12 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,04$	$1,156 \pm 0,3$	$1,15 \pm 0,3$
DIN: 1,2510	$0,55 \pm 0,05$	$0,38 \pm 0,12$	$2,80 \pm 0,80$	$5,92 \pm 1,5$

Fonte: O autor (2025).

4.5.2 Ensaio pino sob disco

Na Figura 36a e Figura 36b são apresentados os valores obtidos para o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste, respectivamente. Estes resultados indicam uma correlação direta entre a variação da velocidade e o desempenho tribológico da chapa de aço testada.

Figura 36 - Resultados de coeficiente de atrito (a) e taxa de desgaste (b) do ensaio PSD.



Fonte: O autor (2025).

O aumento do coeficiente de atrito, observados no início do deslizamento é uma fase transitória conhecida como *running-in* ou “amaciamento”. Essa fase é caracterizada por um aumento inicial no atrito, seguido por uma diminuição à medida que as superfícies se desgastam e se tornam mais uniformes, estabilizando o comportamento tribológico até atingir um estado estacionário. Neste período, há deformações plásticas dos picos de rugosidade que contribuem para suavização das asperezas e aumento da área de contato real (DOHDA e WANG, 1998; KHONSARI *et al.*, 2021).

Os resultados indicam que o coeficiente de atrito registrado para a velocidade de 0,2 m/s foi superior (aprox. 10 %) ao observado para 0,6 m/s. Em velocidades maiores, há uma tendência de transição do regime de lubrificação de limite para misto ou até mesmo hidrodinâmico. Isso resulta na formação de um filme lubrificante mais efetivo, reduzindo o contato direto entre as asperezas das superfícies e, conseqüentemente, o atrito e o desgaste (MAHKAMOV, 2021; KHONSARI *et al.*, 2021).

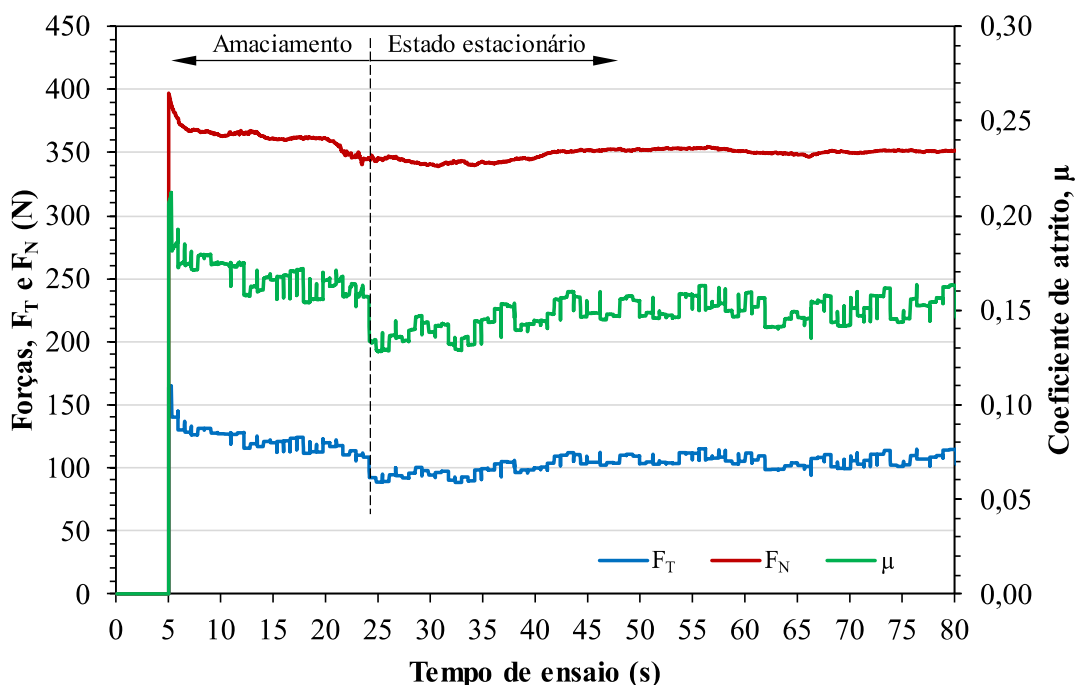
De acordo com Koowattanasuchat *et al.* (2015), há um valor ótimo de velocidade de deslizamento, no qual o coeficiente de atrito é mínimo devido ao regime de lubrificação mais eficiente. Em determinadas condições, o aumento da velocidade também pode gerar uma zona de deslizamento mais estável, reduzindo as flutuações de força tangencial e promovendo uma menor interação adesiva entre as superfícies em contato. Este comportamento pode ser atribuído à predominância de mecanismos de deformação plástica das asperezas (TRZEPIECIŃSKI, 2019).

Adicionalmente, de acordo com a Figura 36b, pode-se observar que a taxa de desgaste também é maior na velocidade de 0,2 m/s. Isto pode ser atribuído à formação incompleta do filme lubrificante e predominância do regime de lubrificação limite, no qual ocorre o contato metal-metal. Esta condição favorece a adesão entre as superfícies, intensificando o desgaste, principalmente por mecanismos adesivos e transferência de material (KOOWATTANASUCHAT, 2016).

4.6 Ensaio SDT

Como exemplo dos ensaios conduzidos sob diferentes condições, na Figura 37 são apresentados os gráficos que mostram a evolução da força normal (F_N) e da força tangencial (F_t) durante a execução dos ensaios SDT. O intervalo de 0 a 5 segundos corresponde ao tempo necessário para o início efetivo do teste. Neste caso específico, foram aplicados os seguintes parâmetros: carga normal de 350 N, velocidade de deslizamento da tira de 1,0 mm/s e rugosidade das superfícies das contraamostras de $R_a = 0,45 \mu\text{m}$. O aumento observado no valor das forças pode ser atribuído ao fenômeno de encruamento do material. Assim como observado nos resultados do ensaio PSD (Figura 36a) dois regimes distintos podem ser observados nos resultados apresentado, a fase do estado de “amaciamento” (*running-in*) e a fase estado “estacionário” (*steady-state*).

Figura 37 - Curvas características do aço AISI 304 submetido ao ensaio SDT: forças aplicadas (F_T e F_N) e coeficiente de atrito (μ). Parâmetros de processo: força normal = 350 N, velocidade de deslizamento = 1,0 mm/s e rugosidade da ferramenta = 0,45 μm .



Fonte: O autor (2025).

Conforme salientado, a fase *running-in* refere-se à um momento inicial onde o contato entre as superfícies em movimento relativo apresenta um aumento rápido e queda

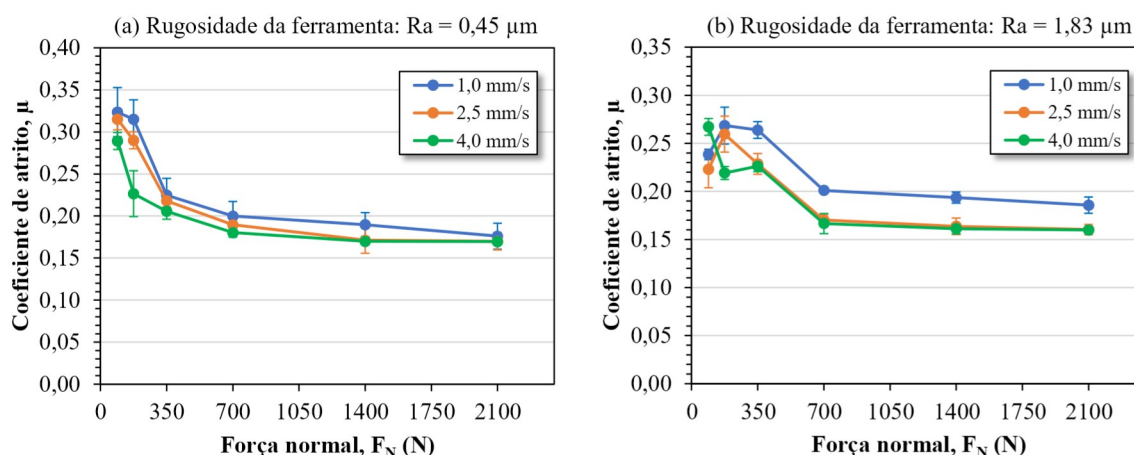
repentina do coeficiente de atrito. Esse fenômeno é resultante de adaptações mútuas entre as superfícies como: remoção das asperezas, formação de uma camada tribológica estável e possíveis alterações na rugosidade, o que influencia diretamente nos valores de atrito e desgaste (BARROS *et al.*, 2025; KHONSARI *et al.*, 2021; KRAGELSKY E KOMBALOV, 1969). Após esta fase, o sistema tribológico alcança um estado mais estável, com menor variação no coeficiente de atrito e desgaste previsível, caracterizando o estado estacionário (BLAU, 2005). É nesse regime que o valor médio do coeficiente de atrito foi determinado.

Mesmo na região estável da curva, é perceptível um comportamento aleatório dos valores de coeficiente de atrito, este fenômeno é conhecido como “*stick-slip*”. Em sistemas tribológicos, este comportamento dinâmico é caracterizado por uma alternância de “aderência” (*stick*) e “deslizamento” (*slip*) nos pontos de conexão das asperezas em contato (BLAU, 2008; HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017).

4.6.1 Análise do coeficiente de atrito

Nas Figura 38a e 38b podemos observar o efeito da aplicação da força normal sobre os valores do coeficiente de atrito da chapa de aço AISI 304 deslizando sobre as contraamostras planas. É perceptível uma tendência clara da redução do valor do coeficiente de atrito à medida que a força normal aumenta. Este comportamento do atrito pode estar relacionado com o fato de que, ao se ultrapassar um determinado valor de carga, a relação entre a força de atrito e a força normal deixa de ser linear, isto é, o coeficiente de atrito varia com a carga normal aplicada (KIRKHORN, 2012; ZABA, 2023).

Figura 38 - Efeito da força normal com o valor do coeficiente de atrito da chapa de aço AISI 304 submetida ao ensaio SDT: rugosidade da ferramenta igual a (a) $0,45\mu\text{m}$ e (b) $1,83\mu\text{m}$.



Fonte: O autor (2025).

Para a ferramenta com rugosidade $R_a = 0,45\mu\text{m}$ (Figura 38a), os valores médios do coeficiente de atrito variaram entre $\mu \approx 0,170$ e $0,323$. Comparados aos resultados obtidos com contraamostras com $R_a = 1,83\mu\text{m}$ (Figura 38b), estes apresentaram valores menores, entre $\mu \approx 0,160$ e $0,268$. De modo geral esses resultados indicam uma redução no coeficiente de atrito de 6% a 21% durante os ensaios realizados com ferramentas de maior rugosidade. Este comportamento pode ser atribuído ao mecanismo de deformação plástica das asperezas e à presença de bolsões de óleo na superfície da chapa (TRZEPIECIŃSKI e LEMU, 2020).

Nos processos de CCM, dois mecanismos de atrito são predominantes: a adesão e a deformação plástica das asperezas (TRZEPIECIŃSKI e FEJKIEL, 2017). Para forças de aperto menores, os picos mais altos das asperezas entram em contato, produzindo assim atrito adesivo, que ocorre através de ligações microscópicas - metálicas ou de Van Der Waals – entre as irregularidades da superfície de contato (ABDELBARY E CHANG, 2023; BLAU, 2008). Quanto maior a adesão entre as superfícies em contato, maior será a força de cisalhamento necessária para romper essa ligação, resultando em um aumento da resistência ao atrito (BHUSHAN, 2013; RABINOWICZ, 1995).

Este comportamento justifica os valores mais elevados de coeficiente de atrito observados na Figura 38, especialmente sob condições de menor carga normal. Após o início do deslizamento, o atrito abrasivo é predominante no sistema tribológico,

causando o mecanismo de aração, que ocorre quando as asperezas da ferramenta deslizam sobre a superfície da chapa, que é mais macia, promovendo corte ou deslocamento lateral do material (LUIZ, 2021). Isto resulta na formação de sulcos, detritos e intensa deformação plástica na superfície afetada. Vale ressaltar que esses dois mecanismos de atrito (adesão e abrasão) são os responsáveis pelo fenômeno *stick-slip* mencionado anteriormente.

A partir do aumento da força normal, as asperezas da chapa macia sofrem deformação mais intensa, resultando em um progressivo achatamento dessas irregularidades, alterando significativamente sua topografia superficial. Isso faz com que a área de contato real entre a ferramenta e a chapa metálica aumente à medida que ocorre o deslizamento. Sob condições lubrificadas, quando os vales mais profundos preenchidos com óleo são alcançados durante o processo de achatamento das asperezas, a resistência ao atrito tende a diminuir (GÅÅRD *et al.*, 2007; SHISODE *et al.*, 2021; SZEWCZYK, 2022; TABOR, 1959). Trzepiecinski e Fejkiel (2017) destacam que os vales presentes no perfil de rugosidade da superfície funcionam como reservatórios de lubrificante entre a ferramenta e a peça de trabalho, mantendo de forma contínua um mínimo volume de óleo à interface de contato. Esse efeito contribui para a redução do coeficiente de atrito em condições de forças normais mais altas.

Entretanto, se esse fenômeno se intensificar em função do aumento das cargas aplicadas, pode ocorrer uma redução no volume dos bolsões de óleo, comprometendo a eficácia da lubrificação. Nestas condições, o atrito tende a estabilizar-se em patamares aproximadamente constantes. Então, pode-se observar na Figura 38 que a partir de aproximadamente 700 N, o coeficiente de atrito efetivamente apresentou tendência à estabilização para as diferentes condições de teste investigadas.

Outro fator preponderante no coeficiente de atrito é a influência da velocidade de deslizamento. Observa-se na Figura 38, uma redução no valor do coeficiente de atrito à medida que a velocidade de deslizamento aumenta. Em altas velocidades, o movimento relativo entre a chapa e a ferramenta favorece a formação de uma película lubrificante mais contínua, o que reduz o contato direto entre as superfícies metálicas (WANG *et al.*, 2022). Isso aproxima o regime de lubrificação das condições

hidrodinâmicas ou semihidrodinâmicas, nas quais o atrito é significativamente menor (FOLLE *et al.*, 2022).

Ao comparar os resultados obtidos no ensaio de Pino Sob Disco (PSD) com os observados nos ensaios de estampagem de tira (SDT), é possível perceber comportamentos tribológicos coerentes, sobretudo no que se refere à influência da velocidade de deslizamento sobre o coeficiente de atrito. Em ambos os ensaios, velocidades mais elevadas resultaram em menores valores de atrito, sugerindo o predomínio de regimes de lubrificação mais eficientes, como o misto e o hidrodinâmico, onde há redução do contato direto entre as superfícies metálicas. Além disso, a maior taxa de desgaste observada no PSD sob baixas velocidades podem ser correlacionada com o maior índice de adesão e a predominância de regimes de lubrificação limite, similarmente observados nas condições iniciais dos ensaios SDT, especialmente durante a fase de *running-in*.

Conforme apresentado anteriormente, o atrito adesivo manifesta-se quando há tempo suficiente para que as superfícies entrem em contato direto, possibilitando a formação de ligações intermoleculares fortes. Com o aumento da velocidade, o tempo de contato entre os picos das asperezas do sistema tribológico é reduzido, o que reduz o processo de adesão, conseqüentemente, diminui o atrito. Da mesma forma, o tempo disponível para a deformação plástica localizada das asperezas também é menor, resultando em uma menor área real de contato, o que contribui para a redução do atrito adesivo. Adicionalmente, o aquecimento gerado na interface de contato é mais controlado em velocidades mais altas, evitando a degradação térmica do lubrificante e preservando sua viscosidade (BAIR, 2020; HEREDIA *et al.*, 2018; KHONSARI *et al.*, 2021).

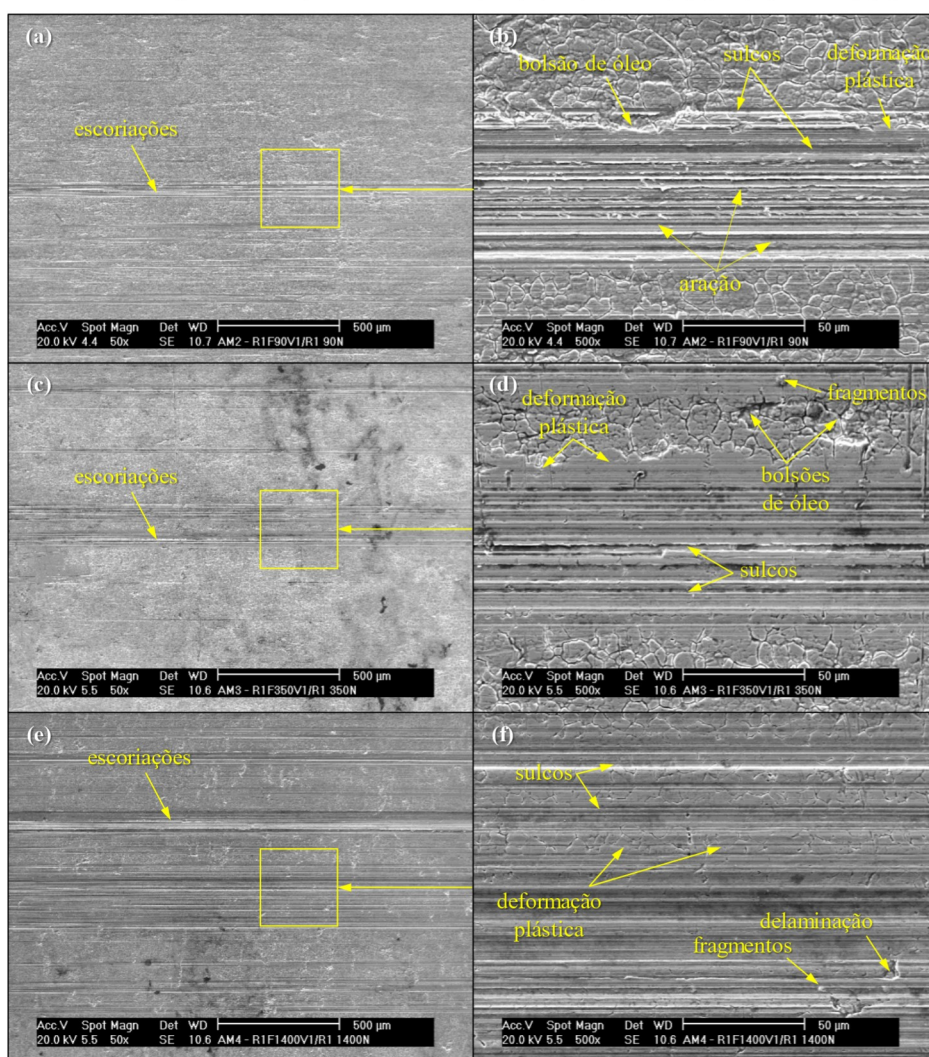
Lubrificantes com elevada viscosidade costumam ser mais eficientes na redução do atrito durante operações de conformação de chapas metálicas (SZEWCZYK *et al.*, 2022; SZPUNAR *et al.*, 2021; TRZEPIECINSKI e LEMU, 2020). Sob aplicação de carga, ocorre um aumento na pressão interna do lubrificante, formando uma espécie de almofada hidrostática, capaz de suportar parte da carga aplicada. Isso reduz o contato direto entre as superfícies e atenua o aumento da área real de contato, resultando em uma diminuição da resistência ao atrito.

4.6.2 Análise das amostras após ensaios

4.6.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na Figura 39 são mostradas as imagens obtidas por MEV das superfícies desgastadas das chapas de aço AISI 304, após a realização do ensaio SDT. É possível observar diversos microefeitos associados aos mecanismos de atrito e desgaste, como a presença de sulcos, detritos, deformações plásticas e delaminação.

Figura 39 – Imagens de MEV das chapas de aço AISI 304 depois dos ensaios SDT (1,0 mm/s e 0,45 μm) mostrando escoriações na superfície da chapa (a) e (b) 90N; (c) e (d) 350 N; (e) e (f) 1400N.



Fonte: O autor (2025).

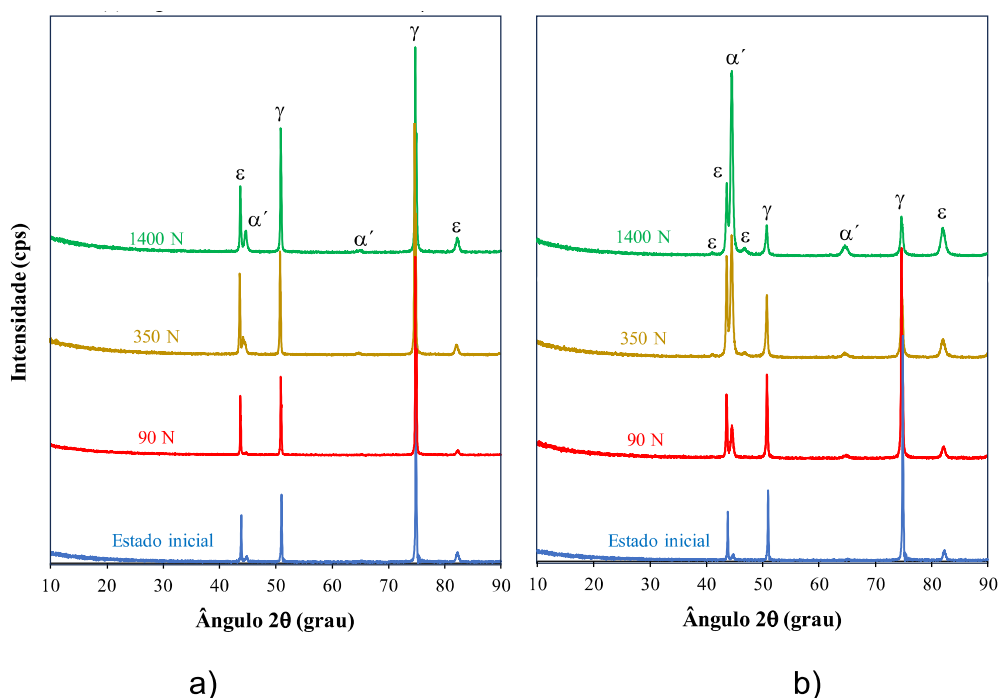
Assim como observado na Figura 39d, vales profundos são identificados na superfície da chapa metálica, que atuaram como reservatórios de lubrificante à interface de contato. Amostras que foram ensaiadas com forças normais mais baixas (Figura 39a–d), é perceptível a predominância do mecanismo de aração, associado à ação combinada do atrito adesivo e abrasivo. Já com o aumento da força normal (Figura 39e–f), o principal mecanismo foi a deformação plástica ou o achatamento das asperezas da superfície. Esse fenômeno contribuiu significativamente para a redução do atrito, pois facilitou a liberação do lubrificante armazenado nos bolsões de óleo à interface de contato.

Vale salientar que a tendência de estabilização do atrito a partir de 700 N pode também estar associada a transformações microestruturais ocorridas na superfície da chapa. Conforme discutido, quando submetido a deformação plástica severa, como em processos de conformação a frio e desgaste mecânico, o aço austenítico está sujeito ao efeito TRIP (BLECK, 2017). Parte da austenita metaestável (γ) presente na microestrutura transforma-se em martensita (ϵ ou α'), uma fase mais dura e resistente, o que pode influenciar diretamente o comportamento tribológico do material (LUIZ e RODRIGUES, 2022).

4.6.2.2 *Difração de Raio x (DRX)*

Na Figura 40 são apresentados os padrões DRX das amostras submetidas a diferentes parâmetros de teste. A análise dos difratogramas permitiu identificar a presença de três fases distintas na microestrutura da superfície do material: austenita (γ), martensita (α') e martensita (ϵ). Esses resultados comprovam a ocorrência do efeito TRIP durante o deslizamento das amostras nos ensaios SDT.

Figura 40 - Análise de DRX destacando as fases presentes na superfície da chapa de aço AISI 304 sob diferentes condições de ensaio: velocidade de 1,0 mm/s, com rugosidade igual a (a) $R_a = 0,45 \mu\text{m}$ e (b) $R_a = 1,83 \mu\text{m}$.

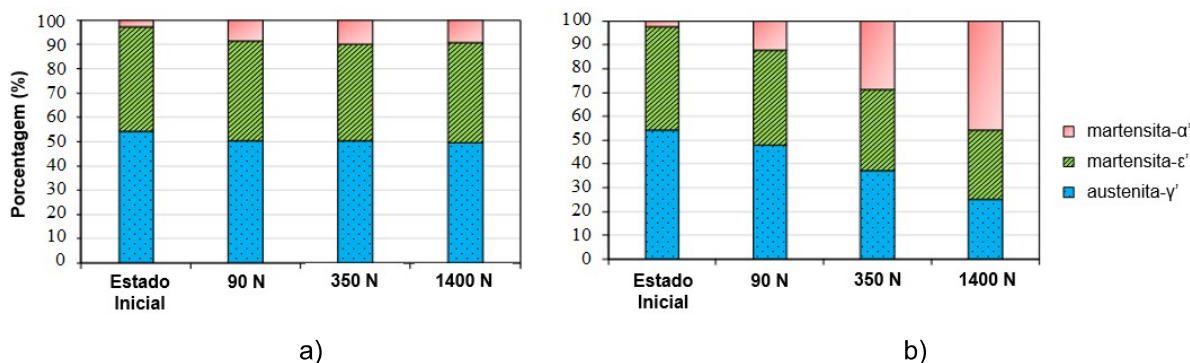


Fonte: O autor (2025).

Também foi realizado um refinamento Rietveld simplificado (filtro Savitzky-Golay) para o ajuste dos perfis dos picos observados no difratograma apresentado na Figura 40, possibilitando estimar quantitativamente as fases presentes na superfície desgastada. Vale salientar que a fração de martensita formada depende de diversos parâmetros, como a composição química do aço, energia de falha de empilhamento, temperatura, taxa de resfriamento, estado de tensão e o nível de deformação plástica imposta (LO *et al.*, 2009; PADILHA e RIOS, 2002). Entretanto, mesmo em condições de temperatura ambiente e sob baixas deformações, a transformação martensítica pode ocorrer.

Os resultados apresentados na Figura 41 corroboram com esta afirmação, pois com o aumento da força normal, e consequentemente, da deformação plástica, a transformação martensítica sequencial $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$ tendeu a se complementar. Luiz e Rodrigues (2022) encontraram resultados semelhantes ao submeter a chapa de aço AISI 304 a ensaios tribológicos de estampagem usando ferramentas cilíndricas (ensaios BUT e STT).

Figura 41 - Distribuição percentual das fases para diferentes parâmetros de ensaios: velocidade de 1,0 mm/s, com rugosidades das contraamostras (a) $R_a = 0,45 \mu\text{m}$ e (b) $1,83 \mu\text{m}$.



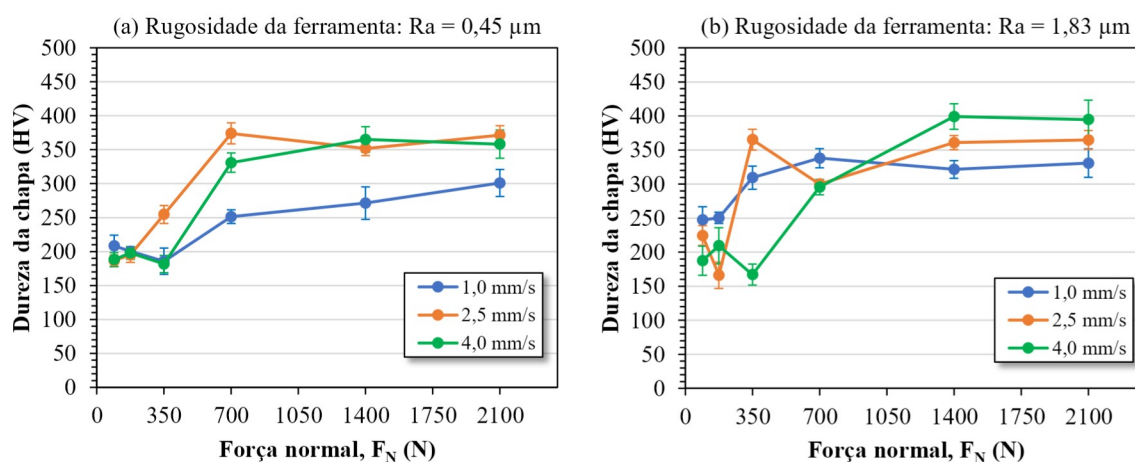
Fonte: O autor (2025).

No caso da ferramenta com rugosidade $R_a = 0,45 \mu\text{m}$, observa-se que essa transformação ocorreu de forma mais gradual, provavelmente em razão da presença do lubrificante nos bolsões de óleo, que contribuiu para absorver parte da carga aplicada e atenuar os efeitos da deformação das asperezas. Por outro lado, para a rugosidade $R_a = 1,83 \mu\text{m}$, observou-se um aumento mais expressivo da fração de martensita α' à medida que se eleva a força normal aplicada. Esse comportamento está associado à intensificação da deformação plástica na superfície da chapa, promovida por maiores pressões de contato.

4.6.2.3 Ensaio de dureza

Como ilustrado na Figura 42, observou-se um aumento da dureza superficial das chapas metálicas com o acréscimo da força normal aplicada, embora esse crescimento tenha demonstrado tendência à estabilização sob níveis mais elevados de carga. No caso da ferramenta com rugosidade $R_a = 0,45 \mu\text{m}$, os valores de dureza da chapa situaram-se entre aproximadamente 182 e 374 HV, representando um acréscimo na faixa de 15% a 137% (Figura 42a). Já para a ferramenta com rugosidade $R_a = 1,83 \mu\text{m}$, a dureza variou de cerca de 166 a 399 HV, representando um aumento entre 5% e 153% (Figura 42b).

Figura 42 - Efeito da força normal nos valores de dureza das chapas de aço AISI 304 submetidas ao ensaio SDT: rugosidade das contraamostras igual a (a) 0,45 μm e (b) 1,83 μm .



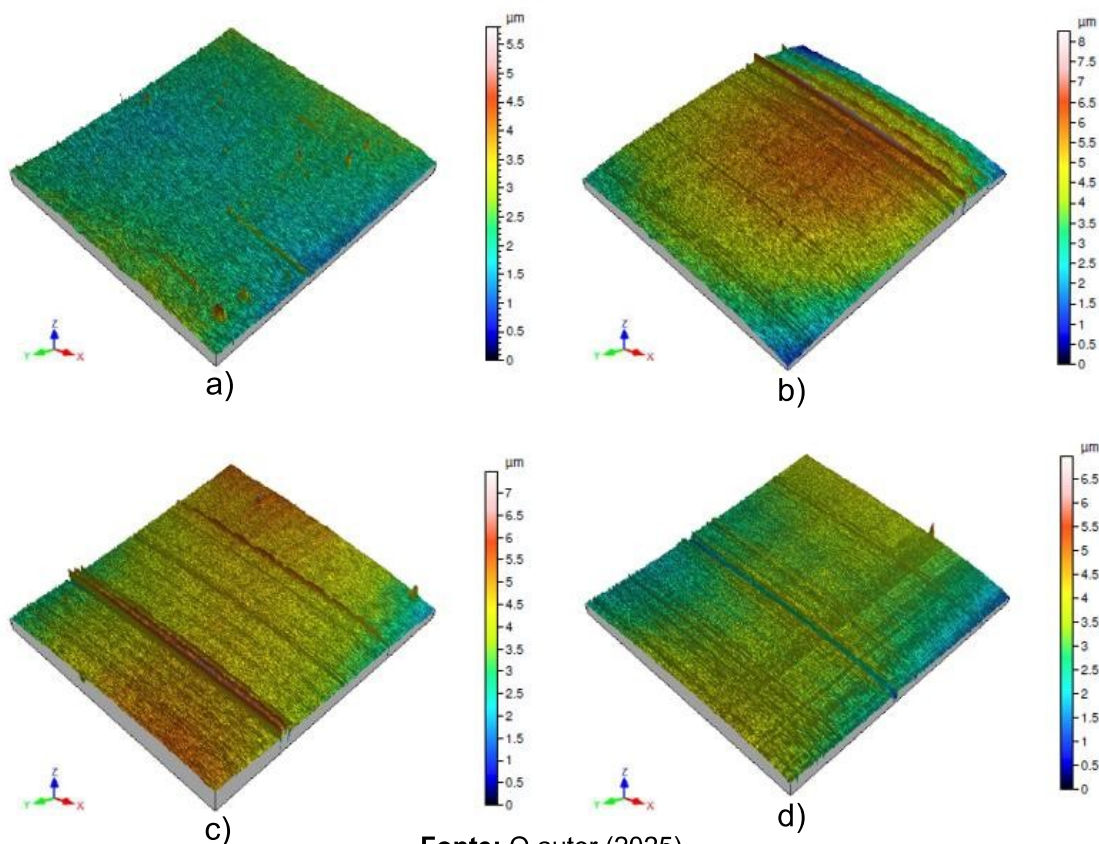
Fonte: O autor (2025).

Esse comportamento revela um aumento mais acentuado da dureza da chapa quando se emprega uma ferramenta com maior rugosidade e força normal elevada. De acordo com Rocha (2006), o aumento de dureza em um aço inoxidável austenítico pode ser atribuído ao encruamento durante o processo de deformação plástica severa, corroborando com as evidências anteriores sobre a transformação martensítica induzida por deformação.

4.6.2.4 Ensaio de Perfilometria 3D

A topografia tridimensional e os resultados quantitativos de rugosidade das chapas ensaiadas com parâmetros de velocidade igual a 1,0 mm/s e contraamostras com rugosidade de 1,83 μm , podem ser observados na Figura 43 e Tabela 8, respectivamente.

Figura 43 - Topografia das amostras no estado como recebido (a) e ensaiadas com força normal igual a 90 N (b), 350 N (c) e 1400 N (d).



Fonte: O autor (2025).

Tabela 8 - Parâmetros básicos da rugosidade superficial das chapas de metálicas após os ensaios SDT.

Força Normal (N)	Rq (μm)	Rsk	Rku	Rp (μm)	Rv (μm)	Rz (μm)	Ra (μm)
Como recebida	0,13	-1,07	11,4	0,381	0,678	1,06	0,09
90	0,31	-0,74	7,58	1,09	1,30	2,39	0,19
350	0,31	-1,02	11,7	1,25	1,69	2,93	0,16
1400	0,25	-1,47	8,15	0,66	1,22	1,88	0,16

Fonte: O autor (2025).

A topografia da superfície da chapa antes do ensaio (Figura 43a) apresenta superfície relativamente uniforme e homogênea, onde predominam vales e picos suaves. Nas chapas que passaram pelo ensaio SDT, nota-se uma acentuada modificação topográfica, com a formação de sulcos na direção do deslizamento.

O valor negativo de assimetria (R_{sk}) em todas as chapas, indica que a superfície é predominantemente formada por vales, o que facilita a formação de bolsões de óleo (SZWAJKA *et al.*, 2025).

A amostra ensaiada sob força normal igual a 90 N (Figura 43b), apresentou um aumento expressivo na rugosidade média aritmética (R_a) em relação o estado natural da chapa, passando de 0,09 μm pra 0,19 μm . Esse comportamento indica que, em condições de baixa pressão de contato, o deslizamento entre as superfícies promoveu a formação de sulcos localizados. De acordo com Blau (2008), em forças menores os picos mais altos das asperezas sem lubrificante entram em contato, produzindo um atrito adesivo nas superfícies de contato.

Sob forças de 350 N (Figura 43c) e 1400 N (Figura 43d), nota-se uma redução e estabilização dos valores de R_a , em torno de 0,16 μm . Entretanto, o aumento dos parâmetros R_{sk} e R_{ku} revelam alterações importantes no perfil da superfície, pois a assimetria R_{sk} tornou-se mais negativa, atingindo -1,47 em 1400 N e a curtose (R_{ku}) diminuiu, indicando um alisamento progressivo com achatamento dos picos e ampliação dos vales. De acordo com Szewczyk *et al.* (2022), com o aumento da força normal, as asperezas da chapa de aço sofrem deformação plástica mais intensa, o que resulta em um achatamento progressivo das irregularidades.

Por fim, é importante destacar que os diferentes mecanismos de atrito que foram discutidos neste estudo não atuam de forma isolada e sim por uma superposição complexa e dinâmica, difícil de quantificar e controlar. De forma geral, os mecanismos de adesão e deformação plástica são fortemente influenciados pelo aumento da área real de contato e pelo encruamento das asperezas superficiais. Essa sobreposição ocorre em proporções variáveis e frequentemente indetectáveis, o que torna extremamente desafiador estimar com precisão o coeficiente de atrito real e o desgaste resultante (OLIVEIRA *et al.*, 2024).

Apesar dessas limitações, ensaios simulativos de atrito, como os realizados neste trabalho, fornecem dados experimentais valiosos, que podem ser utilizados como parâmetros de entrada em simulações numéricas computacionais de processos de

conformação de chapas metálicas. Tais simulações possuem o potencial não apenas de reduzir custos de produção, mas também de aumentar o desenvolvimento de soluções tecnológicas para desafios de escala global, além de contribuir significativamente para o aumento da produtividade e da qualidade das peças fabricadas.

5 CONCLUSÕES

O estudo do comportamento tribológico da chapa de aço inoxidável austenítico AISI 304 submetida às condições de atrito em matriz de estampagem plana foi realizado no presente trabalho, e através dos resultados obtidos nos ensaios experimentais e sua análise, as principais conclusões são sumarizadas a seguir:

- o projeto e construção do tribossimulador foi realizado com sucesso, avanços e vantagens significativos foram obtidos, e os resultados experimentais indicaram que a repetibilidade dos coeficientes de atrito medidos foi satisfatória;
- verificou-se que o valor médio do coeficiente de atrito apresentou tendência de diminuição com o aumento da força normal aplicada. Em níveis mais baixos de força, os mecanismos de atrito adesivo e abrasivo foram predominantes, enquanto em forças mais elevadas, a deformação plástica, em especial o achatamento das asperezas da chapa, passou a ter papel de destaque;
- adicionalmente, pode-se observar que o aumento da velocidade de deslizamento da tira resultou em uma redução do valor médio do coeficiente de atrito. Em velocidades maiores, os resultados tenderam a apresentar valores semelhantes;
- para rugosidade da matriz igual a $R_a = 0,45 \mu\text{m}$, os valores de atrito variaram entre aproximadamente $\mu \approx 0,170$ e $0,323$, enquanto para rugosidade $R_a = 1,83 \mu\text{m}$, o coeficiente de atrito esteve entre $\mu \approx 0,160$ e $0,268$, indicando uma redução da ordem de 6% a 21%.
- a partir de 700 N, o coeficiente de atrito demonstrou uma tendência mais estável, apresentando um comportamento praticamente constante, sem ser significativamente influenciado pelo aumento progressivo da força normal;
- diversos microefeitos resultantes dos mecanismos de atrito e desgaste foram observados na superfície desgastada da chapa de aço, incluindo sulcos, detritos, deformação plástica e delaminação. A intensificação desses microefeitos, levou ao aumento da rugosidade das chapas ensaiadas em relação a condição inicial. Entretanto à medida que a força normal aumentou, houve uma redução nos parâmetros R_a e R_q , causado pela deformação plástica ou achatamento das asperezas;

- mudanças microestruturais foram identificadas na superfície da chapa ensaiada, com a austenita (γ) transformando-se em martensita (α' e ϵ) pelo efeito TRIP, o que fez aumentar o valor da dureza superficial da chapa com o incremento da força normal.

Por fim, ressalta-se que os resultados obtidos nesta pesquisa são relevantes tanto para o avanço do conhecimento científico sobre os mecanismos tribológicos atuantes na estampagem de chapas metálicas, quanto para aplicações práticas na indústria. Além disso, contribui significativamente para a otimização de processos de conformação, em especial no que tange à escolha de parâmetros operacionais que minimizem o atrito e o desgaste entre as superfícies em contato. Ademais, tais dados podem servir de base para a calibração de modelos computacionais utilizados em simulações numéricas da estampagem, conferindo maior confiabilidade às previsões de desempenho e viabilizando a redução de custos com prototipagem e retrabalho.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o comportamento tribológico do aço AISI 304 sob diferentes condições térmicas, utilizando dispositivos com controle de temperatura para investigar a influência do aquecimento no coeficiente de atrito e na transformação martensítica induzida por deformação (efeito TRIP);
- Expandir o estudo para diferentes condições de lubrificação, testando lubrificantes com distintas viscosidades e composições;
- Analisar a região de fratura através de um Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET) para identificar as bandas de deformação que se formaram nos planos de deslizamento onde a tensão de cisalhamento é máxima;
- Aplicar técnica de caracterização de desgaste como perfilometria óptica com o objetivo de quantificar a taxa de remoção de material e identificar os mecanismos de desgaste predominantes nas superfícies em contato;
- Desenvolver contraamostras com formatos diferentes para analisar o comportamento tribológico em diferentes condições;
- Utilizar os dados experimentais como parâmetros de entrada para simulações computacionais por elementos finitos, permitindo a modelagem do contato tribológico e a previsão do coeficiente de atrito e da distribuição de tensões durante o processo de estampagem de tiras.

REFERÊNCIAS

Abdelbary A, Chang L. **Principles of Engineering Tribology: Fundamentals and Applications**. 1st ed. Cambridge: Academic Press; 2023.

ALEKSANDROVIĆ, S.; STEFANOVIĆ, M.; ADAMOVIĆ, D.; LAZIĆ, V. **Variation of normal anisotropy ratio “r” during plastic forming**. *Journal of Mechanical Engineering*, Maribor, v. 55, n. 6, p. 392–399, 2009.

ALTAN, T.; TEKKAYA, A.E. **Sheet Metal Forming: Fundamentals**. ASM International, Ohio, 2012.

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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M**. Standard test methods for tension testing of metallic materials. ASTM International, West Conshohocken, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G99-05**. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, 2010.

BAIR S. Viscous Heating in Compressed Liquid Films. *Tribology Letters*; 2020;68:7.

BARROS, T. H. C.; GONZAGA, I. A. D.; NETO, A, S.; AMARAL, E.C.; GONÇALVES K. A. M. B.; RODRIGUES, P. C. M.; LUIZ, V. D. **Influence of Multi-Pass Forming on the Tribological Performance of AISI 430 Steel Sheet in Deep Drawing Process**. *Advances in Mechanical and Materials Engineering*. 2025; 42(1):59-69.

BHUSHAN, B. **Introduction to tribology**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 2013.

BLECK, W.; GUO, X.; MA, Y. **The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels**. *Steel Res Int*. 2017;88(10):1700218.

BLAU, P.J. **On the nature of running-in**. *Tribology International*. 2005;38(11-12):1007-1012.

BLAU, P.J. **Friction science and technology: from concepts to applications**. 2nd ed. Florida: CRC Press; 2008.

FILHO, B. E.; SILVA, I.B.; BUTTON, S.T. **Conformação Plástica dos Metais**. 6ª ed. EPUSP, São Paulo, 2011. Disponível em: <
<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf>>. Acesso em: 23 mar 2020.

BRITO, G. H. D. **Projeto mecânico de um equipamento de ensaio de desgaste por atrito e abrasão no sistema pino-sobre-disco**. Ouro Preto: UFOP, 2025.

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

CASTRO, R. **Desenvolvimento do sistema de aquisição e supervisão de dados para um tribômetro rotativo do tipo pino sobre disco**. Revista Ciência e Tecnologia, v. 18, n. 32, p. 1–8, 2015.

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

DAVIES, G. J.; GOODWILL, D. J.; KALLEND, J. S. **Earing in deep-drawing steels**. Texture, Cambridge, v. 1, p. 173–182, 1974.

DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**, 3 ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1986.

DOHDA, K; WANG, Z. **Effects of average lubricant velocity and sliding velocity on friction behavior in mild steel sheet forming**. Journal of Tribology, New York, v. 120, n. 4, p. 724–728, Oct. 1998.

EVIN, E.; DANESHJO, N.; MAREŠ, A.; TOMÁŠ, M.; KATARÍNA PETROČIKOVÁ, K.P. **Experimental Assessment of Friction Coefficient in Deep Drawing and Its Verification by Numerical Simulation**. Applied Sciences, v. 11, p. 1-13, 2021.

EVIN, E.; NÉMETH, S.; VÝROSTEK, M. **Evaluation of friction coefficient of stamping**. Acta Mechanica Slovaca, v. 18, n. 3-4, p. 20-27, 2014.

EVIN, E.; TOMÁŠ, M.; VÝROSTEK, M. **Verification the numerical simulation of the strip drawing test by its physical model**. Acta Mech Slovaca, v. 20, n. 1, p. 14-21, 2016.

FISCHER, F. D.; REISNER, G.; WERNER E.; TANAKA. K.; CAILLETAUD, G.; ANTRETTER, T. **A new view on transformation induced plasticity (TRIP)**. Elsevier Science Ltd., v. 16, p. 723 – 748, 2000.

FOLLE, L.F. **Estudo do coeficiente de atrito para processos de estampagem**. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

FOLLE, L.; SCHAEFFER, L. **Avaliação das condições tribológicas em estampagem de chapas através do ensaio de dobramento sob tensão**. Revista Matéria, v.2, n.2, p. 1-15, 2017.

FOLLE, L.; SCHAEFFER, L. **New Proposal to Calculate the Friction in Sheet Metal Forming Through Bending Under Tension Test**. Materials Research, v. 22, n. 6, e20190523, 2019.

Folle L, Silva BCS, Batalha GF, Coelho RS. The Role of Friction on Metal Forming Processes. **The Role of Friction on Metal Forming Processes [Internet]**.

Tribology of Machine Elements - Fundamentals and Applications. IntechOpen; 2022.

GÅÅRD, A.; KRAKHMALOV, P.V.; BERGSTRÖM, J.; HALLBÄCK, N. **Galling resistance and wear mechanisms: cold work tool materials sliding against carbon steel sheets.** Tribol Lett. 2007;26(1):67-72.

GONZALEZ, B. M., CASTRO, C.S.B., BUONO, V. T. L., Vilela, J M C; Andrade, M S; Moraes, J M D; Mantel, M J. **The influence of copper addition on the formability of AISI 304 stainless steel.** Materials Science and Engineering A343 (2003) 51/ 56.

HEREDIA-CANCINO, J. A.; RAMEZANI, M.; ÁLVAREZ-RAMOS, M. E. **Effect of degradation on tribological performance of engine lubricants at elevated temperatures.** Tribology International. 2018; 124:230-237.

HOSFORD, W.F.; CADDELL, R.M. **Metal Forming: Mechanics and Metallurgy.** 4th ed. Cambridge University Press, New York, 2011.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials.** University of Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2017.

HWANG, Y.; CHEN, C. **Investigation of effects of strip metals and relative sliding speeds on friction coefficients by reversible strip friction tests.** Metals, Basel, v. 10, n. 10, p. 1–14, 2020.

International Organization for Standardization – ISO. ISO 25178-6:2010. Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal. Part 6: Classification of methods for measuring surface texture.

KALPAKJIAN, S e SCHMID, S. R. **Manufacturing Processes for Engineering Materials.** Editora PERSON, 2014.

KATYAR, J. K, RAMKUMAR P.; RAO T. V. V. L. N. **Tribology in Materials and Applications.** Department of Mechanical Engineering, University of Aveiro, Aveiro, Portugal, 2020.

KHONSARI MM, GHATREHSAMANI S, AKBARZADEH S. **On the running-in nature of metallic tribo-components: A review.** Wear.;474-475;203871.2021.

KHOT, S.; BORAH, U. **Finite Element Analysis of Pin-on-Disc Tribology Test.** *International Journal of Science and Research (IJSR)*, v. 4, n. 4, p. 1475–1481, 2015.

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

KIRKHORN, L.; OLSEN, A.; ANDERSEN, T.; JOHANSSON, S.; JOHANSEN, K.; PEDERSEN, L. **Improved tribotesting for sheet metal forming.** Materials, Procedia CIRP, v. 3, p. 507-512, 2012.

KOOWATTANASUCHAT, P.; MAHAYOTSANUN, N.; & CHAIWONG, S. **Influences of contact pressure, sliding velocity, lubricant, bending angle and surface texture on friction behaviours in stainless steel strip drawing.** Materials, 9(12), 360, 2016.

KRAGELSKY, I. V.; KOMBALOV, V. S. **Calculation of value of stable roughness after running-in (elastic contact).** Wear. 1969;14(2):137-140.

LEMU, H. G.; Trzepieciński, T. **Numerical and Experimental Study of Frictional Behavior in Bending Under Tension Test.** Journal of Mechanical Engineering, p. 41 – 49, 2013.

Lo, K. H.; Shek, C. H.; Lai, J. K. L. **Recent developments in stainless steels.** Elsevier Science Ltd. P. 39 – 104, 2009.

LISCHKA, F. T. **Efeito do cobre e da deformação no efeito trip de um aço inoxidável austenítico aisi 304, avaliado por diversos métodos de análise.** Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

LITTLEWOOD, M.; WALLACE, J.F. The effect of surface finish and lubrication on the fictional variation involved in the sheet-metal-forming process. **Sheet Metal Industries**, v. 41, p. 925-1930, 1964.

LOADSTAR SENSORES. Disponível em: <https://www.loadstarsensors.com/assets/specsheets/rsb2.pdf>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024.

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.

LUIZ, V.D.; RODRIGUES, P. C. M. **Effect of the test conditions on tribological behavior of an Nb-stabilized AISI 430 stainless steel sheet.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2021; 43:505.

LUIZ, V.D.; RODRIGUES, P. C. M. **Design of a tribo-simulator for investigation of the tribological behavior of stainless-steel sheets under different contact conditions.** Mater Res. 2022 a;25:e20210220.

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 Horizozonte, 2005.

MAHKAMOV, A. **Determination of the Friction Coefficient in the Flat Strip Drawing Test.** Engineering, v. 13, p. 595-604, 29 nov. 2021.

MAKHKAMOV, A. **Tribology in Sheet Metal Forming. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica).** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2017.

MARCINIAK, Z.; Duncan, J.L.; Hu, S.J.; **Mechanics of Sheet Metal Forming.** Woburn: Editora Butterworth-Heinemann, 2002.

MCGUIRE, M. F. **Austenitic Stainless Steels.** Encyclopedia of Materials: Science and Technology, p. 406 – 410, 2001.

MESQUITA, E. L. A.; RUGANI, L.L. **Estampagem dos aços inoxidáveis.** ACESITA S.A., 1997.

OLIVEIRA E. S., DAMASCENO JR, NETO A. S., AMARAL E. C., GONÇALVES K., LUIZ V. D. **The Effect of the Drawing Die Radius in the Bending Under Tension Test on the Frictional Behaviour of AISI 430 Steel and AW-1100 Aluminium Alloy Sheets.** Advances in Mechanical and Materials Engineering. 2024;41(1):183-193.

OKAYASU M.; TOMIDA S. **Phase transformation system of austenitic stainless steels obtained by permanent compressive strain.** Materials Science & Engineering A. 2016.

PADILHA, A. F.; GUEDES, L. C. **Aços Inoxidáveis Austeníticos: microestruturas e Propriedades.** Ed. Hemus, São Paulo, 1996. 170 p.

Padilha AF, Rios PR. **Decomposition of austenite in stainless steel.** ISIJ Int. 2002;42(4):325-7.

PAULA, V. C. D.; OLIVEIRA, M. C. L.; CORREA, O. V.; ANTUNES, R. A. **Estudo do efeito de deformação plástica por laminação a frio sobre a resistência à corrosão intergranular do aço inoxidável AISI 304.** Abraco, Salvador, 2012.

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials.** 2nd ed. New York: John Wiley & Sons; 1995.

ROCHA, M. R. **Estudo da conformabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos 304n e 304h e suas correlações com as microestruturas obtidas.** 129 p. Tese. Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. 2006.

SANTOS, T.F.A; ANDRADE, M.S.; **Avaliação dilatométrica da reversão das martensitas induzidas por deformação em um aço inoxidável austenítico do tipo ABNT 304.** SciELO Brasil. 2008.

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

SHEN Y. F.; LI X. X.; SUN X.; WANG Y. D.; ZUO L. **Twinning and martensite in a 304 austenitic stainless steel.** Elsevier Science Ltd. 2012; 514-522.

SHISODE, M.; HAZRATI, J.; MISHRA, T.; ROOIJ, M.; TEN HORN, C.; BEECK, J. V.; VAN DEN BOOGAARD T. **Modeling boundary friction of coated sheets in sheet metal forming.** Tribology International. 2021; 153:106554.

SILVA, A.L.V.C. e MEI, P.R. Aços e Ligas Especiais. 3ª ed. **Editora Blucher**, São Paulo, 2010.

SLOTA, J.; KAŠČÁK ĽUBOŠ, LĂZĂRESCU, L. (2024). **Frictional Characteristics of EN AW-6082 Aluminium Alloy Sheets Used in Metal Forming.** Advances in Mechanical and Materials Engineering. 2024;41(1):79-87.

SPEIDEL, M. O. (2006). **Nitrogen Containing Austenitic Stainless Steels.** Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 37(10), 875–880.

SZPUNAR, M.; TRZEPIECINSKI, T.; ZABA, K.; OSTROWSKI R.; ZWOLAK M. **Effect of Lubricant Type on the Friction Behaviours and Surface Topography in Metal Forming of Ti-6Al-4V Titanium.** Materials, v. 14, 2021.

SZWAJKA, K.; TRZEPIECINSKI, T; SZEWCZYK, M.; ZIELINSKA-SZWAJKA, J.; BARLAK, M. **Investigating Resulting Surface Topography and Residual Stresses in Bending DC01 Sheet Under Tension Friction Test.** Lubricants. 2025; 13, 255.

SZEWCZYK, M.; SZWAJKA, K.; TRZEPIECIŃSKI, T. **Frictional Characteristics of Deep-Drawing Quality Steel Sheets in the Flat Die Strip Drawing Test.** Materials 2022, 15, 5236.

TABOR, D. **Junction growth in metallic friction: the role of combined stresses and surface contamination.** Proc Roy Soc Lond Math Phys Sci. 1959;251(1266):378—93.

TRZEPIECINSKI, T. E LEMU, H. G. **“Effect of lubrication on friction in bending under tension test-experimental and numerical approach,”** *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 4, 2020.

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

TRZEPIECIŃSKI, T.; LUIZ, V.D.; SZWAJKA, K.; SZEWCZYK, M.; SZPUNAR, M. **Analysis of the Lubrication Performance of Low-Carbon Steel Sheets in the Presence of Pressurised Lubricant.** Adv. Mater. Sci., 23(2), 65-76, 2023.

TRZEPIECINSKI, T. **“A study of the coefficient of friction in steel sheets forming,”** *Metals (Basel)*. vol. 9, no. 9. 2019.

TRZEPIECINSKI, T. **Polynomial Multiple Regression Analysis of the Lubrication Effectiveness of Deep Drawing Quality Steel Sheets by Eco-Friendly Vegetable Oils.** Materials, v. 15, p. 1-18, 2022.

VEGA, M.R.O.; PARISE, K.; RAMOSA, L.B.; BOFF, U.; MATTEDI, S.; SCHAEFFER, L.; MALFATTI, C.F. **Protic Ionic Liquids Used as Metal-Forming Green Lubricants for Aluminum: Effect of Anion Chain Length**. *Materials Research*, v. 20, n. 3, p. 1-13, 2017.

VIANA, T. G. **Estudo do desgaste por deslizamento em aços de trilhos e roda: efeito da razão entre durezas do par, da força normal e da lubrificação em ensaios pino contra disco**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2023.

WAGONER, R.H.; LIM, H.; LEE, M.G. Advanced Issues in springback. **International Journal of Plasticity**, v. 45, p. 3-20, 2013.

WANG Y, Azam A, Zhang G, Dorgham A, Liu Y, Wilson MCT, Neville A. **Understanding the Mechanism of Load-Carrying Capacity between Parallel Rough Surfaces through a Deterministic Mixed Lubrication Model**. *Lubricants*. 2022;10:12.

XU, D.; WAN, X.; YU, J.; XU, G.; LI, G. **Effect of Cold Deformation on Microstructures and Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel**. *Materials*, v. 8, p. 1 – 14, 2018.

YUAN, Zhizhong et al. **Impact properties of high-nitrogen austenitic stainless steels**. *Materials Science and Engineering A*, v. 475, p. 202–206, 2008.

ŽABA, K.; KUCZEK, Ł.; PUCHLERSKA, S.; WIEWIÓRA, M.; GÓRAL, M.; TRZEPIECIŃSKI, T. **Analysis of tribological performance of new stamping die composite inserts using strip drawing test**. *Advances in Mechanical and Materials Engineering*, v. 40, p. 55-62, 2023.