



**Ana Luísa Motta**

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO DO AÇO SAE 4140 ATRAVÉS  
DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO ANEL**

Horizontina - RS

2024

**Ana Luísa Motta**

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO DO AÇO SAE 4140 ATRAVÉS  
DO ENSAIO DE COMPRESSÃO DO ANEL**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin

Horizontina - RS

2024

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso**

**“Determinação do Coeficiente de Atrito do Aço SAE 4140 Através do Ensaio de Compressão do Anel”**

**Elaborada por:  
Ana Luísa Motta**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
Mecânica

Aprovado em: 12/12/2024  
Pela Comissão Examinadora

---

Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

---

Me. André Rosiak  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

---

Prof. Dr. Geovane Webler  
Faculdade Horizontina (FAHOR)

**Horizontina - RS  
2024**

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luiz e Claudete, por sempre acreditarem em mim e me incentivarem, e ao meu lado, buscarem meus sonhos. Vocês são meu maior exemplo de coragem e resiliência.

Minhas irmãs, Tailla e Tamara, por estarem ao meu lado em todos os momentos. O carinho e a cumplicidade de vocês são inestimáveis.

Meu namorado, Matheus, pela paciência, compreensão e apoio incondicional. Sua presença tornou-se essa jornada mais leve e significativa.

Ao Me. André Rosiak por sua disponibilidade e conhecimentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rafael Dalcin por toda disponibilidade e dedicação ao longo desta trajetória.

A todos acima citados, meu muito obrigada!

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o coeficiente de atrito do aço SAE 4140 por meio do ensaio de compressão do anel, comparando as condições com e sem lubrificação utilizando o óleo SAE 85W-90. Os ensaios foram conduzidos a frio em três níveis de compressão: 20%, 40% e 60%, e as deformações geométricas dos anéis foram analisadas. A análise de dureza revelou que a resistência do material aumentou progressivamente com a compressão, passando de 16 HRC na redução de 20% para 22 HRC na de 60%, indicando que o processo de prensagem gera uma compactação significativa, promovendo maior densidade e resistência. A microestrutura também apresentou alterações importantes: com o aumento da compressão, os grãos tornaram-se mais alongados e alinhados, evidenciando uma reorganização interna que melhora a estabilidade mecânica do material. Os resultados mostraram que a aplicação de lubrificante reduziu o coeficiente de atrito de 0,15 (sem lubrificação) para aproximadamente 0,10 (com lubrificação), especialmente em compressões mais elevadas. Além disso, a lubrificação contribuiu para uma maior uniformidade nas dimensões finais, demonstrando menor variação nos diâmetros internos e nas alturas dos anéis. Esse controle do atrito reflete diretamente na redução do desgaste das ferramentas e na melhoria da eficiência operacional.

**Palavras-chave:** conformação mecânica, coeficiente de atrito, ensaio de compressão do anel, aço SAE 4140, lubrificação.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Micrografia de aço SAE 4140 temperado e revenido .....	14
Figura 2 – Esquema geral do processo de conformação .....	16
Figura 3 – Processo comum de forjamento .....	17
Figura 4 – Mecanismos de falhas presentes na ferramenta de forjamento a quente. .....	20
Figura 6 – Classificação dos modos de desgaste e suas subdivisões .....	21
Figura 7 – Elementos do sistema de lubrificação em processos de conformação mecânica .....	23
Figura 8 – Curva de Stribeck e Regimes de Lubrificação.....	26
Figura 9 – Fatores influentes ao aparecimento e progressão do desgaste abrasivo	27
Figura 10 – Efeito da carga no coeficiente de atrito. ....	29
Figura 11 – Efeito do atrito sobre o fluxo do metal durante o teste compressão do anel .....	30
Figura 12 – Fluxograma de atividades experimentais do trabalho .....	32
Figura 13 – Microestrutura do aço SAE 4140 como é recebido .....	33
Figura 14 – Curva de Tensão x Deformação do aço SAE 4140.....	34
Figura 15 – Anéis usinados em suas dimensões iniciais .....	35
Figura 16 – Anéis usinados .....	35
Figura 17 – Óleo utilizado como lubrificante para o ensaio .....	36
Figura 18 – Prensa PH 600 .....	37
Figura 19 – Disposição das amostras para o ensaio de compressão: (a) sem lubrificação; (b) com lubrificação .....	38
Figura 20 – Máquinas para corte da amostra .....	40
Figura 21 – Máquinas prensagem da amostra .....	40
Figura 22 – Amostra embutida .....	41
Figura 23 – Peça sendo medida dureza .....	42
Figura 24 – Amostra de micrografia do aço SAE 4140 após reduções .....	44
Figura 25 – Curva do Coeficiente de Atrito.....	47
Figura 26 – Curva de Calibração Aço SAE 4140 .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química aço SAE 4140 .....	34
Tabela 2 – Propriedades lubrificante 85W-90 .....	36
Tabela 3 – Dureza medida nos anéis .....	43
Tabela 4 – Resultados obtidos nos corpos de prova sem uso de lubrificante .....	46
Tabela 5 – Resultados obtidos nos corpos de prova com uso de lubrificante .....	47

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
1.1 TEMA .....	9
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	9
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA .....	9
1.4 JUSTIFICATIVA .....	10
1.5 OBJETIVOS .....	11
1.5.1 Objetivo geral.....	11
1.5.2 Objetivos específicos.....	12
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>13</b>
2.1 MATERIAIS PARA ENGRENAGENS E PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO ...	13
2.1.1 Materiais para engrenagens forjadas .....	13
2.1.2 Processos de conformação.....	15
2.1.3 Processo de forjamento na conformação .....	17
2.1.4 Ferramentas para forjamento a frio .....	18
2.1.5 Ferramentas para forjamento a quente .....	19
2.2 TRIBOLOGIA NA CONFORMAÇÃO DE ENGRENAGENS .....	21
2.2.1 Mecânica da conformação de engrenagens .....	22
2.2.2 Modelos usados para descrever o atrito e o fator de atrito na conformação .....	24
2.2.3 Lubrificação na conformação de engrenagens .....	26
2.2.4 Desgaste e mecanismos de desgaste em matrizes de conformação de engrenagens .....	27
2.3 ENSAIOS PARA DETERMINAR O COEFICIENTE DE ATRITO .....	28
2.3.1 Ensaio de Compressão do Anel.....	29
<b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>32</b>
3.1 MATERIAL .....	33
3.2 LUBRIFICANTE.....	35
3.3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO PELO ENSAIO DO ANEL ..	37
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E MEDIÇÃO DAS AMOSTRAS .....	39
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>43</b>
4.1 MATERIAL .....	43
4.2 COEFICIENTE DE ATRITO .....	46
4.3 DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS .....	48
<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>52</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de conformação de materiais não é algo novo no meio dos processos mecânicos, é justamente uma das atividades mais antigas realizadas pelo homem. O início dos processos de conformação mecânica remete ao período em que a humanidade passou a extrair minérios da crosta terrestre com o objetivo de fabricar ferramentas de metal para o uso diário. Há mais de 4000 anos antes de Cristo, já se registravam atividades de trabalho em metais como ouro, cobre, prata, entre outros (Bertoldi, 2016). Já outros estudos apontam o uso da conformação muito antes deste período.

Os processos de conformação são utilizados justamente para dar formato a partes ou componentes de máquinas, equipamentos e utensílios de uso diário, seja de grandes empresas, como construção de estruturas metálicas, automóveis, máquinas, como pequenos objetos utilizados no dia a dia, como celulares, eletrodomésticos, etc. Para realizar a conformação dos materiais, são utilizadas ferramentas (geralmente matrizes) e equipamentos, que quando aplicado sobre e sob a peça, por meio da força utilizada, dão o formato esperado à peça (Suski, 2015).

As opções de processos são as mais variadas, entre elas estão: estampagem (ou corte e dobra), forjamento, laminação, extrusão, conformação a frio, conformação a quente, moldagem por injeção, sinterização, dobra, trefilação, etc. O que determina qual processo deve ser utilizado são variáveis como tipo e propriedades do material, complexidade geométrica da peça, volume de produção, tolerâncias dimensionais, acabamento superficial, custo e exigências de propriedades mecânicas (Suski, 2015).

Toda fabricante, ao definir seus processos produtivos, tem como objetivo garantir que os processos sejam economicamente viáveis, com o menor número de desperdícios, mas com a garantia da qualidade do produto. Estas variáveis são possíveis de mensurar a partir da aplicação do ensaio de compressão de anel, pois ele resulta na curva de coeficiente de atrito.

Portanto, o coeficiente de atrito é importante para a conformação mecânica, pois permite controlar o processo, pois garante a qualidade do produto, reduz desgaste das ferramentas e melhora a eficiência energética (Porr e Sinatora, 2009). Ademais, o autor ressalta a efetividade do coeficiente para evitar defeitos no produto e economizar recursos, além de possibilitar a realização de simulações precisas.

O ensaio de compressão é composto por diferentes anéis de aço, que são submetidos a compressão (com possibilidade de ocorrer de modo a quente ou frio), em diferentes condições, como diferentes lubrificantes, diferentes velocidades de prensagem e força. A partir da realização de diversas prensagens diferentes, é feita análise do furo dos anéis, com paquímetro. A partir da deformação que o furo sofre, é possível verificar qual o nível de atrito (baixo ou alto) e qual condição apresenta melhor resultado (Mandic e Stefanovic, 2003).

Com base no exposto, o objetivo do projeto é demonstrar a eficiência e a análise dos resultados da aplicação do ensaio de anel como método para determinar o coeficiente de atrito na conformação do aço SAE 4140.

### 1.1 TEMA

Aplicação do ensaio de compressão de anel, com e sem o uso do lubrificante Óleo para Transmissões SAE 85W-90 da marca John Deere, como ferramenta para determinar o coeficiente de atrito em aço SAE 4140.

### 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Utilização do ensaio de compressão de anel a frio em aço SAE 4140 como método para identificar o coeficiente de atrito em anéis de aço, como método de apoio para a seleção de uso de lubrificantes durante o processo de conformação por prensa. A partir da aplicação do ensaio, com e sem lubrificação, é possível determinar em qual processo há melhor desempenho e resultado, a partir da análise de deformação do anel.

### 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Segundo Bueno (1999), a conformação de engrenagens é uma prática amplamente utilizada na indústria mecânica, especialmente devido à necessidade de componentes com alta resistência e precisão dimensional. No entanto, a otimização dos processos de conformação, especialmente no que diz respeito ao atrito e ao desgaste de ferramentas, ainda apresenta lacunas na literatura. Estudos específicos sobre o comportamento do aço SAE 4140 em ensaios de compressão de anel e os impactos de diferentes condições de lubrificação são limitados.

Ciente destas oportunidades, o trabalho busca preencher essas lacunas, a partir de dados experimentais e análises que auxiliem no avanço da compreensão deste tema, a partir da questão: De que forma a aplicação do ensaio de compressão de anel auxilia a definir melhores técnicas para a conformação de peças de aço SAE 4140?

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

A conformação mecânica está em todo lugar à nossa volta. Desde os veículos e equipamentos mais complexos como foguetes, aviões, máquinas agrícolas, até aqueles que estão no dia-a-dia e nas casas da população, como painéis, geladeiras, computadores. Todos têm algo em comum: têm um ou mais componentes fabricados a partir de processos de conformação.

E para que este processo seja eficiente, não só as características do material escolhido influenciam na qualidade e sustentabilidade da operação, mas também é necessária atenção a variáveis como o coeficiente de atrito. Um processo cujo coeficiente de atrito é muito alto ou baixo, pode apresentar desgaste excessivo de ferramentas, alterações na microestrutura do material, além de demandar mais energia do que o necessário, além de não garantir desta forma padrões de qualidade na peça final (Mandic; Stefanovic, 2003).

Contudo, esta demanda de conhecimento não é nova, e ao longo da história foram desenvolvidos diversos métodos para análise tribológica dos metais. Em 1964, Male e Cockroft desenvolveram a técnica do ensaio do anel para determinar o coeficiente de atrito, com o objetivo de desenvolver uma técnica em que os resultados obtidos não fossem dependentes das propriedades mecânicas do material, mas sim da deformação geométrica do anel.

O ensaio é bastante versátil e utilizado nos dias de hoje, passível de ser aplicado em uma variedade de condições de temperatura, velocidade de deformação, tipos de lubrificação e condições das matrizes (Bertoldi, 2011). Nesse contexto, o ensaio de compressão de anel à quente surge como uma técnica promissora para a análise do comportamento tribológico em condições de conformação mecânica. Este ensaio permite a quantificação do coeficiente de atrito por meio da deformação plástica do anel, sem a necessidade de conhecimento prévio das propriedades intrínsecas do material estudado (Jardim *et al.*, 2023). Além disso, o ensaio de

compressão de anel tem a vantagem de simular fielmente as condições de alta temperatura e grandes deformações encontradas em processos de usinagem, portanto, é uma ferramenta valiosa para estudos tribológicos mais precisos e abrangentes.

A importância desta pesquisa proposta se justifica pela grande relevância na indústria, pois influencia diretamente na eficiência e durabilidade de componentes mecânicos. No caso específico dos anéis de aço SAE 4140, amplamente utilizados em aplicações mecânicas devido à sua resistência e tenacidade, entender a fundo suas características é essencial para otimizar processos de fabricação e operação desses componentes. Vale destacar também a importância da tribologia na indústria mecânica, onde o atrito entre superfícies em contato desempenha um papel fundamental em processos de usinagem e conformação mecânica. Compreender e controlar esse fenômeno é essencial para garantir a eficiência e a qualidade dos componentes produzidos (Holmberg; Erdemir, 2017).

Em função da importância crítica do atrito em processos de conformação e a necessidade de uma compreensão mais profunda do comportamento tribológico nessas condições, o presente projeto de pesquisa visa aprofundar o entendimento da influência do coeficiente de atrito em anéis de aço SAE 4140, uma liga de aço carbono amplamente utilizada na indústria devido à sua resistência, tenacidade e facilidade de processamento (Leite *et al.*, 2017). A escolha desse material como objeto de estudo é motivada por sua relevância prática e pela necessidade de compreender melhor seu comportamento tribológico em diferentes condições operacionais.

Diante da importância que o coeficiente de atrito representa na definição de um processo de conformação mecânica, a aplicação do ensaio de compressão de anel atua como ferramenta que permite visualizar as melhores condições de atrito para diferentes tipos de aço submetidos à prensagem. Portanto, este estudo visa corroborar aquilo que a literatura apresenta sobre a aplicação do ensaio, a partir da aplicação do mesmo e posterior análise.

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.5.1 Objetivo geral

Avaliar a aplicação do ensaio de compressão de anel como uma ferramenta eficaz para determinar o coeficiente de atrito em aço SAE 4140, para compreender de

que maneira essa técnica pode contribuir para a definição de melhores práticas na conformação de aço SAE 4140.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Realizar ensaios experimentais de compressão de anel a partir de amostras de aço SAE 4140, em condições variadas, com e sem o uso de lubrificantes, a fim de analisar o comportamento do coeficiente de atrito em ambos os cenários.
- Definir qual a melhor força de prensagem e uso de lubrificante a ser utilizado no caso de compressão de anel de aço SAE 4140.
- Analisar estatisticamente os resultados obtidos, de forma a apresentar a curva do coeficiente de atrito.
- Determinar, a partir da medida do furo do anel prensado, se o processo apresenta alto ou baixo grau de atrito.
- Obter resultados confiáveis, a partir do método de ensaio de compressão de anel que é uma ferramenta de fácil aplicação, sem necessitar de muitos recursos.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados conceitos e informações relacionadas ao processo de conformação, ensaios mecânicos, coeficiente de atrito e aço SAE 4140, tópicos pertinentes para a realização do estudo proposto.

### 2.1 MATERIAIS PARA ENGRENAGENS E PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO

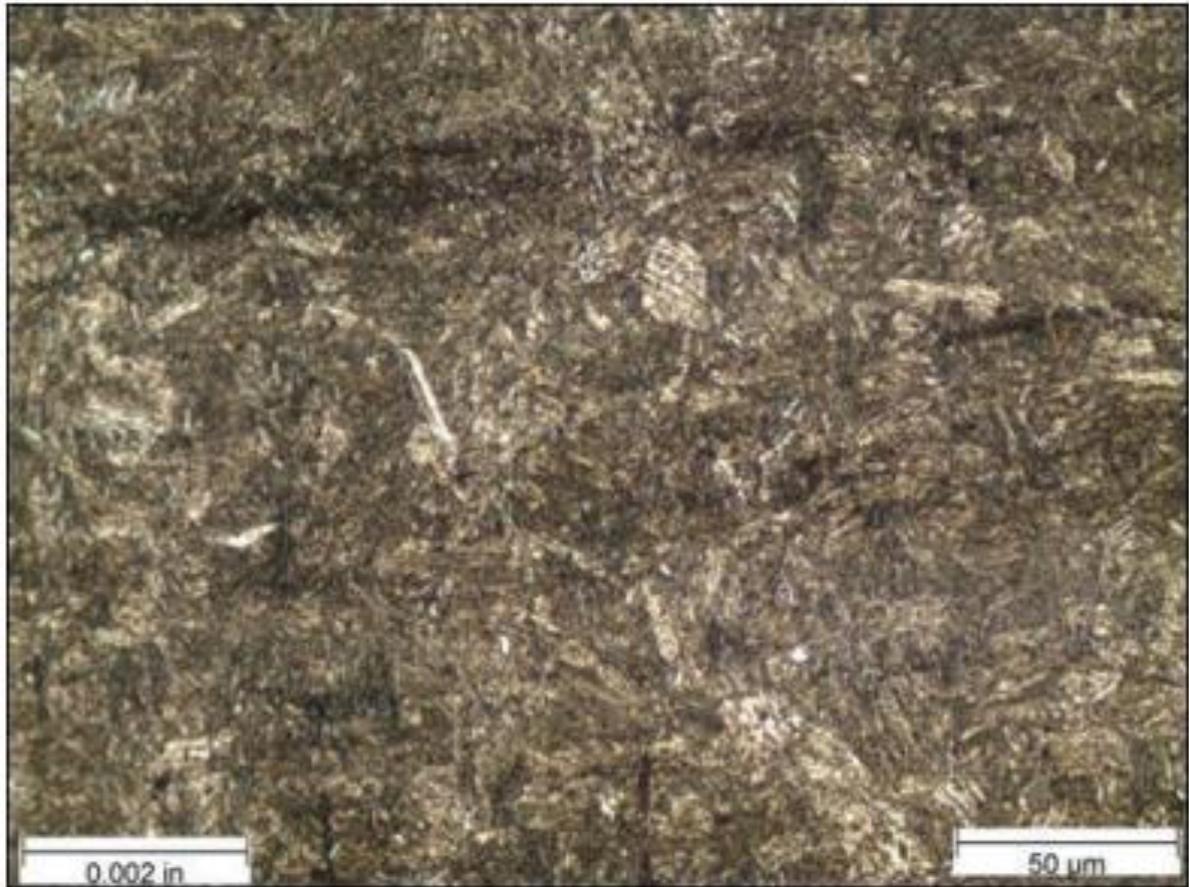
#### 2.1.1 Materiais para engrenagens forjadas

As engrenagens forjadas requerem materiais que possuam uma combinação de alta resistência mecânica, resistência ao desgaste e tenacidade. O aço SAE 4140 é amplamente utilizado devido à sua capacidade de suportar altas cargas e oferecer boa resistência ao impacto. Além disso, o aço SAE 4140 apresenta excelente capacidade de endurecimento, o que permite a obtenção de propriedades mecânicas desejadas através de tratamentos térmicos. Esses tratamentos, como a têmpera e o revenimento, otimizam a resistência ao desgaste e a dureza superficial, tornando-o adequado para aplicações onde há contato constante e carga elevada, como em engrenagens, de acordo com Bueno (1999).

Bueno (1999) afirma que o aço SAE 4140 também é valorizado por sua estabilidade dimensional durante o processamento, garantindo que as peças forjadas mantenham as tolerâncias exigidas mesmo após o tratamento térmico. Sua combinação de elementos de liga, como cromo, molibdênio e manganês, proporciona uma resistência superior à corrosão e à fadiga, atributos cruciais para engrenagens que operam em ambientes industriais severos. A versatilidade do aço SAE 4140 permite sua aplicação não apenas em engrenagens, mas também em componentes como eixos, bielas e matrizes, ampliando seu uso em diversas indústrias. A combinação de custo-benefício, disponibilidade e propriedades mecânicas torna este material uma escolha padrão na fabricação de engrenagens forjadas de alta performance.

De acordo com Lanfredi (2015), o aço utilizado neste estudo, o SAE 4140, um aço-liga de médio carbono (aproximadamente 0,4%), conhecido por conter cromo e molibdênio como principais elementos de liga. Além disso, sua composição inclui manganês, silício e pequenas quantidades de enxofre e fósforo. A Figura 1 mostra a micrografia do aço estudado.

Figura 1 – Micrografia de aço SAE 4140 temperado e revenido



**Fonte:** Ocel; Provines, 2015

O aço SAE 4140 é amplamente utilizado em diversas aplicações industriais devido à sua combinação de resistência mecânica, tenacidade e capacidade de suportar altas cargas em condições severas (Turatti et al., 2017). Ele é classificado como um aço de médio carbono e baixa liga, contendo elementos como cromo (Cr) e molibdênio (Mo), que conferem maior resistência ao desgaste e à corrosão, além de aumentar a temperabilidade do material (Chiaverini, 2005). Segundo Silva (2023), sua composição química típica inclui 0,38–0,43% de carbono, 0,75–1,00% de manganês, 0,15–0,35% de silício, no máximo 0,035% de fósforo, 0,04% de enxofre, 0,80–1,10% de cromo e 0,15–0,25% de molibdênio.

As propriedades mecânicas do aço SAE 4140, como uma resistência à tração média de 655 MPa e limite de escoamento de 417 MPa, tornam-no adequado para componentes que exigem alta resistência e tenacidade (Turatti et al., 2017). Esses valores podem ser significativamente aprimorados com o uso de tratamentos térmicos como têmpera e revenimento, que alteram sua microestrutura de perlita e ferrita para martensita revenida, aumentando a dureza e a resistência ao impacto (Silva, 2023).

Além disso, estudos mostram que o refino microestrutural, obtido por meio de tratamentos térmicos adequados, é essencial para alcançar propriedades homogêneas e otimizar o desempenho do material (Smoljan, 2004).

De acordo com Chiaverini (2005), o aço SAE 4140 é frequentemente utilizado na fabricação de componentes como eixos, engrenagens, virabrequins, pistões e até anéis de rolamentos em turbinas eólicas. Essas aplicações exigem um material que combine alta resistência mecânica, resistência ao desgaste e boa durabilidade em ambientes de trabalho extremos. A versatilidade do aço SAE 4140 reflete sua capacidade de atender a uma ampla gama de demandas na indústria, principalmente quando submetido a processos de manufatura e tratamentos térmicos controlados (Turatti et al., 2017).

### **2.1.2 Processos de conformação**

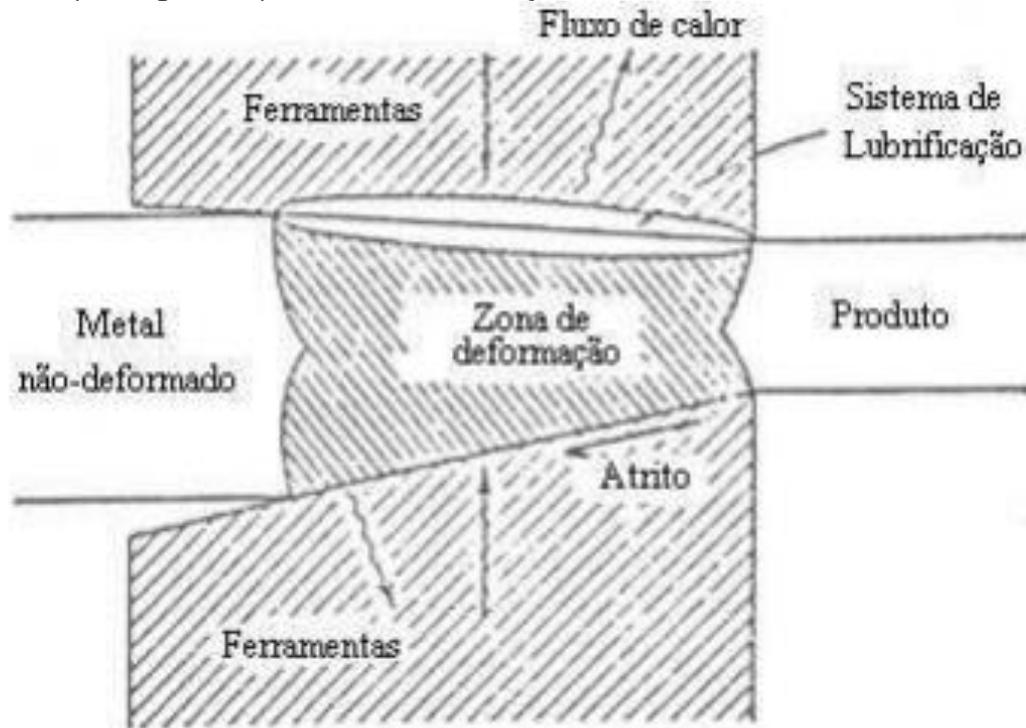
A conformação mecânica dos metais é um conjunto de processos de fabricação que utiliza a deformação plástica para transformar materiais metálicos em produtos acabados ou semielaborados. Esses processos consistem na aplicação de forças externas que induzem o escoamento do metal, alterando sua forma sem mudança significativa no volume. De acordo com Costa e Mira (1985), a conformação é vantajosa por proporcionar eficiência no uso de materiais, rapidez no processo e a possibilidade de melhoria das propriedades mecânicas, como aumento da dureza e eliminação de defeitos internos, como porosidades.

Os processos de conformação podem ser classificados de diversas maneiras. Quanto ao tipo de esforço, temos processos como laminação, forjamento, extrusão e trefilação, que são baseados em compressão, tração ou cisalhamento. Outra classificação considera o regime de operação: processos estacionários, como laminação contínua, ou não estacionários, como o forjamento. Costa e Mira (1985) ainda destacam a divisão entre processos primários, usados para transformar lingotes em produtos semifabricados, e secundários, que geram peças acabadas (Oliveira e Santana, 2000).

A temperatura desempenha um papel essencial na conformação. O trabalho a quente, por exemplo, ocorre acima da temperatura de recristalização do metal, promovendo melhor ductilidade e menor resistência ao escoamento. Já o trabalho a frio ocorre abaixo dessa temperatura, resultando em encruamento, que aumenta a

resistência mecânica e a dureza do material. O trabalho a morno combina características de ambos, oferecendo maior flexibilidade dependendo do produto final desejado (Costa e Mira, 1985; Oliveira e Santana, 2000). A Figura 2 apresenta o esquema do que ocorre com a estrutura do material no processo de conformação.

Figura 2 – Esquema geral do processo de conformação



**Fonte:** Costa e Mira, 1985.

Um aspecto crítico é o atrito na interface entre ferramentas e o material conformado. Ele influencia diretamente o esforço necessário, o desgaste das ferramentas e o acabamento da peça. De acordo com Oliveira e Santana (2000), a lubrificação é um fator fundamental para reduzir o atrito e melhorar a eficiência do processo. O uso de lubrificantes adequados também contribui para a dissipação do calor gerado durante a deformação, especialmente em processos a quente.

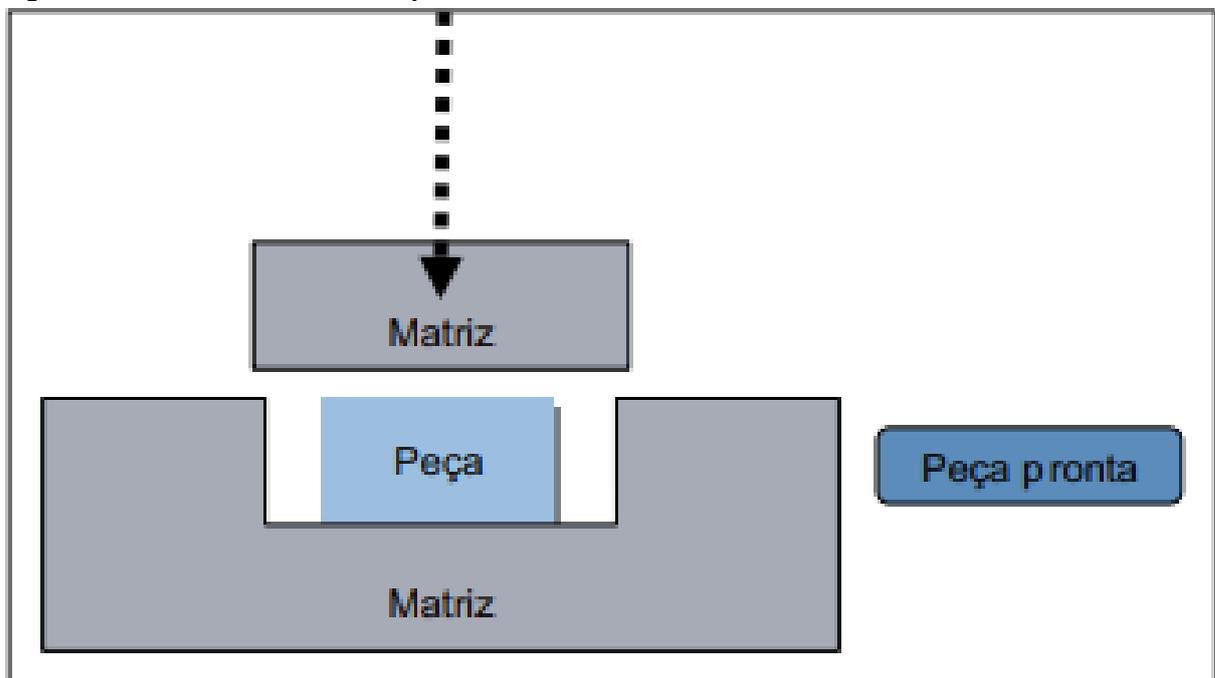
Além de modificar a forma dos metais, os processos de conformação têm impactos na microestrutura do material. A laminação e o forjamento, por exemplo, podem refinar o tamanho de grão e reduzir segregações químicas. Esses efeitos metalúrgicos são importantes para garantir propriedades como resistência à tração, dureza e tenacidade (Costa e Mira, 1985). O controle das condições de conformação, como taxa de deformação e temperatura, é crucial para otimizar esses efeitos.

A aplicabilidade da conformação mecânica é ampla. Ela é empregada na fabricação de peças automotivas, como eixos e engrenagens, estruturas aeroespaciais e até utensílios domésticos. Segundo Oliveira e Santana (2000), o desenvolvimento de novas ligas e técnicas avançadas de controle de processos permite a produção de peças com geometrias complexas e alta precisão, o que amplia ainda mais o campo de aplicação da conformação mecânica.

### 2.1.3 Processo de forjamento na conformação

O processo de forjamento é uma das técnicas da conformação utilizadas para alterar o formato de uma peça, a partir da aplicação de forças sobre ela. É um processo vantajoso pois não apresenta desperdícios significativos de material durante sua aplicação (Michels *et al*, 2013). A Figura 3 apresenta uma ilustração simples de como ocorre o processo de forjamento, onde a peça é posta sob uma matriz, e outra matriz é responsável por prensá-la a uma determinada força, suficiente para dar o formato desejado.

Figura 3 – Processo comum de forjamento



Fonte: Michels *et al.*, 2013.

O forjamento é uma das técnicas mais importantes de conformação de metais e pode ser classificado em três tipos principais: a frio, a quente e a morno. Cada método oferece vantagens específicas e é escolhido com base nos requisitos do

material e das propriedades desejadas na peça final. O forjamento a frio, por exemplo, é realizado em temperatura ambiente e resulta em peças com alta precisão dimensional e excelente acabamento superficial. Entretanto, o processo pode aumentar a resistência do material por encruamento, tornando-o mais difícil de trabalhar em etapas subsequentes (GEIER, 2007).

No forjamento a quente, o material é deformado em temperaturas acima da recristalização, o que permite maior ductilidade e a conformação de peças com geometrias mais complexas. Esse método também reduz as forças necessárias para o processo, mas apresenta desvantagens como maior desgaste das ferramentas e menor qualidade superficial da peça, devido à oxidação provocada pelas altas temperaturas (ALTAN *et al.*, 1999). Já o forjamento a morno combina características dos processos a frio e a quente, sendo ideal para peças que requerem um equilíbrio entre precisão dimensional e propriedades mecânicas. Esse método permite a produção de componentes com geometrias complexas e boas propriedades mecânicas, enquanto reduz os custos associados ao desgaste das ferramentas e ao consumo energético (DIETER, 1986).

A escolha do método de forjamento também depende do material da peça. Materiais mais maleáveis, como ligas de alumínio, são frequentemente utilizados no forjamento a frio, enquanto metais mais resistentes, como aço carbono e aço de baixa liga, são trabalhados a quente para facilitar o processo (SHIRGAOKAR, 2005). Independentemente do método, o forjamento oferece vantagens significativas, como a produção de peças com alta resistência mecânica, devido à orientação das fibras do material, e a possibilidade de criar componentes leves e duráveis. Esses fatores fazem do forjamento uma técnica indispensável em indústrias como a automotiva, aeroespacial e de bens de consumo (LANGE, 1997).

#### **2.1.4 Ferramentas para forjamento a frio**

As ferramentas utilizadas no forjamento a frio precisam ser extremamente resistentes ao desgaste e às tensões mecânicas impostas pelo processo. Elas são normalmente fabricadas com aços de alta liga, como o aço rápido e os aços para trabalho a frio, devido à sua elevada dureza e estabilidade térmica. Essas características garantem que as ferramentas possam suportar as altas forças

compressivas aplicadas durante o processo, sem sofrer deformações plásticas que comprometam a precisão dimensional da peça final (ALTAN *et al.*, 2004).

A resistência ao desgaste é outro requisito fundamental para essas ferramentas, já que o contato direto com o material deformado, muitas vezes em alta velocidade e pressão, pode causar danos à superfície. Para minimizar esses problemas, os aços utilizados frequentemente passam por tratamentos térmicos que aumentam sua dureza e resistência ao impacto, tornando-os mais duráveis mesmo sob condições extremas (DIETER, 1986).

A lubrificação é indispensável no forjamento a frio, uma vez que reduz o atrito na interface entre a ferramenta e o material. Lubrificantes como bissulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ) e revestimentos com fosfato de zinco são amplamente empregados por sua capacidade de proteger a ferramenta contra desgastes excessivos, além de facilitar o fluxo do material durante a conformação. Isso também contribui para uma melhor qualidade superficial da peça final, com menos marcas de desgaste (CALLISTER, 2002).

Além da escolha do material e do tratamento térmico adequado, o design das ferramentas também desempenha um papel crucial. Ele deve ser otimizado para suportar as condições de carga do processo e para distribuir de maneira uniforme as tensões durante a conformação, evitando pontos de concentração que possam causar falhas prematuras (SHIRGAOKAR, 2005).

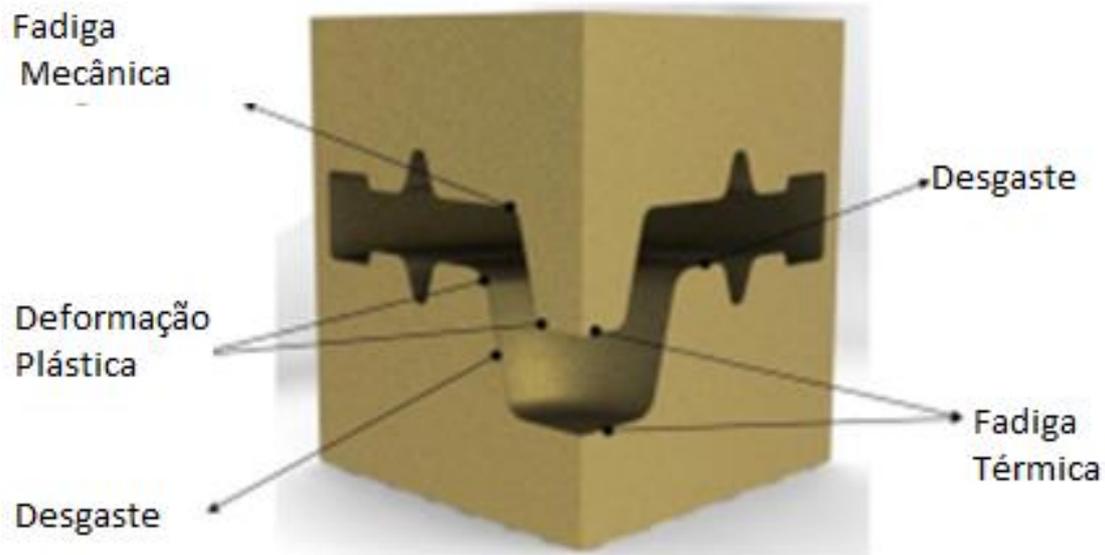
As ferramentas de forjamento a frio precisam ser projetadas para funcionar em ciclos repetidos de alta intensidade sem comprometer sua geometria. Isso é especialmente importante em aplicações de produção em massa, onde a consistência dimensional e a durabilidade das ferramentas impactam diretamente os custos e a eficiência do processo (GEIER, 2007).

### **2.1.5 Ferramentas para forjamento a quente**

No forjamento a quente, as ferramentas enfrentam desafios específicos relacionados às altas temperaturas e aos esforços cíclicos. Por isso, geralmente são fabricadas com aços para trabalho a quente, como o aço norma H13, que combinam resistência ao desgaste, estabilidade térmica e alta tenacidade. Essas propriedades são essenciais para que as ferramentas resistam aos ciclos de aquecimento e resfriamento, que podem causar fadiga térmica e deformações (DIETER, 1986).

A resistência à fadiga térmica é especialmente importante, pois o forjamento a quente envolve exposições repetidas a temperaturas elevadas seguidas de resfriamento rápido. Ferramentas feitas de materiais inadequados podem desenvolver trincas térmicas rapidamente, reduzindo significativamente sua vida útil. O uso de ligas com alta resistência à oxidação também ajuda a proteger a superfície da ferramenta em ambientes de alta temperatura (ALTAN *et al.*, 1999). A Figura 4 apresenta um esquema dos tipos de falhas possíveis de serem encontrados nas ferramentas de forjamento a quente.

Figura 4 – Mecanismos de falhas presentes na ferramenta de forjamento a quente.



**Fonte:** Magalhães *et al.*, 2014.

Lubrificantes específicos para forjamento a quente, como compostos à base de grafite e óleos minerais modificados, são amplamente utilizados para minimizar o desgaste da ferramenta e proteger a peça contra oxidação. Além disso, esses lubrificantes atuam como isolantes térmicos, reduzindo a transferência de calor entre a ferramenta e o material, o que ajuda a preservar as propriedades mecânicas da ferramenta e a melhorar o acabamento da peça (CALLISTER, 2002).

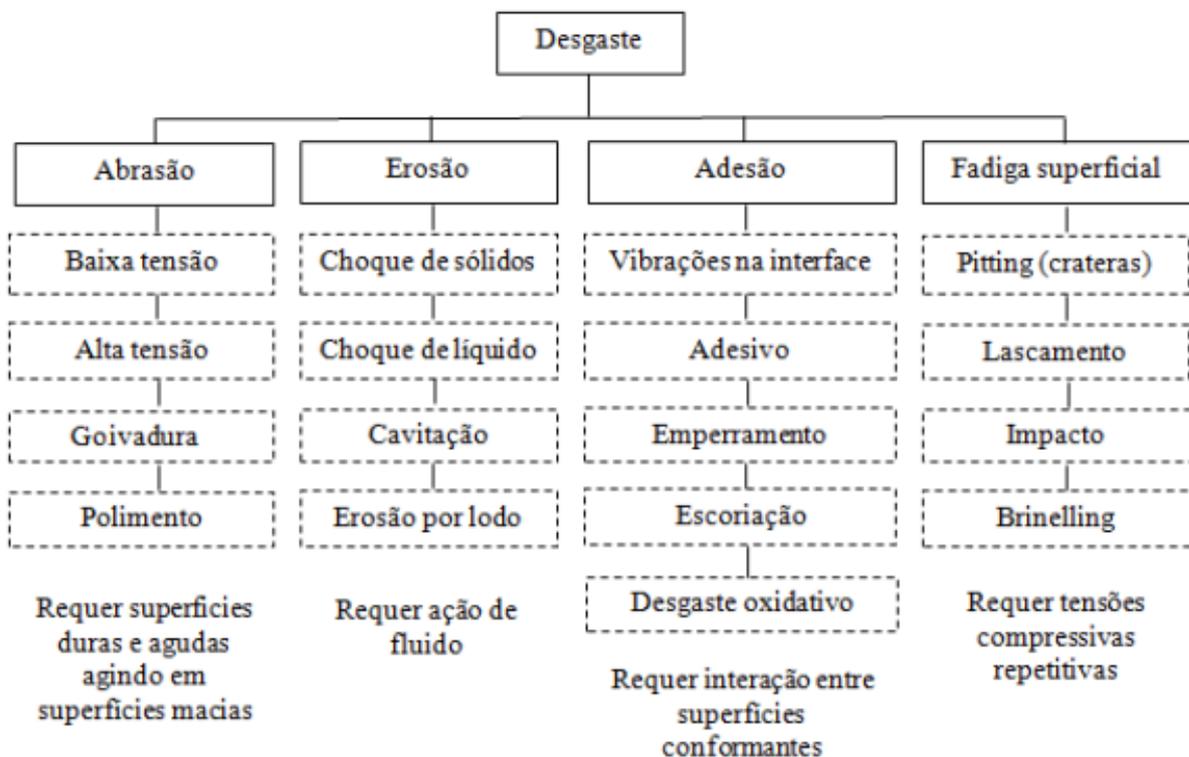
Outro fator determinante é o tratamento superficial das ferramentas. Técnicas como revestimentos cerâmicos ou nitretação podem ser aplicadas para aumentar a resistência ao desgaste e à abrasão. Isso é particularmente útil em processos onde o contato com o material forjado é intenso e prolongado, como na produção de peças de grande porte (SHIRGAOKAR, 2005). O design das ferramentas para forjamento a quente também precisa levar em conta a expansão térmica dos materiais. Ajustes nas

tolerâncias e nas dimensões das ferramentas são feitos para garantir que, mesmo após aquecidas, mantenham sua funcionalidade e precisão na conformação da peça (LANGE, 1997).

## 2.2 TRIBOLOGIA NA CONFORMAÇÃO DE ENGRENAGENS

A tribologia é a ciência que estuda os fenômenos de atrito, desgaste e lubrificação entre superfícies em movimento relativo. Esse campo interdisciplinar combina conhecimentos de física, química, mecânica e ciência dos materiais para desenvolver soluções que otimizem o desempenho de sistemas mecânicos. De acordo com Jost (1966), a tribologia foi oficialmente definida como área de estudo em um relatório que destacou sua relevância econômica e ambiental. Estima-se que a aplicação de conhecimentos tribológicos pode reduzir perdas por atrito e desgaste em até 20%. Na Figura 5 é possível observar as classificações dos desgastes.

Figura 5 – Classificação dos modos de desgaste e suas subdivisões



Fonte: Budinski, 1988.

Os modos de desgaste são elementos centrais da tribologia. Eles incluem desgaste adesivo, abrasivo, por fadiga e corrosivo, que ocorrem isoladamente ou em combinação. Segundo Kato (2001), o desgaste adesivo ocorre quando há adesão

entre as superfícies, enquanto o abrasivo resulta do arranjo e dureza das partículas em contato. Já o desgaste por fadiga é causado por movimentos repetitivos, e o corrosivo decorre de reações químicas ou eletroquímicas em ambientes agressivos.

A lubrificação é uma das principais ferramentas para controlar o atrito e o desgaste. Lubrificantes reduzem a resistência ao movimento entre superfícies, prolongando a vida útil de componentes mecânicos e melhorando a eficiência energética. Segundo Sinatora (2005), os avanços no desenvolvimento de lubrificantes sintéticos e revestimentos tribológicos têm ampliado as aplicações da tribologia, desde a indústria automotiva até a aeroespacial.

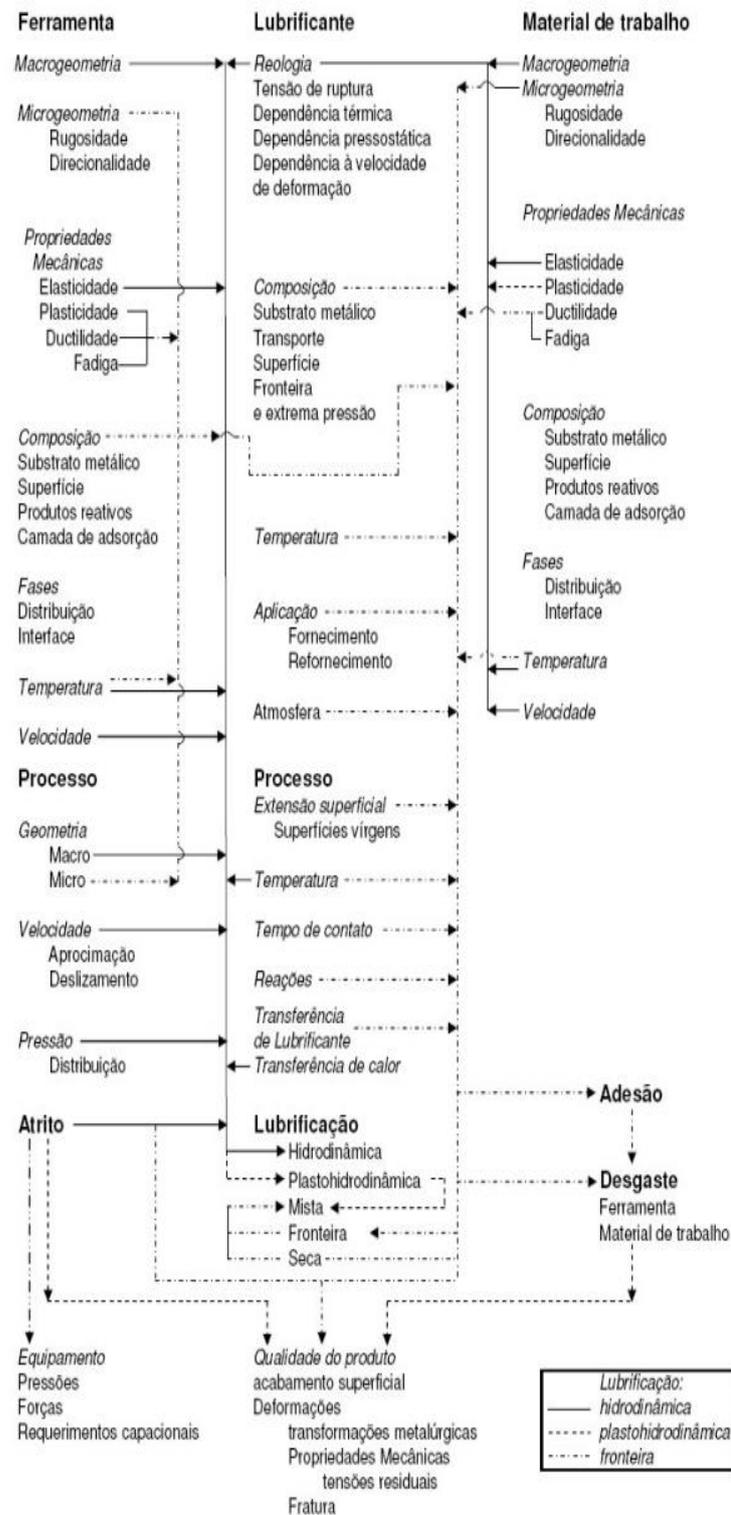
Os tribômetros são equipamentos essenciais na caracterização tribológica de materiais. Esses dispositivos permitem medir o coeficiente de atrito, a taxa de desgaste e a durabilidade de revestimentos sob condições controladas de carga, velocidade e temperatura. Gonçalves *et al.* (2007) destacam que esses estudos são aplicáveis em áreas como engenharia biomédica, eletrônica e ótica, ajudando a projetar sistemas mais confiáveis e eficientes.

As aplicações da tribologia são vastas e essenciais para a engenharia moderna. Ela é empregada no design de motores, transmissões, rolamentos e sistemas hidráulicos, além de setores emergentes como nanotecnologia e biomateriais. Segundo Peterson (1980), o entendimento detalhado dos mecanismos tribológicos pode levar ao desenvolvimento de materiais e sistemas com maior eficiência energética e menor impacto ambiental.

### **2.2.1 Mecânica da conformação de engrenagens**

A conformação de engrenagens envolve a aplicação de forças significativas para moldar materiais em formas específicas. Este processo depende de uma interação complexa entre material, ferramentas e condições de operação. Durante a conformação, a distribuição de tensões e deformações no material é fortemente influenciada pela geometria das ferramentas, pelas propriedades do material da peça a ser conformada e pelas condições de atrito na interface ferramenta-material. Um controle preciso desses fatores é essencial para garantir a qualidade do componente final, minimizando defeitos como trincas, irregularidades de superfície ou deformações indesejadas, de acordo com a ABNT (2000). Na Figura 6, Geier apresenta os elementos que compõem o sistema de lubrificação na conformação.

Figura 6 – Elementos do sistema de lubrificação em processos de conformação mecânica



Fonte: Geier, 2007

O comportamento mecânico do material da engrenagem desempenha um papel central nesse processo. Materiais como o aço SAE 4140, que combinam alta resistência e ductilidade, são preferidos, pois podem suportar a deformação plástica

necessária sem falhar. Por outro lado, as ferramentas de conformação devem ser suficientemente rígidas para manter sua geometria sob altas pressões, evitando desgaste excessivo ou deformação.

Segundo a ABNT (2000), as condições de operação, como velocidade de conformação, temperatura e lubrificação, também são determinantes. Por exemplo, em processos de conformação a quente, a elevação da temperatura reduz a resistência à deformação do material da engrenagem, facilitando a moldagem, mas aumenta a suscetibilidade ao desgaste das ferramentas. Já na conformação a frio, onde as temperaturas são mais baixas, o atrito e as forças de conformação são maiores, exigindo um planejamento rigoroso para prevenir falhas. Visto a importância de levar em consideração a tribologia nos processos de conformação, e ao grande número de fatores que devem ser considerados, a tribologia é um campo complexo e bastante variável, por isso tão presente e estudado (Geier, 2007).

Além disso, modelagens computacionais e simulações numéricas são frequentemente usadas para prever o comportamento durante a conformação, permitindo ajustes no projeto antes da fabricação das ferramentas. Essas análises ajudam a otimizar o processo, reduzindo custos e aumentando a eficiência na produção de engrenagens com alto padrão de qualidade. Assim, a conformação de engrenagens é uma área onde o conhecimento de tribologia, ciência dos materiais e engenharia mecânica convergem para alcançar resultados precisos e confiáveis.

## **2.2.2 Modelos usados para descrever o atrito e o fator de atrito na conformação**

Bueno (1999) afirma que modelos como a teoria de Amontons-Coulomb e a Lei de Prandtl são frequentemente usados para descrever o comportamento do atrito nos processos de conformação. Estes modelos ajudam a prever o coeficiente de atrito e os esforços necessários para a conformação.

A teoria de Amontons-Coulomb estabelece que o atrito é proporcional à força normal na interface entre as superfícies em contato, sendo o coeficiente de atrito o fator de proporcionalidade. Esse modelo é amplamente utilizado devido à sua simplicidade, mas apresenta limitações em condições em que o atrito é influenciado por outros fatores, como a presença de lubrificantes ou deformações significativas nos materiais.

O coeficiente de atrito,  $\mu$ , segundo a teoria de Amontons-Coulomb, é a razão entre a força de atrito e a força normal em uma superfície ou entre a tensão cisalhante e a tensão normal na interface de contato (Costa *et al.*, 2017). Essa relação é independente da área de contato. A equação 1 representa essa relação.

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{\tau}{\sigma_N}$$

Neste caso  $F$  é a força tangencial,  $P$  é a força normal aplicada,  $\tau$  é a tensão cisalhante e  $\sigma_N$  é a tensão normal. O modelo de Amontons-Coulomb é aplicado em situações com baixa pressão de contato, como na laminação de aços planos, onde a tensão normal média é inferior à tensão de escoamento. Nesse caso, a tensão de cisalhamento na interface é limitada pelo limite de elasticidade do material em cisalhamento puro (Costa *et al.*, 2017).

Por outro lado, a Lei de Prandtl é mais sofisticada e leva em consideração o comportamento plástico dos materiais durante a conformação. Ela descreve como as tensões tangenciais se distribuem na interface, ajudando a entender o atrito em condições de alta pressão e deformação, típicas de processos como a conformação de engrenagens. Esse modelo é particularmente útil para prever a formação de zonas de deslizamento e aderência, fenômenos críticos na interface ferramenta-material, segundo Bueno (1999).

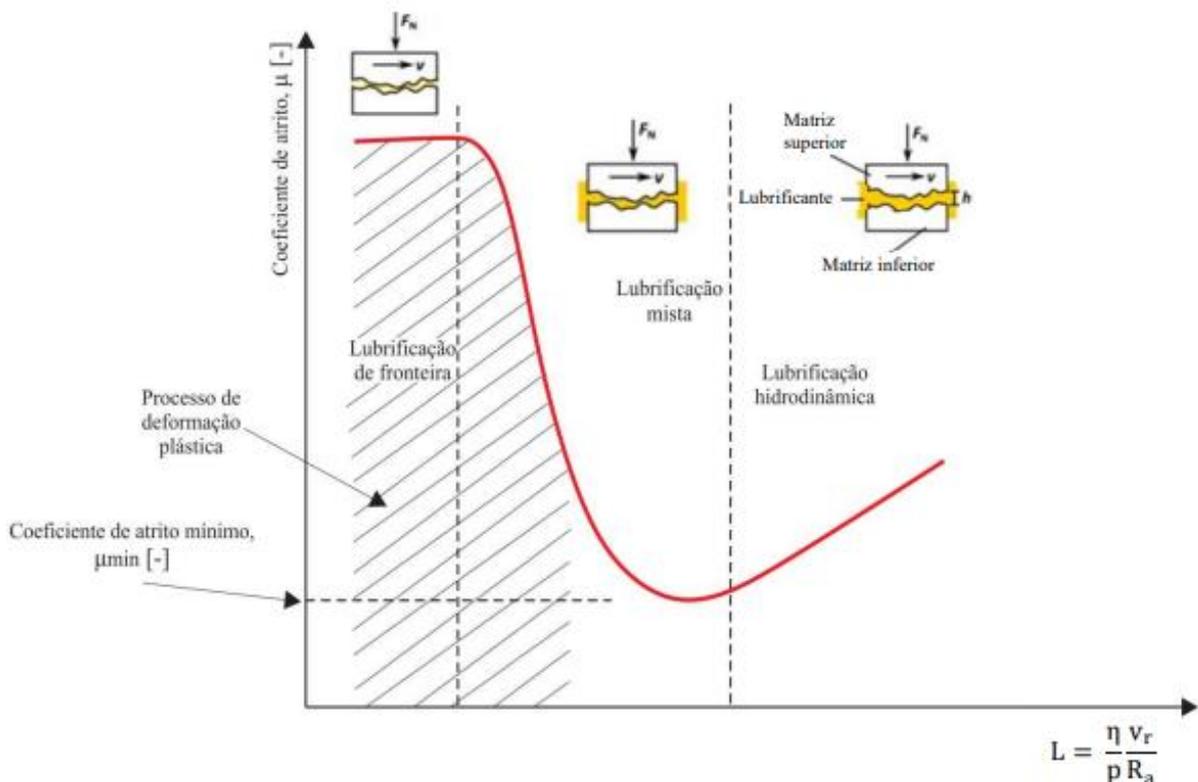
Além desses modelos clássicos, abordagens modernas incorporam simulações computacionais baseadas em métodos numéricos, como o método dos elementos finitos (FEM). Essas simulações permitem considerar variações locais no coeficiente de atrito devido a mudanças na temperatura, pressão ou condições de lubrificação. O uso dessas ferramentas ajuda a projetar processos mais eficientes e a reduzir o desgaste das ferramentas, aumentando sua vida útil.

Bueno (1999) afirma que a aplicação de lubrificantes é frequentemente integrada ao uso desses modelos, modificando as condições de atrito e facilitando a conformação. A eficácia dos lubrificantes é avaliada por sua capacidade de criar um filme que separa as superfícies, reduzindo o contato direto e, conseqüentemente, o desgaste e a energia necessária para a conformação. Esses modelos, aliados a estudos experimentais e computacionais, formam a base para otimizar processos de conformação e melhorar a qualidade dos componentes fabricados.

### 2.2.3 Lubrificação na conformação de engrenagens

A lubrificação desempenha um papel crucial na conformação, reduzindo o atrito e o desgaste das ferramentas. Os regimes de lubrificação podem ser ilustrados pela Curva de Stribeck, que descreve a relação entre a espessura do filme de lubrificante e o coeficiente de atrito, segundo Bueno (1999). A Curva de Stribeck descreve a relação entre o coeficiente de atrito e a espessura relativa do filme de lubrificação em função de parâmetros como velocidade, viscosidade do lubrificante, e carga aplicada. Essa curva é dividida em três regimes de lubrificação principais, de acordo com Sousa (1982): (i) **Lubrificação Limite**: Ocorre quando o filme de lubrificante é extremamente fino e não consegue separar totalmente as superfícies de contato. Nesse regime, o atrito é alto, e o desgaste é predominante. (ii) **Lubrificação Mista**: Ocorre quando há uma mistura entre áreas de contato direto e áreas separadas pelo filme lubrificante. O atrito é menor do que na lubrificação limite, mas ainda há algum desgaste. (iii) **Lubrificação Hidrodinâmica**: Ocorre quando o filme lubrificante é espesso o suficiente para separar totalmente as superfícies em contato, resultando em um atrito significativamente menor e em desgaste praticamente inexistente.

Figura 7 – Curva de Stribeck e Regimes de Lubrificação



Fonte: Adaptada de Rodrigues e Martins (2010).

Essa curva é fundamental para entender o impacto da espessura do filme lubrificante no atrito e no desgaste, destacando a importância de um filme adequado para otimizar o desempenho e proteger as superfícies de contato.

#### 2.2.4 Desgaste e mecanismos de desgaste em matrizes de conformação de engrenagens

Os mecanismos de desgaste incluem abrasão, adesão e fadiga superficial. O desgaste excessivo pode comprometer a precisão e a vida útil das ferramentas, destacando a importância de estratégias eficazes de lubrificação e seleção de materiais. A abrasão ocorre quando partículas duras ou irregulares nas superfícies causam arranhões ou cortes no material da ferramenta. Esse tipo de desgaste é comum em condições em que há impurezas ou contaminantes no sistema de lubrificação, conforme explica a ABNT (2000). Segundo Chander (2017), o desgaste abrasivo e do material pode ocorrer devido os fatores descritos na Figura 8.

Figura 8 – Fatores influentes ao aparecimento e progressão do desgaste abrasivo



**Fonte:** Chander, 2017

A adesão surge quando há transferência de material entre as superfícies em contato devido à soldagem localizada provocada por altas pressões e temperaturas. Esse mecanismo pode resultar em irregularidades e defeitos na superfície das peças conformadas e nas ferramentas. A aplicação de lubrificantes eficazes que reduzam a interação direta entre as superfícies e a escolha de materiais com baixa afinidade química podem minimizar o desgaste adesivo.

Esses mecanismos de desgaste podem atuar de forma isolada ou combinada, dependendo das condições operacionais e dos materiais envolvidos. A

implementação de estratégias de lubrificação adequadas, associadas à manutenção e monitoramento contínuo, é essencial para prolongar a vida útil das ferramentas, melhorar a qualidade dos produtos conformados e reduzir os custos operacionais no longo prazo.

### 2.3 ENSAIOS PARA DETERMINAR O COEFICIENTE DE ATRITO

Para determinar qual o material adequado para cada aplicação, é necessário entender como ele se comporta quando submetido a diferentes forças, que podem ser de compressão, tração etc. Para isto, segundo Sousa (1982), são utilizados ensaios mecânicos, que permitem determinar as propriedades mecânicas dos materiais.

De acordo com Sousa (1982), os ensaios podem ser classificados como destrutivos ou não-destrutivos, onde o primeiro, após aplicado, torna a peça inutilizável, sendo feito por meio de aplicações de forças que a rompem e/ou danificam. Já o segundo é feito por meio de máquinas com raio X e ultrassom, sem necessidade de danos. Conforme Souza (1982), a determinação de qual melhor ensaio a ser aplicado, dependerá de fatores como quais características mecânicas desejam-se medir, a finalidade do material e, principalmente, quais esforços o material sofrerá.

O atrito desempenha um papel crucial nas interfaces de contato durante a conformação, influenciando diretamente a eficiência do processo e a qualidade das peças produzidas. No entanto, as condições extremas a que essas interfaces estão sujeitas, como por exemplo as altas temperaturas, grandes deformações plásticas e altas taxas de deformação, tornam desafiador o estudo e a medição precisos do coeficiente de atrito durante a conformação. A Figura 10 ilustra como o atrito se comporta de acordo com a variação da carga que é aplicada, ou seja, com a força aplicada.

Apesar dos avanços na tecnologia e na teoria da tribologia, métodos experimentais convencionais para determinar o coeficiente de atrito, como o ensaio pino-sobre-face e o ensaio cilindro-sobre-face, muitas vezes apresentam limitações em sua aplicabilidade e precisão.

### 2.3.1 Ensaio de Compressão do Anel

Entre os métodos disponíveis para avaliar o coeficiente de atrito, o ensaio de compressão do anel emergiu como uma técnica amplamente reconhecida nas últimas décadas. Inicialmente proposto por Kunogi (1956), esse método foi posteriormente refinado e detalhado por Male e Cockcroft (1965). Sua abordagem se baseia na análise das alterações dimensionais de uma amostra durante a compressão entre duas superfícies planas.

Figura 9 – Efeito da carga no coeficiente de atrito.



**Fonte:** Bogoni Junior, 2016.

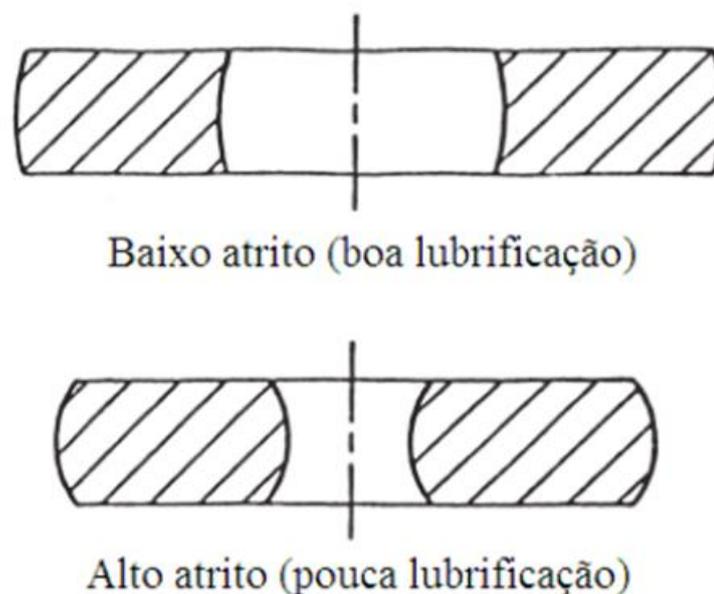
Quando um anel liso é submetido à compressão entre duas placas, o alto atrito resulta em um fluxo interno do material, enquanto o baixo atrito leva ao escoamento do material, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 9. Ao observar as mudanças no diâmetro interno da amostra durante o teste de compressão em relação à redução da altura do anel, é possível estimar indiretamente o coeficiente de atrito na interface entre a peça e a matriz, conforme mostrado na Figura 10. A interpretação desses dados permite a plotagem de curvas específicas que relacionam os coeficientes de atrito com as condições de deformação, baseadas em modelos.

Além disso, a simulação matemática surge como uma ferramenta complementar poderosa para analisar aspectos como deformação do material, distribuição de tensões e comportamento sob diferentes condições de atrito. A integração de modelos físicos experimentais com simulações numéricas oferece uma

abordagem abrangente para investigar o mecanismo de fricção em condições de grande deformação plástica (Junior *et al.*, 2011).

Estudos anteriores também destacaram a influência de diversos fatores nos resultados do ensaio de compressão de anel, incluindo a composição do material, a presença de lubrificantes e a temperatura de ensaio. A seleção adequada desses parâmetros é essencial para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos (Jardim *et al.*, 2023).

Figura 10 – Efeito do atrito sobre o fluxo do metal durante o teste compressão do anel



**Fonte:** Junior, Martins e Schaeffer, 2011

Um estudo realizado por Jardim *et al.* (2023) apresentou uma análise comparativa do coeficiente de atrito entre o aço ABNT 1045 e WC-10Co revestido com AlCrN, utilizando dois métodos distintos: ensaio de torneamento e ensaio de compressão de anel à quente. Os resultados indicaram que o ensaio de compressão de anel à quente é uma técnica promissora para determinar o coeficiente de atrito em diferentes condições de temperatura e materiais de trabalho.

Além disso, um estudo de Sahin *et al.* (2007) investigou a influência da rugosidade superficial das amostras na determinação do coeficiente de atrito pelo ensaio de compressão do anel. Eles observaram que superfícies mais rugosas tendem a apresentar coeficientes de atrito mais elevados devido ao aumento da área de contato entre a peça e a matriz.

Embora existam métodos convencionais para determinar o coeficiente de atrito em condições de usinagem, como o ensaio pino-sobre-face e o ensaio cilindro-sobre-

face, esses métodos apresentam limitações em sua aplicabilidade e precisão. Assim, a exploração de técnicas alternativas, como o ensaio de compressão de anel à quente, é justificada pela necessidade de obter medições mais precisas e confiáveis do coeficiente de atrito em condições de usinagem.

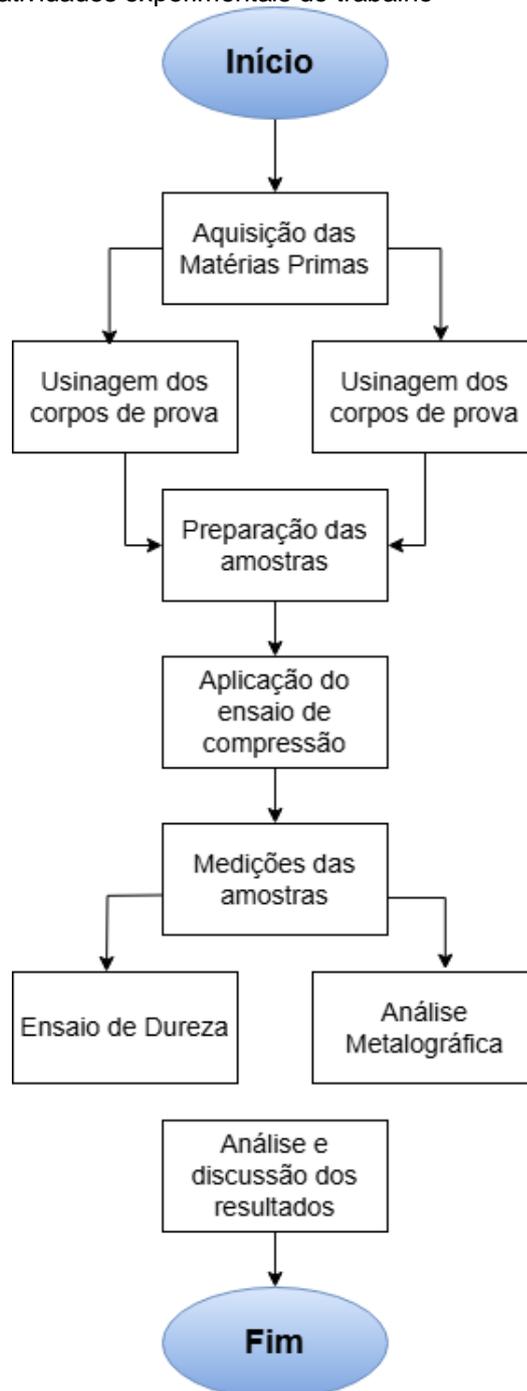
O ensaio de compressão de anel à quente oferece uma abordagem promissora para a determinação do coeficiente de atrito em condições de conformação mecânica. Ao simular de forma precisa as condições de temperatura e deformação encontradas em processos de conformação, essa técnica pode fornecer informações importantes para estudos tribológicos mais abrangentes e precisos (Bhushan, 2013).

Ainda, segundo a ABNT (2000), o ensaio de compressão do anel é amplamente utilizado para determinar o coeficiente de atrito em processos de conformação. Ele envolve a compressão de um anel metálico sob condições controladas, medindo-se a variação de diâmetros internos e externos.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No presente capítulo serão mostradas as estratégias e metodologias utilizadas para o desenvolvimento do estudo, com a finalidade de atingir os objetivos propostos no início do trabalho. Para isso serão realizadas atividades práticas de ensaio e medições, além da análise dos resultados, como mostra a Figura 11.

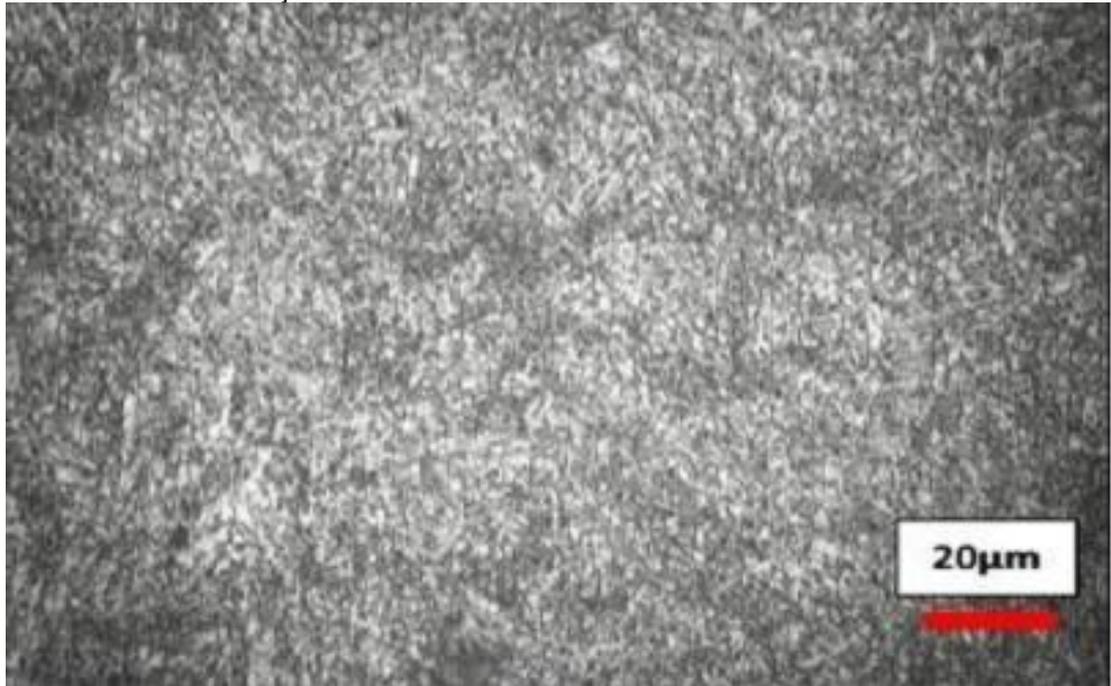
Figura 11 – Fluxograma de atividades experimentais do trabalho



### 3.1 MATERIAL

O material utilizado neste estudo foi o aço SAE 4140, um aço liga cromo-molibdênio amplamente utilizado em aplicações industriais que exigem alta resistência mecânica combinada com boa tenacidade. A Figura 12 apresenta a microestrutura do aço SAE 4140 como é recebido (sem nenhum processo aplicado).

Figura 12 – Microestrutura do aço SAE 4140 como é recebido



Fonte: Mazen, 2014

Cada elemento que compõem este material é responsável por contribuir com as características finais que este aço apresenta, como por exemplo, o carbono aumenta a dureza e a resistência à tração, devido a formação de martensita. O cromo e o molibdênio melhoram a resistência ao desgaste, à corrosão e à temperabilidade, formando carbonetos que reforçam a microestrutura. O manganês e o silício são reforçados para a resistência e ductilidade, refinando a microestrutura e melhorando a homogeneidade dos grãos. Embora o fósforo e o enxofre aumentem a usinabilidade e a resistência à corrosão, em excesso podem comprometer a tenacidade. O ferro forma a matriz básica, determinando a base estrutural do aço.

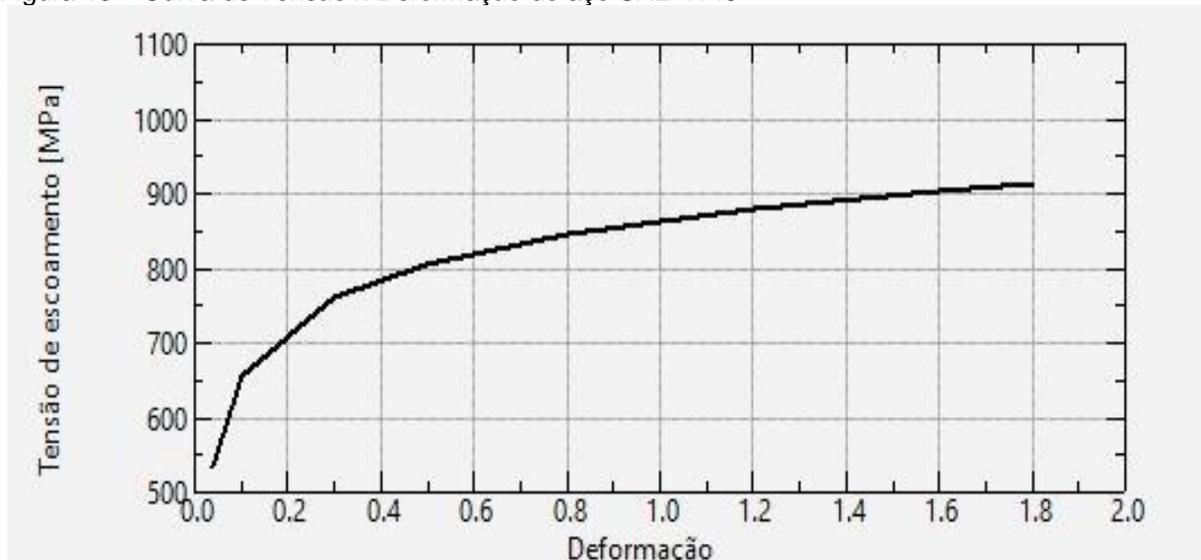
A interação desses elementos permite ajustar o aço SAE 4140 para aplicações que exigem alta resistência, durabilidade e usinabilidade. A composição química típica deste aço é apresentada na Tabela 1. A curva de escoamento do material do estudo é representada na Figura 13.

Tabela 1 – Composição química aço SAE 4140

Componente	Percentual (%)
Carbono (C)	0,38-0,43
Cromo (Cr)	0,80-1,10
Molibdênio (Mo)	0,15-0,25
Manganês (Mn)	0,75-1,00
Silício (Si)	0,15-0,35
Fósforo (P)	máx. 0,035
Enxofre (S)	máx. 0,040

Fonte: Autora, 2024

Figura 13 – Curva de Tensão x Deformação do aço SAE 4140



Fonte: LdTM, 2024

Foram confeccionados 18 anéis de aço SAE 4140. Os anéis apresentavam dimensões cuidadosamente controladas, com diâmetro externo de 18 mm, diâmetro interno de 9 mm e espessura de 8 mm, conforme Figura 14. Essas dimensões foram escolhidas para garantir a representatividade do material e facilitar a análise das deformações durante os ensaios. Antes do início dos testes, os anéis foram inspecionados para garantir uniformidade e ausência de defeitos que pudessem influenciar os resultados experimentais.

Além dos anéis, foram usinados 9 batentes em aço D6, aço ferramenta com alta resistência ao desgaste e alta dureza, com medidas de altura correspondentes aos percentuais de compressão aplicados (20, 40 e 60%), conforme Figura 15. Estes batentes servem como limitador no momento de prensagem, garantindo que não se ultrapasse as medidas desejadas para o ensaio.

Figura 14 – Anéis usinados em suas dimensões iniciais



Fonte: Autora, 2024

Figura 15 – Batentes usinados



Fonte: Autora, 2024

### 3.2 LUBRIFICANTE

Para os ensaios com lubrificação, foi utilizado o Óleo para Transmissões SAE 85W-90 da marca John Deere, apresentado na Figura 16. Trata-se de um lubrificante amplamente reconhecido por sua elevada viscosidade e capacidade de formar um filme resistente à altas pressões, cujas principais características deste lubrificante são

apresentadas na Tabela 2. Esse óleo foi aplicado em uma camada uniforme na superfície de contato dos anéis antes do início de cada ensaio.

Tabela 2 – Propriedades lubrificante 85W-90

Propriedade	Método	Óleo para Transmissão
Viscosidade a 40 °C	ASTM D445	175.9 cSt
Viscosidade a 100 °C	ASTM D445	17.43 cSt
Índice de Viscosidade (IV)	ISO 2909	102
Ponto de Fluidez	ISO 3016	-36 °C

Fonte: Autora, 2024

O lubrificante da Figura 16 é comumente empregado para manutenção da lubrificação de engrenagens, transmissões, reduções finais e diferencial de máquinas e implementos agrícolas. A escolha desse lubrificante teve como base sua performance em regimes de alta pressão, sendo ideal para reduzir o atrito e minimizar o desgaste nos processos de conformação. Nos ensaios sem lubrificação, os anéis foram limpos previamente para remover qualquer resíduo que pudesse interferir nos resultados.

Figura 16 – Óleo utilizado como lubrificante para o ensaio



Fonte: Site John Deere, 2024

### 3.3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO PELO ENSAIO DO ANEL

Os ensaios foram conduzidos em uma prensa hidráulica modelo PH 600, fabricada pela FKL, conhecida por sua precisão e capacidade de aplicação de altas cargas, cedida pelo Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), conforme Figura 17. A prensa utilizada tem como força máxima 600 toneladas, pressão máxima de 250 kgf/cm<sup>3</sup>, uma potência instalada de 40 kW, tensão de 380 V. Além disso, sua abertura máxima é de 1500 mm e seu curso 600 mm.

Figura 17 – Prensa PH 600



Fonte: Autora, 2024

O equipamento é uma prensa hidráulica robusta, capaz de atender demandas industriais de alto impacto e esforços. Os anéis foram submetidos a compressões programadas de 20%, 40% e 60%, correspondendo a diferentes níveis de deformação. Durante os ensaios de 20% e 40%, foi utilizado um limite de carga de 150 toneladas, enquanto, para 60%, foi necessário aumentar o limite para 200 toneladas devido às maiores resistências encontradas. Para cada nível de compressão, foram realizados 6 ensaios: 3 com e 3 sem lubrificação, totalizando 18 ensaios.

Para todos os casos, as peças foram dispostas da mesma forma, sendo os ensaios realizados de acordo com o percentual de compressão (do menor para o maior), sendo feito primeiro com lubrificante e após com o uso dele. Entre cada etapa foi realizada a limpeza do equipamento com thinner a fim de garantir que as faces da matriz utilizada estivessem devidamente livres de lubrificação. Nos casos em que havia o uso de lubrificante, ele foi espalhado uniformemente na superfície abaixo e acima da peça, conforme a Figura 18.

Figura 18 – Disposição das amostras para o ensaio de compressão: (a) sem lubrificação; (b) com lubrificação



(a)

(b)

A prensagem ocorreu em temperatura ambiente, ou seja, a frio, utilizando uma velocidade de 5mm/s. Essa abordagem permitiu uma comparação direta dos efeitos do lubrificante na redução do atrito e na preservação das características geométricas dos anéis, de acordo com Bueno (1999).

O coeficiente de atrito foi determinado através da análise da deformação dos anéis durante o ensaio de compressão. Para isso, foram realizadas medições antes e após o ensaio aplicado, utilizando como instrumento de medição um paquímetro analógico da marca Mitutoyo de 300mm de capacidade e graduação de  $\pm 0.02$  mm.

Nas amostras antes do ensaio, foram realizadas medições de diâmetro interno, externo e altura, já após ensaio, os diâmetros externo e interno, bem como a altura, foram medidos em múltiplos pontos para avaliar as variações geométricas decorrentes da compressão. Isso ocorreu para todos os corpos de prova, nas condições com e sem lubrificação.

Essas medições permitiram identificar padrões de deformação e relacioná-los com as condições de lubrificação e os percentuais de redução aplicados. Os valores obtidos foram tabelados, para posterior processamento e análise dos mesmos. Foram calculados percentuais de redução, e valores médios e desvios padrão dos resultados, principalmente nos valores referentes a redução de altura e diâmetro interno, pois são as duas variáveis responsáveis por determinar a curva de atrito que o material sofreu. Isso ocorreu ao plotar os valores obtidos junto a curva de calibração de atrito simulada em software para o aço SAE 4140 nas mesmas condições do ensaio.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E MEDIÇÃO DAS AMOSTRAS

Além da determinação do coeficiente de atrito do ensaio, foram realizadas análises de dureza e metalografia das amostras prensadas, para analisar como ficou a microestrutura das amostras após passarem pelo processo de prensagem, se houve alteração, e quais foram. Para ambos, foram utilizados os corpos de prova cuja prensagem foi feita com uso de lubrificante, sendo eles selecionados de forma aleatória. As análises foram realizadas no Laboratório de Metalografia da FAHOR. Para análise da microestrutura dos anéis prensados, foi necessário fazer o corte de um dos corpos de prova. Para isso foi utilizada a cortadora metalográfica, conforme a Figura 19.

Figura 19 – Máquinas para corte da amostra



Fonte: Autora, 2024

Feito o corte, a amostra foi para o processo de embutimento. Ele ocorre com o auxílio da prensa embutidora, utilizando a baquelite em pó como material. Para aproveitar a mesma operação, foram cortados os três anéis nos três níveis de redução e embutidos todos em uma única peça, conforme a Figura 20.

Figura 20 – Máquinas prensagem da amostra

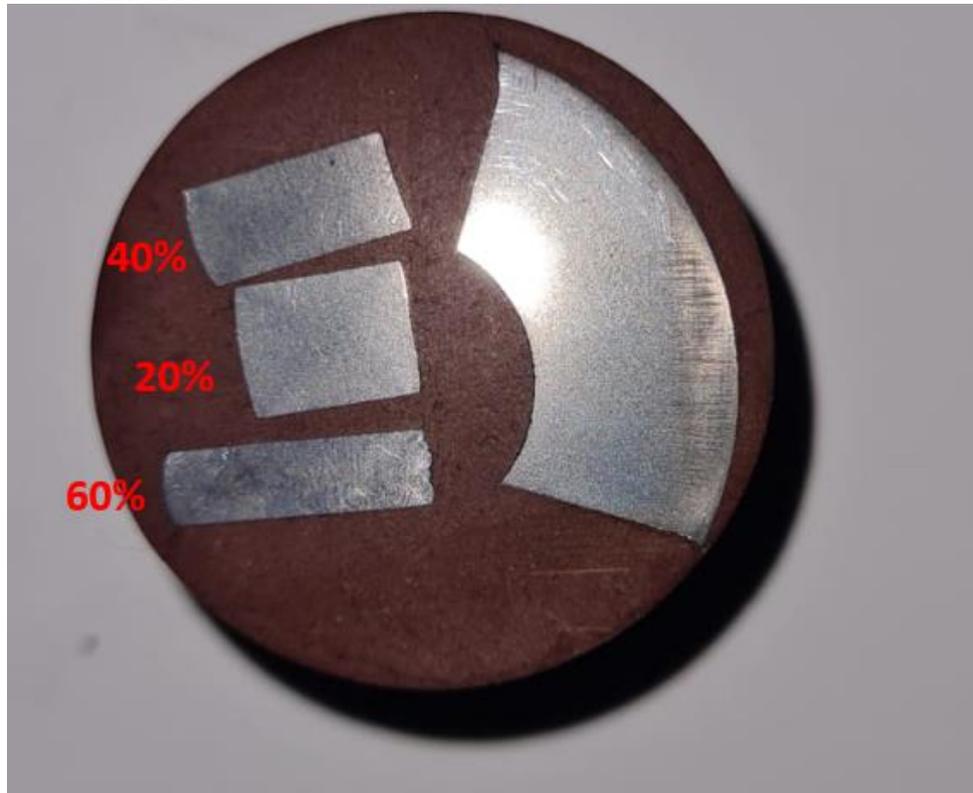


Fonte: Autora, 2024

O material permanece na prensa por cerca de 15 minutos, onde ele fica sendo prensado a uma pressão máxima de 150 kgf/cm<sup>3</sup>. Primeiro a prensa foi aquecida, em seguida foi aplicada a pressão pelo tempo programado (15 minutos) e assim que a luz “cooler” ligou, mostrando que o material pode ser retirado, a amostra foi removida da prensa. Durante a prensagem, foi necessário manter uma pressão constante, para que o pó fosse igualmente compactado.

Após o material ser resfriado, a etapa final de preparação consistiu no lixamento da amostra, para que a superfície estivesse regular e passível de visualização no microscópio. Para isso foram utilizadas lixas nas seguintes gramaturas: 100, 220, 320, 400, 600 e 1200, resultando na amostra da Figura 21.

Figura 21 – Amostra embutida



**Fonte:** Autora, 2024

Após prontas, as amostras foram fotografadas utilizando o microscópio óptico, modelo TNM-07T-PL, da marca Opton, nas 3 lentes disponíveis, cada uma com uma escala diferente. Enquanto decorria a prensagem da peça, foi realizada a medição da dureza nos anéis restantes, também considerando os anéis prensados com o uso de lubrificantes. Para isso foi utilizado o Durômetro, modelo Pantec RASN-T da marca Panambra, do laboratório, conforme a Figura 22.

Figura 22 – Peça sendo medida dureza



**Fonte:** Autora, 2024

Para maior precisão dos resultados, foram realizadas oito medições para cada percentual de prensagem, totalizando 24 tiragens realizadas. A partir dos dados e informações obtidas a partir de pesquisas bibliográficas e dos resultados obtidos nas aplicações do ensaio de compressão no aço SAE 4140, será possível verificar se as hipóteses propostas neste estudo são, ou não, confirmadas.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos métodos e processos descritos no capítulo anterior. São analisados os resultados relativos ao coeficiente de atrito obtido, dureza e metalografia das amostras.

### 4.1 MATERIAL

Conforme dito no capítulo anterior, foram realizadas medições de dureza nos anéis prensados com lubrificante. Foram realizadas oito repetições e obtidos os valores conforme a Tabela 3. Também foram calculadas a média e o desvio padrão de cada caso para que fosse possível realizar a análise.

Tabela 3 – Dureza medida nos anéis

Redução (%)	Média	Desvio Padrão
20	16,81	5,601
40	21,38	5,572
60	22,06	6,202

Fonte: Autora, 2024

É possível concluir que a dureza aumentou conforme a redução da altura do anel também aumentava. Isso mostra que o processo de conformação promove uma compactação no material, promovendo uma maior resistência e conseqüentemente uma maior dureza no material, ou seja, torna o material mais denso. Em processos onde é necessário aumentar a dureza de um material, o processo de prensagem/compressão pode ser utilizado para obter este fim.

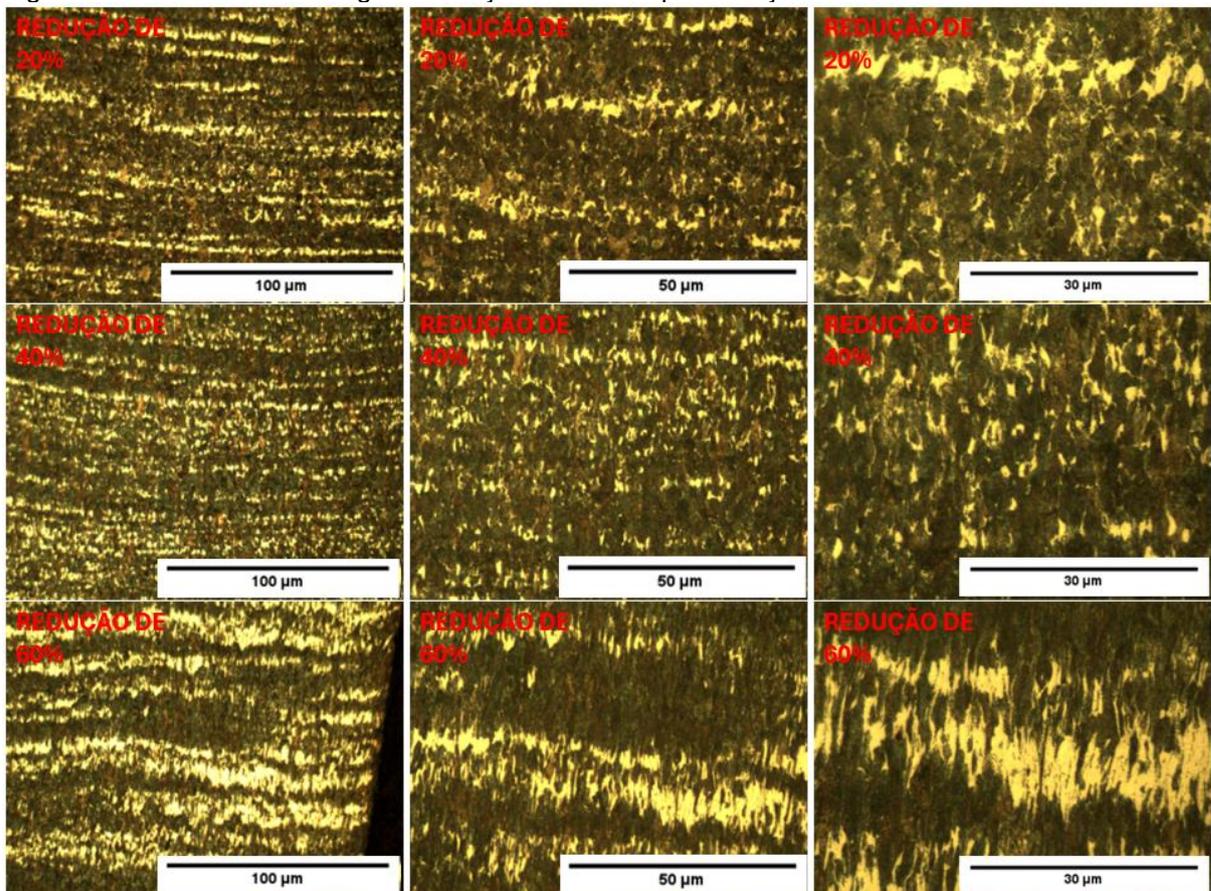
Quanto ao desvio padrão, não houve grandes níveis de variação. A maior variação ocorreu nas amostras com maior percentual de redução, e isso pode ser explicado devido à maior complexidade em reduzir este percentual na altura da peça. Esta variação pode resultar também em variações na microestrutura do material.

Para a análise da microestrutura, foi realizada a prensagem junto à baquelite em pó. Após a prensagem e devido tratamento, as imagens apresentadas na Figura 23 foram tiradas, para análise da microestrutura do material. Analisar a microestrutura dos corpos de prova após o ensaio é fundamental para entender como o material reage à deformação. Durante a compressão, os grãos do material sofrem

redistribuição e alinhamento, o que influencia diretamente em características como resistência e ductilidade.

Esse tipo de análise também ajuda a identificar possíveis defeitos, como microfissuras ou tensões residuais, que podem comprometer a integridade do componente. Como o aço SAE 4140 é muito utilizado em aplicações que exigem alta resistência, é essencial relacionar as alterações na microestrutura às propriedades mecânicas finais.

Figura 23 – Amostra de micrografia do aço SAE 4140 após reduções



Fonte: Autora, 2024

É possível observar que na redução de 20% a deformação ocorre de forma mais superficial, com distribuição uniforme, não ocorrendo alongamento significativo do grão. As maiores alterações estruturais que é possível observar ocorrem nas regiões mais próximas às bordas dos grãos. Já na redução de 40% é possível notar que há um maior grau de deformação plástica nos grãos. Também é visível que o espaçamento entre os grãos reduziu, além disso, a orientação em que o material se altera passa a sofrer maior influência do fluxo que o material trabalha enquanto ocorre o processo de compressão. Por fim, na amostra com redução de 60%, há o maior

alongamento de grãos entre as amostras, os grãos estão também ainda mais comprimidos e apresentando um alinhamento que é característico de deformações maiores. A Figura 24 apresenta uma amostra de cada percentual de prensagem e condição de lubrificação.

Figura 24 – Amostras prensadas



**Fonte:** Autora, 2024

A deformação ocorreu de forma bem distribuída e homogênea, o que sugere que o lubrificante desempenhou o papel de reduzir o atrito entre a peça e a matriz. Além da análise da estrutura do material, foram medidas as dimensões finais de cada corpo de prova para posterior análise de atrito. Para isso utilizou-se um paquímetro analógico, e para os anéis prensados sem lubrificação, os valores encontrados são apresentados na Tabela 4. Para os corpos de prova cuja prensagem ocorreu com uso de lubrificante, os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 – Resultados obtidos nos corpos de prova sem uso de lubrificante

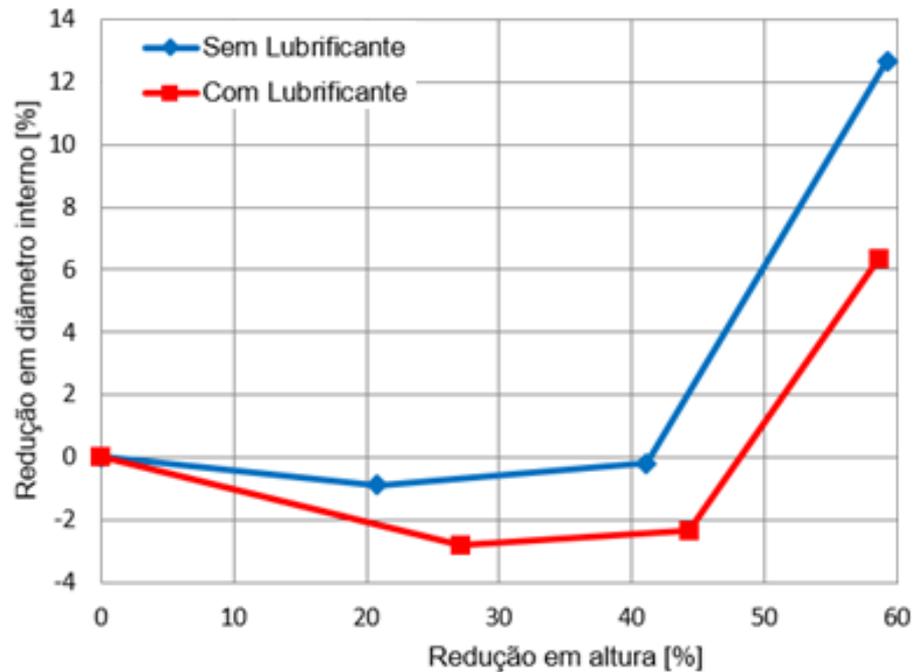
Redução	Amostra	Altura inicial (mm)	Altura final (mm)	Redução da altura (%)	Øint inicial (mm)	Øint final (mm)	Redução do Øint (%)
20%	CP1	8	6.32	21	12	12.09	-0.75
	CP2	8	6.36	20.5	12	12.06	-0.50
	CP3	8	6.32	21	12	12.17	-1.42
	<b>Média final</b>		<b>6.33</b>	<b>20.83</b>		<b>12.11</b>	<b>-0.89</b>
	<b>Desvio Padrão</b>		<b>0.02</b>	<b>0.29</b>		<b>0.06</b>	<b>0.47</b>
40%	CP1	8	4.68	41.5	12	12.04	-0.33
	CP2	8	4.71	41.125	12	11.97	0.25
	CP3	8	4.74	40.75	12	12.06	-0.50
	<b>Média final</b>		<b>4.71</b>	<b>41.13</b>		<b>12.02</b>	<b>-0.19</b>
	<b>Desvio Padrão</b>		<b>0.03</b>	<b>0.38</b>		<b>0.05</b>	<b>0.39</b>
60%	CP1	8	3.25	59.375	12	10.24	14.67
	CP2	8	3.22	59.75	12	10.49	12.58
	CP3	8	3.31	58.625	12	10.71	10.75
	<b>Média final</b>		<b>3.26</b>	<b>59.25</b>		<b>10.48</b>	<b>12.67</b>
	<b>Desvio Padrão</b>		<b>0.05</b>	<b>0.57</b>		<b>0.24</b>	<b>1.96</b>

Fonte: Autora, 2024

## 4.2 COEFICIENTE DE ATRITO

Os valores do coeficiente de atrito foram calculados para os três diferentes níveis de redução da altura dos corpos de prova (20%, 40% e 60%) durante o processo de prensagem. Para encontrar o coeficiente de atrito foram utilizadas a relação entre a variação da altura dos anéis e a variação no diâmetro interno deles em cada condição de lubrificação aplicada. O resultado obtido é apresentado no gráfico da Figura 25, no qual foram plotadas as curvas de atrito em cada condição realizada.

Figura 25 – Curva do Coeficiente de Atrito



Fonte: Autora, 2024.

Tabela 5 – Resultados obtidos nos corpos de prova com uso de lubrificante

Redução	Amostra	Altura inicial (mm)	Altura final (mm)	Redução da altura (%)	Øint inicial (mm)	Øint final (mm)	Redução do Øint (%)
20%	CP1	8	5.82	27.25	12	12.34	-2.83
	CP2	8	5.84	27	12	12.3	-2.50
	CP3	8	5.83	27.125	12	12.37	-3.08
	<b>Média final</b>		<b>5.83</b>	<b>27.13</b>		<b>12.34</b>	<b>-2.81</b>
	<b>Desvio Padrão</b>		<b>0.01</b>	<b>0.13</b>		<b>0.04</b>	<b>0.29</b>
40%	CP1	8	4.54	43.25	12	12.17	-1.42
	CP2	8	4.43	44.625	12	12.39	-3.25
	CP3	8	4.41	44.875	12	12.29	-2.42
	<b>Média final</b>		<b>4.46</b>	<b>44.25</b>		<b>12.28</b>	<b>-2.36</b>
	<b>Desvio Padrão</b>		<b>0.07</b>	<b>0.88</b>		<b>0.11</b>	<b>0.92</b>
60%	CP1	8	3.32	58.5	12	11.23	6.42
	CP2	8	3.33	58.375	12	11.15	7.08
	CP3	8	3.29	58.875	12	11.34	5.50
	<b>Média final</b>		<b>3.31</b>	<b>58.58</b>		<b>11.24</b>	<b>6.33</b>
	<b>Desvio Padrão</b>		<b>0.02</b>	<b>0.26</b>		<b>0.10</b>	<b>0.79</b>

Fonte: Autora, 2024

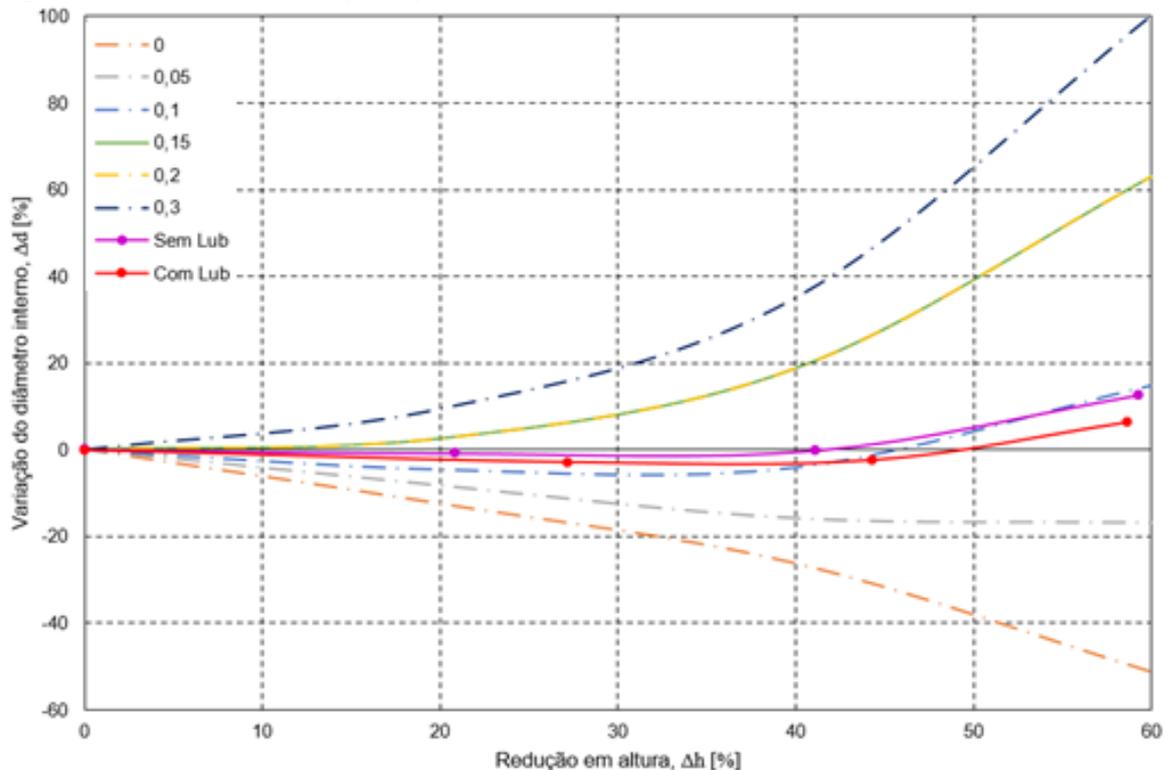
Esses valores refletem a relação entre a força de atrito e a força normal ao longo do processo de conformação, que pode ser influenciada por variáveis como a aplicação de lubrificante, a pressão envolvida e a geometria das amostras. À medida

que a redução da altura aumenta, observa-se um aumento gradual no coeficiente de atrito, o que sugere uma maior interação entre as superfícies de contato devido à compressão do material. Ambas as curvas seguem um padrão bastante semelhante de crescimento, porém é notável que a curva do ensaio com lubrificante apresentou números de coeficiente de atrito menores em relação ao ensaio sem lubrificante.

#### 4.3 DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS

A partir da simulação das curvas feitas no software Qform UK para o aço SAE 4140, foram plotados, juntos as curvas obtidas, os dados calculados das variações percentuais do diâmetro interno e da altura, conforme a Figura 26. É possível observar que na redução de 20% sem uso de lubrificante, a curva inicia próxima a curva do atrito 0,15, porém ao aumentar para 40% desce se aproximando mais da curva de atrito 0,1, para enfim reduzir e cruzar levemente abaixo a curva de atrito 0,1 na redução de 60%. Já no caso do ensaio com uso de lubrificante, a curva em sua totalidade acompanha mais proximamente a curva de atrito 0,1. Em 20% ela segue levemente acima, em 40% de redução ela passa para o limite inferior e na redução de 60% continua se afastando, permanecendo um pouco abaixo do ponto de atrito 0,1.

Figura 26 – Curva de Calibração Aço SAE 4140



Fonte: Autora, 2024

A análise abrangente dos resultados obtidos através dos ensaios de compressão do anel em aço SAE 4140 revelou padrões significativos e importantes correlações entre as variáveis estudadas. Esta discussão concentra-se nos aspectos mais relevantes observados durante a investigação experimental, considerando tanto as condições com lubrificação quanto sem lubrificação, em diferentes níveis de redução.

O estudo demonstrou uma clara variação no comportamento do coeficiente de atrito entre as condições com e sem lubrificação. Na ausência de lubrificante, observou-se um aumento progressivo do coeficiente de atrito conforme a redução aumentava. Este comportamento pode ser atribuído ao incremento das forças de adesão entre as superfícies em contato e à deterioração progressiva da qualidade superficial devido ao contato metal-metal direto.

Já quando houve o uso do lubrificante SAE 85W-90, notou-se que o coeficiente de atrito apresentou um aumento progressivo, porém em valores menores. Este fenômeno pode ser explicado pela formação de um filme lubrificante efetivo, principalmente sob pressões mais elevadas, visto que nos casos de 40 e 60% a diferença de aumento foi mais visível, isso mostra que o lubrificante proporciona melhor proteção contra o desgaste e redução das forças de atrito.

Um estudo realizado por Hu *et al.* (2015), que utilizou o método de variação do anel com ressalto para avaliar o atrito em processos de conformação a frio, retornou coeficientes de atrito entre 0,20 e 0,24 dependendo do fluxo utilizado, com a condição sem lubrificação apresentando o maior valor. Essa convergência de resultados evidencia que, independentemente do método aplicado ou do material testado, a lubrificação é fundamental para a redução do atrito e a melhoria da eficiência do processo. Além disso, em seu estudo o autor destaca que o ensaio promove uma reorganização estrutural interna que resulta em maior resistência mecânica no alumínio Al6082.

Sobre a dificuldade de medir o diâmetro interno devido à ovalização dos anéis durante o processo de estreitamento, Hu *et al.* (2015) apresenta como abordagem para evitar esse problema a introdução do método de ampliação do anel com ressalto, que utiliza o diâmetro externo como referência, minimizando as distorções internas

Partovi *et al.* (2023), apresentou uma abordagem inovadora para determinar o coeficiente de atrito usando aprendizado de máquina aplicado ao teste de especificação de anel. Ele desenvolveu um modelo preditivo baseado em simulações

numéricas realizadas no software ABAQUS, utilizando 3.750 simulações para criar um banco de dados de 18.750 entradas. Este modelo prevê coeficientes de atrito com um erro médio de 4%, demonstrando as previsões de previsão do coeficiente de atrito com alta precisão sem a necessidade de curvas de dificuldades tradicionais. Em seus resultados, observaram coeficientes de atrito de aproximadamente 0,15 para condições sem lubrificação e 0,10 para condições levemente lubrificadas, confirmando a eficácia da lubrificação na redução do atrito.

Outro estudo que aborda o ensaio é o de Hartley *et al.* (2007), que investigaram o impacto do atrito nos testes de compressão realizados em barras de pressão Hopkinson divididas (SHPB), utilizando o ensaio de compressão do anel como ferramenta para estimar fatores de atrito e compreender seus efeitos em diferentes condições de teste. Os materiais avaliados incluíram aço carbono, cobre e alumínio, sendo testados tanto em condições quase estáticas quanto em altas taxas de deformação. Os testes demonstraram que fatores de atrito variam de 0,08 a 0,14, dependendo do material, da condição de superfície e do tipo de lubrificante utilizado. Os autores concluíram que o atrito pode introduzir erros de até 3% nos testes SHPB, recomendando estratégias específicas de lubrificação e preparação de superfície para mitigar esses efeitos.

Portanto, os resultados apresentados destacam-se pela abordagem prática na determinação do coeficiente de atrito no aço SAE 4140, fornecendo uma solução aplicável diretamente em ambientes industriais, com uma redução significativa do coeficiente de atrito de 0,15 para 0,10 ao utilizar lubrificação adequada. Essa abordagem prática foi validada e complementada pelos estudos mais recentes e avançados, como o de Partovi *et al.* (2023), que demonstraram a precisão de métodos baseados em simulações e aprendizado de máquina, confirmando a relevância dos coeficientes obtidos por este estudo ao encontrar resultados similares para condições lubrificadas e não lubrificadas. Além disso, a comparação com metodologias distintas, como a utilização de diferentes geometrias de anéis e simulações computacionais, reforça a robustez do trabalho experimental, evidenciando que os resultados não apenas se alinham às práticas tradicionais de avaliação de atrito, mas também são compatíveis com métodos inovadores e tecnologicamente avançados, consolidando a contribuição prática e científica para o campo da tribologia.

No que diz respeito à deformação geométrica, os anéis apresentaram padrões distintos em função das condições de lubrificação. Nas amostras sem lubrificante,

observou-se uma maior variabilidade nas dimensões finais, particularmente no diâmetro interno. Em contraste, as amostras lubrificadas apresentaram uma deformação mais uniforme e previsível, com menor dispersão nas medidas finais.

Com relação ao lubrificante utilizado, ele se mostrou efetivo, apresentando boa viscosidade na hora da aplicação do ensaio e capacidade de formação do filme lubrificante. Além disso, com os resultados obtidos a lubrificação se mostrou eficiente na redução do coeficiente de atrito e no controle e estabilidade dimensional dos corpos de prova.

Apesar das limitações do estudo, foi possível obter um resultado satisfatório ao final dele. Os resultados práticos se mostraram alinhados às teorias e conceitos obtidos através de estudos bibliográficos, além disso, as comparações com outros estudos realizados utilizando o mesmo ensaio servem como referências para validar os resultados obtidos. O ensaio de compressão de anel apresenta bons resultados, ainda mais quando considerado o seu baixo nível de dificuldade e a não necessidade de grandes investimentos para sua realização a análise.

Conclui-se que os resultados obtidos demonstram claramente a importância crucial da lubrificação adequada em processos de conformação do aço SAE 4140, especialmente em condições de alta redução. A utilização do lubrificante SAE 85W-90 mostrou-se efetiva na redução do atrito e no controle da deformação, resultando em produtos com melhor qualidade e maior consistência dimensional.

Estas descobertas têm implicações significativas para a otimização de processos industriais de conformação, sugerindo que investimentos em sistemas de lubrificação adequados podem resultar em benefícios substanciais tanto em termos de qualidade do produto quanto de eficiência operacional. Além dos benefícios em relação a produtividade e qualidade, os ganhos com a devida utilização da lubrificação também são financeiros, pois a lubrificação reduz gastos com desgaste de ferramenta, e conseqüentemente com retrabalhos, devido a menor variabilidade no processo, o que traz ganhos em redução de custos.

## CONCLUSÃO

Os resultados confirmam que a lubrificação desempenha um papel fundamental na redução do coeficiente de atrito, variando de 0,15 sem lubrificação para cerca de 0,10 com o uso de óleo SAE 85W-90. Isso mostra que o uso de lubrificante não apenas minimiza o desgaste das ferramentas, mas também melhora a eficiência do processo ao reduzir as forças necessárias para a conformação. A lubrificação adequada também contribuiu para maior estabilidade dimensional, diminuindo a dispersão nas medidas finais dos anéis, especialmente em compressões mais elevadas.

O aumento da compressão resultou em uma elevação consistente da dureza dos anéis, de 16,81 HRC para 22,06 HRC, conforme a redução aumentava de 20% para 60%. Esse aumento indica que o processo de compressão pode ser utilizado como uma alternativa para melhorar a resistência mecânica de componentes, tornando-os mais densos e duráveis, características importantes para peças submetidas a altas cargas e desgaste constante.

A análise microestrutural demonstrou que a compressão promoveu um alongamento e alinhamento dos grãos, especialmente nas reduções de 40% e 60%. Isso reflete uma melhora significativa na resistência mecânica e na estabilidade estrutural do aço SAE 4140, características cruciais para aplicações industriais que requerem materiais robustos e de alta performance.

Como sugestão para trabalhos futuros, está a necessidade de investigar diferentes tipos de lubrificantes, também avaliar efeitos da temperatura no processo, além de estudar diferentes velocidades de deformação. Além disso, a análise do desgaste de ferramentas é um campo com oportunidades de estudo.

## REFERÊNCIAS

- ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. **Conformação de metais: fundamentos e aplicações**. São Paulo: EESC-USP, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 172/2000; **Critérios de Classificação dos Aços**. Rio de Janeiro, 2000. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 87/2000; **Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica - Designação e Composição Química**. Rio de Janeiro, 2000. 19p.
- BERTOLDI, Evandro. **Avaliação de atrito e influência do lubrificante por meio de ensaio do anel em aço médio carbono**. XXIV Seminário de Iniciação Científica Unijuí, 2016.
- BHUSHAN, Bharat. **Introduction to tribology**. John Wiley & Sons (2013).
- BOTH, Guilherme. B. **Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste para aplicação em ferramentas de conformação a frio**. Escola de Engenharia Programa de Pós-graduação Em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, Porto Alegre, RS, 2011.
- BUENO, Eleandro Roberto. **Desenvolvimento do Procedimento de Soldagem do Aço AISI 4140 sem Tratamento Térmico Posterior**. Florianópolis: UFSC, 1999. 74p.
- BUDINSKI, K.G. **Surface Engineering for Wear Resistance**. Prentice Hall, 1988.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. LTC, 2002.
- CHANDER, S.; CHAWLA, V. **Failure of Hot Forging Dies: An Updated Perspective**. Materials Today: Proceedings, Volume 4, 2017.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2005.
- COSTA, L. L., ZOTTIS, J., LISBOA, C. P., SCHAEFFER, L. **Interface Peça-Ferramenta na Conformação Mecânica: Conceitos Referentes ao Atrito**. In: Seminário de Inovação e Tecnologia do IFSul, 6º, 2017, Sapucaia do Sul – RS. Anais... São Paulo: Editora ABM, 2017.
- DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. 3ª ed. McGraw Hill, 1986.
- GEIER, M. **Considerações sobre o Atrito para Processos de Forjamento a Frio Através do Ensaio de Compressão do Anel**. Porto Alegre. UFRGS, 2007.
- HOLMBERG, Kenneth; ERDEMIR, Ali. **Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. Friction**. 2017.
- JARDIM, Thaís. R. C; CÂMARA, Marcelo. A., MAGALHÃES, Frederico. D. C; SANTOS, Anderson. J. D. **Avaliação da aplicabilidade do ensaio de compressão de anel à quente para determinar o coeficiente de atrito no ensaio de torneamento do aço ABNT 1045 por meio de análise estatística**. Matéria (Rio de

Janeiro), (2023)

JÚNIOR, Paulo Ricardo Boesch; MARTINS, Vinicius; SCHAEFFER, Lírio. **Determinação do coeficiente de atrito pelo ensaio de compressão do anel: uma revisão.** Revista Thema, Pelotas, v. 8, n. 1, 2011.

HARTLEY, R. S.; CLOETE, T. J.; NURICK, G. N. **An experimental assessment of friction effects in the split Hopkinson pressure bar using the ring compression test.** International Journal of Impact Engineering, 2007.

HU, Chengliang; OU, Hengan; ZHAO, Zhen. **An alternative evaluation method for friction condition in cold forging by ring with boss compression test.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 224, p. 18-25, 2015

KUNOGI, Mahito. **A new method of cold extrusion.** J Sci Res Inst Tokyo, 50; (1957).

LANFREDI, A.; PRADOS, E.F., **Tópicos Experimentais em Materiais. Roteiro de laboratório; Dureza e Tratamento térmico.** Universidade Federal do ABC, 2015.

LANGE, K. **Modern Metal Forming Technology for Industrial Production.** Journal of Materials Processing Technology, 1997.

LEITE, Matheus C; SANTOS, Matheus R; ZAQUEU, Renan A; MARIN JUNIOR, Ronaldo S; ROCHINSKI, Vinicius A; SOUZA, Sueli L; SCARPIN, Lucas M; SANTOS, Paulo S. B. **Ensaio de tração mecânica e análise metalográfica do aço SAE 1045.** Revista Engenharia em Ação UniToledo, 2, (2017).

MAGALHÃES, F. C.; FIGUEIREDO, R. B.; AGUILAR, M. T. P.; PERTENCE, A. E. M.; CAMPOS, H. B.; CETLIN, P. R. **Susceptibilidade à fadiga térmica de matrizes fechadas para forjamento a quente.** Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 11, n. 2, p. 131-137, abr./jun. 2014.

MALE, A.T.; COCKCROFT, M.G. **A method for the determination of the coefficient of friction of metals under condition of bulk plastic deformation.** J Inst Metals (1964–1965).

MANDIĆ, Vesna.; STEFANOVIĆ, Milentije. **Friction studies utilizing the ring – compression test - Part I.** 8th International Tribology Conference, (2003).

MAZEN, A; MOKHTAR, G; WAHAB, A. M. A. **Effect of Heat Treatment on the Fracture Toughness of AISI 4140 Steel.** Minia Journal of Engineering and Technology, (MJET), 2014.

MESQUITA, Rafael. A; HADDAD, Paulo. T. **Propriedades Fundamentais dos Aços Ferramenta para Matrizes de Forjamento.** XIII Conferência Internacional em Forjamento, Porto Alegre, RS, 2009.

MICHELS, L. B; LIMA, D. R. S; SCHAEFFER, L; GRUBER, V. **Uma visão geral sobre os equipamentos utilizados no processos de forjamento.** Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2013.

OCEL, Justin M.; PROVINES, Jason. **Properties of Anchor Rods Removed from**

**San Francisco Oakland Bay Bridge.** The Federal Highway Administration, Mclean, v. 1, n. 1, p.1-68, ago. 2015.

PARTOVI, A., WANG, H., SADENGI, B., PEIDONG, W. **A machine learning approach for determination of coefficient of friction from ring compression test.** Tribology International, 180, 108198, 2023.

PORR, Priscila; SINATORA, Amilton. *Estudo sobre a influência da carga de deformação e do coeficiente de atrito nas propriedades do aço 1020.* 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

RODRIGUES, J., & MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica.** Volume II - Aplicações Industriais. Dinterna. Lisboa, Portugal, 2010.

SAHIN, Mumin; CETINARSLAN, Cem. S; AKATA, H. Erol. *Effect of surface roughness on friction coefficients during upsetting processes for different materials.* Materials & Design, (2007).

SCHULER; ALTAN, T. *Metal Forming Handbook.* Berlin: Springer Verlag, 1998.

SHIRGAOKAR, M. **Cold and Hot forging: fundamentals and applications.** ASM International, 2005.

SILVA, Bryan Miyahara Moraes. **Comparação da microestrutura e das propriedades mecânicas do aço SAE 4140 submetido a têmpera e revenimento convencional e por indução por meio de uma simulação por dilatométrica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2023.

SOUSA, Sérgio Augusto. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos.** 5ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. 286p.

SUSKI, Cassio Aurélio. **Conformação Mecânica de Múltiplos Estágios.** Publicação IFSC, Florianópolis, 2015.

TURATTI, Ednildo; BIRCK, Gabriel; TOSO, Marcelo André. **Avaliação do comportamento mecânico do aço SAE 4140.** Destaques Acadêmicos, Lajeado, v. 9, n. 4, p. 204-223, 2017.