



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

AFONSO HENRIQUE ALVES SILVA

**EFEITO DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA E QUALIDADE DA
CHAPA DE AÇO NA RESISTÊNCIA AO ATRITO DURANTE A
ESTAMPAGEM**

TIMÓTEO/MG

2025

AFONSO HENRIQUE ALVES SILVA

**EFEITO DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA E QUALIDADE DA
CHAPA DE AÇO NA RESISTÊNCIA AO ATRITO DURANTE A
ESTAMPAGEM**

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

Orientador: Prof. Dr. Valmir Dias Luiz

TIMÓTEO/MG

2025

AFONSO HENRIQUE ALVES SILVA

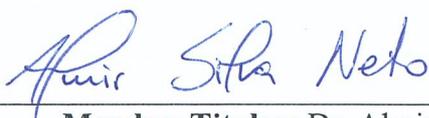
EFEITO DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA E QUALIDADE DA CHAPA DE
AÇO NA RESISTÊNCIA AO ATRITO DURANTE A ESTAMPAGEM

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

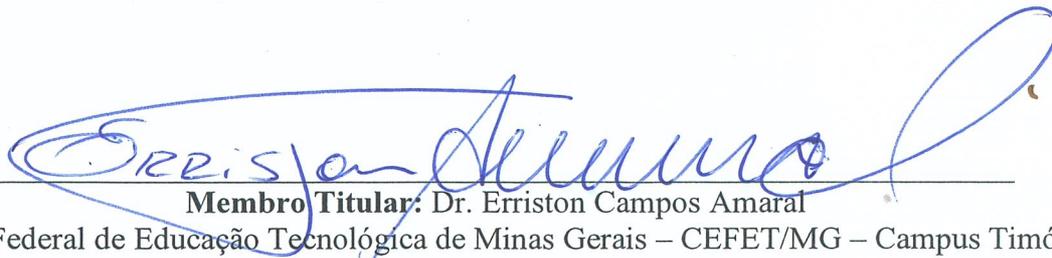
Timóteo, 20 de fevereiro de 2025.



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



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



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

RESUMO

A estampagem é um processo de conformação mecânica amplamente utilizado na indústria de transformação de materiais metálicos. Neste processo, chapas planas são utilizadas na fabricação de produtos de diversas áreas, tal como na indústria automotiva, aeroespacial, linha branca, dentre outras. No entanto, durante a aplicação de esforços, os aspectos tribológicos tem um efeito significativo na produção e qualidade final dos produtos. Portanto, ensaios experimentais que simulam as condições de atrito em laboratório são extremamente relevantes no estudo do comportamento de materiais metálicos. Neste sentido, o presente trabalho tem como principal objetivo investigar o efeito da deformação plástica nas características de atrito de diferentes chapas de aço (AISI 316L, AISI 409 e IF). Para isso, foi utilizado um tribossimulador de chapas metálicas para a execução do ensaio de dobramento sob tensão, que simula o atrito na região de dobramento em matriz de estampagem profunda. O efeito de diferentes parâmetros de ensaio no valor do coeficiente de atrito foi investigado. Foram utilizados alongamentos de 15, 30, 45 e 60 mm, respectivamente, com raios de dobramento de 6 e 16,5 mm. Durante todo o ensaio, a velocidade foi mantida constante em 10 mm s^{-1} , associada a um regime lubrificado. Além disso, diferentes técnicas foram utilizadas na análise das amostras, como medições de dureza e rugosidade. No geral, os resultados mostraram que os aços inoxidáveis e carbono apresentaram aumento no coeficiente de atrito conforme os acréscimos na taxa de deformação. Quanto à rugosidade e dureza, observou-se as mesmas características perante o efeito da deformação. Dentre os aços inoxidáveis, o aço IN316L apresentou maiores coeficientes de atrito devido à sua baixa rugosidade e a possíveis transformações estruturais por deformação. O aço IN409 apresentou elevados valores de coeficiente de atrito, assim como mudanças em sua dureza e rugosidade. Os aços IF apresentaram um comportamento estável em seus valores de coeficiente de atrito. Os aços IF's apresentaram uma alteração em seu coeficiente de atrito com a mudança de alongamento. Devido a suas características químicas este material teve baixas alterações de dureza. Todavia durante o ensaio apresentou expressivos valores de rugosidade.

Palavras-chave: Estampagem; Tribossimulador de chapas metálicas; Ensaio de dobramento sob tensão; Coeficiente de atrito, AISI 316L, AISI 409, IF

ABSTRACT

Drawing is a mechanical forming process widely used in the metalworking industry. In this process, flat sheets are used to manufacture products in various fields, such as the automotive, aerospace, and home appliance industries, among others. However, during the application of forces, tribological aspects have a significant effect on the production and final quality of the products. Therefore, experimental tests that simulate friction conditions in the laboratory are extremely relevant in the study of the behavior of metallic materials. In this regard, the main objective of the present study is to investigate the effect of plastic deformation on the friction characteristics of different steel sheets (AISI 316L, AISI 409, and IF). For this purpose, a tribosimulator for metallic sheets was used to perform the bending under tension test, which simulates the friction in the bending region of a deep drawing die. The effect of different test parameters on the friction coefficient was investigated. Elongations of 15, 30, 45, and 60 mm were used, respectively, with bending radii of 6 and 16.5 mm. Throughout the test, the speed was kept constant at 10 mm/s, associated with a lubricated regime. In addition, different techniques were used in the analysis of the samples, such as hardness and roughness measurements. In general, the results showed that stainless steel and carbon steels exhibited an increase in the coefficient of friction as the deformation rate increased. Regarding roughness and hardness, the same characteristics were observed in response to deformation effects. Among the stainless steels, IN316L steel exhibited higher coefficients of friction due to its low roughness and possible structural transformations due to deformation. IN409 steel exhibited high friction coefficients as well as changes in its hardness and roughness. The IF steels showed a change in their friction coefficient with the increase in elongation. Due to their chemical characteristics, this material experienced minimal changes in hardness. However, during the test, it exhibited significant roughness values.

Keywords: Stamping; Metal sheet tribometer; Bending test under tension; Coefficient of friction AISI 316L, AISI 409, IF.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fatores que afetam a conformação mecânica dos metais.	14
Figura 2: Estampagem profunda.	14
Figura 3: Desenho esquemático de um processo de estampagem profunda onde (a) Região da aba do copo; (b) Região de dobramento da matriz; (c) Região lateral do copo; (d) Região de dobramento no punção; (e) Região do fundo do copo.	15
Figura 4: Distribuição de tensões nas partes de um copo estampado.	16
Figura 5: Classificação quanto ao tipo de desgaste.	18
Figura 6: Diagrama de equilíbrio de um bloco B submetido a uma força H.	20
Figura 7: Mecanismos de atrito.	22
Figura 8: Componentes de adesão e penetração (deformação) no atrito.	22
Figura 9: Retirada de atrito com a utilização de algum meio de lubrificação.	24
Figura 10: Curva de Stribeck.	26
Figura 11: Rugosidades Ra e Rt em um perfil de superfície de uma amostra de comprimento L.	27
Figura 12: Formação da camada passiva em aços inoxidáveis. a) material livre de contaminantes. b) reação do cromo com o oxigênio presente no ambiente c) formação do óxido de cromo.	29
Figura 13: Modelagem representativa para alguns ensaios tribológicos.	35
Figura 14: Representação do ensaio BUT.	36
Figura 15: Rugosímetro digital TESA.	40
Figura 16: Microdurômetro <i>Vickers</i>	41
Figura 17: Tribossimulador (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.	41
Figura 18: Representação esquemática da metodologia utilizada no trabalho.	42
Figura 19: Dureza para as amostras conforme recebidas.	44
Figura 20: Rugosidade média para as amostras conforme recebidos.	45
Figura 21: Dureza média R6.	45
Figura 22: Dureza média R16,5.	46
Figura 23: Rugosidade média R6.	47

Figura 24: Rugosidade média R16,5.....	48
Figura 25: Curva característica e atrito para o aço AISI316L.....	49
Figura 26: Curva característica de atrito para os aços estudados.....	50
Figura 27: Coeficiente de atrito médio R6.....	50
Figura 28: Coeficiente de atrito médio R16,5.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química dos aços AISI 316 e AISI 316L.....	30
Tabela 2: Propriedades mecânicas dos aços AISI 316 e AISI 316L.....	31
Tabela 3: Propriedades mecânicas médias do aço IF recozido em caixa.	34
Tabela 4: Propriedades mecânicas médias do aço IF recozido em caixa.	34
Tabela 5: Composição química aços AISI 409 e AISI 316.	39
Tabela 6: Composição química das chapas de aço IF.	40
Tabela 7: Parâmetros de pesquisa.	43
Tabela 8: Dureza média.	46
Tabela 9: Valores de rugosidade média Ra.	48
Tabela 10: valor de coeficiente de atrito para os raios R6 e R16,5.	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron And Steel Institute</i>
CFC	Cúbica De Corpo Centrado
CCC	Cúbica De Face Centrado
TCC	Tetragonal de Corpo Centrado
TRIP	<i>Transformation Induced Plasticity</i>
IF	<i>Interstitial Free</i>
LE	Limite de Escoamento
LR	Limite de Resistência
AI	Alongamento
HRB	Dureza <i>Rockwell B</i>
r	Coeficiente de Anisotropia
BUT	<i>Bending Under Tension</i>
DBT	<i>Draw Bead Test</i>
SDT	<i>Strip Drawing Test</i>
DMQ-TM	Departamento de Metalurgia e Química - Timóteo
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
SAD	Sistema de Aquisição de Dados

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Coeficiente de Atrito
μ'	Coeficiente de Atrito Dinâmico
μ_{ad}	Atrito causado por adesão
μ_{def}	Atrito causado por deformação
F_n	Força normal na área de contato.
F_f	Força de atrito.
F_t	Força de tangencial.
$F_{n,as}$	Força normal no contato das asperezas.
ΔV	Velocidade relativa
τ_{ad}	Tensão de cisalhamento para cortar uma ligação adesiva
F_1	Força de atrito do pino fixo
F_2	Força de contratensão , pino fixo
t_0	Espessura da chapa
R	Raio d pino de dobramento
F_b	Força de dobramento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA.....	13
3.2 ESTAMPAGEM.....	14
3.2.1 Mecânica da estampagem	15
3.3 TRIBOLOGIA.....	16
3.3.1 Desgaste	18
3.3.2 Atrito	19
3.3.3 Efeito stick-slip	23
3.3.4 Lubrificação	24
3.3.5 Rugosidade	26
3.4 AÇOS PARA ESTAMPAGEM.....	28
3.4.1 Aços resistentes a corrosão	28
3.4.2 AISI 316L	30
3.4.3 AISI 409	31
3.5 AÇOS CARBONO.....	32
3.5.1 Aços livres de interstícios (IF)	33
3.6 ENSAIO DE DOBREMENTO SOB TENSÃO.....	35
4. MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1 MATERIAIS.....	39
4.2 EQUIPAMENTOS.....	40
4.3 MÉTODOS.....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL.....	44
5.2 DUREZA.....	45
5.3 RUGOSIDADE.....	47
5.4 COEFICIENTE DE ATRITO.....	49
6. CONCLUSÕES	53
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54

1. INTRODUÇÃO

A conformação mecânica de chapas de aço compreendem uma vasta gama de processos de produção empregados para a utilização deste material. Sua versatilidade assim como a qualidade final adquirida durante a produção são fortes justificativas para sua utilização na produção de bens de consumo e de capital. Conhecer a fundo as metodologias de produção assim como as variáveis que podem afetar esse sistema é de suma importância para a otimização produtiva. (LUIZ, 2022).

A utilização adequada do aço como matéria prima não se resume somente na sua devda seleção mas também está atrelada ao conhecimento das varáveis que podem afetar seu desempenho em processos de conformação tendo como exemplo a estampagem. Entre as várias variáveis que podem afetar a utilização adequada do aço, o atrito se destaca como uma das mais importantes. Ao longo dos anos, o atrito tem sido uma preocupação central na indústria de estampagem de chapas metálicas, devido ao seu impacto significativo na produtividade e na qualidade do produto. No processo de embutimento profundo, por exemplo, a deformação de um blank ocorre devido ao movimento relativo entre a chapa e a ferramenta, gerando forças de atrito em diferentes áreas da matriz de estampagem. Dependendo da região de contato, essas pressões podem atingir até 100 MPa. Portanto, para garantir produtos de alta qualidade, é crucial entender e controlar essas condições de atrito, uma vez que o nível de pressão em um tribocontato afeta de maneira significativa a qualidade do produto, a estampabilidade da chapa e a distribuição da deformação em várias regiões da ferramenta (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011; TRZEPIECINSKI, 2020; LUIZ, 2022).

Notoriamente, diversos parâmetros influenciam na estampabilidade das chapas metálicas, tal como as propriedades das chapas metálicas, propriedades do material da ferramenta, parâmetros de processo, dentre outros. Entretanto, a determinação precisa da influência de um único parâmetro nas características tecnológicas é ambígua, porque parâmetros únicos são alterados de um caso para outro e sua participação na estampagem de chapas também é alterada, sendo difícil obter resultados exatos sobre o coeficiente de atrito para uma combinação de materiais. Entretanto, com a crescente importância da análise por elementos finitos na pré-produção, a necessidade de precisão dos valores que servem de entrada para a

simulação vem se tornando cada vez mais importante. Por isso, ao longo dos anos, pesquisadores e institutos de pesquisa em todo o mundo têm envidado esforços para aumentar o entendimento sobre o atrito e os parâmetros que envolvem a estampagem de chapas metálicas (TRZEPIECINSKI e LEMU, 2020; EVIN *et al.*, 2021).

No entanto, verifica-se que há uma escassez de artigos e pesquisas que relacionam o nível de deformação aplicado e a qualidade das chapas metálicas ao seu comportamento tribológico. Portanto, é nesse contexto que o presente projeto está inserido, o que produzirá resultados práticos e que poderão ser utilizados para reduzir custos, melhorar a prática industrial e a qualidade dos produtos produzidos pelo processo de estampagem (TRZEPIECINSKI e LEMU, 2020; EVIN *et al.*, 2021).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a resistência ao atrito de chapas de aço AISI 316L, AISI 409 e Intersticial *Free* (IF) em diferentes raios de dobramento e condições de deformação através do ensaio de Dobramento Sob Tensão por meio de um tribossimulador de chapas metálicas.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Os objetivos do presente trabalho são elencados a seguir:

- I. Caracterizar as amostras no estado conforme recebido: Realizar ensaios de caracterização química e mecânica das chapas de aço AISI 316L, AISI 409 e IF para compreender suas propriedades iniciais antes dos ensaios de dobramento;
- II. Determinar o coeficiente de atrito das chapas: Avaliar os valores dos coeficientes de atrito em função do raio da ferramenta de dobramento e dos diferentes níveis de deformação plástica aplicados, utilizando um tribossimulador de chapas metálicas;
- III. Avaliar as propriedades superficiais das amostras após os ensaios de dobramento: Medir a rugosidade e a dureza das superfícies das amostras ensaiadas utilizando um rugosímetro portátil e um durômetro *Vickers*, correlacionando esses parâmetros com o comportamento ao atrito observado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados temas que darão embasamentos teóricos para o desenvolvimento dos estudos propostos.

3.1 PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA

Com o foco na produção de bens de consumo e de capitais, a conformação mecânica dos metais é um processo de grande relevância para o setor produtivo. Além de possibilitar produções em grandes escalas, mantendo qualidades dimensionais e homogeneidade nos produtos, através deste processo pode-se também modificar a propriedade de acordo com a finalidade do produto final (LUIZ, 2022).

Compreende-se como conformação dos metais o processo de modificação da forma de um corpo metálico para outra forma definida. Esses processos são divididos em dois grupos, sendo eles processos mecânicos e processos metalúrgicos. Ambos os processos estão associados a aplicações de tensões externas, como tração e compressão acompanhadas e, em alguns casos, a altas temperaturas. (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

Os processos de conformação mecânica constituem processos em que as tensões aplicadas no material não ultrapassem o limite de resistência a ruptura do material. Dentro deste processo para que ocorra a maximização produtiva atrelado às mudanças necessárias no material, requisitos como qualidade superficial, minimização do consumo de materiais associado ao baixo desgaste do ferramental assim como alta produtividade são aspectos primordiais (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011; LUIZ, 2022).

Os processos de conformação mecânica podem ser caracterizados quanto ao esforço predominante e a temperatura de trabalho. Esta última forma de classificação tem como variável primordial a temperatura no qual, o material processado, depende da faixa de trabalho, será classificado como trabalho a frio, a quente e a morno. Todavia, uma outra forma de classificação está ligada à matéria prima que será trabalhado como chapas, blanques, tarugos etc (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

Conforme Figura 1 vários fatores afetam a resposta das chapas metálicas nos processos de conformação tendo grande destaque os aspectos tribológicos no sistema em estudo (LUIZ, 2022).

Figura 1: Fatores que afetam a conformação mecânica dos metais.

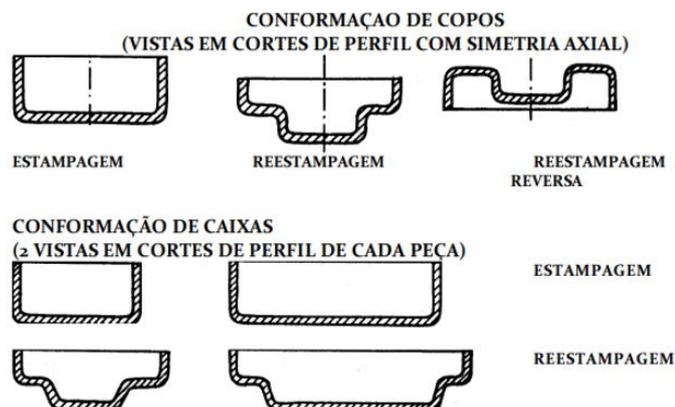


Fonte: Luiz (2022).

3.2 ESTAMPAGEM

Dentre os processos de conformação mecânica, os processos de estampagem compreendem na utilização de chapas metálicas que são prensadas contra uma matriz para fabricações de peças ocas. Neste processo destacam-se o embutimento, estampagem profunda, e a estampagem por estiramento. A estampagem profunda de chapas metálicas utiliza os processos de estampagem, reestampagem e estampagem reversa conforme ilustrado na Figura 2 (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

Figura 2: Estampagem profunda.



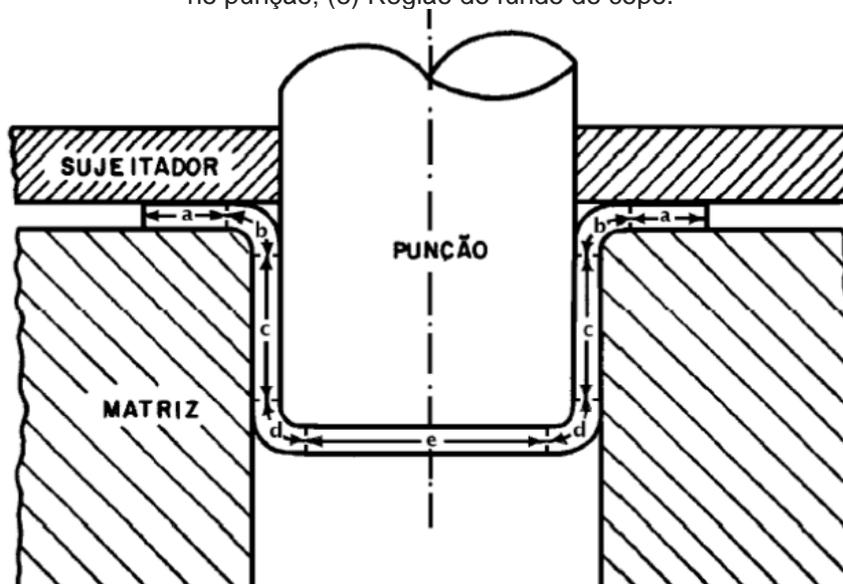
Fonte: Bresciani Filho *et al.* (2011).

Os produtos obtidos através da estampagem profunda são elementos de formatos cilíndricos com raios variados, fundos planos ou esféricos e podem ter inclinações nas paredes laterais (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

3.2.1 Mecânica da estampagem

A mecânica da estampagem será melhor detalhada observando a Figura 3.

Figura 3: Desenho esquemático de um processo de estampagem profunda onde (a) Região da aba do copo; (b) Região de dobramento da matriz; (c) Região lateral do copo; (d) Região de dobramento no punção; (e) Região do fundo do copo.



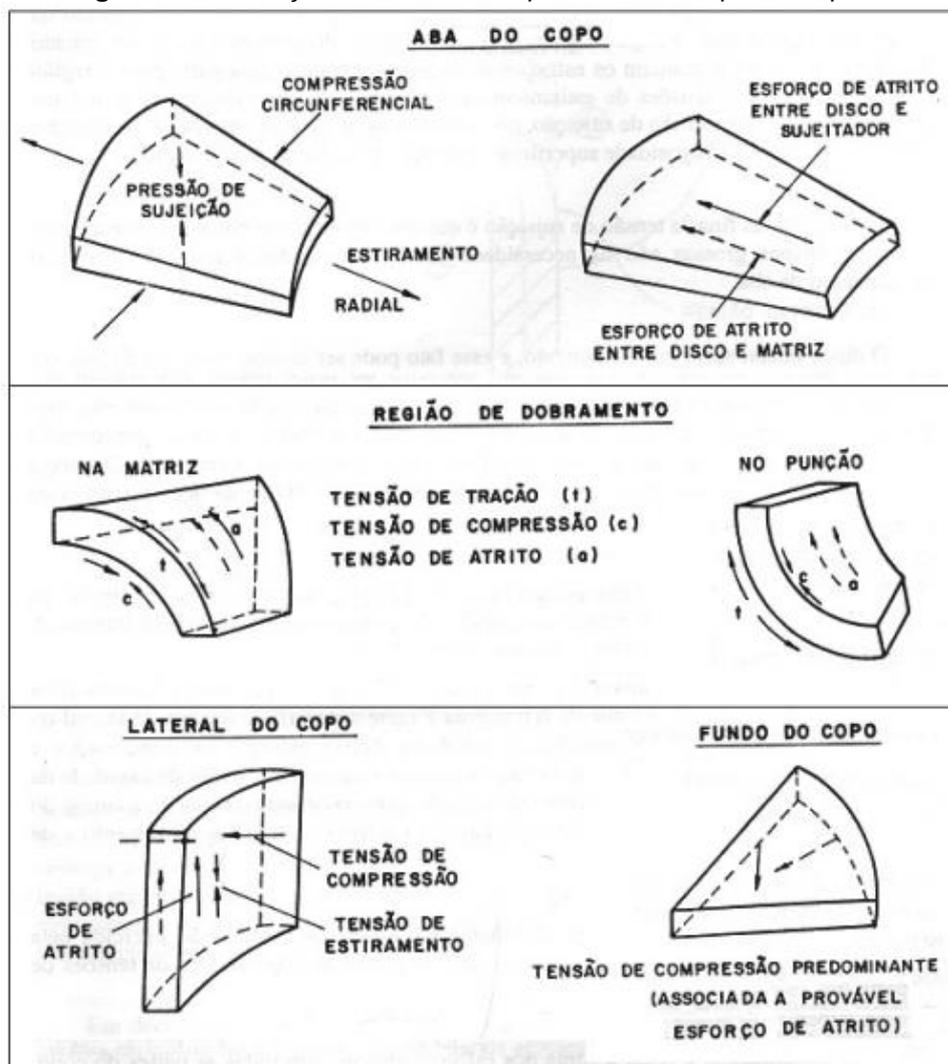
Fonte: Bresciane Filho *et al.* (2011).

O primeiro estágio compreende na ação do punção na chapa metálica que deforma em direção a movimentação do mesmo. A aba do disco metálico (a) tem seu movimento restringido através do sujeitador que comprime o material evitando o enrugamento da chapa. (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

Na região do dobramento (b) e no punção tem-se a ação de tensões de tração na parte externa e compressão na parte interna que estão ligadas ao atrito nestas regiões. Nas laterais (c) atuam tensões de tração e compressão provocando afinamento da chapa nessas regiões tendo ainda a ação do atrito entre a chapa e o punção. No fundo do copo (d) é predominante a pressão de compressão exercida pelo punção que é transmitida as demais partes do material. As distribuições de tensões descritas estão

esquemáticas na Figura 4 (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

Figura 4: Distribuição de tensões nas partes de um copo estampado.



Fonte: Bresciane Filho *et al.* (2011).

Como resultados dos esforços dentro deste complexo sistema fatores como propriedades dos materiais submetidos a esses esforços, propriedades do ferramental e suas geometrias e as condições nos quais estão submetidas as superfícies em contato regem o resultado final deste processo. Todavia, estes aspectos influenciam na qualidade final do produto que será obtido (LUIZ,2022).

3.3 TRIBOLOGIA

Quando se deseja estudar os fatores que afetam o resultado final dos processos de conformação mecânica dos metais, deve-se atentar ao estudo tribológico do sistema.

O termo Tribologia, originário do grego, vem da junção do radical “Tribos” que significa esfregar mais o sufixo “Logia” que por sua vez significa estudo. Atualmente entende-se como Tribologia a ciência que estuda a interação de superfícies em movimento relativo visando entender o comportamento do atrito, desgaste e a ação dos lubrificantes em meio a esse sistema (LUIZ, 2022; MILCHESKI *et al.*, 2023).

Historicamente o pioneirismo para a utilização deste termo vem de Jost em um estudo de sua autoria para o comitê de ciência e educação britânico em 1966 visando estudar os impactos econômicos devido aos aspectos tribológicos. Contudo, apesar de ser um assunto relativamente novo no meio científico o estudo desses aspectos intrigou cientistas renomados como Leonardo da Vinci. A ciência por trás desta terminologia já se solidificava bem antes da sua primeira utilização. Todavia, Jost colocou em prática esse conhecimento buscando prever o comportamento do sistema formado pelos tribo elementos (SILVA, 2020; MILCHESKI *et al.*, 2023).

O estudo deste fenômeno científico é vasto e complexo abordando diversas áreas científicas como Mecânica dos Sólidos e Ciência dos Materiais onde a primeira traz como ênfase as tensões e temperaturas de contato e a segunda busca entender o comportamento em escalas atômicas. Outro par de estudos de grande valia é a Mecânica dos Fluidos e a Química. O primeiro busca entender o comportamento do lubrificante no sistema. Já os estudos químicos tem como uma das suas principais fontes de investigação a reatividade dos lubrificantes, com o propósito de mitigar os efeitos causados pelos aspectos tribológicos, como por exemplo o atrito e o desgaste (SILVA, 2020).

A complexidade deste conjunto científico está atrelado a união destas vastas áreas do conhecimento em um único sistema conhecido como Sistema Tribológico. Um tribossistema, uma outra forma de se denominar este conjunto, compreende na união entre os componentes em contato mais a presença de agentes como por exemplo um líquido interfacial. Não obstante, este conjunto sofre interferências externas como por exemplo interferências do ambiente ao qual está inserido. Entretanto, esses fatores adicionados a elementos como rugosidade e condições operacionais afetam totalmente o comportamento sistêmico (GAIGHER, 2023).

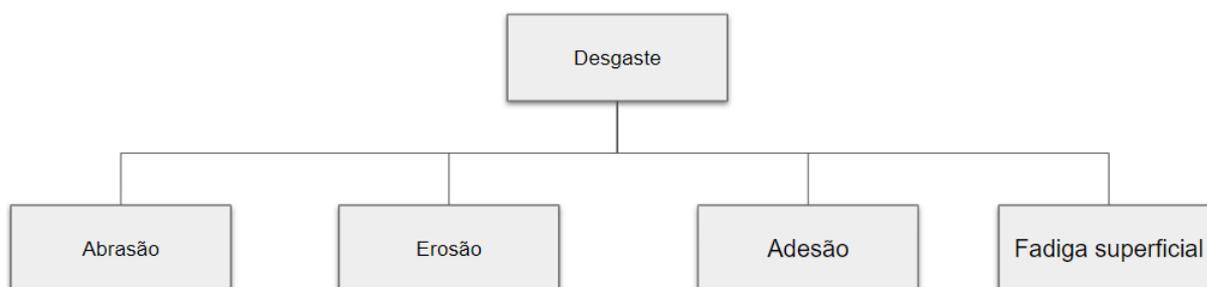
3.3.1 Desgaste

Desde o desgaste de um anel em um dedo humano representando a longevidade deste matrimônio até um gotejamento de água em uma pedra dando origem a um dos mais famosos ditados populares, o desgaste está presente no cotidiano da produção humana. Contudo, este fenômeno tem um grande foco nos estudos tribológicos buscando a minimização de seus efeitos (MILCHESKI *et al.*, 2023).

Compreende-se como desgaste a remoção de material em superfícies sólidas podendo acarretar falhas e um determinado componente mecânico. Este fenômeno tem forte dependência das características do material no qual foi submetido ao desgaste. Ademais, a remoção de material pode ser em uma ou mais superfícies em contato e afetam a topografia superficial dos mesmos devido a interação das asperezas, em outras palavras, interação das rugosidades dos materiais (SILVA, 2020).

A Figura 5 apresenta uma das classificações aceitas para os tipos de desgastes existentes (SILVA, 2020).

Figura 5: Classificação quanto ao tipo de desgaste.



Fonte: Adaptado de Silva (2020).

De acordo com Gaigher (2023), o desgaste abrasivo compreende na retirada de material devido a irregularidades superficiais presentes nos materiais em contato. Entretanto, este fenômeno também é caracterizado pela presença de um corpo externo com dureza elevada. Silva (2020) acrescenta que um dos fatores que determinam ou não a resistência dos materiais neste sistema é a dureza, portanto para seus estudos quanto maior a dureza do material maior a sua resistência. Gaigher (2023) traz como um dos resultados deste tipo de desgaste o sulcamento onde há a

formação sulcos ou canais na superfície desgastada devido a aderência de partículas na superfície oposta. Como consequência do trabalho a frio essas partículas aderidas acabam tendo um aumento de sua dureza no qual atuam como mecanismos de abrasão.

O desgaste por erosão compreende na perda de material devido a impactos constantes de partículas sólidas em uma velocidade maior que 1 m s^{-1} . Uma outra forma de definir este fenômeno é a retirada de material de um corpo sólido submetido a ação de um fluido que apresenta partículas sólidas em sua estrutura. Este fenômeno vem ganhando destaque devido aos desenvolvimentos por exemplo de equipamentos que apresentam em seus sistemas as operações em altas velocidades (SILVA, 2020; GAIGHER, 2023).

O desgaste por adesão ocorre quando entre os materiais existem uma força adesiva suficientemente forte para dificultar a movimentação dos mesmos. Comumente chamado de soldagem a frio, este tipo de fenômeno ocorre devido ao atrito entre as superfícies como consequência das deformações plásticas das asperezas e quebra das ligações superficiais que acarreta em formações de partículas de desgastes no sistema. A severidade deste fenômeno é ditada pela carga, contaminantes, rugosidades e propriedades físico-químicas dos materiais (SILVA, 2020; GAIGHER, 2023 e MILCHESKI *et al.*, 2023).

Por fim uma outra forma de desgaste é o desgaste por fadiga. Este fenômeno é o resultado da formação de tensões mecânicas, térmicas e químicas devido a movimentos repetitivos e constantes. Essa movimentação leva a formação de rachaduras nas superfícies resultando na remoção de materiais (SILVA, 2020; MILCHESKI *et al.*, 2023).

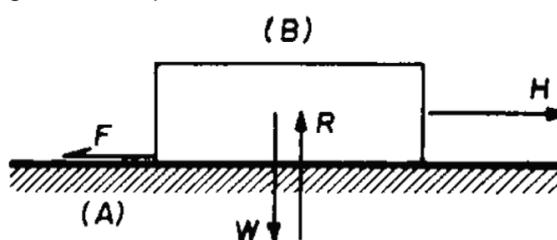
3.3.2 Atrito

Muitas vezes negligenciado nos exercícios de física do ensino médio onde os enunciados trazem a informação de que se deve desprezar o atrito, este elemento apresenta uma parte fundamental de estudo nos tribossistemas. Entende-se como atrito uma força de resistência ao movimento, sendo tangencial ao plano de

movimentação entre duas superfícies, ou em outras palavras, a resistência de movimentação de um corpo sobre o outro. Os mecanismos físico-químicos deste sistema estão atrelados a natureza dos materiais em contato (HELMAN e CETLIN, 2010; GAIGHER, 2023).

Para explicar fisicamente a ação do atrito em um corpo dispõe-se da observação de um diagrama de corpo livre ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Diagrama de equilíbrio de um bloco B submetido a uma força H.



Fonte: Silva (2020).

Dispondo-se de um bloco (B) em uma superfície (A) observa-se no diagrama a força peso (W) e uma força de reação (R) de mesma intensidade, mas de sentidos opostos. Em um primeiro momento este bloco está estático e ao submetê-lo a uma força (H) de intensidade inferior à da força (F), que está contrária ao movimento, o bloco continuará estático. Entretanto, quando esta força (H) supera a força que se opõe ao movimento (F) este bloco irá movimentar-se no plano (A). Em ambos os casos a força (F) se opõe ao movimento sendo então denominada como força de atrito. Com este pequeno experimento pode-se observar uma relação entre a força (F) e a (H) no qual é representada pela Equação 1. Entretanto, este processo também tem forte relação com os tipos de materiais e a qualidade superficial dos mesmos em contato (HELMAN e CETLIN, 2010; SILVA, 2020)

$$\frac{F}{R} = \mu \quad (1)$$

Diante desta relação matemática obtém-se o coeficiente de atrito estático (μ) sendo um valor adimensional e conhecida como Lei de Atrito de Culomb. Em 1781 Charles A. Culomb trouxe-se as seguintes inferências para o estudo do movimento entre dois corpos (HELMAN e CETLIN, 2010; SILVA, 2020).

- 1) A força de atrito entre dois corpos em contato é proporcional a força normal que atua no sistema.
- 2) Uma vez que o corpo (B) começa a movimentar-se a força (H) necessária para manter este corpo em movimento é de menor intensidade se comparada a força (H) necessária para iniciar o movimento. Sendo assim inicia-se o atrito dinâmico (F') no sistema onde sua relação matemática é mostrada na Equação 2 onde μ' é o coeficiente de atrito dinâmico, sendo ele um valor menor do que o atrito estático.

$$F' = \mu' R < F \quad (2)$$

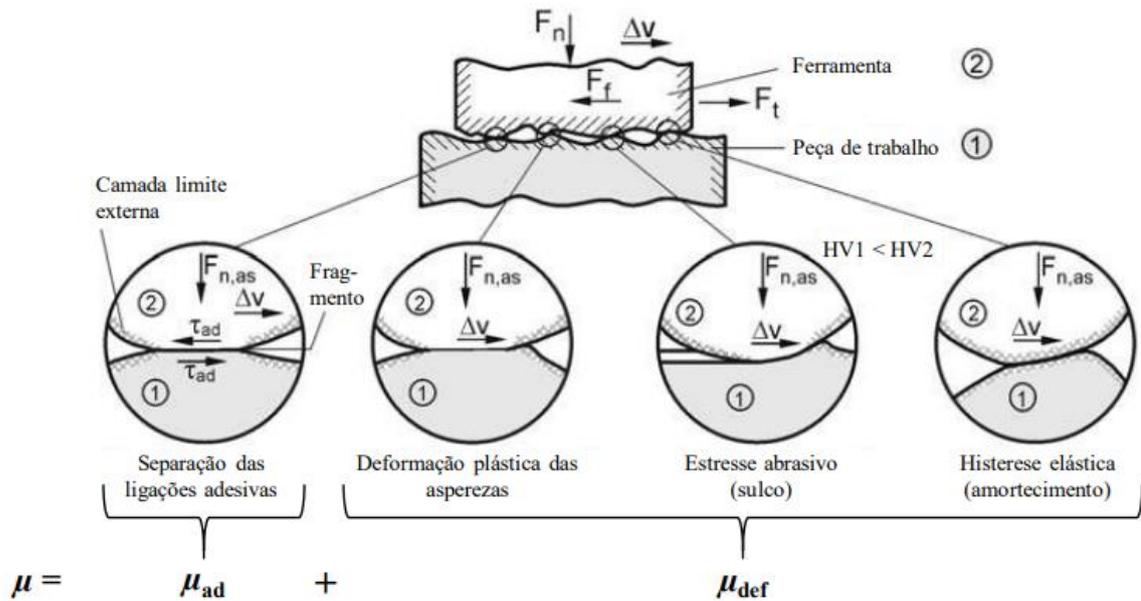
Dentre as grandezas estudadas em Tribologia pode-se destacar o atrito como uma das mais complexas para ser medida devido a facilidade de ser alterada durante os processos de medição. Dentro da conformação de chapas metálicas a movimentação entre chapa e ferramenta promove no sistema uma interação geradora das forças de atrito. Características como dureza do par tribológico ou a presença de um material interfacial que altere o cisalhamento dos planos são fatores que influenciam diretamente o coeficiente de atrito. Contudo, dentro dos processos de conformação mecânica o atrito em geral não segue as Leis associadas ao atrito de Culomb pois há uma dependência da velocidade de deslizamento e por sua vez este mecanismo não é um valor constante e muito menos proporcional a força normal aplicada ao sistema (LUIZ, 2022 e GAIGHER 2023).

Mas em meio a tamanha dificuldade de se estipular o real comportamento do atrito nos sistemas de conformação Luiz (2022) descreve que o atrito é regido por dois mecanismos, sendo eles adesão (μ_{ad}) e deformação (μ_{def}) que podem ser observados na Figura 7.

O mecanismo de adesão é semelhante ao desgaste adesivo acima explicado onde há uma união por ligações atômicas ou moleculares, soldagem a frio, durante a movimentação das superfícies. Todavia, para permitir a movimentação essas forças devem ser quebrados o que gera uma perda de energia no sistema. Já o mecanismo de deformação, ou que pode ser chamado também de penetração (μ_p), é dado pela

diferença de dureza entre chapa e ferramenta, sendo a dureza da chapa menor se comparada a da ferramenta. Essa diferença acarreta na deformação plástica das asperezas e sulcamento modificando a topografia do sistema. A Figura 8 trás uma representação esquemática e separada de cada componente (LUIZ ,2022).

Figura 7: Mecanismos de atrito.



Fonte: Luiz (2022).

Onde:

F_n = Força normal na área de contato.

F_f = Força de atrito.

F_t = Força de tangencial.

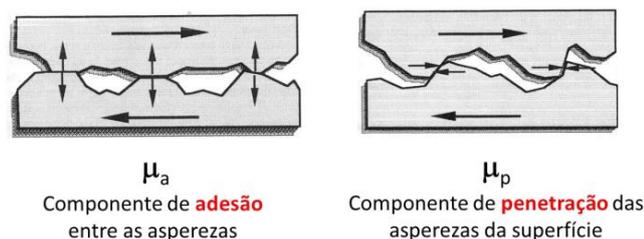
$F_{n,as}$ = Força normal no contato das asperezas.

ΔV = Velocidade relativa

τ_{ad} = Tensão de cisalhamento para cortar uma ligação adesiva

HV = Dureza *Vickers*

Figura 8: Componentes de adesão e penetração (deformação) no atrito.



Fonte: Folle (2012).

A rugosidade dos materiais tem uma forte influência na determinação de qual será o componente predominante no sistema. Em materiais de maior rugosidade há a predominância do mecanismo de deformação enquanto que em casos contrários onde o material apresenta um melhor acabamento superficial e como consequência uma baixa rugosidade há uma predominância do mecanismo adesivo. É importante salientar que ambos os mecanismos acontecem simultaneamente e não isoladamente. Outros aspectos que influenciam é o aumento de dureza devido ao encruamento do material e crescimento das junções (LUIZ, 2022).

Atrito é um dos fenômenos mais complexos a serem estudados em um tribossistema.. A forma em que ele se apresenta assim como sua complexa alteração em meio as variáveis o tornam uma das características mais desafiadoras dentro dos processos de conformação. Contudo, é de conhecimento que este elemento interfere no sistema com consumos exagerados de energia partindo do pressuposto que quanto maior o atrito maior a força necessária para se conformar o material (SILVA, 2020).

3.3.3 Efeito stick-slip

Dentre os fenômenos atrelados ao atrito destaca-se o *Stick-Slip*. Este fenômeno consiste na aderência entre duas superfícies com rugosidades reduzidas prosseguido pelo deslizamento entre elas. Este processo pode ser explicado pelo mecanismo de soldagem a frio no qual há uma interação atômica entre ambas as superfícies que é quebrada pela aplicação de força (DEMARCH *et al.*, 2023).

Stick-slip é considerado como pequenas alterações no regime de deslizamento, ou seja, pequenas alterações no regime de atrito dinâmico. Este regime é interrompido em pequenos intervalos de tempo onde ocorre o atrito estático seguido pela normalização do estado inicial (MIRANDA, 2021).

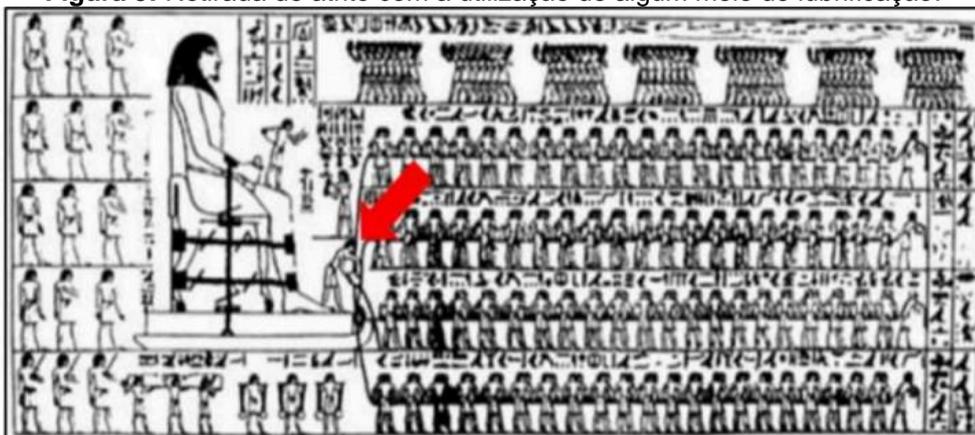
Este efeito pode ser observado em processos no qual há deslizamento entre dois corpos como por exemplo em processos de solda por fricção. Neste processo há uma elevação da temperatura devido a esse fenômeno no qual há uma aderência (*stick*) entre o metal e ferramenta que gira deformando o material e aumentando a

temperatura. Com esse aumento de temperatura há uma perda de adesão por parte do material com a ferramenta permitindo assim a movimentação conhecida como deslizamento (*slip*) (BARBOSA, 2021).

3.3.4 Lubrificação

Como forma de mitigar os efeitos do atrito em um tribossistema, é comum utilizar um filme lubrificante na interface de contato. Por exemplo, pode ser visto na Figura 9 uma imagem egípcia no qual há à presença de um homem possivelmente jogando ao chão algum tipo de fluido lubrificante como maneira de facilitar a locomoção de uma estátua (MILCHESKI *et al.*, 2023).

Figura 9: Retirada de atrito com a utilização de algum meio de lubrificação.



Fonte: Milcheski *et al.* (2023).

Lubrificante é qualquer substância colocada entre duas superfícies de contato com o intuito de promover um suave deslizamento e reduzir o atrito. Uma característica importante deste elemento é sua baixa resistência ao cisalhamento, o que possibilita que o processo de atrito se localize nesta película e não nas superfícies dos materiais em contato. Como consequência de sua utilização pode-se destacar o aumento da vida útil das ferramentas utilizadas caracterizado pela minimização dos aspectos tribológicos, uma suavização do movimento relativo entre os materiais e a refrigeração do sistema (HELMAN e CETLIN, 2010; SILVA, 2020; ELLWANGER, 2021).

Dentro da conformação mecânica de metais a presença de lubrificação e o seu desempenho é de extrema importância para um sistema. Deve-se atentar a variáveis como viscosidade, molhabilidade, aditivos utilizados assim como não afetar a peça

conformada após o processo pois deve ser de fácil retirada e não deve alterar a qualidade superficial (LUIZ, 2022).

Dentre o estudo da lubrificação na tribologia foi desenvolvida a curva de Stribeck conforme Figura 10. Esta curva apresenta os tipos de regime lubrificantes e traz a relação não linear entre coeficiente de atrito e número de Hersey (LUIZ,2022).

O primeiro regime é o regime limítrofe ou limite. Neste caso a película protetora é de uma espessura mínima possível podendo ser a níveis de moléculas depositadas superficialmente “monomoleculares”. Neste regime há uma maior interação entre as superfícies devido a camada lubrificante não conseguir separar completamente as superfícies em contato. Este regime apresenta maiores coeficientes e atrito e é mais afetado pela rugosidade dos materiais em comparação a espessura do filme (ELLWANGER, 2021; LUIZ, 2022).

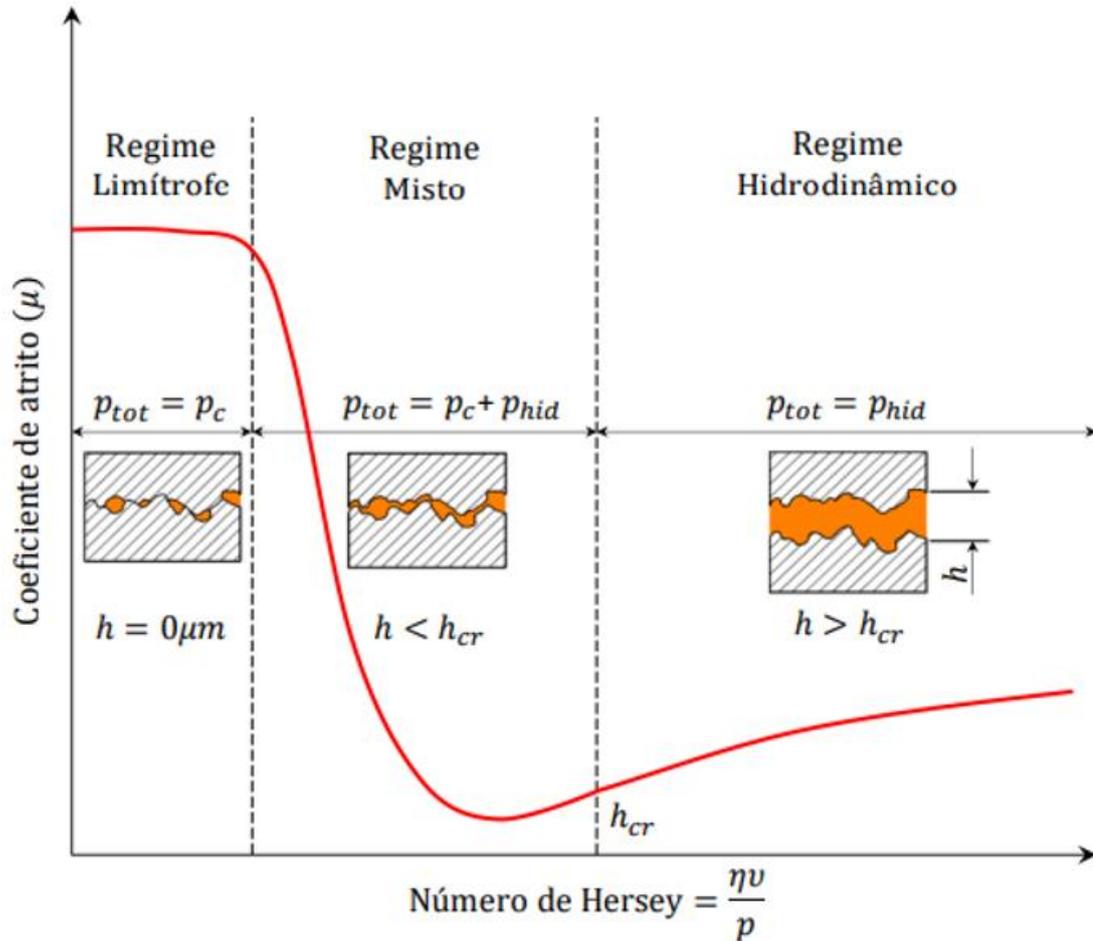
O segundo regime é o hidrodinâmico no qual pode ser obtida uma situação conhecida como ideal devido a formação completa de um filme entre as superfícies. A idealidade é devido a não haver contato entre as asperezas dos materiais levando a redução do atrito e desgaste. Entretanto, para condições de variação de carga normal e de altas velocidades, como exemplo da conformação de chapas metálicas, este regime dificilmente irá acontecer (ELLWANGER, 2021; LUIZ, 2022).

O regime misto é a mistura dos dois regimes sendo essa a condição mais encontrada em processos de conformação mecânica de chapas metálicas. Dentro deste regime os picos na interface metálica apresentam condições limites de lubrificação enquanto que nos vales há a formação dos popularmente conhecidos “bolsões de óleo” no qual compreende na formação de um regime hidrodinâmico devido aos vales estarem cheios de óleo. (ELLWANGER, 2021; LUIZ, 2022).

Um quarto regime, não apresentado na curva de Strilbeeck, é o regime de atrito seco. Neste regime não há a utilização de lubrificante, ou seja, não há uma película para mitigar os efeitos do atrito. Esta condição é utilizada ara materiais de excelente conformabilidade e em casos onde a condição de atrito não apresenta uma influência significativa na qualidade da peça (LUIZ, 2022).

A rugosidade das superfícies é um fator de extrema importância na ação dos lubrificantes. A depender do volume de espaços livres entre as cavidades haverá uma melhora na atuação dos lubrificantes (SILVA, 2020).

Figura 10: Curva de Stribeck.



Fonte: Luiz (2022).

3.3.5 Rugosidade

A rugosidade corresponde ao conjunto de irregularidades presentes em uma superfície, incluindo saliências e reentrâncias. O tamanho e a distribuição dessas irregularidades desempenham um papel fundamental no desempenho de peças e instrumentos promovendo alterações significativas no coeficiente de atrito (MENEZES; KISHORE; KAILAS, 2008; BIASIBETTI et al., 2019).

Em seus trabalhos, Trzepieciniski (2019) observou duas relações entre atrito e

3.4 AÇOS PARA ESTAMPAGEM

Com a visão de se ter um processo saudável e autossuficiente, a busca pelo controle das variáveis de processo, como a exemplo dos aspectos tribológicos citados, são um passo importante para a saúde do sistema. Entretanto, apenas o conhecimento sobre estas variáveis não é a única forma de se ter um resultado ótimo (SOUSA, 2021; LUIZ,2022).

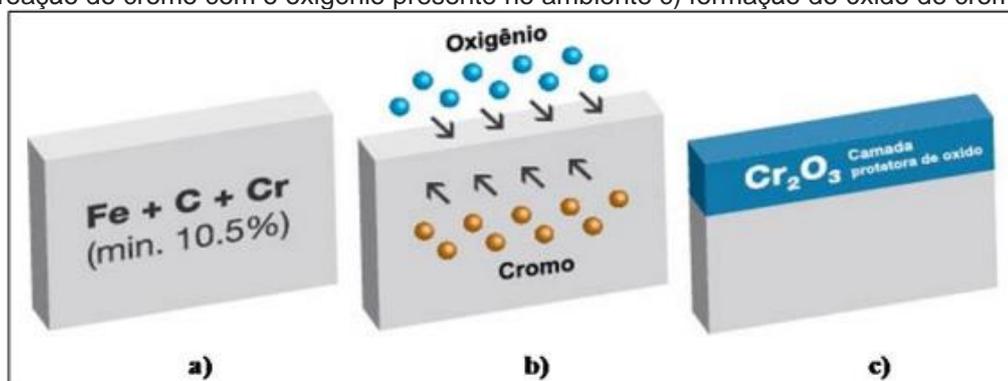
Além de saber o que se deve controlar, o conhecimento do material destinado a essa aplicação é algo fundamental para o processo. Dentro da estampagem a composição química do material, propriedades físicas, estrutura cristalina e seu grau de conformabilidade são características cruciais para um bom método de embutimento. Sendo assim, materiais como alumínio, cobre, ligas não ferrosas assim como aços inoxidáveis e aços baixo carbono são amplamente utilizados neste segmento de mercado (SOUSA, 2021; LUIZ,2022).

3.4.1 Aços resistentes a corrosão

Comumente chamados de aços inoxidáveis, os aços resistentes a corrosão são ligas compostas principalmente pelos elementos ferro, carbono e cromo sendo este último elemento com um valor mínimo de 10,5% da composição química. Dentre suas principais características se destacam suas propriedades mecânicas, sua processabilidade assim como sua disponibilidade no mercado. São materiais inertes e que podem ser obtidos a partir de processos de reciclagem (SILVA e MEI, 2021; LUIZ, 2022; SOUSA, 2021 e FLORENCIO, 2022).

O termo resistência a corrosão se deve principalmente a presença de cromo em sua composição química. Este elemento é um dos principais responsáveis pela passivação do material, ou seja, a formação de uma camada passiva originária da oxidação seletiva do cromo. Devido a sua estabilidade esta camada de passivação permite que em meios corrosivos o material tenha uma alta resistência. A Figura 12 demonstra esquematicamente este processo (SILVA e MEI, 2021; SOUSA, 2021; e FLORENCIO, 2022).

Figura 12: Formação da camada passiva em aços inoxidáveis. a) material livre de contaminantes. b) reação do cromo com o oxigênio presente no ambiente c) formação do óxido de cromo.



Fonte: Sousa, A. (2021).

O jargão inoxidável é um conceito popular amplamente utilizado, entretanto não remete a verdadeira natureza do processo já que para se garantir as propriedades primordiais para utilização desse material se faz necessário a formação de uma camada passivadora derivada da oxidação do cromo. Devido a essa característica especial os aços resistentes a corrosão podem ser utilizados em indústrias químicas, automotivas, farmacêuticas entre outras (SOUSA, 2021; SILVA e MEI, 2021; LUIZ, 2022 e FLORENCIO, 2022).

Os aços inoxidáveis podem ser classificados conforme suas estruturas onde se destacam seus principais elementos de liga assim como a estrutura cristalina do material pós tratamento térmico, tal como descritos nos tópicos a seguir (SOUSA, 2021; SILVA e MEI, 2021; FLORENCIO, 2022):

- Os aços austeníticos apresentam estrutura austenítica Cúbica de Face Centrada (CFC) e tem como principais elementos de liga o Cromo e Níquel. Os principais aços desta classe são 301, 302, 304, 304L, 308, 310, 316, 316L, 317, 321, 347, 201, 202 e 204.
- Os aços ferríticos apresentam estrutura ferrítica Cúbica de Corpo Centrado (CCC) e tem como principais elementos de liga cromo e molibidênio assim como a presença de titânio e nióbio. Os principais aços desta classe são os aços 405, 409, 430, 439, 441.
- Os aços Duplex apresentam uma estrutura mista austenítica e ferrítica com elementos de liga como Cromo, Níquel e Molibidênio. Os principais

aços desta classe são AISI 329, UNS S32304, UNS S31803.

- Os aços Martencíticos apresentam uma estrutura martencítica Tetragonal de Corpo Centrado(TCC). Os principais aços desta classe são 403, 410, 414, 416, 420, 431, 440A, B e C.
- Os aços Endurecíveis por precipitação apresentam estrutura Austenítica ou Martensítica e tem como principais elementos de liga Cromo, Níquel e Molibidênio.

Em suma, as diferenciações destes aços são mais acentuadas devido a estrutura cristalina final obtida. Dentre estas gamas de materiais para a estampagem se destacam os aços Austeníticos e Ferríticos devidos as suas propriedades mecânicas e sua facilidade de ser conformado tendo em vista os demais materiais. Entretanto, questões econômicas como custo de produção e venda são fatores que também designam a escolha adequada do material (Luiz, 2022).

3.4.2 AISI 316L

Dentro da família dos aços inox austeníticos destaca-se o aço inox 316L ou AISI 316L conforme *American Iron And Steel Institute* (AISI). Devido ao baixo teor de carbono (<0,03%) esse aço recebe em seu nome a letra “L” que o diferencia do aço AISI 316. Esta redução é uma alternativa para conter a formação de carbeto de cromo precipitados nos contornos de grão que geram uma redução na resistência a corrosão deste material devido a corrosão intragranular denominada sensitização. A composição química destes dois aços conforme a norma ASTM A276-06 (2017) está descrita na Tabela 1(GUIMARÃES, 2022; FLORENCIO, 2022)

Tabela 1: Composição química dos aços AISI 316 e AISI 316L.

Aço	C (% máx.)	Mn (% máx.)	P (% máx.)	S (% máx.)	Si (% máx.)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)
316	0,08	2	0,045	0,03	1	16 a 18	10 a 14	2 a 3
316L	0,03	2	0,045	0,03	1	16 a 18	10 a 14	2 a 3

Fonte: Adaptado de Guimarães (2022).

Uma outra consequência oriunda da redução deste elemento está nas propriedades mecânicas. Os aços 316L apresentam propriedades inferiores se comparado ao 316. Na Tabela 2 é possível visualizar um comparativo das propriedades mecânicas dos

dois materiais conforme a norma ASTM A276-06 (2017).

Tabela 2: Propriedades mecânicas dos aços AISI 316 e AISI 316L.

Aço	Tensão limite de escoamento (MPa)	Tensão limite de resistência (MPa)	Alongamento mínimo na direção longitudinal (%)	Alongamento mínimo na direção transversal (%)
316	205	515	35	25
316L	170	485	35	25

Fonte: Adaptado de Guimarães (2022).

Devidos as suas características mecânicas e químicas, o AISI 316L é muito utilizado em fabricações de válvulas, tubos, peças para indústrias químicas e petrolíferas entre outras. Todavia, sua aplicação como biomaterial em dispositivos cirúrgicos e ortopédicos merece destaque pois demonstra sua versatilidade frente ao mercado (FLORENCIO, 2022).

Os aços inoxidáveis autênticos são metaestáveis onde podem ocorrer mudanças em suas características, como exemplo as mudanças de fases, através de alterações no sistema. O efeito TRIP (*Transformation Induced Plasticity*) é um exemplo da mudança de fase dos aços austeníticos através de processos de conformação a frio. Nesta etapa a austenita metaestável pode ser transformada em martensita alfa linha (α') e épsilon (ϵ), duas variantes da fase martensítica. A mudança pode ser gerada por fatores térmicos e através da conformação do material. Transformações martensíticas são adifusionais pois ocorre através de cisalhamento dos planos cristalográficos gerado a partir da fase austenítica promovendo a nucleação da nova fase. Através destas mudanças os AISI 316L tem uma melhora em suas propriedades mecânicas como aumento da dureza e limite de resistência. Essa alteração também é promovida pelo aumento do número de discordâncias no material caracterizando o processo de encruamento. (MAEQUES *et al.*, 2019; RODRIGUES, 2021 e FLORENCIO, 2022).

3.4.3 AISI 409

O Aço AISI 409 é um outro material pertencente a classe de aços resistentes a corrosão no qual está contido no grupo de aços ferríticos. Este aço é muito utilizado nos setores automotivos nos quais são necessárias características como

conformabilidade, resistência a corrosão e boa soldabilidade, características cruciais para sua utilização. Ademais, a utilização deste aço em sistemas de exaustão de carros mostra sua versatilidade em uma parte do equipamento sujeita a grandes ciclos térmicos sendo necessárias excelentes propriedades mecânicas, resistência a fadiga e a corrosão (SILVA e MORAIS, 2020).

Os aços ferríticos apresentam estrutura ferrítica (CCC) em temperatura ambiente. Esta classe de aço apresenta características favoráveis a seu uso em sistemas de exaustão como baixo coeficiente de expansão térmica e resistências a corrosão em altas temperaturas. Todavia, características como facilidade de serem cortados e trabalhados e suas propriedades mecânicas tornam esta classe de aço suscetível a utilização na estampagem (LUIZ, 2022; PANEDO, 2023).

Como desvantagens, esta classe de material apresenta baixa tenacidade e plasticidade além de elevada temperatura de transição dúctil-frágil que são características desfavoráveis a sua utilização em processos de conformação. Entretanto questões econômicas como o preço do Níquel, elemento muito utilizado em aços austeníticos como exemplo do 316L acima citado, têm feito com que cada vez mais esta família de aço ganhe espaço neste mercado devido ao baixo custo (LUIZ, 2022).

Devido a composição química destes aços eles podem apresentar transformações de fases indesejadas como transformações austeníticas e martensíticas. Isso pode ser desenvolvido através da presença de elementos residuais como Nitrogênio e Carbono. Contudo, utiliza-se da estabilização destes elementos onde com a inserção de componentes como Titânio e Nióbio há a formação de carbonetos e nitretos o que reduz os teores de elementos residuais. Estas estabilizações são denominadas como Estabilização com Titânio, Estabilização com Nióbio e Estabilização com Titânio e Nióbio (PANEDO, 2023).

3.5 AÇOS CARBONO

Dentre a vasta quantidade de materiais utilizados para conformação mecânica destacam-se os aços carbono. Estes aços são de maior produção mundial e

empregados em várias aplicações. Uma de suas principais classificações é dada de acordo com a porcentagem de carbono encontrada em sua composição sendo nomeados como aços de baixo, médio e alto carbono (LIMA, 2022).

Quanto as características mecânicas a porcentagem de carbono apresenta uma grande influência em aspectos como dureza, tenacidade e ductilidade. Aços baixo carbono apresentam alta tenacidade e ductilidade assim como baixa dureza. Em contrapartida aços de médio e alto carbono apresentam baixa ductilidade e tenacidade assim como alta dureza e resistência se comparado aos aços de baixo teor de carbono (LIMA, 2022).

A utilização destes aços na conformação mecânica parte da necessidade de materiais com boa conformabilidade e baixo custo. Todavia, sua utilização em processos de conformação parte da melhor combinação possível destes dois aspectos o que pode ser obtido em aços de baixo e ultrabaixo teor de carbono (SILVA e MEI, 2021).

3.5.1 Aços livres de interstícios (IF)

Devido ao avanço do setor automobilístico mundial inicia-se a corrida para produção de aços adequados a esse mercado. A partir da década de 1970 no Japão começa a ser produzido o aço IF (*Interstitial Free*) que se traduz como aços livres de intersticiais. Estes aços apresentam valores de carbono e nitrogênio entre 20 e 30 ppm (0,002 – 0,003%) com adição de outros elementos de liga como manganês e titânio. O baixo teor destes elementos intersticiais possibilita que esse aço tenha interstícios livres (SILVA e MEI, 2021 e DIAS, 2023).

Para-se produzir este aço parte da utilização de elementos como titânio e nióbio. Estes elementos tem como função a formação de carbonitretos que auxiliam na remoção do carbono e nitrogênio em solução sólida. Com a remoção destes elementos associados a processos eficazes de laminação é possível produzir um material com baixo limite de escoamento, elevado alongamento e boas propriedades de estampagem. Os aços IF podem ser classificados de acordo com o elemento formador de carbonetos utilizado; sendo (IF-Ti) adição de Titânio, (IF-Nb) adição de Nióbio e (IF-Nb+Ti) adição de nióbio e titânio (DIAS, 2023).

A produção deste aço só foi possível com a utilização de um processo de desgaseificação a vácuo no qual a interação eficaz entre carbono e oxigênio possibilitou a produção deste material em grandes escalas. Todavia, antes se fazia necessário a utilização de grandes quantidades de elementos de liga tornando a produção deste material cara para o mercado (MORAES e CARVALHO, 2016).

Como características gerais do aço IF as Tabelas 3 e 4 apresentam valores médios de composição química e propriedades mecânicas respectivamente.

Tabela 3: Propriedades mecânicas médias do aço IF recozido em caixa.

Aço	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	Ti (%)
IF	0,0059	0,144	0,007	0,016	0,009	0,044	0,076

Fonte: Adaptado de Inácio (2013).

Tabela 4: Propriedades mecânicas médias do aço IF recozido em caixa.

Aço	LE (MPa)	LR (MPa)	Al (%)	HRB	r
IF	140,0	308,0	46,2	39,0	1,7

Fonte: Adaptado de Inácio (2013).

Na Tabela 4, as propriedades LE, LR, AL, HRB e r representam Limite de escoamento, Limite de Resistência, Alongamento, Dureza Rockwell B e Coeficiente de Anisotropia, respectivamente. Observa-se que este aço apresenta excelentes propriedades mecânicas para sua utilização em processos de estampagem. Entretanto, devido ao fato de ter baixos valores de elementos intersticiais em sua matriz a resposta deste material irá depender para qual fim ele será utilizado. Uma outra consequência de suas características está atrelado ao processos de endurecimento como envelhecimento (precipitação) e encruamento. Esses mecanismos não são tão eficazes como consequência do baixo valor de elementos intersticiais. Todavia, como mecanismos de endurecimento deste material se destaca o endurecimento ao fogo ou cura da pintura no qual com a utilização de temperatura no processo de pintura a quente há um ancoramento de elementos em solução sólida nas discordâncias geradas pelos processos de estampagem e/ou encruamento. Este ancoramento acarreta em ganho na resistência mecânica (INÁCIO, 2013; FIETO, 2013).

Em suma os Aços IF são amplamente utilizados nos setores automotivos assim como

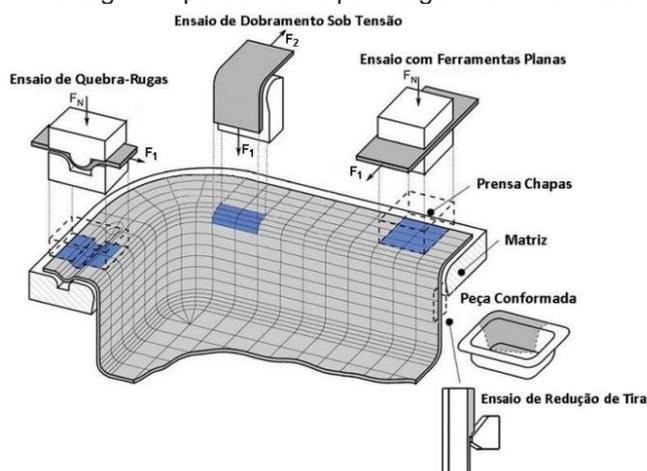
na produção de embalagens e confecção de componentes eletrônicos. Sua ampla utilização esta atrelada a suas excelentes características para estampabilidade como auto coeficiente de anisotropia e alta ductilidade (INÁCIO,2013; SILVA e MEI, 2021; DIAS, 2023).

3.6 ENSAIO DE DOBREMENTO SOB TENSÃO

Conhecer o comportamento de um material, assim como as variáveis de processos que afetam esses comportamentos, é de grande importância para os setores de produção. Vários parâmetros afetam os processos de conformação mecânica; esses parâmetros podem levar a perdas significativas de materiais devido a falhas. Sendo assim, conhecer o atrito e as regiões críticas do processo é de grande valia para a conformação mecânica de metais. (SILVA, 2017; LUIZ, 2022).

Na estampagem, o conhecimento desses parâmetros é obtido por meio da aplicação de testes laboratoriais, como o ensaio de dobramento sob tensão, em inglês chamado de *Bending Under Tension* (BUT). Outros ensaios, como o DBT (*Draw Bead Test*) e o SDT (*Strip Drawing Test*), conhecidos respectivamente como ensaio de freio de estampagem e ensaio de estampagem de tira, são amplamente utilizados para a obtenção de parâmetros para o processo. Na Figura 13 está esquematizado o embutimento profundo de uma chapa metálica, com a representação de alguns ensaios utilizados. Pode-se observar a real condição de ensaio, destacando-se o BUT (TRZEPIECINSKI, 2019; LUIZ, 2022).

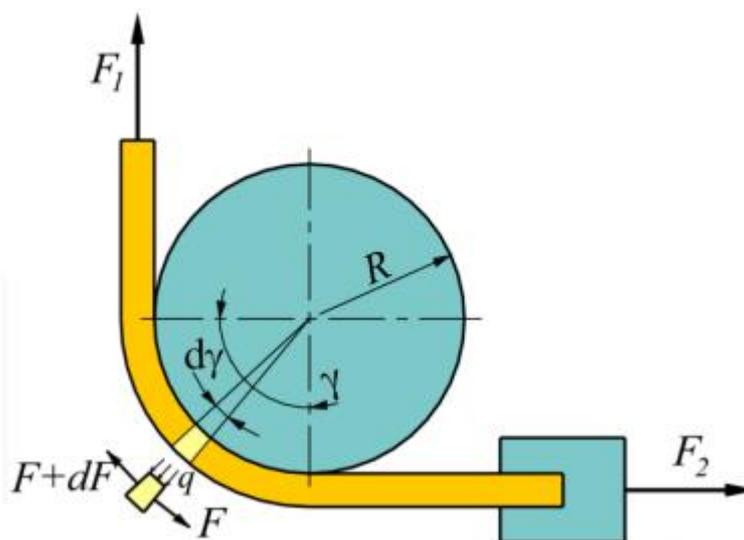
Figura 13: Modelagem representativa para alguns ensaios tribológicos.



Fonte: Silva (2017).

O ensaio BUT, introduzido por Littlewood e Wallace em 1964, compreende o dobramento e deslizamento de uma tira de aço ao redor de um raio, simulando a ferramenta de dobramento, conforme ilustrado na Figura 14. Na indústria, para esta etapa do processo, estão caracterizados os efeitos do dobramento e estiramento na chapa. (TRZEPIECINSKI, 2019; LUIZ, 2022).

Figura 14: Representação do ensaio BUT.



Fonte: Trzepiecinski (2019).

Este ensaio tem a capacidade de estabelecer valores de atrito que simulam os processos mecânicos experimentados pelas chapas nas regiões dos raios. Para determinar esses valores, utilizam-se as forças F_1 e F_2 que são empregadas na equação do coeficiente de atrito, apresentada na Equação 3. Nessa equação, considera-se que há pinos fixos e um ângulo de dobramento de 90° (LUIZ, 2022)

$$\mu = \frac{2}{\pi} \ln \frac{F_1}{F_2} \quad (3)$$

Entretanto, também se dispõe da Equação 4 para calcular a força de atrito, a qual é utilizada para pinos livres e fixos, bem como outras variáveis, como o raio de dobramento, a espessura da chapa e a força de dobramento. (LUIZ, 2022)

$$\mu = \frac{2}{\pi} \left(1 + \frac{t_0}{2R} \right) \ln \left(\frac{F_1 - F_b}{F_2} \right) \quad (4)$$

Onde:

F_1 = Força de atrito do pino fixo

F_2 = Força de contratensão, pino fixo

t_0 = Espessura da chapa

R = Raio do pino de dobramento

F_b = Força de dobramento

Observa-se uma dependência da Equação 4 em relação à força de dobramento F_b . Para o cálculo dessa força, utiliza-se a Lei de Swift, de 1948, demonstrada na Equação 5 (LUIZ, 2022).

$$F_b = \frac{S_y t^2 w}{2R} \quad (5)$$

Onde:

S_y = Limite de escoamento

t = Espessura da chapa

w = Largura da chapa

R = Raio do pino de dobramento

A força F_1 necessária para movimentação da chapa em um pino de dobramento pode ser descrita pela Equação 6 onde F_f é a força de atrito.

$$F_1 = F_2 + F_b + F_f \quad (6)$$

Trzepieciniski (2020) utilizou deste ensaio para diferentes chapas metálicas com diferentes graus de qualidade sendo elas *drawing quality* (DQ), *deep drawing quality* (DDQ) e *extra deep drawing quality* (EDDQ). Em seu trabalho foi utilizado um diâmetro de 20 mm e velocidade de 3 mm s⁻¹ assim como dois regimes de lubrificação sendo eles regime seco e lubrificado. Ademais, foram utilizados diferentes estágios de deformação para obtenção do coeficiente de atrito.

Em ambos os sistemas Trzepiecinski (2020) observou um aumento da força de atrito com o aumento dos valores de deformação. Outro ponto de discussão é que durante os ensaios as chapas metálicas sofrem aumento de suas resistências mecânicas que como consequência a dureza dos mesmos. Contudo, é escrito que quanto maior o alongamento da amostra maior a pressão de contato e como consequência menor será a eficiência da lubrificação. Estes aspectos explicam o aumento do coeficiente de atrito conforme os estágios crescentes de deformação.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada no trabalho se divide em três etapas (03) etapas conforme Na primeira etapa foi feita a caracterização do material que consiste em análises químicas e mecânicas dos quatro (04) aços que foram estudados. A segunda fase compreende os ensaios de estampabilidade, ensaio BUT, para aquisição de dados e obtenção dos coeficientes de atrito. A terceira etapa consiste na avaliação dos resultados e na redação do TCC.

Todos os procedimentos experimentais apresentados foram feitos nos Laboratório de Química, Metalografia e de Ensaios Mecânicos do Departamento de Metalurgia e Química (DMQ-TM) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) Campus Timóteo.

4.1 MATERIAIS

As amostras de aços inoxidáveis AISI409 e AISI316L fornecidas pela Aperam South America. A amostra de aço AISI409 apresenta acabamento 2D e espessura de 1 mm. Já o aço AISI316L apresenta acabamento 2B e espessura de 0,8 mm. Os acabamentos são nomeados conforme ASTM A480/A480M (2020). O fluxo de processamento para esses dois materiais são bem parecidos. Ambos os materiais são submetidos ao processo de laminação a frio, recozimento e decapagem. Entretanto, o que difere um acabamento 2B do 2D é que o primeiro recebe um passe de laminação de acabamento (*Skin Pass*) para aumento de dureza superficial ao contrário do segundo. As composições químicas obtidas dessas chapas de aço, em conformidade com a norma ASTM A240/A240M (2020), estão listadas na Tabela 5.

Tabela 5: Composição química aços AISI 409 e AISI 316.

Aço	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)
AISI409	0,052	0,188	0,486	0,029	0,001	11,006	0,232	0,025
AISI316L	0,014	1,319	0,434	0,036	0,002	16,557	10,182	2,000

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Um segundo par de amostras utilizados são os Aços Carbono IF. A título de

nomeação das amostras foram adotados como IF01 e IF02. Ambos os aços apresentam 0,67 mm de espessura e a composição química é conforme Tabela 6.

Tabela 6: Composição química das chapas de aço IF.

Aço	C (%)	Mn (%)	Ti (%)	Nb (%)	Al (%)	N (%)	Si (%)	P (%)
IF01	0,003	0,09	0,06	0,002	0,04	0,002	0,007	0,005
IF02	0,001	0,1	0,04	0,002	0,05	0,002	0,006	0,01

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O lubrificante utilizado no ensaio foi o óleo a base mineral típico de conformação a frio da marca GREASE, tipo US1 CUT LS 120, com viscosidade cinemática de 120 Mpa s⁻¹ e uma densidade de 0,894 g cm⁻³.

4.2 EQUIPAMENTOS

As medidas de rugosidade foram realizadas com o auxílio de um rugosímetro digital da marca TESA, modelo Rugosurf 20 conform Figura 15, no qual fornece os seguintes parâmetros de rugosidade: média (Ra), Desvio médio dos quadrados (Rq), Rugosidade máxima (Rz) e Rugosidade total (Rt).

Figura 15: Rugosímetro digital TESA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A avaliação da dureza do material foi realizada por meio de um durômetro *Vickers* da marca Shimadzu, modelo HMV-2T, conforme mostrado na Figura 16.

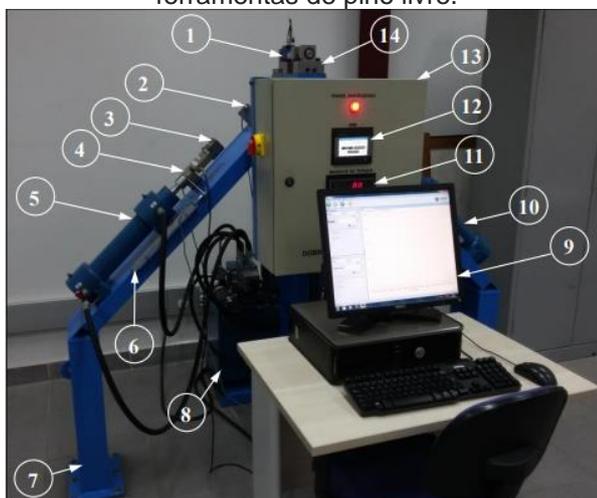
Figura 16: Microdurômetro *Vickers*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os ensaios de atrito foram feitos no simulador conforme Figura 17.

Figura 17: Tribossimulador (1) sensor de torque; (2) sensor de proximidade indutivo; (3) garra; (4) célula de carga; (5) cilindro hidráulico dianteiro; (6) sensor de posição LVDT; (7) estrutura de montagem; (8) unidade hidráulica; (9) computador com software de aplicação; (10) cilindro hidráulico traseiro; (11) sensor de torque; (12) interface homem-máquina; (13) painel de controle; (14) porta-ferramentas de pino livre.



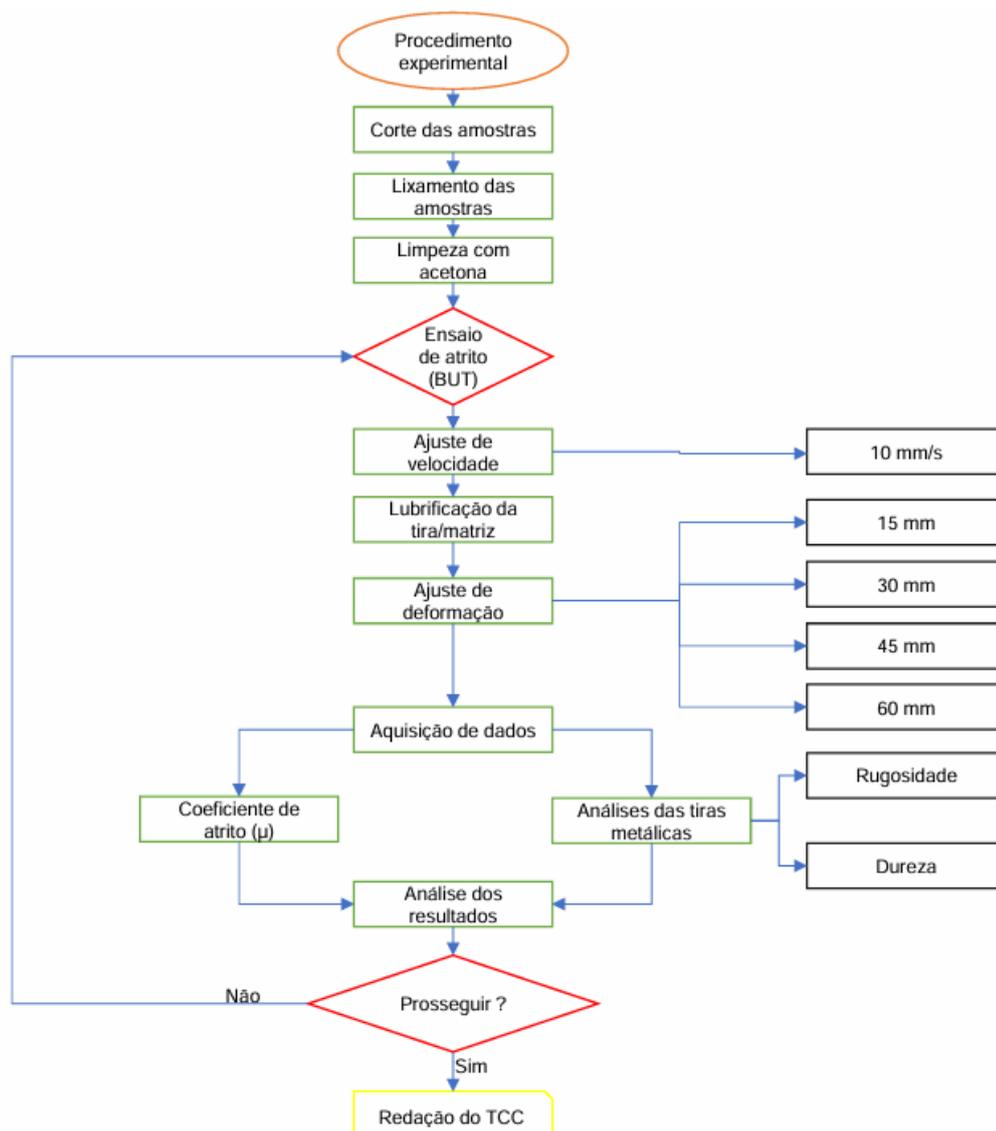
Fonte: Luiz (2022).

Um Sistema de Aquisição de Dados (SAD) desenvolvido pela empresa Loadstar Sensors fo utilizado para aquisição dos dados experimentais para obtenção das forças de atrito. O equipamento dispões do *software* SensorVUE para a aquisição dos dados em tempo real, os quais posteriormente foram tratados em uma planilha do Excel para desenvolvimento e análise dos gráficos.

4.3 MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho foi conforme Figura 18.

Figura 18: Representação esquemática da metodologia utilizada no trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Inicialmente os corpos de prova utilizados no trabalho tiveram suas bordas lixadas para a retirada de qualquer resquício de rebarbas provenientes do corte no qual podem afetar a fase experimental. Após esta etapa, as amostras foram limpas com acetona e secadas utilizando algodão.

A próxima etapa foi o ensaio para obter os valores de rugosidade do material.

Utilizando o rugosímetro foi feita dez medições no sentido horizontal da peça e dez medições no sentido vertical obtendo assim os valores de R_a , R_q , R_t e R_z , e a média das medições foi considerada como o resultado final.

Posteriormente, foi executado o ensaio de dureza *Vickers* utilizou--se uma carga de 9,8 N durante 15 segundos. Dez medições foram feitas em áreas distintas da chapa de aço. A média das dez medições foi considerada como o resultado final.

Para obtenção dos valores de atrito foi utilizado o ensaio BUT por meio do tribossimulador. Os parâmetros iniciais estabelecidos para os ensaios simulativos são conforme Tabela 7 e foram obtidos através de ensaios preliminares. Estes ensaios buscaram a determinação da deformação máxima que os corpos de prova suportariam e como resultado foi possível determinar os valores de deformação estabelecidos pela tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros de pesquisa.

Parâmetros	Especificação
Tipo de ensaio	BUT
Velocidade de ensaio mm s^{-1}	10
Condição de contato	Lubrificado
Alongamento em mm	15, 30, 45 e 60
Raios das ferramentas em mm	6 e 16,5
Rugosidade das ferramentas em μm	0,54
Equação para cálculo de coeficiente de atrito	Eq. 3

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

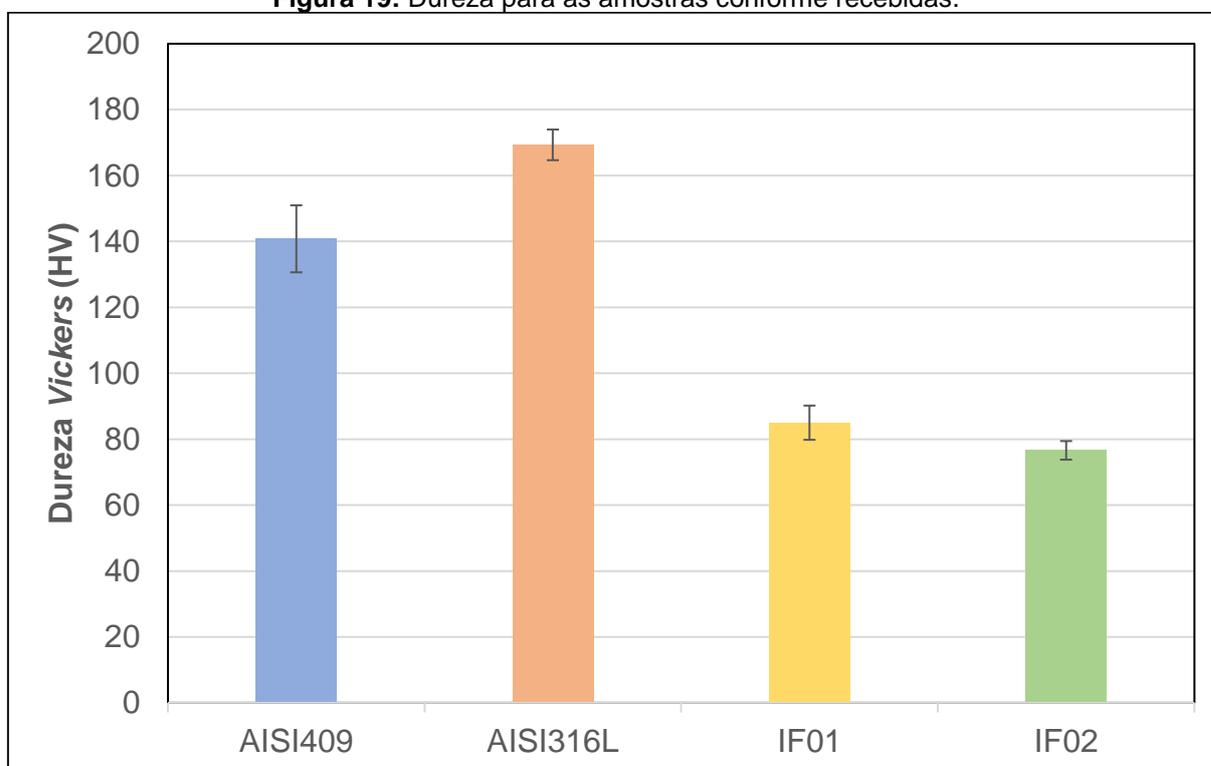
O tribossimulador utiliza dois cilindros de trabalho para movimentação das chapas. As tiras de aço são fixadas nas extremidades de ambos os cilindros onde um cilindro movimenta verticalmente enquanto o segundo cilindro permanece estático. A velocidade é medida por meio de um sensor de deslocamento LVDT, o qual é acoplado à haste do cilindro. Uma das extremidade da tira permite que a mesma tensionada deslize enquanto a outra extremidade está presa ao cilindro estático. Através do *software* SensorVUE é possível ter as medidas das forças F_1 e F_2 atuantes através de cada cilindroqu foram utilizadas para os cálculos de atrito.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

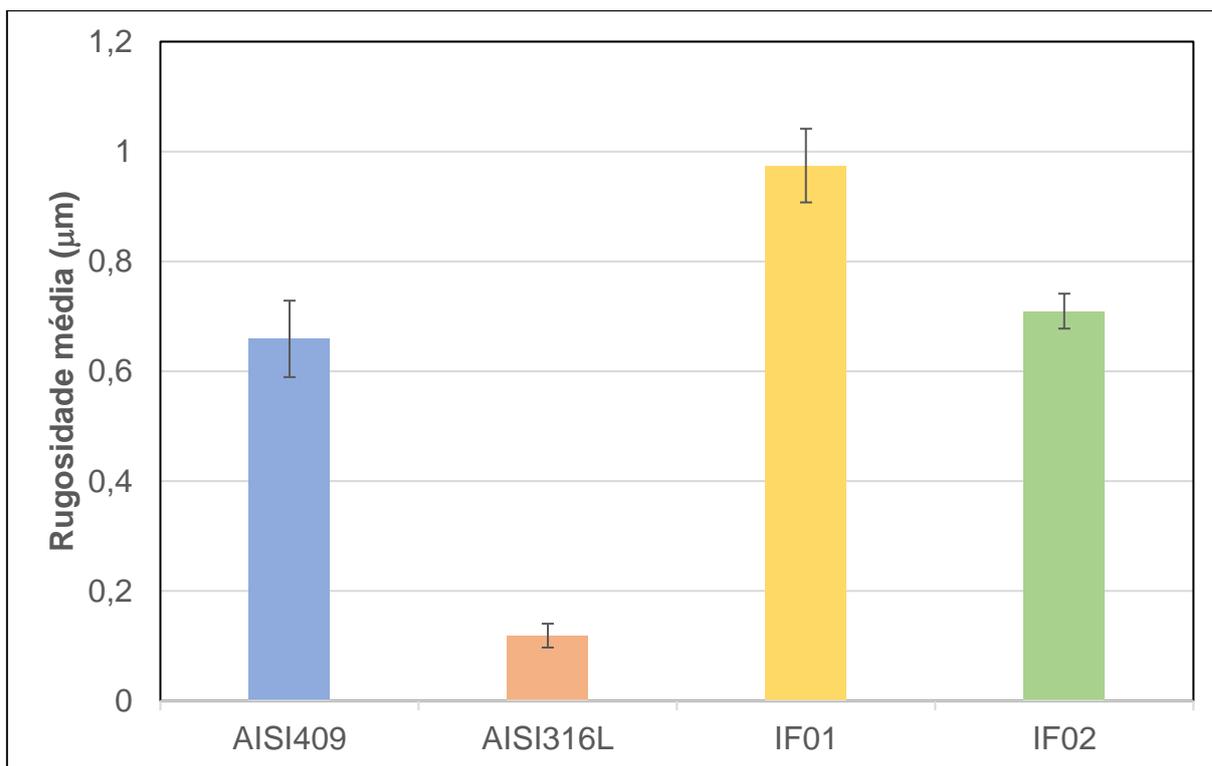
Os valores de dureza de cada amostra conforme recebido são apresentados na Figura 19. Os aços AISI409 e AISI316L apresentaram dureza inicial de 140,9 e 169,31 HV, o que está de acordo com a norma ASTM A240 (2020), que apresenta uma dureza máxima estimada de 150 e 200 HV, respectivamente. Os aços IF apresentaram dureza inicial de 85 e 76 HV, respectivamente.

Figura 19: Dureza para as amostras conforme recebidas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

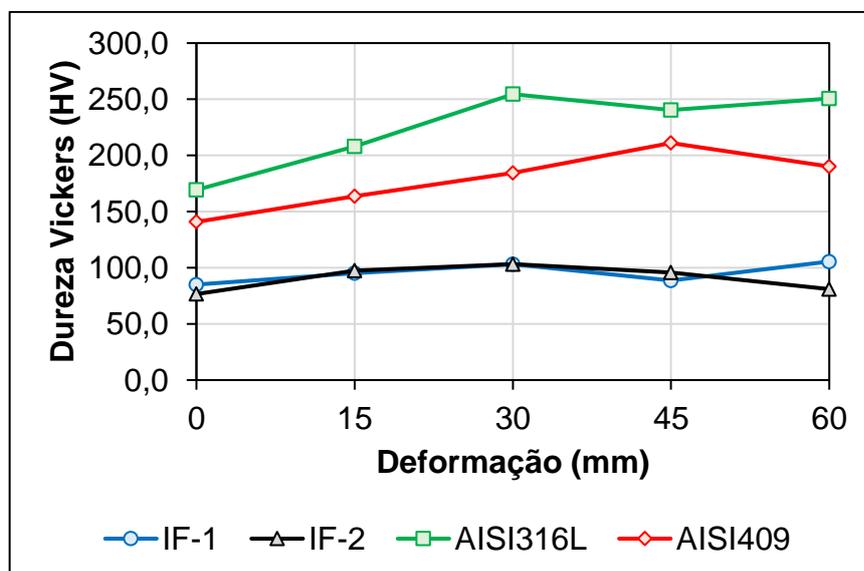
Os valores de rugosidade média Ra de cada amostra conforme recebido no sentido transversal são apresentados na Figura 20. Os aços AISI409 e AISI316L apresentaram rugosidades iniciais de 0,6588 e 0,1186 μm , respectivamente. Os aços IF apresentaram rugosidades iniciais de 0,9744 e 0,7093 μm , respectivamente.

Figura 20: Rugosidade média para as amostras conforme recebidos

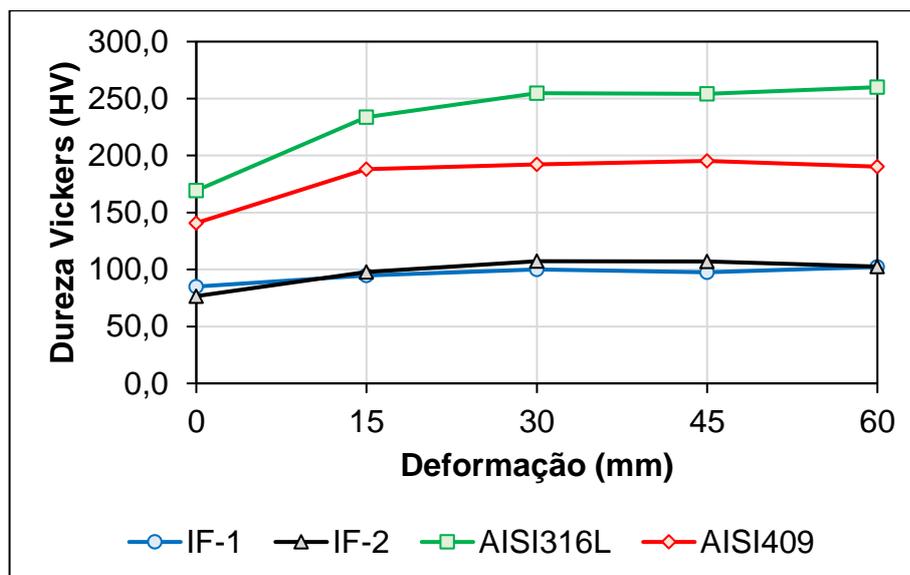
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.2 DUREZA

A Tabela 8 apresenta os valores de dureza das tiras metálicas. Graficamente esses valores podem ser visualizados nas Figuras 21 e 22.

Figura 21: Dureza média R6

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

. **Figura 22:** Dureza média R16,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 8: Dureza média.

Aço	Deformação (mm)	R6		R16,5	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
IF1	0	85,00	5,19	85,00	5,19
	15	95,27	12,12	94,81	6,63
	30	103,24	8,90	100,06	4,04
	45	88,60	7,72	97,45	3,74
	60	105,52	8,16	102,31	8,38
IF2	0	76,61	2,82	76,61	2,82
	15	97,54	12,65	97,78	4,31
	30	103,24	8,90	107,25	6,09
	45	95,85	3,43	106,91	6,78
	60	81,08	4,99	102,58	9,34
AISI316L	0	169,31	4,65	169,31	4,65
	15	207,93	7,40	233,70	8,79
	30	254,50	13,57	254,75	13,55
	45	240,55	9,61	254,20	6,02
	60	250,63	3,87	260,01	7,16
AISI409	0	140,80	10,16	140,80	10,16
	15	163,60	17,78	188,06	9,61
	30	184,45	8,08	192,23	9,72
	45	211,03	20,98	195,26	10,90
	60	190,15	10,64	190,15	10,64

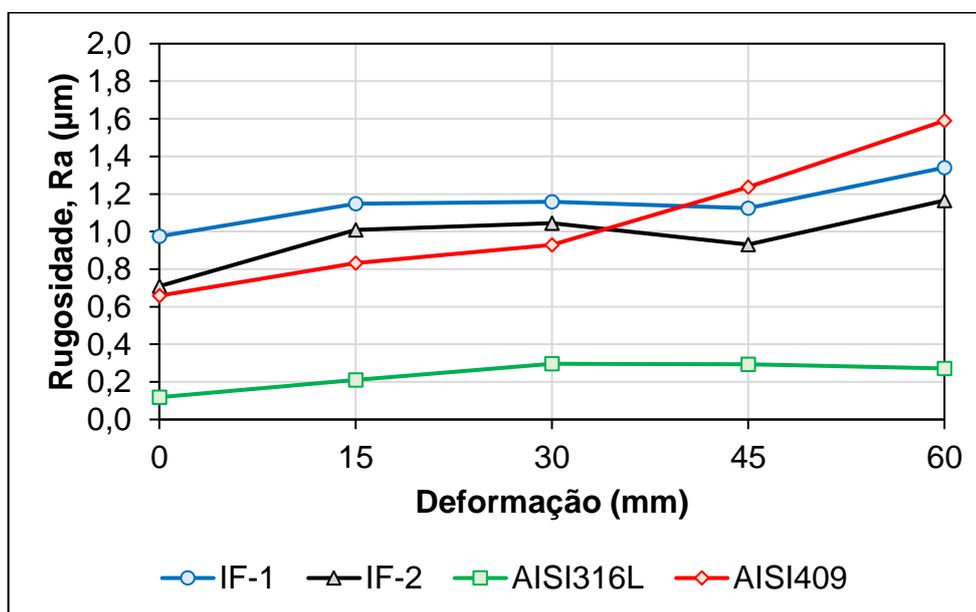
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em ambos os raios de dobramento, houve um aumento da dureza dos materiais a medida que há o aumento do alongamento. Observa-se um maior incremento nos aços inoxidáveis, o que pode ser caracterizado pelo encruamento das asperezas da superfície da tira metálica por deformação a frio. Para os aços IF, devido ao baixo teor de elementos intersticiais em sua matriz, mecanismos de endurecimento, como envelhecimento (precipitação) e encruamento, não são tão eficazes, o que remete ao baixo incremento em seus valores. Todavia, é importante salientar que o aumento de dureza das asperezas da superfície tende a causar um aumento na tensão de cisalhamento. Como resultado, o coeficiente de atrito também tende a aumentar (INÁCIO, 2013; FIETO, 2013; LUIZ et al., 2020).

5.3 RUGOSIDADE

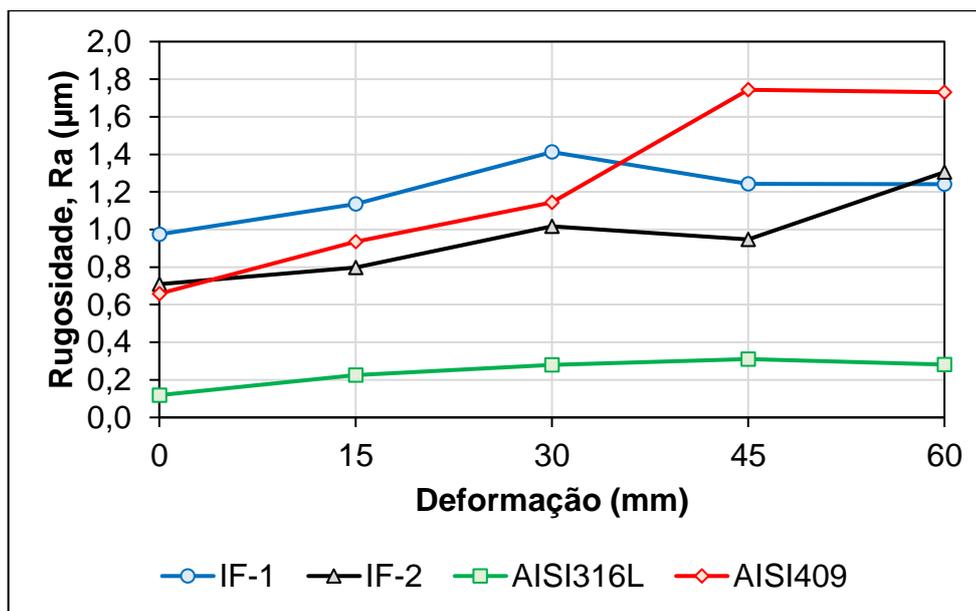
Os valores de rugosidade das tiras metálicas são representados conforme Figuras 23 e 24 e Tabela 9

Figura 23: Rugosidade média R6.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 24: Rugosidade média R16,5.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 9: Valores de rugosidade média Ra.

Aço	Deformação (mm)	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
IF1	0	0,9744	0,0671	0,9744	0,0671
	15	1,1490	0,1869	1,1358	0,1534
	30	1,1583	0,1477	1,4123	0,3334
	45	1,1250	0,2133	1,2428	0,2098
	60	1,3407	0,2871	1,2407	0,1218
IF2	0	0,7093	0,0318	0,7093	0,0318
	15	1,0092	0,0643	0,7977	0,3276
	30	1,0453	0,0894	1,0173	0,0641
	45	0,9312	0,1444	0,9477	0,0807
	60	1,1655	0,0970	1,3055	0,1562
AISI316L	0	0,1186	0,0217	0,1186	0,0217
	15	0,2097	0,0255	0,2248	0,0635
	30	0,2965	0,0375	0,2803	0,0352
	45	0,2932	0,0365	0,3107	0,0200
	60	0,2715	0,0266	0,2808	0,0236
AISI409	0	0,6588	0,0696	0,6588	0,0696
	15	0,8330	0,0640	0,9355	0,1186
	30	1,0453	0,0894	1,1440	0,1431
	45	0,9312	0,1444	1,7435	0,3121
	60	1,1655	0,0970	1,7313	0,2161

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

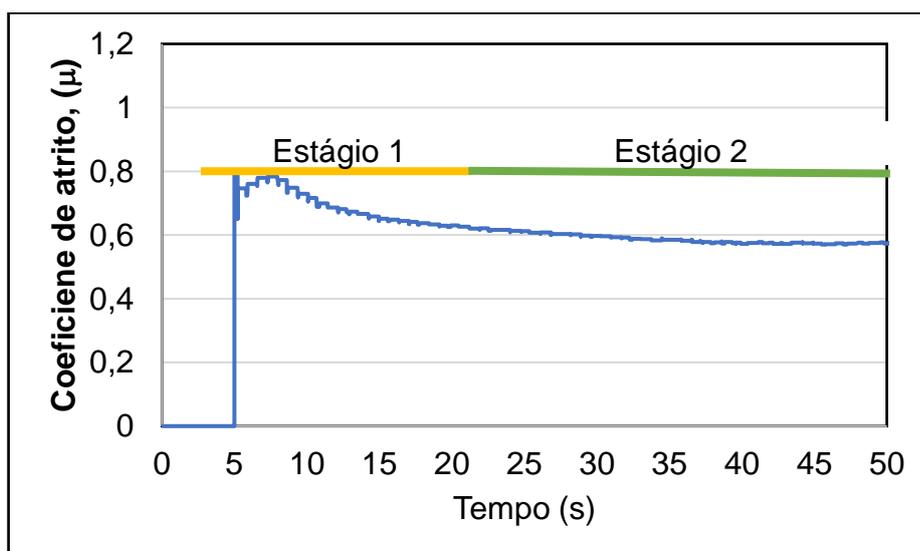
Os valores iniciais de rugosidade podem ser avaliados no ponto zero de deformação do gráfico. Ambos os materiais apresentaram aumento de sua rugosidade conforme a mudança progressiva de deformação. Sendo assim pode-se inferir que houve uma mudança topográfica caracterizada pelo aumento das irregularidades devido ao maior deslizamento de planos cristalinos próximo à superfície do material à medida que se aumenta o alongamento.

A diferença de dureza entre os materiais determina características adicionais que explicam os acréscimos de rugosidade. Os aços com menor dureza, como os IF, devido ao processo de desgaste abrasivo, apresentam maiores variações topográficas como consequência das interações com as asperezas duras da ferramenta, podendo apresentar mudanças significativas de rugosidade (FOLLE, 2012; TRZEPIECINSKI, 2020 LUIZ, 2022).

5.4 COEFICIENTE DE ATRITO

A Figura 25 apresentam a curvas características de atrito obtida através dos ensaios no Tribossimulador.

Figura 25: Curva característica e atrito para o aço AISI316L.

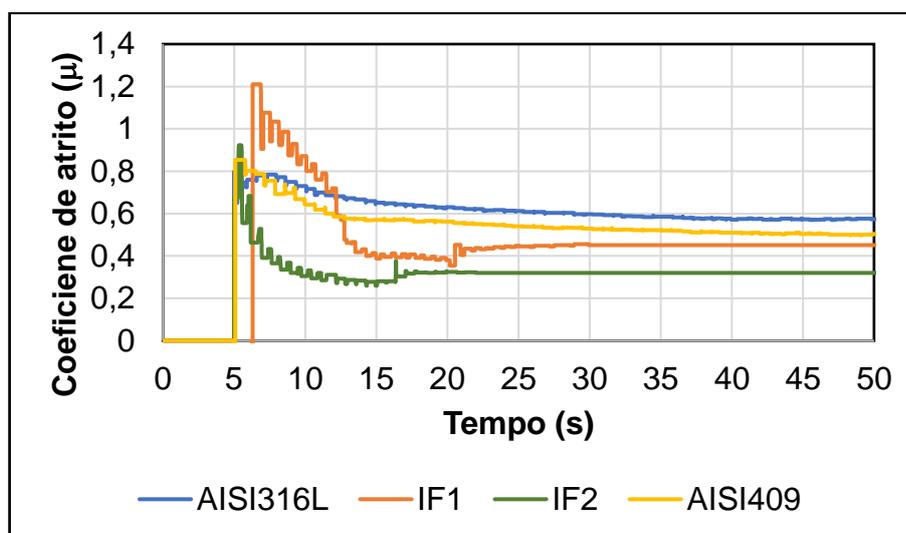


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As curvas apresentam dois estágios denominados (1) *Running-in* e (2) Estado estável. No primeiro estágio, observa-se um aumento do coeficiente de atrito no início do

ensaio. Esse aumento pode ser caracterizado como uma acomodação das superfícies de contato antes de se obter uma estabilidade no coeficiente de atrito, exibida por condições de atrito linear no estágio 2. Para este trabalho, o coeficiente de atrito médio foi obtido na região de estágio estável, utilizando a Equação 3. Observa-se na Figura 26 uma diferença de posicionamento dos estágios 1 e 2 em cada aço estudado, o que demonstra a diferença comportamental do atrito em cada material.

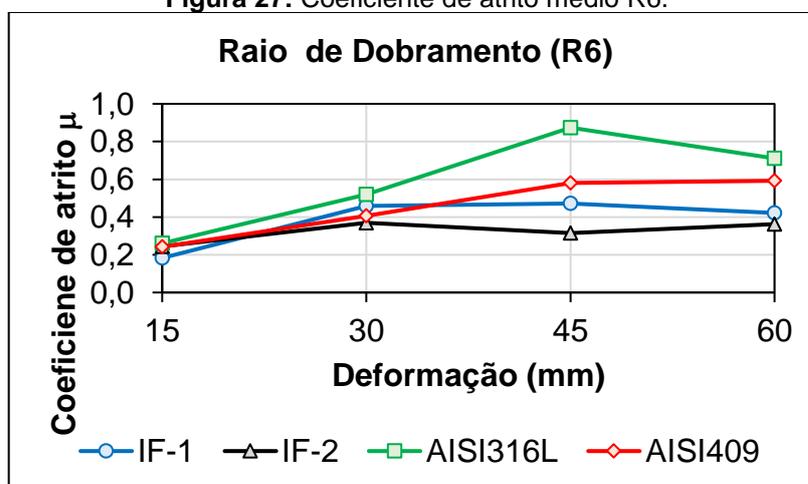
Figura 26: Curva característica de atrito para os aços estudados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

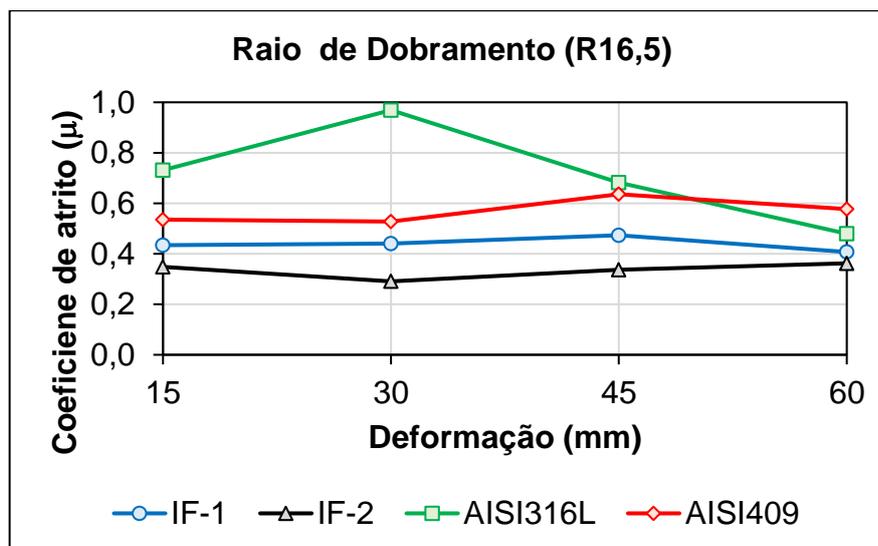
Nas Figuras 27 e 28 e Tabela 10 são apresentados os valores do coeficiente de atrito para cada aço investigado em função do raio de dobramento e alongamento.

Figura 27: Coeficiente de atrito médio R6.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 28: Coeficiente de atrito médio R16,5.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 10: valor de coeficiente de atrito para os raios R6 e R16,5.

Deformação (mm)	Aço	R6				R16,5			
		A1	A2	Média	Desvio Padrão	A1	A2	Média	Desvio Padrão
15	IF1	0,2017	0,1638	0,1828	0,0268	0,4305	0,4383	0,4344	0,0055
	IF2	0,1861	0,2440	0,2151	0,0409	0,3329	0,3478	0,3403	0,0105
	AISI316L	0,2675	0,2536	0,2605	0,0098	0,5966	0,8667	0,7316	0,1909
	AISI409	0,2353	0,2487	0,2420	0,0095	0,5364	0,5345	0,5354	0,0014
30	IF1	0,4021	0,5170	0,4595	0,0813	0,5023	0,3797	0,4410	0,0867
	IF2	0,4027	0,3363	0,3695	0,0470	0,2874	0,2942	0,2908	0,0048
	AISI316L	0,3559	0,6846	0,5202	0,2324	0,9535	0,9846	0,9691	0,0220
	AISI409	0,5163	0,2964	0,4063	0,1555	0,4461	0,6094	0,5277	0,1155
45	IF1	0,5309	0,4128	0,4719	0,0835	0,4517	0,4951	0,4734	0,0307
	IF2	0,2954	0,3344	0,3149	0,0275	0,3092	0,3646	0,3369	0,0392
	AISI316L	0,6291	1,1186	0,8738	0,3461	0,7147	0,6480	0,6814	0,0471
	AISI409	0,4166	0,7454	0,5810	0,2325	0,5402	0,7316	0,6359	0,1354
60	IF1	0,3882	0,4559	0,4220	0,0479	0,4229	0,3912	0,4071	0,0224
	IF2	0,3136	0,4127	0,3631	0,0701	0,3805	0,3441	0,3623	0,0257
	AISI316L	0,7855	0,6372	0,7114	0,1049	0,5257	0,4334	0,4796	0,0653
	AISI409	0,4307	0,7537	0,5922	0,2284	0,4250	0,7291	0,5771	0,2150

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para ambas as classes de aços estudados, observou-se um aumento no coeficiente de atrito conforme o aumento progressivo da deformação. Trzepieciniski (2020) descreve que, quanto maior o alongamento da amostra, maior a pressão de contato,

o que reduz a eficiência da lubrificação e aumenta a interação entre as duas superfícies, podendo acarretar no aumento do coeficiente de atrito à medida que o alongamento aumenta. Dentre os aços inoxidáveis, o AISI316L apresentou os maiores valores de atrito em comparação ao AISI409. Todavia, os aços carbono também apresentaram acréscimos no coeficiente de atrito, sendo o IF1 o que apresentou maiores valores em comparação ao IF2.

Conforme indicado no capítulo 5.3, uma menor dureza resulta em maior desgaste abrasivo na superfície do material. Esse desgaste tende a aumentar a rugosidade das chapas metálicas, e uma superfície mais rugosa pode reter mais lubrificante nos vales de suas asperezas. Conforme descrito no capítulo 3.3.4, a lubrificação tende a amenizar os efeitos do atrito, o que explica os menores valores dessa variável obtida nos aços carbono, que apresentaram maiores valores de rugosidade e conseqüentemente maior retenção de lubrificante. Entretanto, o aumento do alongamento reduz a eficiência da lubrificação, podendo acarretar no aumento do coeficiente de atrito.

Em materiais com maior rugosidade, o mecanismo de deformação tende a predominar, enquanto, em materiais com melhor acabamento superficial e, conseqüentemente, menor rugosidade, o mecanismo adesivo prevalece. Esses aspectos podem ajudar a explicar o comportamento do aço AISI316L. Esse material apresentou os menores valores de rugosidade e uma superfície muito lisa, o que dificulta a retenção do lubrificante nas superfícies de contato durante a estampagem. Isso pode ter contribuído para os maiores valores de coeficiente de atrito obtidos por esse aço em comparação ao IN409. Outro ponto a ser observado é que, para esse aço, a alta dureza resultou em pequenas modificações na rugosidade, facilitando o efeito do atrito devido à baixa retenção de lubrificante em sua superfície (FOLLE, 2012; TRZEPIECINSKI, 2020 LUIZ, 2022).

6. CONCLUSÕES

O estudo do efeito da deformação plástica e qualidade da chapa de aço na resistência ao atrito durante a estampagem foi investigado por meio do ensaio BUT. As principais conclusões são resumidas a seguir:

- Dentre os aços inoxidáveis o aço AISI316L apresentou maiores coeficientes de atrito devido a sua baixa rugosidade e a possíveis transformações estruturais por deformação. O aço AISI409 apresentou elevados valores de coeficiente de atrito assim como mudanças em sua dureza e rugosidade.
- Os aços IF apresentaram uma alteração em seu coeficiente de atrito com a mudança de alongamento. Devido a suas características químicas este material teve baixas alterações de dureza. Todavia durante o ensaio apresentou expressivos valores de rugosidade.
- Os resultados experimentais poderão ser utilizados como dados de entrada na simulação numérica computacional bem como nas diretrizes de projeto e critérios de prevenção de falhas a partir dos materiais investigados, o que pode culminar em uma redução de custos, melhoria no desempenho de processos e qualidade de produtos.

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

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Análise de Outros Tipos de Ligas Metálicas: Expandir o estudo para incluir diferentes tipos de ligas metálicas, como outras ligas de aço carbono, aços inoxidáveis e ligas de alumínio, a fim de comparar o comportamento tribológico em condições semelhantes de estampagem profunda.

Variação dos Parâmetros de Estampagem: Estudar o impacto da variação de diferentes parâmetros de estampagem, como velocidade, acabamento superficial e lubrificação, no atrito e desgaste. Essa análise pode ser realizada tanto para os materiais mencionados neste trabalho quanto para novos materiais.

Simulação Computacional: Implementar simulações computacionais usando softwares de elementos finitos para prever o comportamento tribológico sob diferentes condições de operação. Os modelos computacionais devem ser validados com os resultados experimentais, garantindo maior precisão nas análises.

Influência de Lubrificantes: Avaliar o efeito de diferentes tipos de lubrificantes utilizados no processo de estampagem sobre o comportamento tribológico da chapa e da matriz. O objetivo é identificar quais lubrificantes proporcionam melhor desempenho em termos de redução do atrito e desgaste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, C. E. C. **Solda por fricção e mistura mecânica a ponto em chapas automotivas de aço de baixo teor de carbono**. 2021. 166f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica – Centro Universitário da FEI, São Paulo. SP. Brasil.

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

BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I.B.; BUTTON, S.T. **Conformação Plástica dos Metais**. 6ªed. EPUSP, São Paulo, 2011. Disponível em: <https://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf>. Acesso em: 01 mar 2024.

COSTA, R. J. G. **Substituição parcial do titânio pelo nióbio em um aço AST 409: Efeito na microestrutura, textura e estampabilidade**. 2017. 42f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas– Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. MG, Brasil, 2017.

DEMARCH, A.; ROSSO, L. S.; MENEGON, J. O.; VIEIRA, A. W.; ANGLOLETTO, E. Estudo da influência do solado do calçado na resistência ao escorregamento de diferentes superfícies cerâmicas. **Cerâmica Industrial**, v. 28, n. 1, p. 1-11, 2023.

DIAS, F. H. G. B. **Influência do Atrito na Laminação**. 2023. 18f. Trabalho de conclusão de curso. Bacharelado em Engenharia Metalúrgica – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2023.

ELLWANGER, D. **Análise do desempenho tribológico de lubrificantes automotivos em ensaio de escorregamento metal=metal**. 2021. 29f. Trabalho de conclusão de curso. Bacharelado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2021.

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.

FIETO, B. M. **Evolução da microestrutura e das propriedades mecânicas do aço IF tratado termomecanicamente**. 2013. 76f. Trabalho de conclusão de curso. Bacharelado em Engenharia de Materiais – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2013.

FLORENCIO, K. C. **Estudo do efeito TRIP produzido pela laminação a frio do aço inoxidável austenítico AISI 316L e avaliação de seu uso como biomaterial**. 2022. 87f. Dissertação. Mestrado em Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. MG, Brasil.

22OLLE, L. F. **Estudo do coeficiente de atrito para processos de estampagem**. 2012. 131f. Tese. Doutorado em Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2012.

GAIGHER, L. **Machine Learning Aplicado a Tribologia: Análise dos parâmetros relacionados ao desgaste abrasivo, adesivo e por erosão nos equipamentos da indústria e mineração**. 2023. 41f. Trabalho de conclusão de curso. Bacharelado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2023.

GUIMARÃES, C. B. C. K. P. **Caracterização microestrutural destrutiva de molas de aço inoxidável austenítico AISI 316L suscetíveis a falha por corrosão sob tensão**. 2022. 63f. Trabalho de conclusão de curso. Bacharelado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil, 2022.

HELMAN, H. e CETLIN, P. R. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2.ed. São Paulo: Artiber Editora, 2010. 261p.

INÁCIO, G. A. **Desenvolvimento de um modelo de rede neural para estudo da cinética de recristalização de um aço IF**. 2013. 116f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica – Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda. RJ,

Brasil, 2013.

LIMA, E. F. S. **Propriedades mecânicas e resistência a corrosão de aços-carbonos aplicados na indústria de petróleo e gás: Uma revisão da literatura.** 2022. 70f. Trabalho de conclusão de curso. Bacharelado em Engenharia Metalúrgica – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2022.

LUIZ, V. D. **Estudo do comportamento mecânico, tribológico e fratura da chapa de aço AISI 430 sob dobramento e estiramento.** 2022. 202f. Tese. Doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2022.

Mello, M. S.; Souza, A. J.; Geier, M. Determinação Empírica dos Parâmetros de Rugosidade Ra e Rt Aplicando Ferramenta Alisadora no Torneamento de Acabamento a Seco do aço AISI 4140. **7º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Luís-MA. Anais do VII CONEM (CD-ROM).** 2012.

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

MILCHESKI, J. L.; BATISTA, L. G. K; NARDELLI, M. R. SUMLE, M. K. TEDESCHI, V. H. P. Tribologia voltada para a indústria automotiva. **Revista Tecnologia-UNIFATEC**, v.14, n.2, p.78-104, 2023.

MIRANDA, M. H. P. **Análise de sensibilidade das propriedades mecânicas e geométricas no fenômeno brake squeal e no desgaste de freios a disco de motocicleta.** 2021. 84f. Dissertação. Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais – Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. CE. Brasil, 2021.

MORAES, A. L.; CARVALHO, F. A. **Análise de microestrutura e das Propriedades Mecânicas do Aço IF-Nb/Ti .** 2016. 62f. Trabalho de conclusão de curso. Bacharelado em Engenharia Mecânica – Centro Federal de Educação Tecnológica

Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

Medição da rugosidade de superfícies — Parâmetros | Olympus. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/pt/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>, Acesso em: 01 jan. 2025.

OLIVEIRA, A. F. **Caracterização de um aço IF após relaminação no Laminador de Encruamento**. 2010. 153f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materias – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. SP, Brasil, 2010.

PANEDO, R. L. F. **Microestrutura, textura e propriedades de estampagem de aços inoxidáveis ferríticos estabilizados ao Titânio e ao Nióbio após processo de laminação a quente, a frio e recozimento**. 2023. 96f. Dissertação. Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas– Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. MG, Brasil, 2023

RODRIGUES, L. L. F. M. **Análise dos efeitos da deformação a frio em aços inoxidáveis austeníticos**. 2021. 72f. Trabalho de conclusão de curso. Bacharelado em Engenharia Mecânica – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2021.

SILVA, A. L. V. da C. e.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2021. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 14 maio 2024.

SILVA, B. C. S. **Efeitos tribológicos da superfície de ferramentas para estampagem de chapas de magnésio AZ31B**. 2017. 120f. Dissertação. Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial – Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador. BA, Brasil, 2017.

SILVA, F. S.; MORAIS, W. A. **AVALIAÇÃO DA SOLDABILIDADE E DO DESEMPENHO DA UNIÃO ENTRE AÇOS APLICADOS EM ESCAPAMENTOS AUTOMOTIVOS. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, 2020.

Disponível em <https://tecnologiammm.com.br/article/doi/10.4322/2176-1523.20202031>

SILVA, J. F. D. **Avaliação do desempenho tribológicos de aços utilizados para ferramentas de conformação a frio.** 2020. 88f. Trabalho de conclusão de curso. Bacharelado em Engenharia Mecânica – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, RS, Brasil, 2020.

SOUSA, J. C. **A estampagem de chapas e o processo de melhoria de imperfeições dos produtos estampados.** 2021. 34f. Trabalho de conclusão de curso. Bacharelado em Engenharia Mecânica – Instituição Anhanguera, Campinas, SP, Brasil, 2021.

TRZEPIECINSKI, T. A study of the coefficient of friction in steel sheets forming. **Metals**, v. 9, n. 9, p. 988, 2019.

TRZEPIECINSKI, T., LEMU, H.G. Recent developments and trends in the friction testing for conventional sheet metal forming and incremental sheet forming. **Metals**, v. 10, n. 1, p. 1-34, 2020.