

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL  
Campus Ibirubá**

**VITOR ADELINO BENETTI**

**Influência do desgaste em insertos de metal duro no processo de torneamento de  
aço SAE 4140**

**Ibirubá  
2025**

VITOR ADELINO BENETTI

Influência do desgaste em insertos de metal duro no processo de torneamento de aço  
SAE 4140

Proposta de projeto apresentada como requisito parcial para o desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso do curso Superior em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá.

Orientador: Bruno Nonemacher

Ibirubá  
2025

## RESUMO

Este trabalho investigou a influência do desgaste de insertos de metal duro no processo de usinagem do aço-liga SAE 4140, com foco no impacto sobre o acabamento e na resistência à fadiga das peças usinadas. O objetivo foi analisar comparativamente o desempenho entre operações realizadas com ferramentas novas e desgastadas. A pesquisa teve caráter experimental, envolvendo a usinagem do material nas duas condições mencionadas, seguida da realização de ensaios de fadiga por flexão rotativa conforme a norma ASTM E 466, e medições de rugosidade por meio de rugosímetro Mitutoyo. Os resultados foram analisados a partir das curvas S-N (Wöhler) obtidas nos ensaios e dos valores de rugosidade média (Ra). Constatou-se que, apesar das rugosidades médias das peças usinadas com insertos novos terem sido superiores, o desvio padrão nessa condição foi significativamente menor em comparação com os insertos desgastados, indicando maior uniformidade no processo. Em relação à resistência à fadiga, não foram observadas diferenças significativas nos valores médios entre as duas condições testadas. No entanto, os insertos desgastados propiciaram diferentes níveis de rugosidade superficial, o que resultou em maior dispersão no número de ciclos até a falha por fadiga. Observou-se que o elevado desvio padrão da rugosidade nas peças usinadas com insertos desgastados refletiu diretamente em um alto desvio padrão dos ciclos de fadiga. Isso evidencia que o desgaste da ferramenta aumenta a imprevisibilidade no comportamento à fadiga do material usinado, tornando o processo menos consistente sob essa condição.

**Palavras-chaves:** fadiga, rugosidade, metal duro.

## ABSTRACT

This study investigated the influence of wear on cemented carbide inserts in the machining process of SAE 4140 alloy steel, focusing on the impact on surface finish and fatigue resistance of the machined parts. The objective was to comparatively analyze the performance between operations carried out with new and worn tools. The research had an experimental approach, involving the machining of the material under both mentioned conditions, followed by rotating bending fatigue tests in accordance with ASTM E 466, and surface roughness measurements using a Mitutoyo profilometer. The results were analyzed based on the S-N (Wöhler) curves obtained from the tests and the average roughness values (Ra). It was found that, although the average roughness of the parts machined with new inserts was higher, the standard deviation under this condition was significantly lower compared to the worn inserts, indicating greater process uniformity. Regarding fatigue resistance, no significant differences were observed in the average values between the two tested conditions. However, the worn inserts led to varying levels of surface roughness, which resulted in greater dispersion in the number of cycles until fatigue failure. It was observed that the high standard deviation in roughness for parts machined with worn inserts directly reflected in a high standard deviation of fatigue cycles. This indicates that tool wear increases the unpredictability of the fatigue behavior of the machined material, making the process less consistent under this condition.

**Key-words:** fatigue, roughness, hard metal.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo do processo de usinagem	7
Figura 2 - Forças de usinagem e suas componentes	9
Figura 3 - Embalagem de ferramenta com parâmetros de usinagem	10
Figura 4 - Esquema representativo dos ângulos das ferramentas de corte	12
Figura 5 - Ferramentas de aço rápido	13
Figura 6 - Ferramenta de rosqueamento	13
Figura 7 - Ferramenta de sangramento	14
Figura 8 - Ferramentas de corte de torno com direção de alimentação diferente	14
Figura 9 - Ferramentas de torno segundo o tipo de operação (cortar, cilindrar, sangrar, alisar, facear, rosquear)	15
Figura 10 - Tipos de desgastes em ferramentas de metal duro.	21
Figura 11 - Representação esquemática do perfil de rugosidade e cálculo do parâmetro Ra (rugosidade média aritmética)	26
Figura 12 - Perfilômetro Mitutoyo	27
Figura 13 - Rugosímetro óptico	28
Figura 14 - Curvas S-N para materiais aplicados na engenharia	31
Figura 15 - Representação esquemática da curva de Wöhler (diagrama S-N), com base em aços submetidos à fadiga, conforme Callister (2012)	32
Figura 16 - Superfície de fratura por fadiga. Etapas envolvidas no processo de fadiga: nucleação (A), propagação da trinca (B) e fratura final.	33
Figura 17 - Barra de aço SAE 4140 utilizada como matéria-prima para usinagem dos corpos de prova	36
Figura 18 - Inseto de usinagem utilizado para fabricação dos corpos de prova	38
Figura 19 - Torno CNC - GT-250B	39
Figura 20 - Projeto 2D do corpo de prova	41
Figura 21 - Tarugo após faceamento e execução do furo de centro	41
Figura 22 - Tarugo após usinagem do perfil	42
Figura 23 - Corpo de prova após processo de usinagem	42
Figura 24 - Ensaio de tração do aços SAE 4140	43
Figura 25 - Máquina de ensaiar resistência à fadiga	44
Figura 26 - Corpo de prova preso no sistema de fixação da máquina	44
Figura 27 - Rugosímetro Mitutoyo SJ-210	46
Figura 28 - Medição da rugosidade dos corpos de prova	46
Figura 29 - Macrografia de inserto desgastado	47
Figura 30 - Macrografia de inserto novo	48
Figura 31 - Macrografia do flanco de corte: a) Flanco de inserto novo e b) Flanco de inserto desgastado	50
Figura 32 - Análise macroscópica da fratura. (a) Inseto novo e (b) Inseto desgastado	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios e recomendações de escolha de ferramentas de usinagem	16
Tabela 2 - Classificação de insertos de metal duro conforme a norma ISO 513	18
Tabela 3 - Composição química do aço SAE 4140	37
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço SAE 4140	37
Tabela 5 - Número de corpos de prova de acordo com a condição de teste	40
Tabela 6: Cargas e tensões resultantes aplicadas aos corpos de prova	45
Tabela 7 - Medição do desgaste de flanco das ferramentas	49
Tabela 8: Valores de Ra para corpos de prova e média de acordo com a condição de usinagem	52
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de fadiga	54
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de fadiga para condição de usinagem com inserto novo	55
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de fadiga para condição de usinagem com inserto desgastado	57
Tabela 12 - Comparativo dos resultados de resistência à fadiga entre as condições de usinagem	61
Tabela 13 - Comparativo do parâmetro de rugosidade Ra entre as condições de usinagem	62

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva tensão-deformação dos corpos de prova	51
Gráfico 2 - Curva S-N para condição de usinagem com ferramentas novas	55
Gráfico 3 - Curva S-N para condição de usinagem com ferramentas desgastadas	56
Gráfico 4 - Comparativo da curva S-N entre as duas condições de usinagem	58
Gráfico 5 - Correlação entre Desvio Padrão da Rugosidade ( $R_a$ ) e Desvio Padrão médio do número de ciclos	59

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNC	Controle Numérico Computadorizado
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
HSS	<i>High Speed Steel</i>
MD	Metal Duro
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
HRC	<i>Hardness Rockwell C</i>
BUE	<i>Build-up edge</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
MQF	Mínima Quantidade de Fluido
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
S-N	<i>Stress versus Number of cycles</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

VC	Velocidade de corte (m/min)
n	Rotação da ferramenta (RPM)
d	Diâmetro (mm)
Vf	Velocidade de avanço (mm/min)
f	Avanço da ferramenta (mm/rot)
$r_\epsilon$	Raio da ponta da ferramenta (mm)
Ra	Rugosidade média aritmética
Rq	Raiz quadrada média da rugosidade
Rz	Altura máxima do perfil
Rsk	Assimetria da rugosidade
WC	Carboneto de Tungstênio
Co	Cobalto
TiC	Carboneto de Titânio
TaC	Carboneto de Tântalo
NbC	Carboneto de Nióbio
WC-Co	Carboneto de Tungstênio e Cobalto
W	Tungstênio
Mn	Manganês
Nb	Nióbio
Cr	Cromo
Ni	Níquel
Mo	Molibdênio
V	Vanádio
M	Momento fletor (Nmm)
I	Momento de inércia da seção transversal ( $mm^4$ )
c	Distância do eixo neutro até a fibra externa (mm)
$\sigma$	Tensão (MPa)
ap	Profundidade de corte (mm)
$V_b^{Max}$	Desgaste de flanco máximo (mm)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	4
1.1 JUSTIFICATIVA	5
1.2 OBJETIVOS	6
1.2.1 Objetivo geral	6
1.2.2 Objetivos específicos	6
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	7
2.1 FUNDAMENTOS DE USINAGEM	7
2.1.1 Parâmetros de usinagem	8
2.2 USINAGEM CNC	10
2.3 FERRAMENTAS DE USINAGEM	11
2.3.1 Tipos de ferramentas de usinagem	12
2.3.1.1 Ferramentas de metal duro	17
2.3.1.1.1 Mecanismos de desgaste de ferramentas de metal duro	19
2.4 FLUÍDOS DE CORTE	21
2.5 AÇOS-LIGA USINADOS NA INDÚSTRIA	23
2.5.1 Comportamento dos aços-liga no processo de usinagem	24
2.6 RUGOSIDADE EM PROCESSOS DE USINAGEM	25
2.6.1 Conceito e importância da rugosidade	25
2.6.2 Fatores que afetam a rugosidade	26
2.6.3 Métodos de medição da rugosidade	27
2.6.4 Rugosidade teórica	28
2.7 FADIGA MECÂNICA EM COMPONENTES USINADOS	29
2.7.1 Conceito de fadiga e mecanismos de nucleação e propagação de trincas	29
2.7.2 Limite de resistência à fadiga	30
2.7.3 Construção da curva de fadiga (Wohler)	30
2.7.4 Influência da qualidade superficial na resistência à fadiga	33
2.7.5 Relação entre rugosidade e vida em fadiga	34
2.7.6 Influência de tensões residuais oriundas da usinagem	35
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	36
3.1 MATERIAL DO CORPO DE PROVA	36
3.2 FERRAMENTA DE CORTE	38
3.3 PARÂMETROS DE USINAGEM	38
3.4 CENTRO DE USINAGEM	39
3.5 FLUÍDO DE CORTE	40
3.6 CONDIÇÕES DE TESTE	40
3.7 ENSAIO DE TRAÇÃO	43
3.8 ENSAIOS DE FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA	43
3.9 ANÁLISES DE ACABAMENTO	45
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	47
4.1 ANÁLISE MACROSCÓPICA DOS INSERTOS	47
4.1.1 Análise do desgaste das ferramentas	48
4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO	50
4.3 ANÁLISES DE ACABAMENTO	51
4.4 ENSAIOS DE FLEXÃO ROTATIVA	54
4.5 ANÁLISE MACROSCÓPICA DA FRATURA	60

4.6 ANÁLISE DOS DADOS	61
<b>5 CONCLUSÃO</b>	<b>63</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A usinagem é uma das principais etapas da fabricação mecânica, amplamente empregada na indústria para a obtenção de componentes com precisão dimensional e acabamento adequados às suas funções. Entre os diversos fatores que afetam a eficiência e a qualidade do processo, o estado da ferramenta de corte, especialmente o desgaste progressivo dos insertos, desempenha um papel decisivo tanto na qualidade superficial da peça quanto em seu desempenho mecânico em serviço (AMORIM, 2002; SILVA et al., 2018).

À medida que o inserto sofre desgaste, ocorrem alterações na geometria de corte, na geração de calor e na formação do cavaco, o que pode resultar em superfícies mais irregulares, com maiores níveis de rugosidade e presença de microdefeitos. Essas imperfeições atuam como potenciais iniciadores de trincas, especialmente em componentes sujeitos a carregamentos cíclicos, impactando diretamente sua resistência à fadiga — um dos modos de falha mais críticos em aplicações estruturais (SILVA et al., 2018).

O aço SAE 4140, amplamente utilizado na fabricação de eixos, engrenagens e outros componentes submetidos a esforços dinâmicos, exige não apenas boa resistência mecânica, mas também acabamento controlado, de forma a garantir durabilidade e confiabilidade em operação. Nesse contexto, torna-se essencial compreender como o desgaste da ferramenta de corte influencia as propriedades finais da peça usinada, permitindo a adoção de estratégias mais eficazes de controle de processo e de manutenção de ferramentas (AMORIM, 2002; MACHADO et al., 2009).

Este trabalho tem como objetivo investigar a influência do desgaste dos insertos de corte na rugosidade e na resistência à fadiga de corpos de prova usinados em aço-liga. Através de ensaios experimentais, busca-se correlacionar a condição da ferramenta com os parâmetros de integridade superficial e desempenho mecânico, contribuindo para a otimização do processo de usinagem e para o aumento da vida útil de componentes críticos.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A busca por processos de fabricação mais eficientes, previsíveis e confiáveis tem impulsionado estudos que relacionam os parâmetros de usinagem ao desempenho funcional dos componentes fabricados. No caso de peças metálicas aplicadas em contextos estruturais, automotivos ou industriais, aspectos como a qualidade superficial e a resistência à fadiga se destacam como critérios fundamentais para garantir durabilidade e segurança operacional (A VOZ DA INDÚSTRIA, 2023; INVENT BRASIL, 2023; BBJOVEM, 2025).

Dentre os fatores que afetam diretamente essas propriedades, o desgaste progressivo dos insertos de corte merece atenção, uma vez que influencia significativamente a formação da superfície usinada e, conseqüentemente, a integridade do componente. Insertos desgastados podem gerar superfícies com maior rugosidade, tensões residuais elevadas e irregularidades geométricas, condições que favorecem a nucleação precoce de trincas de fadiga. Ainda assim, esse efeito muitas vezes é negligenciado em linhas de produção, onde os limites de desgaste da ferramenta nem sempre são monitorados com precisão.

Estudar a influência do desgaste dos insertos sobre a resistência à fadiga e a rugosidade permite compreender melhor a relação entre os parâmetros do processo de usinagem e o comportamento mecânico do produto final. Além disso, fornece subsídios para a definição de limiares técnicos de troca de ferramenta, contribuindo para a redução de falhas prematuras e para o aumento da confiabilidade de peças críticas.

Do ponto de vista acadêmico, a abordagem proposta neste trabalho articula de forma coerente conceitos complementares dentro do campo da Engenharia Mecânica, como engenharia de materiais, processos de fabricação e mecânica da fratura, resultando em uma análise experimental robusta e com forte aplicabilidade industrial. Já sob o aspecto prático, os resultados obtidos têm potencial para auxiliar empresas na tomada de decisões relacionadas à manutenção de ferramentas, ao controle de qualidade e à otimização dos processos produtivos, contribuindo diretamente para o aumento da eficiência e da confiabilidade operacional.

Dessa forma, este estudo justifica-se por seu potencial de contribuição técnica e científica, além de seu caráter aplicável, fornecendo dados relevantes sobre os efeitos reais do desgaste de ferramentas de corte no desempenho de componentes usinados.

## 1.2 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os objetivos gerais e específicos do presente trabalho.

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a influência do desgaste das ferramentas de usinagem no acabamento e na resistência à fadiga do aço SAE 4140, por meio da análise comparativa entre operações realizadas com insertos novos e com insertos desgastados.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a usinagem de corpos de prova do aço SAE 4140 em condições distintas: com ferramentas novas e com ferramentas desgastadas.
- Caracterizar o material dos corpos de prova quanto às suas propriedades mecânicas.
- Analisar a resistência à fadiga do material nas diferentes condições.
- Analisar a qualidade do acabamento das peças usinadas, comparando os resultados obtidos entre insertos novos e desgastados.
- Comparar os dados obtidos para identificar os efeitos da utilização de ferramentas novas e de ferramentas desgastadas na usinagem de aço-liga SAE 4140.

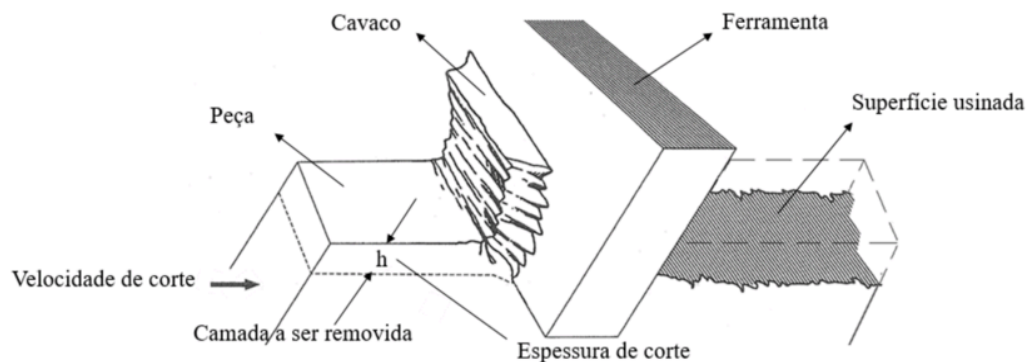
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda, com base em uma pesquisa bibliográfica, os principais conceitos que norteiam esse trabalho: a usinagem com ferramentas novas e com ferramentas desgastadas, e como as condições de rugosidade resultantes desses processos influenciam na resistência à fadiga do aço SAE 4140.

### 2.1 FUNDAMENTOS DE USINAGEM

A usinagem é um processo de fabricação que, por meio da remoção de material em forma de cavaco, atribui a forma desejada à peça final. Define-se como cavaco, a porção de material geometricamente irregular retirada pela ação da ferramenta (MACHADO et al., 2015).

Figura 1: Esquema representativo do processo de usinagem.



Fonte: (MACHADO et al., 2015).

Para que ocorra a remoção de material nas condições usuais de usinagem, a ferramenta penetra na peça, provocando o deslocamento de uma pequena porção do material contra a face de saída da ferramenta.

Durante a operação, a remoção de material ocorre em duas etapas (SENAI, 1998):

- Desbaste: é a primeira fase da usinagem. Nela ocorre a remoção grosseira do sobremetal e não há muita preocupação com a qualidade da superfície gerada.

- Acabamento: é a etapa final da usinagem. Nela ocorre a remoção final de sobremetal e há uma grande exigência quanto às dimensões e ao perfil de rugosidade da superfície gerada.

A usinagem é classificada de duas formas: a convencional na qual o material é removido devido ao cisalhamento ocasionado pela ferramenta de corte, e a não convencional, na qual a extração ocorre por meio de reações químicas, laser, ultrassom, plasma, entre outros. São exemplos de processos convencionais o torneamento, furação, fresamento, retificação, etc e de processos não convencionais a eletroerosão, usinagem química, usinagem a jato d'água, etc (SANTOS; SALES, 2004).

### 2.1.1 PARÂMETROS DE USINAGEM

Os parâmetros de corte são fundamentais para o *setup* correto da máquina, para uma maior eficiência. O cálculo correto destes parâmetros nos permite uma série de vantagens, tais como economia de energia elétrica, aumento da vida útil da ferramenta, economia no fluido de corte, aumento da vida útil da máquina, entre outros (DE ALMEIDA, 2015).

O primeiro parâmetro analisado é a velocidade de corte. Segundo Diniz, Marcondes, Coppini (2013), velocidade de corte é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, sendo medida em metros por minuto. Através dela, pode-se calcular a quantidade de rotações da máquina e o percurso percorrido pela ferramenta no período de um minuto.

Segundo De Almeida (2015), os fatores que influenciam a velocidade de corte são:

- Material da peça a ser usinada;
- Operação de usinagem (desbaste ou acabamento);
- Material da ferramenta utilizado;
- Tipo de perfil que será usinado.

A velocidade de corte ( $V_c$ ) é calculada de acordo com a equação (1):

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} = \frac{m}{min} \quad (1)$$

Onde:

- $d$  = diâmetro da peça em mm;
- $n$  = número de rotações da ferramenta em RPM.

Ao isolar  $n$  na equação de  $V_c$  e multiplicar pelo avanço da ferramenta, é possível obter o valor da velocidade de avanço (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 1969). Essa é dada por (2):

$$Vf = f * n = \frac{1000 * Vc}{\pi * d} * f \quad (2)$$

Onde:

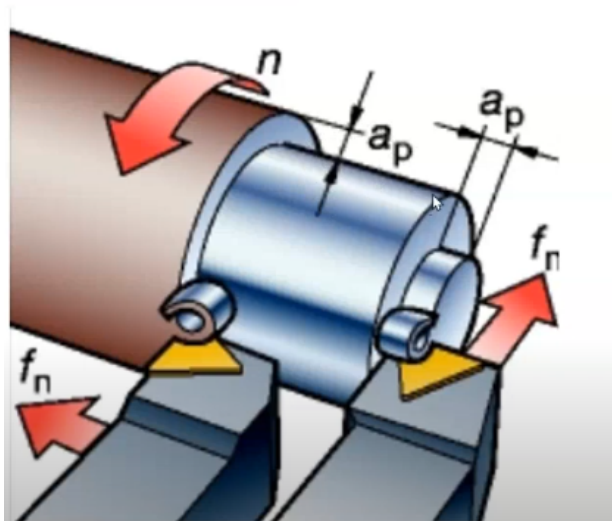
- $Vf$  = Velocidade de avanço em mm/min;
- $f$  = avanço em mm/rotação.

O segundo parâmetro analisado é o avanço ( $f$ ) denominado como o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta. Este parâmetro influencia na formação do cavaco e na rugosidade da peça. (MARCONDES; COPPINI, 2013; MACHADO, 2009).

Profundidade de corte ( $ap$ ) refere-se à grandeza de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. Semelhante ao avanço, esse parâmetro também influencia na formação do cavaco, porém em relação a rugosidade da peça sua influência fica mais evidente para valores acima de 1 mm (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Na figura 2 observa-se a cinemática envolvida entre os parâmetros de usinagem supracitados.

Figura 2: Forças de usinagem e suas componentes



Fonte: Thomazi (2020).

Os fabricantes de ferramentas informam os principais parâmetros de corte — como avanço, velocidade de corte e profundidade máxima — nas embalagens (Figura 3) ou

catálogos a fim de garantir o uso adequado da ferramenta, otimizar o desempenho durante a usinagem e evitar falhas por sobrecarga ou desgaste prematuro. Esses dados orientam o usuário na escolha das condições operacionais mais seguras e eficientes, considerando o material a ser usinado e o tipo de operação.

Figura 3: Embalagem de insertos de usinagem com recomendação de parâmetros de corte.



Fonte: Adaptado de Mercado Livre (2025).

## 2.2 USINAGEM CNC

Segundo a OXIFIX (2024), a usinagem CNC (Controle Numérico Computadorizado) é um processo de manufatura automatizado que utiliza computadores para controlar ferramentas de corte e outros equipamentos. Este sistema permite a fabricação de peças com alta precisão e repetibilidade, utilizando comandos programados em código G que orientam os movimentos da máquina.

Dentre os benefícios da usinagem CNC, se destacam (OXIFIX, 2024):

- **Alta Precisão:** A usinagem CNC oferece uma precisão incomparável, permitindo a produção de peças com tolerâncias muito apertadas.
- **Repetibilidade:** Uma vez programada, a máquina CNC pode reproduzir o mesmo processo inúmeras vezes, garantindo consistência na produção.
- **Eficiência:** A automação reduz a necessidade de intervenção humana, aumentando a eficiência e diminuindo o tempo de produção.

- Flexibilidade: Com a capacidade de programar diferentes operações, a usinagem CNC é adequada para a produção de peças complexas e variadas.
- Segurança: A operação automatizada minimiza os riscos de acidentes, proporcionando um ambiente de trabalho mais seguro.

A usinagem CNC é um processo altamente automatizado e preciso, que envolve várias etapas para transformar o design inicial em um produto acabado. De acordo com OXIFIX (2024), as principais etapas são:

- Projeto: A primeira etapa é a criação do modelo digital da peça a ser usinada. Esse modelo é geralmente elaborado utilizando softwares de CAD (Computer-Aided Design), que permitem a visualização e modificação do design em três dimensões.
- Pré-processamento e Programação: Após o design, o modelo CAD é convertido em um código de máquina utilizando softwares de CAM (Computer-Aided Manufacturing). Esse código, geralmente em formato G-code, contém todas as instruções necessárias para a máquina CNC executar as operações de usinagem.
- Usinagem: Com o código de máquina carregado, a máquina CNC inicia o processo de usinagem. A peça bruta é fixada na mesa da máquina, e as ferramentas de corte executam as operações conforme especificado no G-Code. Durante essa etapa, a precisão e a repetibilidade da usinagem CNC garantem a produção de peças de alta qualidade.

### 2.3 FERRAMENTAS DE USINAGEM

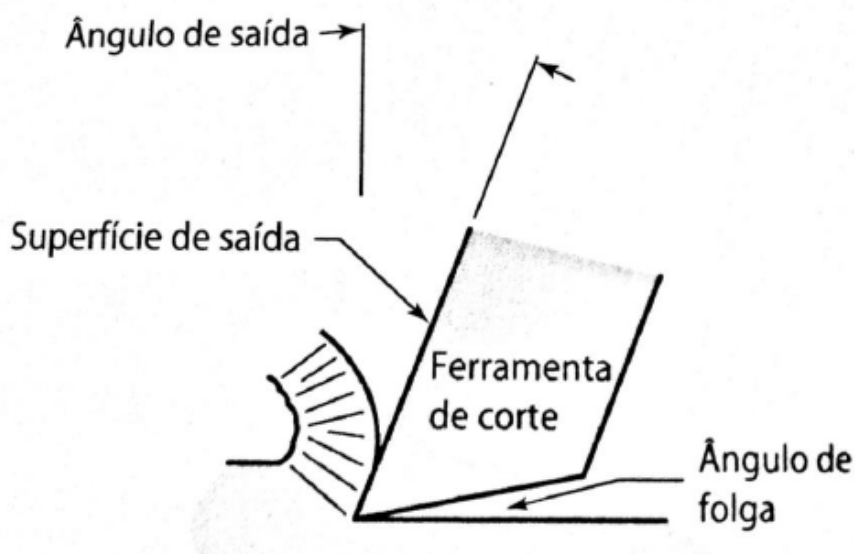
De forma geral, a usinagem é um processo utilizado para dar forma a um material bruto por meio da remoção controlada de material, realizada por uma ferramenta de corte acoplada a uma máquina. O material retirado durante esse processo é conhecido como cavaco, cuja forma e temperatura estão diretamente ligadas aos parâmetros utilizados na operação de usinagem.

De acordo com Fitzpatrick (2013), todas as ferramentas de corte compartilham quatro características: ângulo de saída, ângulo de posição, raio de ponta e ângulo de folga. Essas características são a base da geometria de uma ferramenta de corte, e são definidas por:

- Ângulo de folga: folga atrás da aresta de corte;

- Ângulo de posição ou de corte: distribui a largura do cavaco sobre uma área maior;
- Ângulo de saída: superfície sobre a qual o cavaco desliza;
- Raio de ponta: arredondamento da ponta ou junção entre arestas principal e secundária da ponta de corte.

Figura 4: Esquema representativo dos ângulos das ferramentas de corte



Fonte: Fitzpatrick (2013)

### 2.3.1 TIPOS DE FERRAMENTAS DE USINAGEM

As ferramentas de usinagem podem ser classificadas de diversas formas, de acordo com o tipo de operação, o material da ferramenta, a estrutura construtiva e o sentido de avanço. Além disso, podem ser monolíticas (ferramentas inteiriças) ou modulares (com pastilhas intercambiáveis fixadas em suportes). A escolha adequada do tipo de ferramenta impacta diretamente o desempenho do processo, influenciando o acabamento, o desgaste da ferramenta e a eficiência da usinagem (MACHADO et al., 2015; COMPRACO, 2024).

De acordo com Compraco (2024), existem 4 principais categorias que caracterizam as ferramentas de torneamento:

- Categoria 1: Ferramentas de torneamento por material, onde as ferramentas estão classificadas de acordo com a composição química de cada uma delas, por exemplo, aço rápido (HSS), metal duro (MD), etc.

Figura 5: Ferramentas de aço rápido.



Fonte: Compraco (2024)

- Categoria 2: Ferramentas de torneamento baseadas em operações, onde as ferramentas estão classificadas de acordo com a operação que ela irá realizar, por exemplo ferramenta de desbaste, de acabamento, de sangramento, rosqueamento, etc.

Figura 6: Ferramenta de rosqueamento.



Fonte: Compraco (2024).

- Categoria 3: Ferramentas de torneamento baseadas na estrutura, onde as ferramentas estão classificadas de acordo com as características construtivas de cada uma delas, por exemplo ferramentas de corpo único, ferramentas de fixação, etc.

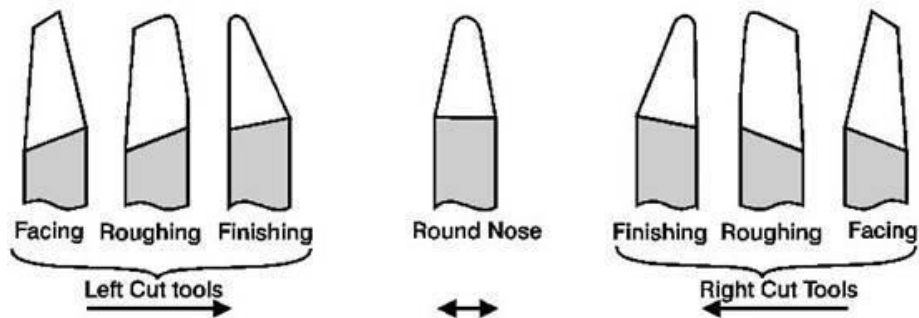
Figura 7: Ferramenta de sangramento.



Fonte: Compraco (2024)

- Categoria 4: Ferramentas de torneamento com base na direção de avanço, onde as ferramentas estão classificadas de acordo com o sentido e direção de avanço durante o ciclo de trabalho, por exemplo ferramenta de torneamento e corte à direita, à esquerda e de cabeça redonda.

Figura 8: Ferramentas de corte de torno com direção de alimentação diferente.



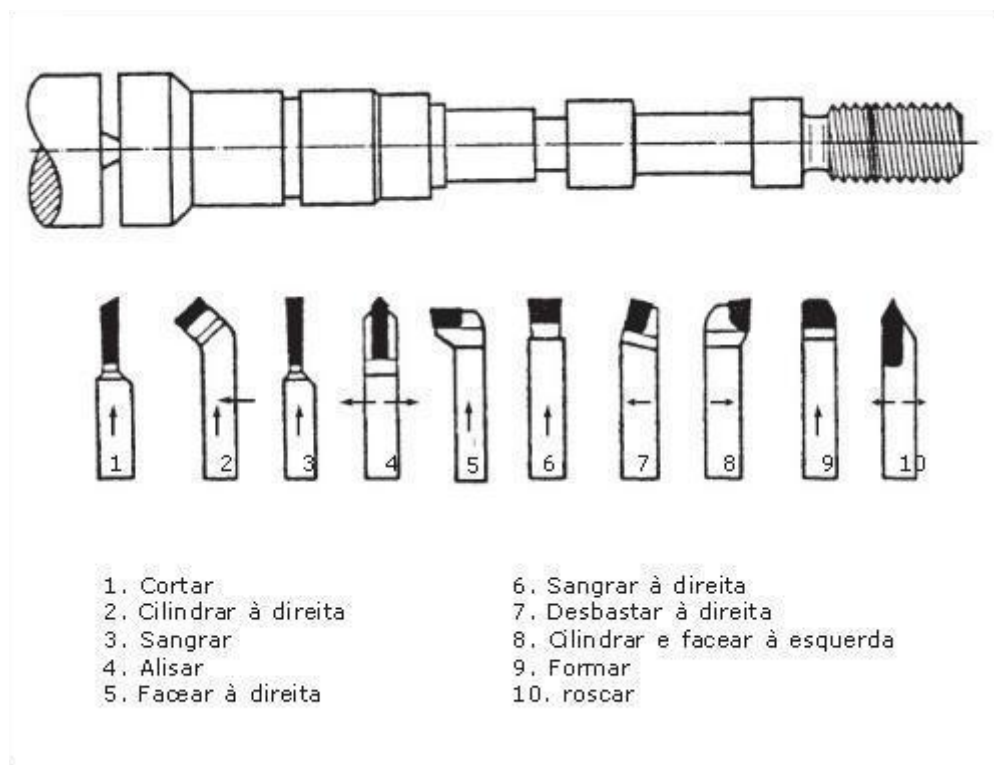
Fonte: CHIGGOFACORY, 2024.

A escolha adequada da ferramenta de corte para cada processo de usinagem deve considerar uma série de fatores técnicos que influenciam diretamente a eficiência, a qualidade do produto final e a vida útil da ferramenta. Entre os principais critérios estão: o material da peça a ser usinada, o tipo de operação (como torneamento, fresamento, furação ou rosqueamento), as condições de corte (velocidade, avanço, profundidade de corte), a geometria da ferramenta (ângulo de folga, ângulo de incidência, raio de ponta) e o tipo de

máquina utilizada. Além disso, aspectos como a presença de fluido de corte, a exigência de acabamento e a tolerância dimensional também interferem na escolha. A correta definição da ferramenta permite não apenas a obtenção de melhores resultados em termos de produtividade e qualidade superficial, mas também contribui para a redução do desgaste precoce e para a estabilidade do processo (MACHADO et al., 2015; PINTO et al., 2018).

A Figura 9 ilustra como a geometria e sentido de avanço da ferramenta são determinantes para a escolha correta da mesma, conforme a operação a ser executada:

Figura 9: Ferramentas de torno segundo o tipo de operação (cortar, cilindrar, sangrar, alisar, facear, rosquear)



Fonte: The Engineers Post (2023).

A Tabela 1 exemplifica os critérios e recomendações de escolha de ferramentas de acordo com o processo a ser realizado:

Tabela 1: Critérios e recomendações de escolha de ferramentas de usinagem.

<b>Tipo de Operação</b>	<b>Critérios Técnicos para Seleção da Ferramenta</b>	<b>Recomendação de Ferramenta</b>
<b>Torneamento</b>	Material da peça (ex: aço-liga, alumínio), tipo de passe (acabamento ou desbaste), rigidez da máquina, velocidade de corte e uso de fluido	Inserto intercambiável de metal duro com geometria negativa para desbaste; geometria positiva para acabamento
<b>Fresamento</b>	Dureza do material, geometria da peça, número de passes, necessidade de remoção volumétrica e acabamento	Fresa de topo de metal duro ou HSS; uso de fresas com pastilhas indexáveis para alta produtividade
<b>Furação</b>	Profundidade do furo, tolerância dimensional, presença de fluido de corte, tendência ao empastamento	Broca helicoidal de HSS ou metal duro com canais largos para evacuação de cavacos
<b>Rosqueamento</b>	Tipo de rosca (interna/externa), passo, tolerância, tipo de material, necessidade de reversão	Macho ou ferramenta de torno com perfil de rosca; uso de pastilhas para tornear roscas em produção
<b>Mandrilamento</b>	Acabamento desejado, concentricidade, tolerância de diâmetro, tipo de furo (passante ou cego)	Ferramentas de precisão com ponta ajustável ou pastilha intercambiável

<b>Acabamento fino / usinagem de precisão</b>	Tolerância estreita, rugosidade, estabilidade térmica	Ferramentas com raio de ponta pequeno, geometria positiva e revestimento fino (ex: TiAlN)
---	--	---

Fonte: adaptado de ROCHA TOOLS (2025); A EG-TEC (2024); ARTIZONO (2024).

### 2.3.1.1 FERRAMENTAS DE METAL DURO

As ferramentas de metal duro tiveram sua origem por volta da década de 1920, na Alemanha, com a produção do carboneto de tungstênio (WC) em pó pela primeira vez (MACHADO et al., 2015). Desde então, tornaram-se amplamente utilizadas na indústria, principalmente devido à possibilidade de variação em sua composição, o que permite atingir combinações otimizadas de dureza à temperatura ambiente, dureza a quente, tenacidade e resistência ao desgaste. Sua fabricação se dá por meio da metalurgia do pó, envolvendo etapas como compressão, sinterização e retificação. As propriedades resultantes — como resistência mecânica, dureza e tenacidade — estão diretamente relacionadas a esse processo produtivo (FERRARESI, 1969).

Essas ferramentas são compostas basicamente por dois constituintes principais: um carboneto de alta dureza e resistência ao desgaste, como o carboneto de tungstênio (WC), e um aglomerante metálico, geralmente o cobalto (Co), pertencente ao grupo do ferro, cuja função é ligar as partículas de carboneto e conferir tenacidade ao conjunto (FERRARESI, 1969). Além do WC, outros carbonetos podem ser incorporados para adicionar propriedades específicas, como o carboneto de titânio (TiC), carboneto de tântalo (TaC) e o carboneto de nióbio (NbC) (REBEYKA, 2016).

A norma ISO 513:2004 estabelece a classificação padronizada dos materiais de corte, como os carbonetos metálicos (metal duro), de acordo com os tipos de materiais a serem usados. Essa norma organiza as ferramentas em seis grupos principais, identificados por letras (P, M, K, N, S, H) e cores padronizadas, facilitando a seleção apropriada do material da ferramenta para cada tipo de aplicação e condição de usinagem.

Cada grupo é subdividido em classes numéricas (ex.: P10, M20, K30), que indicam a relação entre resistência ao desgaste e tenacidade. Números mais baixos representam classes com maior dureza e menor tenacidade, ideais para cortes em alta velocidade com baixo

avanço. Já números mais altos indicam classes com maior tenacidade, recomendadas para operações com maiores cargas mecânicas ou avanços (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 513:2004).

Abaixo, apresenta-se a tabela com a classificação conforme a ISO 513:

Tabela 2: Classificação de insertos de metal duro conforme a norma ISO 513.

<b>Grupo (Símbolo)</b>	<b>Cor ISO</b>	<b>Material a ser usinado</b>	<b>Exemplos de Subgrupos</b>	<b>Características Gerais</b>
<b>P</b>	Azul	Aços em geral (exceto inoxidáveis austeníticos)	P01, P10, P20, P30	Alta resistência ao desgaste, indicada para altas velocidades.
<b>M</b>	Amarelo	Aços inoxidáveis (austeníticos, martensíticos)	M10, M20, M30	Boa tenacidade; requer maior controle térmico e estabilidade do corte.
<b>K</b>	Vermelho	Ferros fundidos (cinzento, nodular, maleável)	K10, K20, K30	Alta dureza e resistência ao desgaste; adequado a cortes interrompidos.
<b>N</b>	Verde	Metais não ferrosos (alumínio, latão, cobre, plásticos)	N05, N10, N20	Excelente acabamento; ideal para materiais macios e abrasivos.

<b>S</b>	Marrom	Superligas (níquel, cobalto), titânio	S05, S15, S25	Requer resistência térmica elevada e corte estável.
<b>H</b>	Cinza	Materiais endurecidos (acima de 45 HRC)	H05, H10, H20	Alta dureza; indicado para acabamento e retificação em peças duras.

Fonte: *INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION* - ISO 513:2004.

A padronização ISO 513 é fundamental para:

- Facilitar a seleção correta da pastilha ou ferramenta, conforme o material da peça;
- Evitar falhas prematuras por uso inadequado do material de corte;
- Otimizar a produtividade e vida útil da ferramenta;
- Uniformizar a comunicação técnica entre fabricantes e usuários.

Essa classificação é amplamente utilizada pelos fabricantes de ferramentas, que identificam suas pastilhas com códigos correspondentes (ex.: P10 para corte leve de aço, K20 para ferro fundido, S15 para ligas de níquel, etc.), garantindo ao usuário uma escolha mais segura e eficiente.

#### 2.3.1.1.1 MECANISMOS DE DESGASTE DE FERRAMENTAS DE METAL DURO

Durante a usinagem, ferramentas de metal duro são submetidas a altas pressões, fricção intensa e temperaturas elevadas, o que resulta na atuação de diferentes mecanismos de desgaste. A compreensão desses mecanismos é essencial para otimizar o processo, aumentar a vida útil da ferramenta e reduzir custos de fabricação (Machado et al., 2009; Diniz & Marinho, 2011).

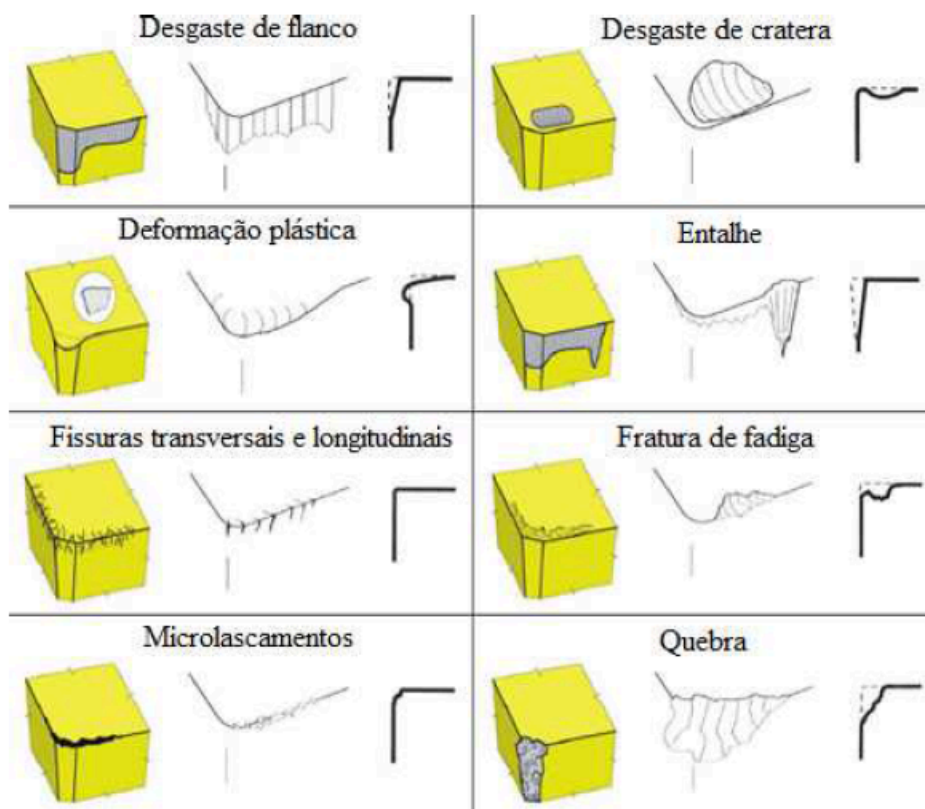
Os principais mecanismos de desgaste de ferramentas de metal duro são:

- **Abrasão:** o desgaste abrasivo ocorre devido ao contato direto entre partículas duras do material usinado e a superfície da ferramenta, removendo material progressivamente. É um dos mecanismos mais comuns em ferramentas de metal duro e tende a ocorrer

principalmente no flanco e na cratera da ferramenta (Machado et al., 2009). Esse tipo de desgaste é típico em usinagem de materiais com alta dureza ou inclusões abrasivas (Trumpold, 2013).

- Aderência (ou adesão): em determinadas condições de temperatura e pressão, ocorre a aderência de fragmentos do material usinado à ferramenta. Esses fragmentos, ao se desprenderem, podem levar junto pequenas porções do metal duro, ocasionando formação de crateras ou lascamentos. Esse fenômeno é frequente em materiais dúcteis, como aços inoxidáveis, e pode gerar formação da chamada "aresta postiça de corte" (BUE) (Diniz & Marinho, 2011; Gomes & Silva, 2012).
- Difusão: esse mecanismo ocorre em temperaturas elevadas, favorecendo a migração de átomos entre o cavaco e a ferramenta. Elementos como tungstênio (W) e cobalto (Co) presentes na ferramenta podem difundir-se para o material usinado, promovendo a degradação da liga do metal duro e acelerando o desgaste da cratera (Gomes & Silva, 2012; Trumpold, 2013).
- Oxidação: em ambientes com presença de oxigênio e temperaturas elevadas, a superfície da ferramenta pode sofrer reação química, formando óxidos frágeis que se desprendem facilmente. Esse processo de oxidação contínua contribui para a perda de massa e para o enfraquecimento da aresta de corte, sendo agravado pela ausência ou má aplicação do fluido de corte (Machado et al., 2009; Trumpold, 2013).
- Fratura (ou fadiga térmica/mecânica): a fratura ocorre quando há variação cíclica de temperatura ou esforços mecânicos sobre a ferramenta, causando trincas térmicas ou por fadiga. Esse tipo de desgaste é comum em processos intermitentes, como o fresamento, e pode resultar em lascamentos ou quebras repentinas (Gomes & Silva, 2012).

Figura 10: Tipos de desgastes em ferramentas de metal duro.



Fonte: MACHADO & SILVA, 2009

## 2.4 FLUIDOS DE CORTE

Durante a usinagem, praticamente toda a potência consumida se transforma em calor e distribui-se entre cavaco, peça, ferramenta e meio-ambiente. As porcentagens dissipadas e absorvidas por cada um variam conforme os parâmetros de usinagem, material da peça e da ferramenta, tipo de usinagem, entre outros, mas, de modo geral, maior parte da energia gerada, de 60 a 80% é dissipada pelo cavaco, 10 a 20% pela peça e o restante, cerca de 10%, pela ferramenta. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008; AKHIL et al., 2016). Apesar de a quantidade de calor absorvida pela ferramenta ser pequena, as regiões em que ele é distribuído também são pequenas, por isso, desenvolvem-se ali altas temperaturas que interferem diretamente no desgaste da ferramenta, podendo ocasionar trincas, sulcos, fraturas, deformação plástica nas arestas cortantes, alterações no acabamento e dimensões da peça devido à dilatação térmica, alterações estruturais, corrosão, etc. Os fluidos de corte surgiram

exatamente para amenizar os efeitos indesejáveis citados. Sua primeira utilização foi constatada por Taylor, em 1980, que ao utilizar água reduziu a temperatura e conseguiu aumentar a velocidade de corte em 33% sem danos à ferramenta (LISBOA; MORAES; HIRASHITA, 2013).

De acordo com Diniz, Marcondes, Coppini (2008), as principais funções dos fluidos de corte são:

- Refrigeração: atua na extração do calor produzido durante os processos, principalmente naqueles em que altas velocidades de corte são utilizadas;
- Lubrificação: esse efeito prevalece em baixas velocidades de corte que permitem que o fluido adira-se na interface cavaco ferramenta, atuando na redução do coeficiente de atrito e, conseqüentemente, diminuindo o calor gerado, os esforços e potências de corte;
- Expulsão de cavaco: dependendo da pressão de fluxo do fluido, ele atua expulsando os cavacos das proximidades, inclusive, em alguns processos como o de furação, os cavacos são expulsos dessa forma;
- Proteção contra corrosão: formam uma camada protetora contra a oxidação na máquina e na peça.

Embora não haja uma classificação universalmente padronizada, os fluidos de corte são geralmente divididos em dois grandes grupos: aquosos e oleosos. Os fluidos aquosos têm como base principal a água e incluem:

- Água pura: usada apenas para resfriamento, de forma limitada, pois não oferece propriedades lubrificantes;
- Óleos solúveis (emulsões): mistura de óleo mineral ou vegetal com água, combinando bom resfriamento com lubrificação moderada;
- Fluidos semissintéticos: contém pequena quantidade de óleo e aditivos solúveis, equilibrando refrigeração e lubrificação com boa estabilidade química;
- Fluidos sintéticos: totalmente livres de óleo, compostos por sais e aditivos que garantem excelente refrigeração, porém com baixa capacidade lubrificante (Trumpold, 2013).

Já os fluidos oleosos, também chamados de óleos integrais, são utilizados puros, sem diluição, oferecendo elevada capacidade de lubrificação e proteção superficial. Eles podem ser:

- Óleos minerais ou vegetais: promovem uma camada de lubrificação espessa, ideais para operações severas;
- Óleos semissintéticos: combinam óleo mineral com aditivos sintéticos, visando maior estabilidade térmica e menor emissão de névoa;
- Óleos sintéticos: formulados com ésteres, poliglicóis ou outras bases químicas, oferecem boa lubricidade, resistência térmica e menor impacto ambiental (Diniz & Marinho, 2011).

Cada tipo de fluido apresenta vantagens e limitações quanto à eficiência térmica, capacidade de lubrificação, impacto ambiental, custo, manutenção e compatibilidade com materiais. Assim, a seleção deve considerar a operação específica, o tipo de material usinado e os objetivos do processo (Trumpold, 2013).

## 2.5 AÇOS-LIGA USINADOS NA INDÚSTRIA

Os aços-liga são materiais ferrosos que apresentam, além do carbono, a adição de elementos químicos como cromo (Cr), níquel (Ni), molibdênio (Mo), manganês (Mn), vanádio (V) e nióbio (Nb), em proporções superiores às encontradas nos aços-carbono comuns. Esses elementos visam melhorar propriedades mecânicas específicas, como resistência ao desgaste, à tração, à fadiga térmica, tenacidade e dureza a quente, tornando os aços-liga amplamente utilizados na indústria para fabricação de componentes críticos (Callister; Rethwisch, 2015).

De modo geral, esses aços são empregados na fabricação de eixos, engrenagens, árvores de transmissão, peças estruturais, ferramentas e componentes automotivos que exigem elevado desempenho mecânico. Entre os mais utilizados na usinagem destacam-se os aços SAE 4140, 4340, 8620 e 52100, com diferentes comportamentos conforme o tratamento térmico aplicado.

Durante a usinagem, os aços-liga apresentam desafios como endurecimento por trabalho, abrasividade, tendência à formação de aresta postiça e geração de calor elevado, especialmente quando possuem alto teor de carbono ou passam por tratamentos térmicos (Machado et al., 2009). Por isso, a escolha correta da geometria da ferramenta, fluido de corte e parâmetros de usinagem é essencial para manter a qualidade superficial e o desempenho do processo.

O SAE 4140, por exemplo, é um aço-liga ao cromo-molibdênio com excelente relação entre tenacidade e resistência mecânica, sendo usinado frequentemente na condição temperada e revenida. Já o 4340 é mais resistente, com maior teor de níquel, e requer ferramentas com alto desempenho e controle térmico rigoroso. O 8620, por conter menos carbono, é mais usinável e amplamente aplicado em peças cementadas. O 52100, aço para rolamento, destaca-se pela alta dureza e resistência ao desgaste, mas exige usinagem em condições muito bem controladas (Diniz & Marinho, 2011; Totten, 2006).

### **2.5.1 Comportamento dos aços-liga no processo de usinagem**

A usinabilidade dos aços-liga está diretamente relacionada à presença e à concentração dos elementos de liga adicionados à matriz ferrítica. Elementos como cromo (Cr), molibdênio (Mo), níquel (Ni), manganês (Mn), vanádio (V) e nióbio (Nb) são amplamente utilizados para melhorar propriedades mecânicas como dureza, resistência ao desgaste, à fadiga e à tração, mas tais melhorias podem, em contrapartida, tornar o processo de usinagem mais exigente (Machado et al., 2009; Diniz & Marinho, 2011).

De forma geral, quanto maior a quantidade e a dureza dos carbonetos formados pelos elementos de liga, menor será a usinabilidade do aço. Isso ocorre devido ao aumento da abrasividade, elevação da temperatura na zona de corte e maior tendência ao desgaste prematuro das ferramentas. A presença de elementos como vanádio e nióbio, por exemplo, gera partículas duras e resistentes ao cisalhamento, que promovem desgaste abrasivo severo (Trumpold, 2013).

Além disso, os elementos de liga podem influenciar na formação do cavaco, dificultando a fragmentação e promovendo maior esforço de corte. Em aços endurecidos ou tratados termicamente, a usinabilidade tende a piorar significativamente, exigindo o uso de ferramentas de maior desempenho (como pastilhas revestidas ou cerâmicas) e o emprego adequado de fluidos de corte para lubrificação e refrigeração (Machado et al., 2009).

Portanto, o aumento da resistência mecânica promovido pelos elementos de liga melhora o desempenho em serviço das peças, mas implica em condições mais severas de usinagem, exigindo controle rigoroso dos parâmetros de corte, seleção cuidadosa da ferramenta e, muitas vezes, o uso de técnicas especiais como usinagem a seco com revestimentos ou com mínima quantidade de fluido (MQF).

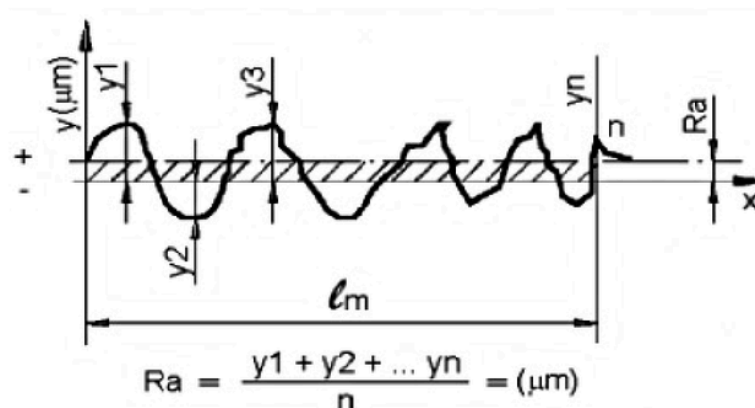
## 2.6 RUGOSIDADE EM PROCESSOS DE USINAGEM

A rugosidade é uma das principais características de qualidade obtidas no processo de usinagem, sendo definida como o conjunto de irregularidades micrométricas deixadas na superfície da peça em função da ação da ferramenta de corte. Ela influencia diretamente o comportamento funcional do componente, afetando propriedades como resistência à fadiga, atrito, desgaste, lubrificação e acoplamento mecânico. A rugosidade é afetada por diversos fatores operacionais, incluindo o tipo de ferramenta, geometria do inserto, parâmetros de corte, estabilidade da máquina-ferramenta e presença ou não de fluido de corte (Diniz; Marinho, 2011). Por esse motivo, o controle da rugosidade é fundamental para garantir o desempenho do produto final e a repetibilidade do processo.

### 2.6.1 Conceito e importância da rugosidade

A rugosidade representa as irregularidades na superfície de componentes usinados, descritas por parâmetros como  $R_a$  (média aritmética) e  $R_q$  (média quadrática). Sua relevância transcende aspectos estéticos: superfícies com alta rugosidade podem afetar o desempenho funcional, como resistência à fadiga, atrito, desgaste e corrosão. Assim, controlar a rugosidade é essencial para garantir qualidade e confiabilidade, especialmente em peças críticas. Dentre os parâmetros mais utilizados, destaca-se o  $R_a$ , que representa a média aritmética dos desvios da superfície em relação a uma linha média ao longo de um comprimento de avaliação. Conforme ilustrado na Figura 11, seu cálculo é feito pela soma dos valores absolutos dos desvios ( $y_1, y_2, \dots, y_n$ ) dividida pelo número total de pontos ( $n$ ), sendo expresso em micrômetros ( $\mu\text{m}$ ). Essa medida fornece uma estimativa da uniformidade do acabamento superficial e permite comparar a eficiência de diferentes condições de usinagem. Valores elevados de  $R_a$  indicam maior irregularidade da superfície e podem atuar como pontos críticos para nucleação de trincas sob carregamentos cíclicos, o que reforça a importância de seu monitoramento em aplicações sujeitas à fadiga.

Figura 11 - Representação esquemática do perfil de rugosidade e cálculo do parâmetro  $R_a$  (rugosidade média aritmética).



Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

### 2.6.2 Fatores que afetam a rugosidade

- Desgaste da Ferramenta

O desgaste da ferramenta é um dos principais fatores que influenciam diretamente a rugosidade superficial das peças usinadas. À medida que a ferramenta se desgasta, sua geometria original se altera, provocando maior atrito e instabilidade no processo de corte, o que resulta em um acabamento superficial mais áspero e irregular. Isso ocorre porque as arestas de corte desgastadas geram vibrações e força de corte aumentada, comprometendo a qualidade do acabamento da peça (Beraldo et al., 2016).

- Parâmetros de Corte

Os parâmetros de corte, como velocidade, avanço e profundidade de corte, exercem influência direta sobre a rugosidade superficial das peças usinadas. Uma velocidade de corte adequada pode reduzir as irregularidades da superfície ao minimizar a formação de rebarbas e ondulações. Por outro lado, avanços elevados tendem a aumentar a rugosidade, pois a ferramenta remove maior volume de material por passagem, causando marcas mais evidentes na superfície. A profundidade de corte também afeta a rugosidade, pois cortes mais profundos podem gerar maior esforço na ferramenta, provocando vibrações e acabamento menos uniforme (Calza et al., 2018).

- Vibração (Chatter)

Vibração induzida ("chatter") cria ondulações regulares na superfície, prejudicando a qualidade. Nitin Ambhore et al. (2020), ao usinar aço 52100, evidenciaram que a amplitude de vibração crescente, devido ao desgaste do inserto, impacta diretamente a rugosidade.

Estudos recentes em turning complexos utilizando regressão Bayesiana e análise de vibração confirmam a forte correlação entre vibração e Ra.

### 2.6.3 Métodos de medição da rugosidade

Nesta seção serão apresentados os principais métodos para verificação de rugosidade.

#### Método Contato: Perfilômetro de Estilete

O método tradicional utiliza um estilete diamantado que percorre a superfície, produzindo perfil 2D. Normas como ISO 4287 e ASME B46.1 definem padrões de comprimento de amostragem e parâmetros (Ra, Rq, Rz, Rsk).

Figura 12: Perfilômetro Mitutoyo (Rugosímetro).



Fonte: SARIKI (2025).

#### Métodos Ópticos Não-Contatos

Técnicas como interferometria de luz branca (WLI), microscopia confocal e sensores cromáticos confocais permitem medir rugosidades com resolução nanométrica, sem contato físico e em superfícies delicadas.

Figura 13: Rugosímetro óptico.



Fonte: Bruker Corporation (2023).

### Monitoramento Online via Sensores

Modelos de previsão em tempo real combinam sinais vibracionais e acústicos com aprendizado de máquina. Chen et al. (2024) aplicaram regressão por processo Gaussiano ao monitoramento da rugosidade via sensores em turning de componentes complexos. Lai et al. (2024) desenvolveram um sistema para fresamento, acoplado ao CNC, que integra parâmetros de corte e medições de vibração para prever Ra em tempo real.

#### 2.6.4 Rugosidade teórica

A rugosidade teórica refere-se à forma ideal, baseada exclusivamente em parâmetros geométricos do processo de usinagem — como avanço ( $f$ ) e raio de ponta da ferramenta ( $r_e$ ) — sem considerar erros práticos, vibrações ou desgaste de ferramenta (Diniz; Coppini; Marcondes, 2011). A estimativa para a rugosidade média ( $Ra$ ) no torneamento é determinada pela equação (3).

$$Ra = \frac{f^2}{32 * r_e} \quad (3)$$

Onde:

$Ra$  = rugosidade média aritmética ( $\mu\text{m}$ )

$f$  = avanço por volta (mm/rev)

$r_e$  = raio de ponta do inserto (mm)

O cálculo da rugosidade teórica baseia-se unicamente no raio da ponta da ferramenta e no avanço da usinagem, sem considerar outros fenômenos que podem afetar o acabamento superficial. Por isso, fatores como o chatter — vibrações decorrentes do desgaste da ferramenta — acabam influenciando a rugosidade real, limitando a precisão das estimativas teóricas. Essa limitação é corroborada pela pesquisa de Alves (2013), que identificou discrepâncias significativas entre os valores teóricos e experimentais, sobretudo em condições de avanços elevados.

## 2.7 FADIGA MECÂNICA EM COMPONENTES USINADOS

A fadiga é um fenômeno de falha progressiva que ocorre em materiais submetidos a carregamentos cíclicos ou alternados, mesmo quando as tensões aplicadas estão abaixo do limite de escoamento do material. Em componentes usinados, a ocorrência da fadiga está fortemente associada às condições superficiais geradas durante o processo de usinagem, como rugosidade, tensões residuais e presença de microtrincas. Irregularidades superficiais e defeitos resultantes de operações inadequadas podem atuar como concentradores de tensão, favorecendo a iniciação de trincas de fadiga. Por isso, o controle dos parâmetros de usinagem e a escolha adequada de ferramentas e fluidos de corte são fundamentais para minimizar os efeitos negativos sobre a resistência à fadiga dos componentes (Suresh, 1998; Diniz; Marinho, 2011).

### 2.7.1 Conceito de fadiga e mecanismos de nucleação e propagação de trincas

A fadiga mecânica é um fenômeno caracterizado pela falha progressiva de um material submetido a carregamentos cíclicos, mesmo quando as tensões aplicadas são inferiores ao limite de resistência estática do material (ASM INTERNATIONAL, 2002). Esse tipo de falha é responsável por uma parcela significativa das quebras em componentes mecânicos, especialmente aqueles que operam sob condições dinâmicas e variáveis (geralmente ciclos de carregamentos alternados em tração e compressão).

### 2.7.2 Limite de resistência à fadiga

Representa o valor máximo da tensão alternada que o material suporta sem ocorrer ruptura. Nos aços e alguns outros metais ferrosos, existe um limite de fadiga bem definido (geralmente obtido para  $10^6$  a  $10^7$  ciclos). O limite de fadiga é normalmente representado em um gráfico tensão x número de Ciclos (curva S-N). A curva mostra a relação entre a tensão aplicada (S, de "*stress*") e o número de ciclos até a falha (N).

O limite de resistência à fadiga é influenciado por diversos fatores, como o acabamento, que pode concentrar tensões e iniciar trincas, e os tratamentos térmicos, que aumentam a resistência do material. Entalhes e descontinuidades também reduzem a vida útil em fadiga, assim como ambientes corrosivos e temperaturas elevadas, que aceleram a formação de trincas. Além disso, o tipo de carregamento aplicado, como flexão, torção ou tração alternada, afeta diretamente a resistência do material. Segundo Callister (2012, apud GONÇALVES, 2017), esses fatores devem ser considerados no projeto para garantir a durabilidade e a segurança estrutural.

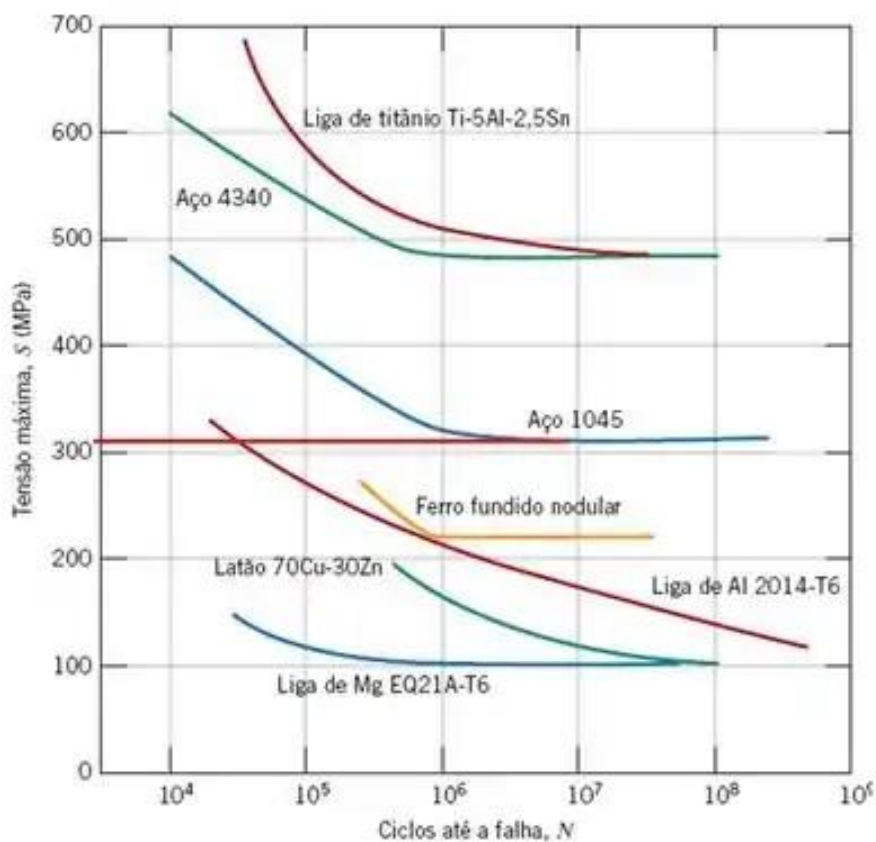
A estimativa do limite de resistência à fadiga para os aços pode ser realizada com base em métodos empíricos amplamente utilizados na engenharia, especialmente quando não há dados experimentais disponíveis. De forma geral, considera-se que o limite de fadiga é aproximadamente 50 a 60% da resistência à tração para carregamentos alternados em flexão rotativa. Esse valor, no entanto, pode variar conforme o tipo de aço, a condição superficial, a presença de entalhes e o ambiente de operação. De acordo com Máfia (2013), essa relação é frequentemente aplicada em cálculos iniciais de projetos, mas é essencial que se considerem fatores corretivos, como o tamanho do componente, o acabamento e o tipo de carregamento específico a que o material será submetido. Tratamentos térmicos também influenciam diretamente na resistência à fadiga, especialmente aqueles que melhoram a dureza superficial e a homogeneidade da microestrutura.

### 2.7.3 Construção da curva de fadiga (Wöhler)

A curva de Wöhler, também denominada curva S–N (*Stress versus Number of cycles*), representa uma ferramenta essencial nos estudos de fadiga de materiais. Esse gráfico estabelece a relação entre a tensão alternada aplicada a um corpo de prova e o número de ciclos necessários para que ocorra a falha por fadiga. A curva foi originalmente proposta por

August Wöhler no século XIX, a partir de suas investigações sobre falhas em eixos ferroviários submetidos a carregamentos cíclicos (Callister; Rethwisch, 2015). Desde então, ela tem sido amplamente utilizada para avaliar o comportamento à fadiga de materiais metálicos, sendo referência em projetos de componentes sujeitos a solicitações dinâmicas (Budynas; Nisbett, 2011). Na figura 14 pode-se observar as curvas de fadiga para alguns materiais comuns da engenharia.

Figura 14: Curvas S-N para materiais aplicados na engenharia.

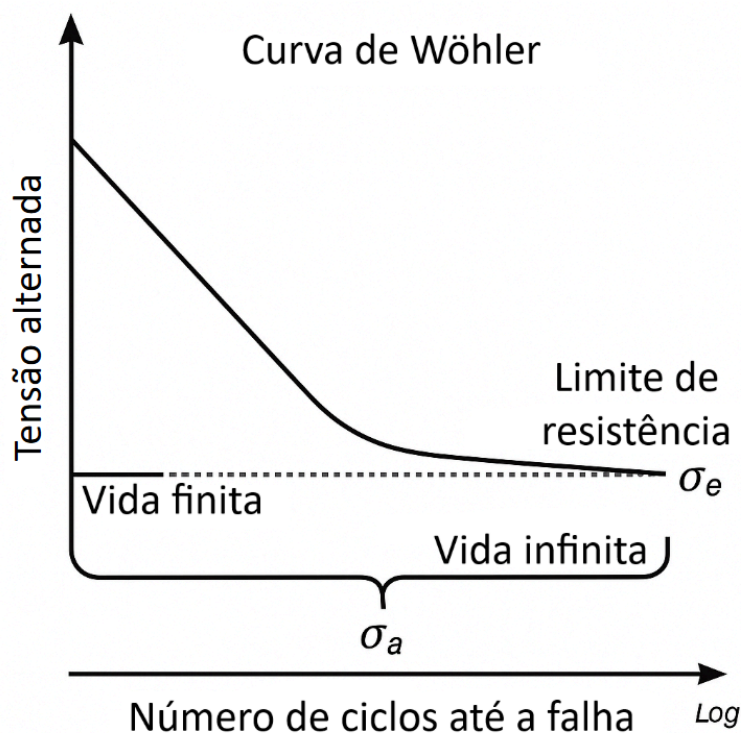


Fonte: Adaptado de Dowling (1999).

A construção da curva de Wöhler para um determinado material é realizada por meio de ensaios de fadiga sob carregamento cíclico controlado, nos quais corpos de prova padronizados são submetidos a diferentes níveis de tensão alternada. Para cada nível de tensão, registra-se o número de ciclos até a ocorrência da fratura do corpo de prova. Esses dados são então plotados em um gráfico com tensão alternada (geralmente em escala logarítmica) no eixo vertical e o número de ciclos até a falha (em escala logarítmica) no eixo

horizontal. O procedimento é repetido para diversas tensões, permitindo a obtenção de uma curva contínua que representa o comportamento à fadiga do material (Budynas; Nisbett, 2011).

Figura 15: Representação esquemática da curva de Wöhler (diagrama S-N), com base em aços submetidos à fadiga, conforme Callister (2012).



Fonte: Adaptado de Callister (2012).

Em situações de carregamento flexional, como em ensaios de fadiga por flexão rotativa, a tensão máxima atuante na superfície do corpo de prova é determinada pela equação (4) da tensão normal devido à flexão:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (4)$$

onde  $\sigma$  é a tensão normal (em MPa),  $M$  é o momento fletor aplicado (em N·mm),  $c$  é a distância da linha neutra até a superfície do corpo de prova (em mm), e  $I$  é o momento de inércia da seção transversal (em mm<sup>4</sup>). Para seções circulares, comuns em corpos de prova cilíndricos, o momento de inércia é calculado pela equação (5):

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (5)$$

sendo  $d$  o diâmetro da seção transversal. Essa equação permite avaliar com precisão a tensão gerada na região crítica do corpo de prova, especialmente nas camadas superficiais, onde as trincas por fadiga geralmente se iniciam (Budynas; Nisbett, 2011).

De maneira geral, as tensões máximas a serem utilizadas podem iniciar em uma faixa de 80 a 90% da tensão máxima de tração e ir diminuindo gradativamente até 50%, que é a faixa na qual a maioria dos aços encontra o limite de fadiga, como já mencionado anteriormente no item 2.7.2 (CALLISTER, 2012).

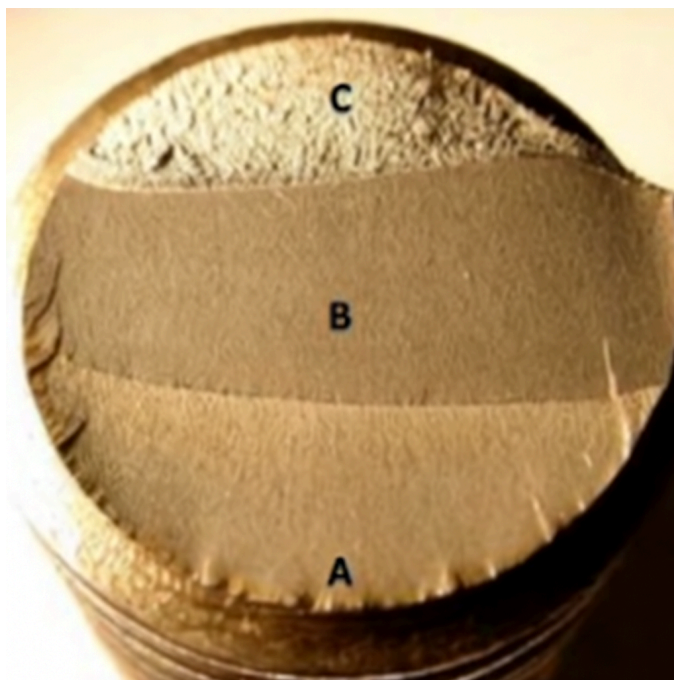
#### **2.7.4 Influência da qualidade superficial na resistência à fadiga**

A resistência à fadiga de componentes metálicos é altamente sensível às condições superficiais, uma vez que, sob carregamentos cíclicos, as falhas geralmente se iniciam na superfície do material. A presença de imperfeições superficiais, como arranhões, rebarbas, marcas de usinagem e cavidades, atua como concentrador de tensões, favorecendo a nucleação de trincas. Como resultado, superfícies rugosas tendem a reduzir significativamente a vida em fadiga de um componente (SILVA, 2017).

Além da rugosidade, outros fatores influenciam diretamente o desempenho em fadiga, como tensões residuais geradas por processos de usinagem, conformação ou tratamento térmico, bem como a presença de camadas endurecidas superficialmente. O processo de *shot peening*, por exemplo, é comumente utilizado para introduzir tensões residuais compressivas na superfície do material, retardando a nucleação e propagação de trincas de fadiga (ASM INTERNATIONAL, 2002).

O processo de fadiga é tradicionalmente dividido em três etapas: nucleação (A), propagação da trinca (B) e fratura final (C) (SURESH, 1998). A nucleação geralmente ocorre em regiões de concentração de tensões, como superfícies rugosas, entalhes ou descontinuidades. Após a nucleação, as trincas se propagam de forma estável a cada ciclo de carregamento, até que a seção remanescente não seja mais capaz de suportar a carga aplicada, levando à fratura súbita. A figura 16 representa as etapas mencionadas.

Figura 16: Superfície de fratura por fadiga. Etapas envolvidas no processo de fadiga: nucleação (A), propagação da trinca (B) e fratura final (C).



Fonte: Adaptado de Souza (2023).

De acordo com Schijve (2009), a presença de microdefeitos superficiais ou imperfeições geométricas pode acelerar significativamente a nucleação da trinca de fadiga. Além disso, fatores como a orientação das tensões e a microestrutura do material também influenciam o comportamento em fadiga.

A preparação da superfície também desempenha um papel relevante. Processos como retificação, brunimento e polimento são aplicados quando se busca uma melhoria no acabamento, especialmente em componentes críticos como eixos, engrenagens e peças aeronáuticas. Nesses casos, os ganhos em vida em fadiga são expressivos, podendo chegar a duplicar a durabilidade em relação a peças com acabamento bruto (NORTON, 2000).

### **2.7.5 Relação entre rugosidade e vida em fadiga**

A rugosidade influencia diretamente a vida em fadiga de componentes metálicos devido à sua atuação como local preferencial para o início de trincas. Superfícies mais rugosas possuem picos e vales que aumentam localmente a concentração de tensões, favorecendo a

nucleação de trincas sob carregamentos cíclicos. Essa concentração de tensões é ainda mais crítica em materiais dúcteis e em ambientes onde atuam outros mecanismos de degradação, como a corrosão (SOUZA; MARTINS, 2014).

Estudos experimentais têm mostrado que a redução dos parâmetros de rugosidade Ra e Rz está associada a um aumento considerável na vida em fadiga, especialmente em regimes de alto ciclo, onde as tensões são relativamente baixas e o número de ciclos é elevado. Em materiais usinados, o efeito da rugosidade pode ser comparado à presença de pequenas trincas iniciais, que reduzem o número de ciclos necessário para o início da falha (LUCAS; FERREIRA, 2013).

Além disso, a orientação das marcas de usinagem em relação à direção do carregamento é um fator decisivo. Marcas paralelas ao esforço cíclico tendem a ter menor efeito deletério sobre a resistência à fadiga, enquanto marcas perpendiculares intensificam a concentração de tensões e aceleram o processo de falha (LANGE; SCHMIDT, 2006).

Outro aspecto relevante é que a influência da rugosidade não pode ser analisada isoladamente, pois interage com outros fatores como a microestrutura do material, presença de inclusões, tensões residuais e condições de serviço. Contudo, a rugosidade é um parâmetro controlável no processo de fabricação, o que a torna um ponto focal em estratégias de melhoria da confiabilidade e durabilidade de componentes sujeitos à fadiga (MEGURO et al., 2005).

### **2.7.6 Influência de tensões residuais oriundas da usinagem**

Além da rugosidade, as tensões residuais introduzidas durante o processo de usinagem afetam significativamente a resistência à fadiga. Tensões residuais de tração na superfície facilitam a nucleação e a propagação de trincas, enquanto tensões residuais de compressão podem retardar esse processo (PONSONNET et al., 2004).

Segundo Field, Kahles e Cammett (1972), operações de usinagem severas ou sem controle térmico podem induzir tensões residuais prejudiciais, enquanto processos como shot peening e usinagem com parâmetros otimizados podem gerar tensões compressivas benéficas, aumentando a vida em fadiga.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do trabalho, inicialmente foram definidos os materiais a serem utilizados, a geometria do corpo de prova e da ferramenta de usinagem, bem como definidos os parâmetros de usinagem. Após isso, foram realizados os ensaios e medições, conforme descritivo a seguir.

#### 3.1 MATERIAL DO CORPO DE PROVA

Foi escolhido o aço SAE 4140 treilado e normalizado para ser o material dos corpos de prova, por ser um material que se destaca pela boa resistência mecânica e à fadiga, boa resistência ao desgaste. Além disso, optou-se por esse material devido à sua pronta disponibilidade, fator determinante para a realização dos ensaios. A figura 17 ilustra o tarugo de aço, escolhido para a realização do estudo.

Figura 17: Barra de aço SAE 4140 utilizada como matéria-prima para usinagem dos corpos de prova.



Fonte: Autor (2025).

O aço SAE 4140, também conhecido como aço-cromo-molibdênio, é um aço ligado de médio carbono amplamente utilizado em aplicações estruturais. Sua composição química típica inclui cerca de 0,38–0,43% de carbono, 0,75–1,00% de cromo e 0,15–0,25% de molibdênio, o que lhe confere boa temperabilidade, elevada resistência mecânica e razoável

tenacidade após tratamento térmico (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Esses aços são aplicados tanto em componentes sujeitos a solicitações moderadas, como engrenagens e eixos, quanto em elementos críticos, como hastes de pistão e peças aeronáuticas, onde são exigidas resistências ao escoamento entre 655 MPa e 965 MPa, dependendo do grau de tratamento térmico adotado (ASM INTERNATIONAL, 1990). Por meio de processos de têmpera seguidos de revenido, os aços da série 4140 podem atingir resistência à tração superior a 1600 MPa, mantendo boa resistência à fadiga e à fratura (CAMPBELL, 2008).

A composição química completa e as principais propriedades mecânicas do aço SAE 4140 normalizado estão dispostas nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Composição química do aço SAE 4140.

Composição química aço SAE 4140 (%)						
C	Mn	Si	Cr	Mo	P	S
0,38 - 0,43	0,75 - 1	0,15 - 0,3	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25	máx. 0,035	máx. 0,04

Fonte: AZOM (2019).

Tabela 4: Propriedades mecânicas do aço SAE 4140.

Propriedades Mecânicas aço SAE 4140	
Resistência à tração	600 - 700 [MPa]
Tensão de escoamento	655 [MPa]
Módulo de Elasticidade	190 a 200 [GPa]
Dureza Brinell	197 [HB]

Fonte: K9 Aços (2025).

Inicialmente, o tarugo utilizado para usinar os corpos de prova tinha dimensão de 1.½” de diâmetro e 155 mm de comprimento. Por conta do comprimento total do corpo de prova, se fez necessário a utilização de contraponto de fixação na face oposta à face de fixação na castanha, com a finalidade de aumentar a firmeza da peça durante a usinagem, evitar problemas de descentralização e reduzir a vibração.

### 3.2 FERRAMENTA DE CORTE

Para realizar a usinagem dos corpos de prova, foi utilizada a pastilha triangular do tipo TNMG, catalogada com o código TNMG 16 04 08-PM 4425, a mesma comumente utilizada nesse tipo de usinagem. A pastilha em questão possui seis arestas de corte, três para cada face de corte, com raio da ponta de 0,8 mm.

Figura 18: Inserto de usinagem utilizado para fabricação dos corpos de prova.



Fonte: Adaptado de Mercado Livre (2025).

Cada corpo de prova foi usinado com uma única ferramenta de corte, para posterior análise de desgaste, ou seja, foram utilizadas 18 ferramentas de corte. Para a realização da comparação dos resultados, foram utilizadas 9 ferramentas novas e 9 ferramentas desgastadas, totalizando 18 ferramentas utilizadas no experimento.

### 3.3 PARÂMETROS DE USINAGEM

Como o estudo visa analisar a influência da utilização de fluido de corte no acabamento da usinagem do corpo de prova, os parâmetros de usinagem foram definidos e fixados para todos os corpos de prova usinados. Para a definição da velocidade de corte, foi levado em consideração as recomendações dadas pelo fabricante da ferramenta de corte, para não comprometer a qualidade da usinagem e nem a utilização da ferramenta.

Foram padronizados os seguintes parâmetros de usinagem para garantir a repetibilidade dos ensaios:

- Velocidade de corte ( $V_c$ ): 200 m/min
- Avanço ( $f$ ): 0,3 mm/rot
- Profundidade de corte ( $a_p$ ): 1,0 mm

### 3.4 MÁQUINA-FERRAMENTA

Os ensaios de usinagem foram realizados em um torno CNC da marca YCM, modelo GT-200B, com capacidade de rotação de até 4500 rpm e potência nominal de 7,5 kW. A máquina apresenta controle numérico computadorizado que permite precisão nos movimentos e repetibilidade dos parâmetros de corte selecionados, garantindo a padronização dos experimentos. O torno CNC YCM GT-200B utilizado nos ensaios é equipado com o sistema de comando numérico FANUC TXP-100e, um controlador desenvolvido para aplicações de torneamento de alta precisão e produtividade. O sistema de refrigeração do torno permite a aplicação de fluido de corte emulsionável, com bico direcionador posicionado próximo à zona de corte.

Figura 19: Torno CNC - GT-250B



Fonte: Adaptado de Selltis (2025).

### 3.5 FLUÍDO DE CORTE

Nos ensaios realizados, foi utilizado um fluido de corte do tipo emulsionável, aplicado diretamente na interface ferramenta-peça por meio do sistema de refrigeração do torno.

Foi utilizado um fluido de corte semi sintético da marca Quimatic Tapmatic, modelo ECO 150, diluído em água na proporção de 1:20, conforme a recomendação do fabricante. A solução foi preparada previamente e homogeneizada, garantindo uniformidade na aplicação ao longo dos testes.

A aplicação do fluido foi realizada por meio de um bico direcionador localizado próximo à zona de corte, operando em fluxo contínuo. Essa configuração permite atingir diretamente o ponto de maior geração de calor, promovendo a dissipação térmica e contribuindo para a estabilidade dimensional da peça.

### 3.6 CONDIÇÕES DE TESTE

Após a definição de todos os parâmetros anteriormente descritos, foram definidas as condições para a realização dos testes e a quantidade de corpos de prova em cada uma, conforme Tabela 5:

Tabela 5 - Número de corpos de prova de acordo com a condição de teste

<b>CONDIÇÃO DE TESTE</b>	<b>NÚMERO DE CORPOS DE PROVA</b>
Ferramenta nova	9
Ferramenta desgastada	9

Fonte: o Autor (2025).

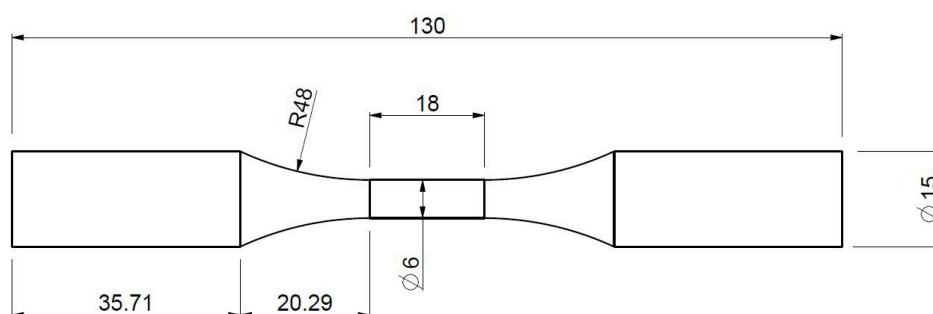
Todos os corpos de prova foram usinados sob as mesmas condições operacionais, mantendo-se constantes os parâmetros de corte, como velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem. Essa padronização teve como objetivo garantir que eventuais diferenças nos resultados fossem atribuídas exclusivamente à condição da ferramenta (nova ou desgastada), isolando a influência dos demais fatores do processo.

A geometria dos corpos de prova utilizados nos ensaios de fadiga foi definida com base nos critérios estabelecidos pela norma ASTM E466-15, que padroniza o ensaio de fadiga por flexão rotativa. Os principais requisitos atendidos incluem a forma cilíndrica simétrica, a

presença de filetes de transição suave entre as regiões usinadas e a ausência de entalhes, de modo a garantir a nucleação natural de trincas na superfície. Além disso, foram observadas as dimensões mínimas especificadas para assegurar repetibilidade e validade estatística dos resultados (ASTM, 2015).

A Figura 20 apresenta o projeto 2D do corpo de prova utilizado nos ensaios de fadiga, desenvolvido conforme os critérios geométricos estabelecidos pela norma ASTM E466-15. O desenho contempla as principais dimensões, raios de transição e regiões de usinagem, garantindo a conformidade com os requisitos para realização do ensaio por flexão rotativa.

Figura 20 - Projeto 2D do corpo de prova



Fonte: o Autor (2025).

O processo de usinagem de todos os corpos de prova seguiu a seguinte sequência de etapas:

1. Faceamento e execução do furo de centro na face oposta à face fixa na castanha;

Figura 21 - Tarugo após faceamento e execução do furo de centro



Fonte: o Autor (2025).

2. Usinagem do perfil nas dimensões definidas;

Figura 22 - Tarugo após usinagem do perfil



Fonte: o Autor (2025).

3. Remoção da parte do corpo de prova que foi utilizada para prender na castanha.

Figura 23 - Corpo de prova após processo de usinagem



Fonte: o Autor (2025)

### 3.7 ENSAIO DE TRAÇÃO

Visando validar experimentalmente as propriedades mecânicas do aço SAE 4140 utilizado na usinagem dos corpos de prova, foi realizada a execução do ensaio de tração, permitindo comparar os resultados obtidos com os dados encontrados na literatura técnica. Este foi realizado em uma máquina universal de ensaios, marca Emic, modelo DL10000, localizada no laboratório de ensaios mecânicos do IFRS - Campus Ibirubá. A confecção dos corpos de prova e os métodos para realização do ensaio seguiu a norma ASTM E8/E8M. Devido a disponibilidade reduzida de material para construção do corpo de prova, realizou-se a usinagem destes em escala reduzida (respeitando as proporções apontadas em norma). Na imagem 24 observa-se a execução do ensaio.

Figura 24: Ensaio de tração do aços SAE 4140.



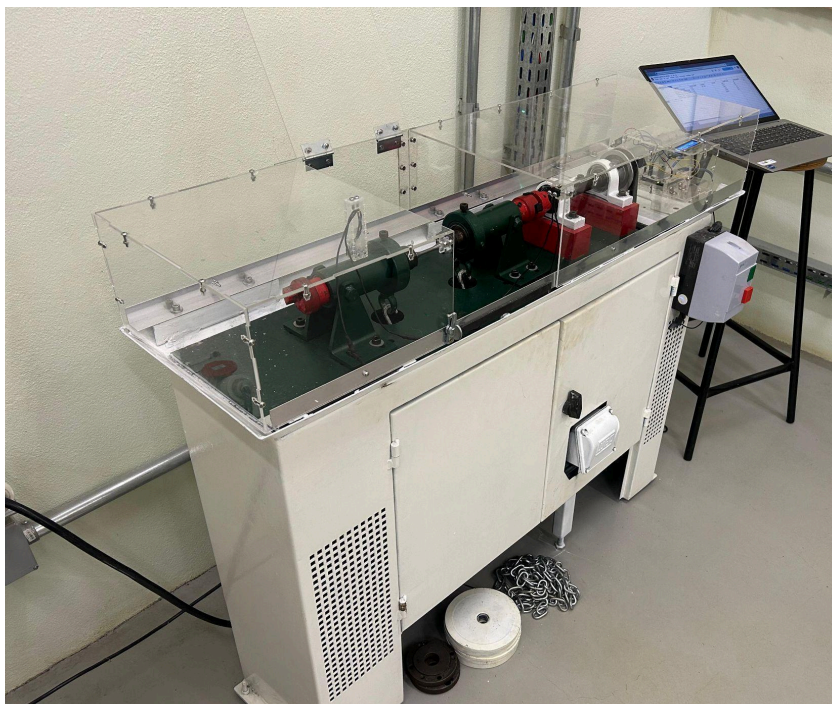
Fonte: Autor (2025).

### 3.8 ENSAIOS DE FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA

Com os corpos de prova devidamente usinados nas condições propostas, foram realizados os ensaios de fadiga por flexão rotativa. A máquina utilizada para realizar os ensaios, foi uma máquina construída no próprio IFRS - Campus Ibirubá, por um aluno do curso de graduação em Engenharia Mecânica, em projeto orientado pelo Professor Adão

Felipe Oliveira Skonieski. A máquina foi construída respeitando todas as exigências técnicas da norma ASTM E 466, a qual estabelece os procedimentos para realizar ensaios de fadiga axial com controle de força e amplitude constante, aplicados a materiais metálicos.

Figura 25 - Máquina de ensaiar resistência à fadiga



Fonte: o Autor (2025).

Para a realização dos ensaios, o parâmetro de rotação da máquina se manteve constante em 3400 RPM durante todo o tempo de todos os ensaios realizados. Após a fixação dos corpos de prova na máquina, é feita a colocação das cargas nos pontos de fixação, as quais geram as tensões responsáveis pela fratura do material.

Figura 26 - Corpo de prova preso no sistema de fixação da máquina



Fonte: o Autor (2025).

As curvas S-N foram construídas a partir de 3 tensões baseadas na curva S-N do aço SAE 1045. Isso se deu pela semelhança com o aço SAE 4140 quando as propriedades mecânicas e também aos teores de carbono. Analisando a curva S-N do aço SAE 1045, foi escolhida a tensão correspondente à parte superior do início da curva, outra tensão para a parte intermediária e a última tensão correspondente à base da curva, antes do limite de vida infinita. Para cada tensão, foram ensaiados 3 corpos de prova, para termos uma amostragem mínima necessária para definir o comportamento da resistência à fadiga do material utilizado. As tensões aplicadas foram as seguintes:

Tabela 6: Cargas e tensões resultantes aplicadas aos corpos de prova.

<b>Condição</b>	<b>Tensão aplicada (MPa)</b>	<b>Nº de corpos de prova</b>
Insero Novo	343,37	3
	418,7	3
	494,03	3
Insero desgastado	343,37	3
	418,7	3
	494,03	3

Fonte: o Autor (2025).

### 3.9 ANÁLISES DE ACABAMENTO

Para realizar a análise do acabamento dos corpos de prova, utilizou-se o rugosímetro Mitutoyo SJ-210, disponível no laboratório de Metalografia do IFRS - Campus Ibirubá. O equipamento opera com um sistema de apalpador de contato, que percorre a superfície do material e registra as variações em altura ao longo de um trajeto predefinido, convertendo-as em parâmetros padronizados de rugosidade, como Ra (rugosidade média aritmética), Rq (raiz quadrada média) e Rz (altura máxima do perfil).

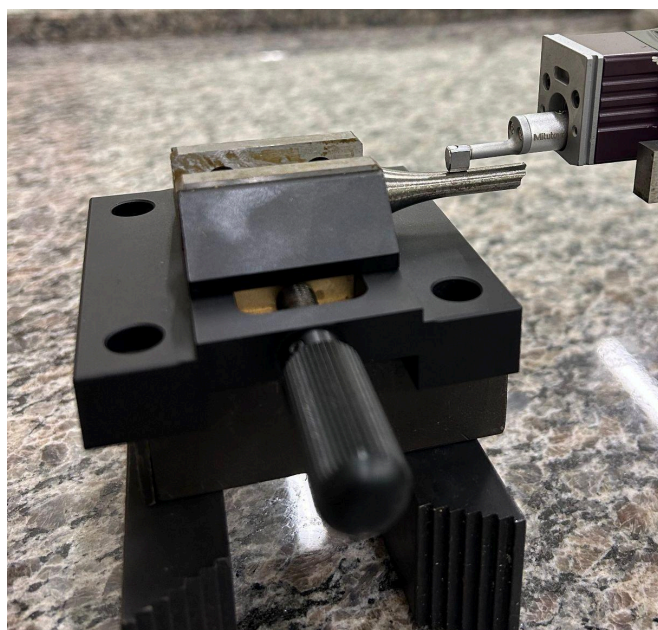
Figura 27 - Rugosímetro Mitutoyo SJ-210.



Fonte: adaptado de Mitutoyo (2025).

Foram realizadas 5 medições de rugosidade em cada corpo de prova, na seção de diâmetro menor, próximas da região onde ocorreram as fraturas, e coletados os parâmetros Ra da superfície dos corpos de prova.

Figura 28 - Medição da rugosidade dos corpos de prova.



Fonte: o Autor (2025).

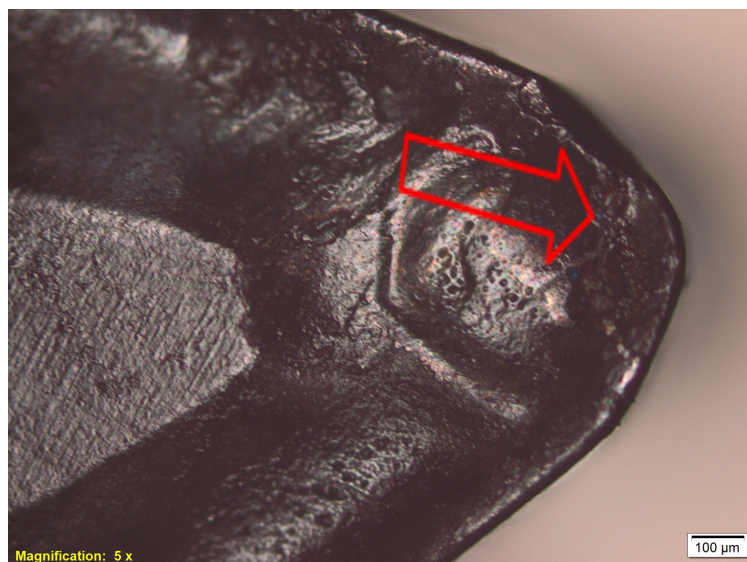
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios de fadiga por flexão rotativa realizados nos corpos de prova, as análises de rugosidade, bem como a análise dos dados e comparativo entre eles.

### 4.1 ANÁLISE MACROSCÓPICA DOS INSERTOS

Com o intuito de complementar a avaliação da influência do desgaste da ferramenta no desempenho da usinagem e na integridade superficial das amostras, foram realizadas análises macroscópicas das ferramentas de corte utilizadas nos experimentos. As observações foram feitas por meio de imagens obtidas com o auxílio de microscopia óptica, ampliando em 50 vezes, possibilitando a identificação visual dos mecanismos de desgaste predominantes, como é possível ver na imagem a seguir:

Figura 29 - Macrografia de inserto desgastado.



Fonte. Autor (2025).

As macrografias permitiram observar que os insertos desgastados apresentavam evidências claras de desgaste por aderência, abrasão e formação de crateras, especialmente nas regiões próximas à aresta de corte. Tais características indicam o acúmulo de calor e o

aumento do atrito durante o processo de usinagem, fatores que contribuem para a degradação da qualidade do corte e da superfície usinada.

Figura 30 - Macrografia de inserto novo.



Fonte: Autor (2025).

Já os insertos novos, utilizados como referência, apresentaram arestas uniformes e superfícies limpas, com ausência de falhas ou irregularidades visíveis. A comparação entre os dois estados, como visto nas imagens acima, reforça a correlação entre o desgaste progressivo da ferramenta e a perda de desempenho do processo, tanto em termos de acabamento quanto de comportamento mecânico dos corpos de prova.

A análise macroscópica dos insertos, portanto, atua como um suporte visual e qualitativo aos dados quantitativos obtidos nos ensaios, contribuindo para uma compreensão mais completa da relação entre o estado da ferramenta e os resultados de usinagem.

#### 4.1.1 ANÁLISE DO DESGASTE DAS FERRAMENTAS

A norma ISO 3685:1993, intitulada *Tool-life testing with single-point turning tools*, estabelece diretrizes padronizadas para a realização de ensaios de vida útil de ferramentas de corte de ponto único, utilizadas principalmente em operações de torneamento. O objetivo da norma é permitir que diferentes estudos sobre desempenho de ferramentas possam ser

comparados de forma confiável, padronizando as condições de corte, critérios de falha e métodos de medição do desgaste (ISO, 1993).

Um dos principais aspectos abordados pela norma é a definição dos critérios de fim de vida da ferramenta, com base no desgaste de flanco. A ISO 3685 recomenda o uso da largura média do desgaste de flanco ( $V_b$ ) e da largura máxima do desgaste ( $V_{bMax}$ ) como parâmetros principais para avaliação. Para ensaios em materiais ferrosos, os valores de referência geralmente utilizados são  $V_b = 0,3$  mm e  $V_{bMax} = 0,6$  mm, embora esses valores possam ser ajustados conforme o tipo de material usinado, o tipo de ferramenta e as condições de corte empregadas (ISO, 1993).

Com base nas diretrizes estabelecidas pela norma ISO 3685, foi realizado o monitoramento do desgaste de flanco das ferramentas utilizadas nas condições de usinagem propostas. As medições foram conduzidas periodicamente ao longo do processo, com o objetivo de acompanhar a evolução do desgaste e identificar o momento em que os critérios de fim de vida foram atingidos. Na Tabela 7, são apresentados os valores obtidos para os parâmetros  $V_b$  (desgaste médio de flanco) e  $V_{bMax}$  (desgaste máximo de flanco), possibilitando verificar o nível de desgaste das ferramentas utilizadas na usinagem dos corpos de prova:

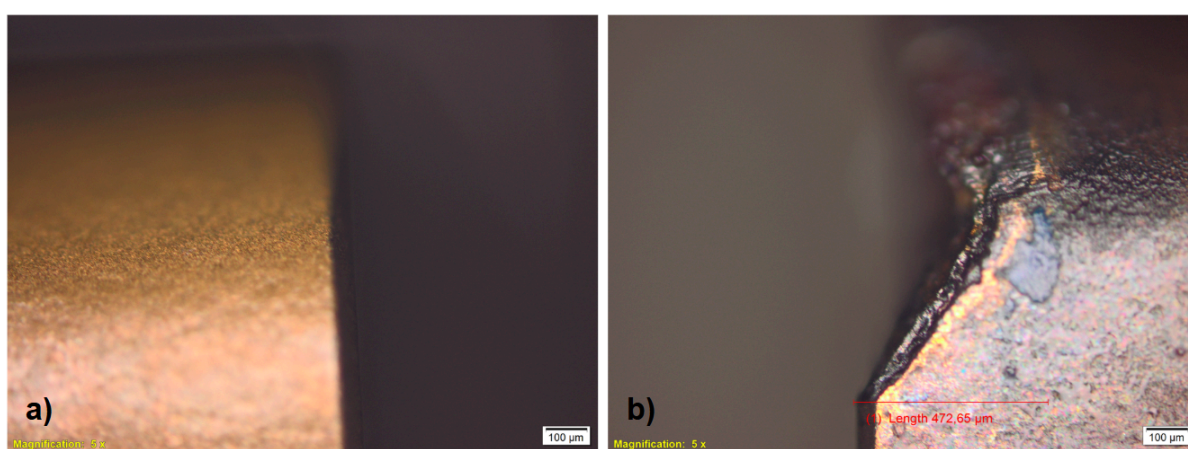
Tabela 7 - Medição do desgaste de flanco das ferramentas

Nº INSERTO	DESGASTE $V_{bMax}$ ( $\mu\text{m}$ )	DESGASTE MÉDIO INSERTOS ( $\mu\text{m}$ )	% $V_{bMax}$ (ISO 3685)
12	612,72	384,4	64,07%
13	89,01		
14	422,28		
15	324,3		
16	501,63		
17	472,65		
18	472,65		
19	298,08		
20	266,34		

Fonte: o Autor (2025).

A fim de ilustrar visualmente o desgaste de flanco ocorrido nas ferramentas durante o processo de usinagem, a Figura 31 apresenta a comparação entre uma unidade de inserto novo e uma unidade de inserto após o uso, posicionadas lado a lado. Essa comparação permite observar com clareza a formação da região de desgaste na aresta de corte, evidenciando a perda de material e a alteração geométrica resultante da interação contínua com a peça usinada. A análise visual complementa as medições quantitativas, contribuindo para a compreensão do comportamento da ferramenta ao longo do tempo de corte.

Figura 31 - a) Flanco de inserto novo e b) Flanco de inserto desgastado



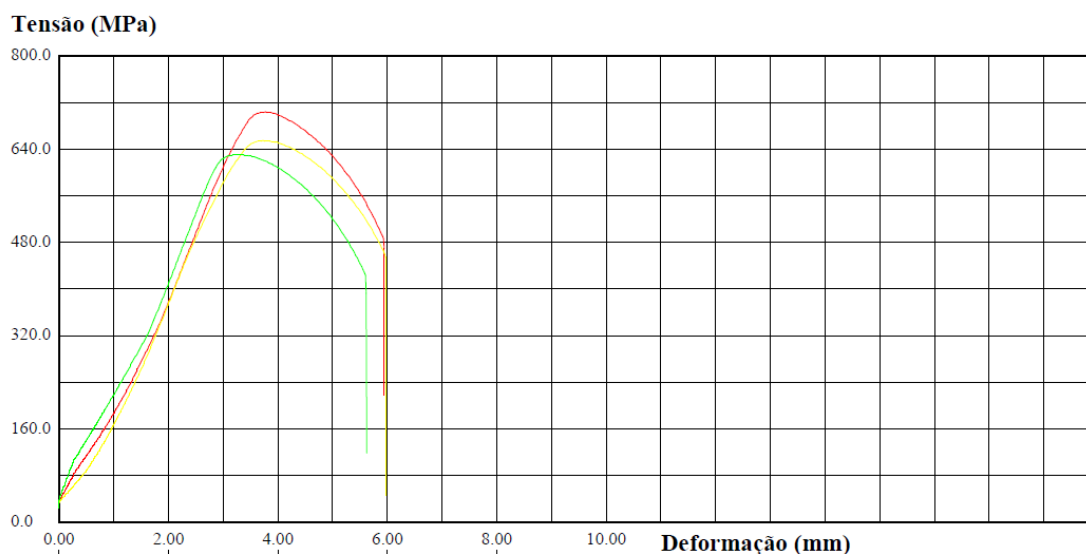
Fonte: o Autor (2025).

## 4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Com o objetivo de verificar as propriedades mecânicas reais do material utilizado nos corpos de prova e validar os dados teóricos empregados na análise dos ensaios de fadiga, foi realizado um ensaio de tração uniaxial em uma amostra do aço SAE 4140.

A partir das curvas tensão-deformação obtidas, foram determinados os principais parâmetros mecânicos do material como tensão máxima de tração, tensão de escoamento e módulo de elasticidade. No Gráfico 1, pode-se observar as curvas geradas sobre o gráfico de tensão e deformação. As três curvas (verde, vermelha e amarela) são provenientes dos três corpos de prova ensaiados.

Gráfico 1 - Curva tensão-deformação dos corpos de prova



Fonte: o Autor (2025).

Verificou-se que os valores obtidos no ensaio de tração foram compatíveis com os limites teóricos esperados, confirmando que o material ensaiado se encontrava em conformidade com a condição de fornecimento especificada. A tensão de escoamento experimental apresentou média de 577,6 MPa, a tensão máxima de tração média de 663,4 MPa. Valores que se alinham aos intervalos típicos para o aço 4140 trefilado e normalizado.

Esse ensaio foi fundamental para assegurar que as condições reais do material fossem adequadamente consideradas na análise dos resultados de fadiga, conferindo maior precisão e confiabilidade às interpretações feitas ao longo do trabalho.

### 4.3 ANÁLISES DE ACABAMENTO

Realizadas as análises de acabamento dos corpos de prova, obteve-se os seguintes resultados para o parâmetro Ra de todas as amostras:

Tabela 8: Valores de Ra para corpos de prova e média de acordo com a condição de usinagem

Nº CP	CONDIÇÃO	MEDIDA (Ra)	VALOR MÉDIO Ra (µm)	DESVIO PADRÃO
1	INSERTO NOVO	3,576	3,915	0,330
2	INSERTO NOVO	3,604		
3	INSERTO NOVO	3,504		
4	INSERTO NOVO	3,873		
5	INSERTO NOVO	3,963		
6	INSERTO NOVO	3,871		
7	INSERTO NOVO	4,056		
8	INSERTO NOVO	4,420		
10	INSERTO NOVO	4,372		
12	INSERTO DESGASTADO	1,782		
13	INSERTO DESGASTADO	1,552		
14	INSERTO DESGASTADO	5,020		
15	INSERTO DESGASTADO	3,633		
16	INSERTO DESGASTADO	2,220		
17	INSERTO DESGASTADO	3,569		
18	INSERTO DESGASTADO	6,127		
19	INSERTO DESGASTADO	2,303		
20	INSERTO DESGASTADO	3,490		

Fonte: o Autor (2025).

● **Primeira consideração: comparação entre rugosidade experimental e teórica**

Como apresentado na revisão teórica, a rugosidade resultante de um processo de usinagem para torneamento pode ser estimada pela equação 3, quando se conhece o avanço (f) e raio da ponta ( $r_e$ ) do inserto utilizados no processo.

Considerando os valores experimentais de raio da ponta de 0,8 mm e avanço de 0,3 mm, chega-se à rugosidade média de 3,52 µm, valor muito semelhante aos reais obtidos.

- **Segunda consideração: Comparação das rugosidades experimentais em função do desgaste dos insertos**

As medições de rugosidade foram realizadas em regiões usinadas representativas, e os resultados obtidos confirmam que a condição da ferramenta exerce influência significativa sobre o acabamento final. De maneira geral, os corpos de prova usinados com insertos novos apresentaram valores mais altos de rugosidade média, porém, com maior estabilidade entre os resultados, como mostra o parâmetro de desvio padrão. Em contrapartida, os corpos de prova usinados com insertos desgastados apresentaram valores mais baixos de rugosidade média, mas com dispersão muito grande entre os resultados, como mostra o desvio padrão.

A observação de valores de rugosidade menores em corpos de prova usinados com insertos desgastados, em comparação com insertos novos é explicável por fenômenos associados ao desgaste da ferramenta. Um dos principais fatores é a alteração da geometria da aresta de corte, que pode resultar no arredondamento da aresta ou formação de um micro-raio maior, promovendo um acabamento mais suave, semelhante ao polimento. Além disso, o desgaste por adesão pode causar o acúmulo de material da peça na ponta da ferramenta (conhecido como aresta postiça), que temporariamente age como uma extensão da ferramenta com características próprias, alterando a interação com o material da peça. Esse material aderido pode, por vezes, preencher os microespaços gerados pela usinagem, diminuindo a rugosidade medida. No entanto, esses efeitos são transitórios e imprevisíveis, e o uso prolongado da ferramenta desgastada tende a piorar a qualidade superficial à medida que o desgaste se intensifica e se torna instável (AMORIM, 2002). É devido a isso que se percebe alto desvio padrão das medições realizadas em amostras usinadas com insertos desgastados.

Manter a rugosidade estável com baixo desvio padrão em processos produtivos de usinagem é fundamental para garantir a reprodutibilidade do desempenho funcional das peças e fortalecer a padronização industrial. Isso porque superfícies com acabamento uniforme asseguram melhor encaixe entre componentes, reduzem a variabilidade dimensional e elevam a confiança na montagem, diminuindo retrabalho e inspeções extras. Além disso, esse controle rigoroso favorece a otimização de tolerâncias funcionais, o que contribui para a eficiência do processo e redução de custos operacionais, consolidando a qualidade e competitividade do produto no mercado (PAULA; SILVA; MACHADO, 2023).

#### 4.4 ENSAIOS DE FLEXÃO ROTATIVA

Para a condição de tensões descritas no item 3.7, foram realizados 3 ensaios para cada tensão e para cada condição de usinagem dos corpos de prova. Na tabela a seguir, podem ser observados os resultados:

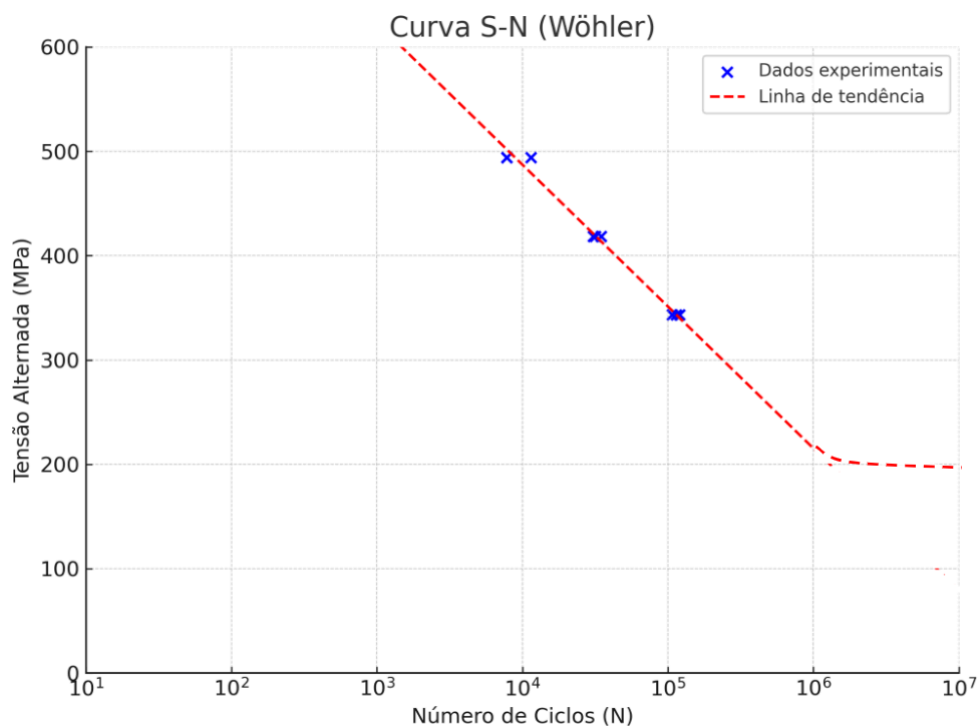
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de fadiga

<b>Nº CORPO DE PROVA</b>	<b>CONDIÇÃO</b>	<b>CARGA USADA (Kg)</b>	<b>CICLOS</b>	<b>TENSÃO (MPa)</b>
7	Inserto novo	8	113909	343,37
8	Inserto novo	8	106832	343,37
10	Inserto novo	8	120239	343,37
1	Inserto novo	10	30581	418,7
2	Inserto novo	10	31721	418,7
3	Inserto novo	10	34697	418,7
4	Inserto novo	12	7805	494,03
5	Inserto novo	12	11432	494,03
6	Inserto novo	12	7769	494,03
14	Inserto desgastado	8	145949	343,37
15	Inserto desgastado	8	74243	343,37
17	Inserto desgastado	8	156817	343,37
12	Inserto desgastado	10	45377	418,7
13	Inserto desgastado	10	23714	418,7
18	Inserto desgastado	10	21058	418,7
16	Inserto desgastado	12	5162	494,03
19	Inserto desgastado	12	14507	494,03
20	Inserto desgastado	12	13973	494,03

Fonte: o Autor (2025).

Para os corpos de prova usinados com insertos novos, obteve-se a seguinte curva S-N:

Gráfico 2 - Curva S-N para condição de usinagem com ferramentas novas



Fonte: o Autor (2025).

Para essa condição de usinagem, obteve-se os seguintes resultados de resistência à fadiga:

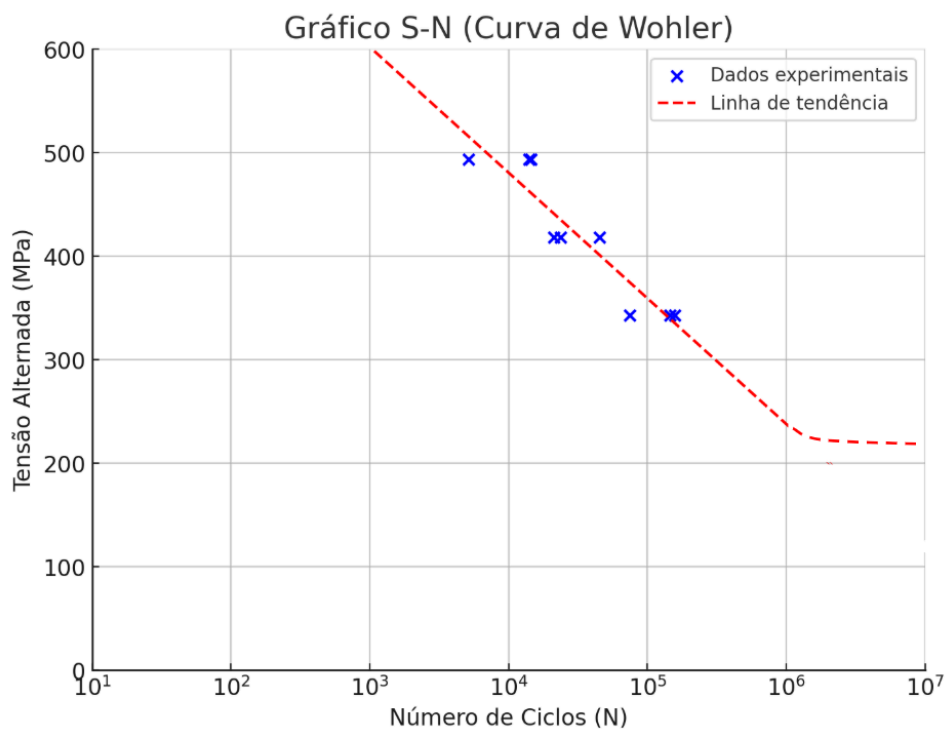
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de fadiga para condição de usinagem com inserto novo

Nº CORPO DE PROVA	CONDIÇÃO	CARGA USADA (Kg)	CICLOS	TENSÃO (MPa)	DESVIO PADRÃO AMOSTRAS (ciclos)
7	Inserto novo	8	113909	343,37	6706,97
8	Inserto novo	8	106832	343,37	
10	Inserto novo	8	120239	343,37	
1	Inserto novo	10	30581	418,7	2125,15
2	Inserto novo	10	31721	418,7	
3	Inserto novo	10	34697	418,7	
4	Inserto novo	12	7805	494,03	2104,52
5	Inserto novo	12	11432	494,03	
6	Inserto novo	12	7769	494,03	

Fonte: o Autor (2025).

Para os corpos de prova usinados com insertos desgastados, obteve-se a seguinte curva S-N:

Gráfico 3 - Curva S-N para condição de usinagem com ferramentas desgastadas



Fonte: o Autor (2025)

Para essa condição de usinagem, obteve-se os seguintes resultados de resistência à fadiga:

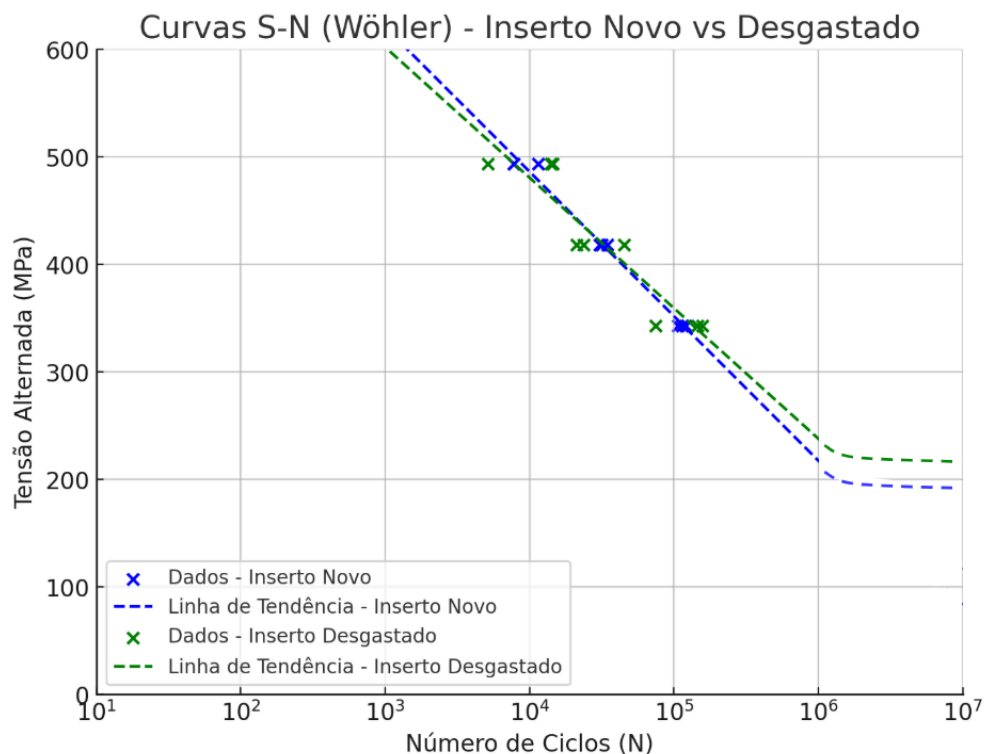
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de fadiga para condição de usinagem com inserto desgastado

<b>Nº CORPO DE PROVA</b>	<b>CONDIÇÃO</b>	<b>CARGA USADA (Kg)</b>	<b>CICLOS</b>	<b>TENSÃO (MPa)</b>	<b>DESVIO PADRÃO AMOSTRAS</b>
14	Inserto desgastado	8	145949	343,37	44867,08
15	Inserto desgastado	8	74243	343,37	
17	Inserto desgastado	8	156817	343,37	
12	Inserto desgastado	10	45377	418,7	13340,13
13	Inserto desgastado	10	23714	418,7	
18	Inserto desgastado	10	21058	418,7	
16	Inserto desgastado	12	5162	494,03	5247,98
19	Inserto desgastado	12	14507	494,03	
20	Inserto desgastado	12	13973	494,03	

Fonte: o Autor (2025).

Para melhor visualização da dispersão dos resultados, foram sobrepostas as retas originadas pelos testes:

Gráfico 4 - Comparativo da curva S-N entre as duas condições de usinagem



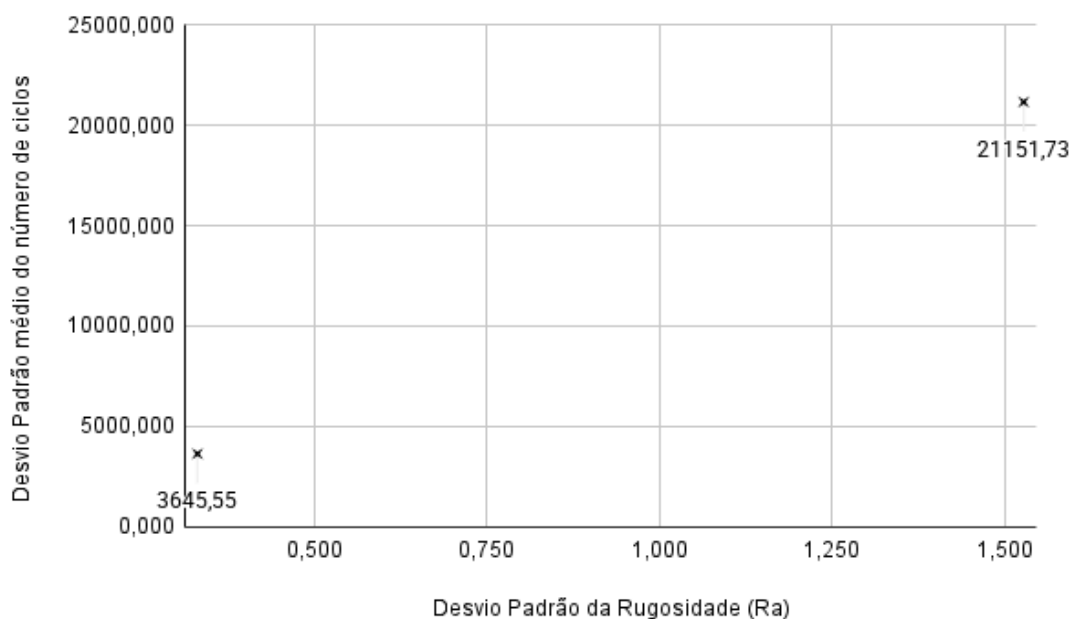
Fonte: o Autor (2025).

Analisando o gráfico acima, é possível observar que a dispersão dos resultados obtidos das amostras usinadas com insertos desgastados foi maior do que a dispersão dos resultados das amostras usinadas com insertos novos.

A maior dispersão observada está diretamente relacionada à variação da rugosidade desses corpos de prova, já verificada anteriormente. O desgaste da ferramenta provoca alterações na geometria de corte, o que contribui para um aumento no desvio padrão das medidas de rugosidade. Essa instabilidade superficial atua como fator crítico no comportamento em fadiga, uma vez que regiões com rugosidade mais elevada funcionam como pontos de concentração de tensões, facilitando a iniciação de trincas (HERTZBERG, 1996). Como resultado, há uma maior variação na vida em fadiga entre as amostras, mesmo sob condições de carga semelhantes. Segundo Torres e Trentini (2002), superfícies com menor rugosidade e maior uniformidade promovem melhor distribuição de tensões e maior resistência à nucleação de trincas por fadiga. Portanto, o controle da rugosidade média e da sua uniformidade é essencial para garantir a repetibilidade e a confiabilidade estrutural em componentes submetidos a esforços cíclicos.

O Gráfico 5 apresenta a correlação entre o desvio padrão da rugosidade média (Ra) das superfícies usinadas e o desvio padrão do número de ciclos até a falha por fadiga. Observa-se que a condição com menor variabilidade na rugosidade ( $Ra \approx 0,2 \mu\text{m}$ ) resultou em um desvio padrão significativamente inferior no número de ciclos ( $\approx 3.645$  ciclos), indicando maior consistência nos resultados de vida em fadiga. Por outro lado, a condição com maior variação da rugosidade ( $Ra \approx 1,45 \mu\text{m}$ ) apresentou desvio padrão superior a 21.000 ciclos, evidenciando que a irregularidade superficial influencia não apenas a redução da resistência à fadiga, mas também a dispersão dos resultados. Essa relação sugere que o controle da rugosidade contribui para uma maior previsibilidade do comportamento em fadiga, uma vez que superfícies mais uniformes tendem a apresentar menores concentrações de tensões e, conseqüentemente, menor variabilidade na iniciação de trincas de fadiga.

Gráfico 5 - Correlação entre Desvio Padrão da Rugosidade (Ra) e Desvio Padrão médio do número de ciclos

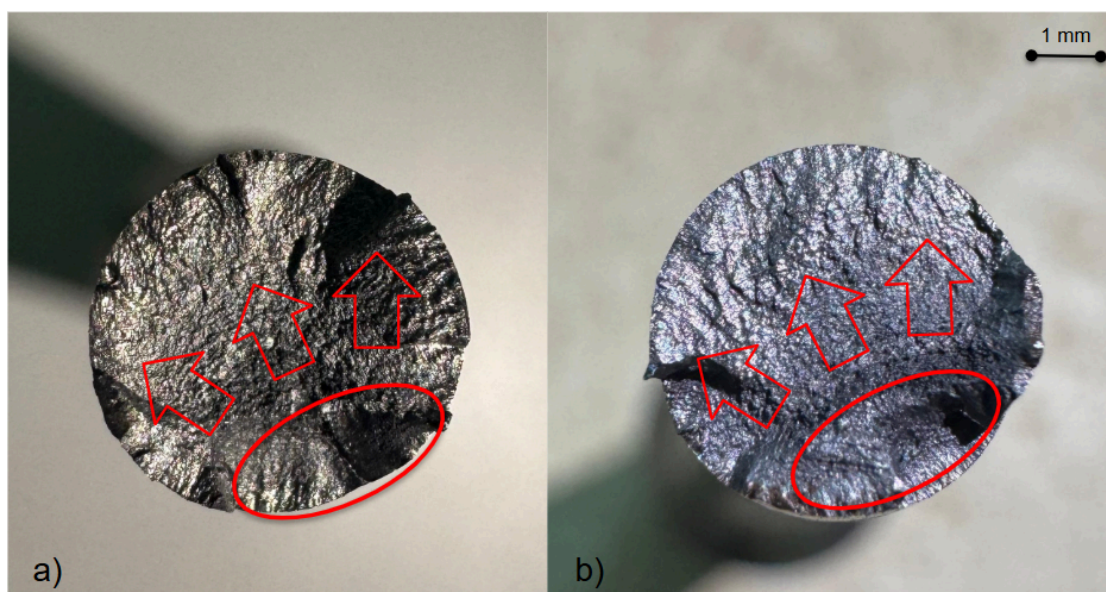


Fonte: Autor (2025).

#### 4.5 ANÁLISE MACROSCÓPICA DA FRATURA

A análise macroscópica das fraturas resultantes dos ensaios de fadiga teve como objetivo identificar os aspectos visuais associados ao processo de nucleação e propagação das trincas. Por meio da observação direta das superfícies fraturadas, foi possível avaliar a morfologia das fraturas e inferir sobre o mecanismo de falha envolvido.

Figura 32 - Análise macroscópica da fratura. (a) Inseto novo e (b) Inseto desgastado.



Fonte: Autor (2025)

As fraturas apresentaram morfologias compatíveis com o processo de fadiga, caracterizadas principalmente pela presença de zonas concêntricas de crescimento da trinca e regiões de ruptura final com aparência irregular (COLPAERT, 2017; MACHINE MFG, 2025). A imagem “a” caracteriza a fratura de um corpo de prova que foi usinado com inserto novo, e a imagem “b” caracteriza a fratura de um corpo de prova usinado com inserto desgastado.

Apesar das diferenças nos resultados de vida em fadiga entre os corpos de prova usinados com insertos novos e desgastados, a análise macroscópica das fraturas revelou que, visualmente, ambas apresentaram características bastante semelhantes. Em todas as amostras observou-se a presença de marcas típicas de fadiga, como zonas de nucleação próximas à superfície, marcas de praia evidentes e regiões de ruptura final com aspecto abrupto. Essa

semelhança sugere que o mecanismo de falha predominante foi o mesmo em ambas as condições, diferindo principalmente na velocidade de propagação da trinca e no número de ciclos até a falha. Assim, a análise macroscópica reforça que, embora as condições de usinagem influenciam diretamente a vida em fadiga, o modo de fratura se manteve consistente, o que valida a confiabilidade do procedimento experimental e das observações realizadas.

#### 4.6 ANÁLISE DOS DADOS

A partir dos dados apresentados na tabela 12, é possível observar que os coeficientes de variação para as amostras usinadas na condição de inserto novo foram muito inferiores às amostras na condição com inserto utilizado:

Tabela 12 - Comparativo dos resultados de resistência à fadiga entre as condições de usinagem

TENSÃO (MPa)	CONDIÇÃO	MÉDIA CICLOS	DESVIO PADRÃO	COEF. DE VARIANÇA (%)
343,37	Inserto desgastado	125670	44867,1	35,7
418,7	Inserto desgastado	30050	13340,1	44,4
494,03	Inserto desgastado	11214	5247,98	46,8
343,37	Inserto novo	113660	6706,97	5,9
418,7	Inserto novo	32333	2125,15	6,6
494,03	Inserto novo	9002	2104,52	23,4

Fonte: o Autor (2025).

Os corpos de prova usinados com insertos novos apresentaram, de forma geral, menor dispersão nos resultados, com desvios padrão inferiores aos obtidos nas amostras usinadas com insertos desgastados. Essa menor variabilidade indica que a usinagem com ferramentas em bom estado promove uma superfície mais uniforme e controlada, reduzindo a influência de imperfeições locais ou tensões residuais que possam atuar como iniciadores de trinca.

Por outro lado, a condição de usinagem com insertos desgastados apresentou maior dispersão dos dados, o que evidencia uma maior sensibilidade a variações no acabamento e,

possivelmente, à presença de descontinuidades geradas durante a usinagem. Essa instabilidade no processo contribui para a ocorrência de falhas prematuras e imprevisíveis, comprometendo a confiabilidade do componente.

A análise estatística, portanto, reforça que além da redução da vida em fadiga, o uso de insertos desgastados também acarreta uma menor previsibilidade do comportamento do material sob solicitações cíclicas, o que é um fator crítico em aplicações estruturais ou de alta responsabilidade.

Esses resultados indicam que a qualidade e o estado da ferramenta de corte têm influência não apenas na média de vida em fadiga, mas também na reprodutibilidade dos resultados, sendo um aspecto relevante no controle de qualidade e no projeto de processos de fabricação confiáveis.

Os resultados de rugosidade também apresentaram comportamento irregular para as amostras usinadas com inserto desgastado, e resultados mais estáveis para amostras usinadas com inserto novo:

Tabela 13 - Comparativo do parâmetro de rugosidade Ra entre as condições de usinagem

<b>CONDIÇÃO</b>	<b>Ra MÉDIO (um)</b>	<b>DESVIO PADRÃO</b>	<b>COEF. VARIAÇÃO (%)</b>
Inserto novo	3,915	0,330	8,4
Inserto desgastado	3,300	1,528	46,3

Fonte: o Autor (2025).

Embora se espere, em condições ideais, que ferramentas novas proporcionem melhores acabamentos superficiais, observou-se que, em determinadas situações, os insertos desgastados apresentaram valores de rugosidade média (Ra) inferiores aos obtidos com insertos novos. Esse comportamento pode ser atribuído ao alisamento progressivo da aresta de corte ao longo do tempo de uso. À medida que ocorre o desgaste de flanco, a aresta de corte pode se tornar mais arredondada, reduzindo as micro irregularidades deixadas na superfície da peça e, conseqüentemente, diminuindo os valores de Ra. Além disso, o desgaste pode gerar uma área de contato maior entre a ferramenta e a peça, o que pode provocar um efeito de brunimento, suavizando a superfície usinada.

## 5 CONCLUSÃO

A análise combinada dos ensaios de fadiga e das medições de rugosidade evidencia a relevância da estabilidade do processo de usinagem na previsibilidade do desempenho mecânico dos componentes. Nos ensaios de fadiga, as amostras usinadas com insertos novos apresentaram menor dispersão nos resultados, refletindo maior repetibilidade e confiabilidade do processo, enquanto as amostras usinadas com insertos desgastados demonstraram maior variabilidade no número de ciclos até a falha. Curiosamente, os resultados das análises de rugosidade indicaram que, embora as médias dos valores de Ra das amostras usinadas com insertos desgastados tenham sido ligeiramente inferiores às das usinadas com insertos novos, a dispersão dos dados foi significativamente maior. Isso revela que a condição da ferramenta de corte não apenas influencia a qualidade superficial média, mas também afeta diretamente a consistência do acabamento, o que pode comprometer a previsibilidade do comportamento em fadiga. Portanto, a obtenção de superfícies com rugosidade controlada e estável é essencial para garantir um desempenho confiável sob solicitações cíclicas, reforçando a importância do monitoramento do desgaste da ferramenta e da manutenção da estabilidade do processo de usinagem em aplicações que exigem alta integridade estrutural.

Dessa forma, através dos resultados desse trabalho, conclui-se que:

- A condição da aresta de corte exerce influência significativa sobre a resistência à fadiga dos corpos de prova usinados, afetando diretamente o número de ciclos até a falha;
- Ferramentas desgastadas não permitem um controle de rugosidade no processo de usinagem;
- Ferramentas desgastadas afetam diretamente em dimensionamentos de mecanismos solicitados por esforços de fadiga;
- O monitoramento do desgaste da ferramenta e o controle dos parâmetros de usinagem são fatores críticos para assegurar qualidade superficial adequada e maximizar a vida útil dos componentes em aplicações estruturais.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomendam-se como trabalhos futuros na mesma linha de pesquisa as seguintes propostas:

- Avaliar até que nível de desgaste das ferramentas ainda mantém a previsibilidade dos resultados em fadiga e usinagem;
- Analisar a influência de parâmetros de usinagem (como avanço, profundidade de corte e velocidade de corte) na evolução do desgaste da ferramenta e nas propriedades da superfície usinada.
- Investigar a aplicação de fluidos de corte ou métodos de refrigeração (como MQL – mínima quantidade de lubrificante, criogênica ou usinagem a seco) e seus efeitos sobre o desgaste da ferramenta, rugosidade e fadiga.

## REFERÊNCIAS

A EG-TEC. **Ferramentas de Usinagem para Torno: importância, escolha certa e manutenção essencial.** [S. l.], 2024. Disponível em: <https://aeg-tec.com.br/.../ferramentas-usinagem-para-torno-importancia-escolha-certa-e-manutencao-essencial>. Acesso em: 29 jun. 2025.

ALVES, D. **Análise de rugosidade superficial de superfície torneada em função do avanço e do raio de ponta da ferramenta.** Trabalho didático (Disciplina Tecnologia Mecânica) — Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2013.

AKHIL, C. S.; ANANTHAVISHNU M. H.; AKHIL C. K.; AFEEZ P. M.; AKHILESH R.; RAHUL R. . **Measurement of Cutting Temperature during Machining.** Journal of Mechanical and Civil Engineering, v. 13, p. 108-122, 2016.

AMORIM, Heraldo José de. **Avaliação do desgaste de ferramentas e rugosidade das superfícies usinadas no torneamento dos aços ABNT 1040 e ABNT 1045.** 2002. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/3791>. Acesso em: 20 jun. 2025.

ARTIZONO. **Guia completo de materiais de ferramentas de corte para usinagem CNC.** [S. l.], 2024. Disponível em: [https://artizono.com/pt\\_br/guia-.../](https://artizono.com/pt_br/guia-.../). Acesso em: 29 jun. 2025.

ASM INTERNATIONAL. **Fatigue and Fracture.** Materials Park: ASM Handbook, 2002. v. 19.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM E466-15: Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials.* West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.

A VOZ DA INDÚSTRIA. **Usinagem: 7 processos de fabricação fundamentais.** 2023. Disponível em:

<https://avozdaindustria.com.br/oportunidades/conheca-os-processos-de-fabricacao-por-usinagem>. Acesso em: 29 jun. 2025.

**AZOM.** AISI 4140 Alloy Steel (UNS G41400): Chemical composition [online]. Atualizado em 18 dez. 2019. Disponível em: *AZoM – The A to Z of Materials*. Acesso em: 23 jul. 2025.

**BBJOVEM.** **Como a usinagem de precisão está revolucionando a fabricação de peças.** 2025. Disponível em: <https://bbjovem.com.br/como-a-usinagem-de-precisao-esta-revolucionando-a-fabricacao-de-peças>. Acesso em: 29 jun. 2025.

BERALDO, E. S., GIORDANO, L. A., & PEDERIVA, R. (2016). **Influência do desgaste da ferramenta na rugosidade superficial em operações de usinagem.** *Revista Matéria*, 21(3), 925-936.

BRUKER CORPORATION. **ContourX-100 3D optical profiler.** Disponível em: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/dimension-and-surface-measurement/optical-profiler/contourx-100.html>. Acesso em: 25 jun. 2025.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Projeto de elementos de máquinas de Shigley.** 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CALLISTER, William D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CALZA, E. J.; FUENMAYOR, F. J.; LOPEZ DE LACALLE, L. N. ***Influence of cutting parameters on surface roughness in turning processes.*** *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 94, n. 5-8, p. 2257–2267, 2018. DOI: 10.1007/s00170-017-1027-1.

CAMPBELL, F. C. *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. ASM International, 2008.

CHIGGOFACTORY. **Lathe Cutting Tools: A complete guide to CNC turning tools and selection**. 2024. Disponível em: <https://www.chiggofactory.com/lathe-cutting-tools>. Acesso em: 25 jun. 2025.

COLPAERT, Humbertus. **Falhas por fadiga: marcas concêntricas e região final irregular**. PUC-Rio, 2017.

COMPRACO. **Ferramentas de torneamento: diferentes tipos de ferramentas de torneamento**. Compraco, 22 jun. 2024. Disponível em: <https://compraco.com.br/blogs/industria/ferramentas-de-torneamento-diferentes-tipos-de-ferramentas-de-torneamento/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

DE ALMEIDA, P. S. **Processos de usinagem: Utilização e aplicações das principais máquinas operatrizes**. São Paulo: Érica, 2015.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: Artliber, 2008.

DINIZ, A. E.; MARINHO, R. R. T. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Artliber, 2011.

DOWLING, Norman E. **The Fatigue Design Handbook**. 2. ed. New York: Springer, 1999. Curvas S-N para ligas metálicas: Ti-5Al-2.5Sn, aço 4340, aço 1045, ferro fundido dúctil, Latão 70Cu-30Zn, liga 2014-T6 Al e EQ21A-T6 Mg.

EL BARADIE, M. A. C. **Cutting fluids, part I: Characterization**. Journal of Materials Processing Technology. 56 (1996) 786 – 797. Dublin City University. Dublin, Ireland.

FERNANDES, C. M. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Vol. 1. São Carlos: Blucher, 1969.

FITZPATRICK, Michael. **Introdução aos processos de usinagem**. 1. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

FIELD, M.; KAHLES, J. F.; CAMMETT, J. T. **Surface finish effects in fatigue**. *Metallurgical Transactions*, v. 3, n. 1, p. 2721-2730, 1972.

GNEITING, B. C.; TRIMM, H. H. **Fatigue failures and their prevention**. In: DAVIS, J. R. *ASM Handbook: Failure Analysis and Prevention*. Materials Park: ASM International, 1995. p. 307-321.

GOMES, J. F. S.; SILVA, M. B. **Desgaste e vida da ferramenta de corte**. In: Usinagem dos Materiais Modernos. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GONÇALVES, Cláudio Henrique. **Resistência dos Materiais: Conceitos e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2017.

HERTZBERG, Richard W. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 513:2004 – Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges – Designation of the main groups and groups of application**. Geneva: ISO, 2004.

INVENT BRASIL. **A importância da qualidade na usinagem e fabricação de máquinas industriais**. 2023. Disponível em: <https://invent.ind.br/a-importancia-da-qualidade-na-usinagem-e-fabricacao-de-maquinas-industriais>. Acesso em: 29 jun. 2025.

LANGE, K.; SCHMIDT, G. *Mechanical Engineering Handbook*. Springer-Verlag, 2006.

LISBOA, F. C. D.; MORAES, J. J. B. D.; HIRASHITA, M. D. A. **Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências**. XXXIII Encontro nacional de engenharia de produção. A gestão dos processos de produção e as parcerias globais para o desenvolvimento sustentável dos sistemas produtivos. Salvador, Bahia. 08 a 11 de out. 2013.

LUCAS, A. L.; FERREIRA, F. A. **Superfícies e Fadiga: análise e influência do acabamento superficial na resistência de materiais**. Revista Materiais, v. 18, n. 2, p. 55-62, 2013.

MACHADO, A. R. **Teoria da usinagem dos materiais**. SÃO PAULO: Editora Edgar Blücher Ltda., 2009.

MACHADO, A. R. et al. **Processos de usinagem dos principais materiais metálicos e compósitos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MACHINE MFG. **Fatigue Fracture: Types, Characteristics & Fixes**. 2025. Disponível em: <https://www.machinemfg.com/fatigue-fracture/>. Acesso em: 22 jun. 2025.

MÁFIA, Afonso de Campos. **Resistência dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2013.

MEGURO, K.; TANAKA, Y.; KANEMATSU, Y. *Effect of Surface Finish on Fatigue Strength of Steels*. *International Journal of Fatigue*, v. 27, n. 9, p. 1210–1217, 2005.

MERCADO LIVRE. **Insero Pastilha Korloy TNMG 160408 VP2 PC8110**. [Imagem]. Disponível em: [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2186947557-10un-insero-pastilha-korloy-tnmg-160408-vp2-pc8110-\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2186947557-10un-insero-pastilha-korloy-tnmg-160408-vp2-pc8110-_JM). Acesso em: 20 jun. 2025. Imagem extraída da página do produto.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2000.

PAULA, Fábio Rüstow de; SILVA, Leonardo Rosa Ribeiro da; MACHADO, Alisson Rocha. **Influência dos parâmetros de corte e desgaste da ferramenta de corte sobre a rugosidade nos furos em CGI 500**. *Anais do XXV Colóquio de Usinagem*, Brusque, SC, UNIFEFE, 11 dez. 2023. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/xxv-coloquio-de-usinagem/676636-influencia-dos-parametros-de-corte-e-desgaste-da-ferramenta-de-corte-sobre-a-rugosidade-nos-furos-em-cgi-500>. Acesso em: 21jun. 2025.

SARIKI. **Rugosímetro portátil**. [Imagem]. Disponível em: <https://www.sariki.es/pt-pt/equipamentos-de-medicao/estado-superficial-perfil-e-formas/rugosimetro/portateis/>. Acesso em: 25 jun. 2025. Imagem extraída da página do produto.

SOUZA, S. A.; MARTINS, F. L. **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos**. São Paulo: LTC, 2014.

OXIFIX. **A história da usinagem CNC e sua importância na indústria**. Oxifix, 2024. Disponível em: <https://oxifix.com.br/a-historia-da-usinagem-cnc-e-sua-importancia-na-industria/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

PONSONNET, L. et al. **Fatigue lifetime and residual stresses in surface-treated medical grade titanium alloy**. *Surface and Coatings Technology*, v. 182, n. 2-3, p. 281-286, 2004.

PINTO, M. L.; SANTANA, L. L.; DEL PINO, G. G. **Análise das estruturas de ferramentas de corte da usinagem**. *Revista Científica Semana Acadêmica, Fortaleza*, v. 1, n. 000150, 2018. Disponível em: <https://www.semanaacademica.org.br/artigo/analise-das-estruturas-de-ferramentas-de-corte-da-usinagem>. Acesso em: 19 jun. 2025.

REBEYKA, Claudimir José. **Princípios dos Processos de Fabricação por Usinagem**. Curitiba: Intersaberes, 2016. 292 p.

REIS, Alexandre M. **Influência do ângulo de posição secundário da ferramenta, raio de ponta e lubrificação na usinagem em presença de aresta postiça de corte**. 2000. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2000. Disponível em: . Acesso em: 13 abr. 2025.

ROCHA TOOLS. **Ferramentas de usinagem: escolha certa para aumentar a eficiência e precisão**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.rochatools.com.br/blog/ferramentas-de-usinagem-escolha-certa-para-aumentar-a-eficiencia-e-precisao>. Acesso em: 29 jun. 2025.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. PUC Minas, 2004.

SCHIJVE, J. **Fatigue of Structures and Materials**. 2. ed. Dordrecht: Springer, 2009.

SILVA, A. F. **Fadiga em Componentes Mecânicos: análise, causas e prevenção**. São Paulo: Blucher, 2017.

SILVA, C. R. da; COSTA, A. R. da; MENDES, L. A. **Influência do desgaste da ferramenta de corte na resistência à fadiga de componentes usinados**. Revista Matéria, v. 23, n. 2, p. 1–10, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/XYZ>. Acesso em: 29 jun. 2025.

SOUZA, A. Jr. I. **Superfície de fratura por fadiga**. In: SOUZA ALVES JÚNIOR, Isau. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA NO COMPORTAMENTO À FADIGA DO AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI – 316. Aracaju: UFS, 2023. Disponível em: [https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/17579/2/ISAU\\_SOUZA\\_ALVES\\_JUNIOR.pdf](https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/17579/2/ISAU_SOUZA_ALVES_JUNIOR.pdf). Acesso em: 20 jun. 2025. Imagem extraída do PDF.

SURFACE, T. **Fatigue failure of machine components**. *Practical Failure Analysis*, v. 1, n. 4, p. 9-15, 2001.

SENAI. **Usinagem - tecnologia do corte**. Divisão de recursos didáticos da diretoria e educação do departamento regional do SENAI-SP. Vol. 1: Processos mecânicos de usinagem. São Paulo, SP, 1998.

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. 2nded. New York: Oxford University Press, 2005.

SURESH, S. **Fatigue of Materials**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

THE ENGINEERS POST. **Lathe Cutting Tools Based on Operations**. Disponível em: <https://theengineerspost.com/lathe-cutting-tools/>. Acesso em: 25 jun. 2025.

THOMAZI, Eduardo. **Usinagem – Parâmetros de usinagem**. [Vídeo]. Setembro de 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=3uuTc3uJ8>. Acesso em: 20 jun. 2025. Imagem extraída do vídeo.

TORRES, Eduardo A.; TRENTINI, Jorge V. **Efeito da usinagem na resistência à fadiga de componentes mecânicos**. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 55, n. 3, p. 147–151, jul./set. 2002.

TOTTEN, G. E. **Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

TRUMPOLD, H. **Fluidos de corte para usinagem: seleção e aplicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.