

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DE CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGMEC
MESTRADO PROFISSIONAL

MARCELO HAUSMANN

INFLUÊNCIA DO FLUIDO LUBRIRREFRIGERANTE SOBRE O DESGASTE EM
TORNEAMENTO DE TUBOS DE FERRO FUNDIDO

CAXIAS DO SUL – RS

2025

MARCELO HAUSMANN

**INFLUÊNCIA DO FLUIDO LUBRIRREFRIGERANTE SOBRE O DESGASTE EM
TORNEAMENTO DE TUBOS DE FERRO FUNDIDO**

Dissertação apresentada como requisito para
a obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Doutor. Rodrigo Panosso
Zeilmann

CAXIAS DO SUL – RS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

H376i Hausmann, Marcelo

Influência do fluido lubrificante sobre o desgaste em torneamento de tubos de ferro fundido [recurso eletrônico] / Marcelo Hausmann. – 2025.
Dados eletrônicos.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.

Orientação: Rodrigo Panosso Zeilmann.

Modo de acesso: World Wide Web

Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>

1. Usinagem. 2. Torneamento. 3. Fundição. I. Zeilmann, Rodrigo Panosso, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 621.9

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

MARCELO HAUSMANN

**INFLUÊNCIA DO FLUIDO LUBRIRREFRIGERANTE SOBRE O DESGASTE EM
TORNEAMENTO DE TUBOS DE FERRO FUNDIDO**

Dissertação apresentada à Universidade de Caxias do Sul como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. Doutor. Rodrigo Panosso Zeilmann

Aprovado em 05 de novembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Giovani Dambros Telli
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Profa. Dra. Lilian Vanessa Rossa / PGEPROTEC
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por me conceder a vida, a saúde e a força necessária para superar os desafios e concluir mais esta importante etapa da minha jornada.

À Metalúrgica Riosulense, por me propiciar esta oportunidade de participar deste projeto.

Ao meu orientador, Prof. Doutor. Rodrigo Panosso Zeilmann, agradeço imensamente pela condução deste trabalho, pela paciência, pelo conhecimento compartilhado e pelas orientações precisas que foram determinantes para o meu desenvolvimento.

Aos membros da banca examinadora, agradeço a disponibilidade em avaliar este trabalho e pelas valiosas contribuições sugeridas para o aprimoramento desta dissertação.

Aos meus filhos, Isadora e Arthur, pelo amor infinito e por compreenderem e ajudarem, com a pureza de vocês, nos dias em que não pude estar presente em suas atividades e brincadeiras devido aos estudos.

À minha esposa, Caroline, pelo apoio incondicional, pela compreensão, sua presença constante e incentivo, que foram fundamentais para que eu mantivesse o foco e a determinação durante todo o curso e a elaboração deste trabalho.

A todos vocês, que transformaram desafios em aprendizado e tornaram esta conquista possível, dedico a minha mais profunda gratidão.

RESUMO

Este estudo avaliou a influência de diferentes condições de lubrificação (seco, MQL - mínima quantidade de lubrificante e fluido abundante) no desgaste de insertos durante o torneamento de tubos de ferro fundido cinzento centrifugado. A presença de carbonetos superficiais, resultante do processo de centrifugação, adiciona complexidade à usinagem desse material. Os objetivos incluíram analisar os efeitos dos fluidos lubrificantes nos mecanismos de desgaste e o impacto na vida útil. Também, analisou-se o impacto da redução do fluido na limpeza do equipamento e no manuseio da peça, além da caracterização física dos desgastes e da utilização de análise estatística. A metodologia empregou um planejamento experimental controlado com parâmetros de corte constantes em material Liga 8 ABNT NBR 16080 e insertos Mitsubishi SNMA 120412 MC5005, com critérios de fim de vida por desgaste de flanco (VB_{max}) de 0,3 mm. Os testes foram executados de forma similar no mesmo torno CNC. Os resultados obtidos com os testes, identificaram os tipos de desgaste, sendo que nos três casos eles foram caracterizados por abrasão, seguida por adesão e oxidação, conforme resultados obtidos através de análise de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). Com relação à vida útil e ao desgaste, os resultados dos testes com fluido abundante obtiveram a maior vida útil do inserto em metros usinados do que os testes a seco e com MQL. Foi possível observar, através dos dados coletados, que os testes com fluido abundante e a seco obtiveram resultados de comportamento caracterizados em três estágios de desgaste, sendo desgaste acentuado, seguindo de desgaste constante e novamente desgaste acentuado, sendo este característico de fim de vida da ferramenta. O teste com MQL apresentou uma oscilação de desgaste e se mostrou instável na estimativa de tendência de vida útil, mesmo mostrando valores de resíduos dentro do esperado.

Palavras-Chave: fluido lubrificante; usinagem; torneamento.

ABSTRACT

This study evaluated the influence of different lubrication/cooling conditions (dry, MQL - Minimum Quantity Lubrication, and flood coolant) on insert wear during the turning of centrifuged gray cast iron tubes. The presence of surface carbides, resulting from the centrifugation process, adds complexity to the machining of this material. The objectives included analyzing the effects of the cutting fluids on wear mechanisms and their impact on tool life. Furthermore, the impact of fluid reduction on equipment cleanliness and part handling was analyzed, in addition to the physical characterization of wear and the use of statistical analysis. The methodology employed a controlled experimental design with constant cutting parameters on Alloy 8 ABNT NBR 16080 material and Mitsubishi SNMA 120412 MC5005 inserts, with an end-of-life criterion defined by a flank wear (VB_{max}) de 0.3 mm. The tests were performed similarly on the same CNC lathe. The results identified the wear types; in all three cases, they were characterized by abrasion, followed by adhesion and oxidation, according to results obtained through Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) analysis. Regarding tool life and wear, the tests with flood coolant achieved a longer insert life in machined meters compared to dry and MQL tests. It was observed, through the collected data, that the flood coolant and dry tests showed behavior characterized by three wear stages: initial rapid wear (break-in), followed by steady-state wear, and finally accelerated wear, which is characteristic of the tool's end of life. The MQL test presented wear fluctuation and proved unstable in estimating the tool life trend, despite showing residual values within the expected range.

Keywords: cooling and lubricant fluid; machining; turning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos processos de usinagem	18
Figura 2 – Movimentos e velocidades no processo de torneamento	19
Figura 3 – Indicação de materiais de ferramentas de corte	21
Figura 4 – Divisão Custo na Usinagem	22
Figura 5 – Comparação materiais ferramentas usinagem.....	23
Figura 6 – Diagrama de resistência à fratura: Comparação de tipos de metal-duro em diferentes tamanhos de grão.....	24
Figura 7 – Deposição química a partir de fase vapor.....	28
Figura 8 – Propriedades revestimento de metal-duro	30
Figura 9 – Classificação detalhada da forma dos cavacos	33
Figura 10 – Representação esquemática dos quatro principais mecanismos de desgaste.....	34
Figura 11 – Causas de desgaste no processo de usinagem.....	35
Figura 12 – Fenômenos de difusão em ferramentas de metal-duro.....	37
Figura 13 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte	39
Figura 14 – Comportamento da vida útil da ferramenta	40
Figura 15 – Desgaste característico se forma na ferramenta de corte durante o processo de torneamento.....	41
Figura 16 – Formas de desgaste e grandezas medidas na parte de corte, conforme DIN ISO 3685.....	42
Figura 17 – Classificação fluidos lubrificantes de acordo com a DIN 51385 ..	44
Figura 18 – Fatores de motivação para a usinagem a seco / MQL.....	47
Figura 19 – Sistema MQL externo: 1. Bico ejetor e 2. Bico convencional	48
Figura 20 – Benefícios, desvantagens, precauções e análises futuras. Estratégia do uso do MQL.....	49
Figura 21 – Classificações dos processos de fundição.....	51
Figura 22 – Demonstração de processo de fundição por centrifugação	52
Figura 23 – Fluxo de processo do trabalho	55
Figura 24 – Composição química em massa da LIGA 8. ABNT NBR 16080	59

Figura 25 – Análise metalográfica da grafita, ampliação 100X. Forma I, Tipo A e B predominante, D e E <40%. Tamanho 4 a 7.	59
Figura 26 – Análise metalográfica da matriz com ampliação de 100X. Perlítica com rede aberta de Steadita. Carboneto <1%	60
Figura 27 – Tubos fundidos, antes da operação de torneamento externo em desbaste.....	61
Figura 28 – Torno CNC QT 150 (A) e sistema de torneamento com dois Tornos CNC QT 150 com carga e descarga automática por robô (B), para usinagem das operações de desbaste e pré-acabamento	62
Figura 29 – Sistema de pinça expansível (A) e camisa de cilindro fixada com pinça expansível (B)	63
Figura 30 – Microscópio Dino Lite	64
Figura 31 – Inseto SNMA 120412 MC5005 do fabricante Mitsubishi, classe K (A) e geometria e características do inseto (B).....	65
Figura 32 – Suporte para Inseto SNMA	66
Figura 33 – Evolução desgaste flanco com fluido abundante, com vista superior do inseto (A) e vista em perspectiva do inseto (B).....	68
Figura 34 – Análise com MEV 250X de ampliação na região de saída do cavaco, com uso de fluido abundante	69
Figura 35 - Análise MEV e resultados de EDS. Imagem da face de saída de cavaco e flanco, do desgaste apresentado com fluido abundante.	70
Figura 36 – Trincas identificadas no revestimento, na região de saída de cavaco - peças usinadas com fluido abundante	72
Figura 37 – Análise de regressão linear dos valores de VBmax médio dos resultados obtidos no teste com fluido abundante.....	75
Figura 38 – Evolução desgaste flanco e Gume a Seco, com vista flanco do inseto (A) e vista em perspectiva do inseto (B).	77
Figura 39 – Imagem da ferramenta utilizada no teste a seco, mostrando a condição da face de saída de cavaco.	78
Figura 40 - Análise MEV e resultados de EDS. Imagem do Gume mostrando desgaste apresentado com processo de usinagem a seco.....	79
Figura 41 – Análise por MEV e resultados de EDS, da superfície de saída de cavaco ferramenta com usinagem à seco.	80

Figura 42 – Trincas mecânicas gume 24 peças usinadas a seco	83
Figura 43 – Análise de regressão linear dos valores de VBmax médio da análise dos resultados obtidos no teste a seco.	86
Figura 44 – Evolução desgaste flanco e gume com MQL.....	88
Figura 45 – Início do desgaste de Gume utilizando MQL.....	88
Figura 46 – Análise do Gume utilizando MEV e EDS para análise de ferramenta desgastada usando no teste com MQL.....	89
Figura 47 – Ferramenta danificada durante a usinagem com MQL. Estrutura da ferramenta. Ampliação de 10k vezes	91
Figura 48 – Análise de regressão linear dos valores de VBmax médio, para os resultados obtidos no teste com MQL.....	94
Figura 49 - Adaptação sistema MQL para realização dos testes	99

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Desgaste Médio (VBmax) x Comprimento usinado em metros). Análise de tendência Polinomial de ordem 2. Teste com fluido abundante	74
Gráfico 2 – Gráfico dos resultados-testes de usinagem a seco, VBmax x metros usinados.....	84
Gráfico 3 – Gráfico MQL VBmax x Peças produzidas / metros usinados.....	92
Gráfico 4 – Comparativo de desgastes VBmax e desvio padrão nos testes com fluido abundante, a seco e MQL	96
Gráfico 5 - Comparativo das taxas de desgaste nos 3 testes realizados, mostrando a taxa de desgaste nos testes, na réplica e na tréplica.....	97
Gráfico 6 Comparativo de custo de produção Ferramenta de corte + Fluido lubrificante.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicação e classificação dos materiais duros de corte	25
Tabela 2 – Principais aditivos utilizados em lubrificantes.....	46
Tabela 3 – Dados coletados de VBmax teste com fluido abundante	67
Tabela 4 – Dados coletados de VBmax teste à seco.....	77
Tabela 5 – Resultados de desgaste VBmax com teste MQL	87
Tabela 6 – Tabela de avaliação qualitativa dos Métodos de Usinagem.....	98

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.2.1	Objetivo geral.....	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
1.2.3	Delimitação da pesquisa.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	USINAGEM.....	17
2.2	TORNEAMENTO	18
2.2.1	Ferramentas de corte	20
2.2.2	Metal-duro	22
2.3	USINABILIDADE	30
2.3.1	Qualidade Superficial	31
2.3.2	Cavaco de usinagem	32
2.3.3	Desgaste de ferramenta	34
2.4	SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO	42
2.4.1	Fluidos lubrificantes	43
2.5	FUNDIÇÃO	50
2.5.1	Fundição por centrifugação.....	52
2.5.2	Ferro fundido cinzento	53
3	METODOLOGIA.....	55
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	55
3.1.1	Variáveis de entrada	57
3.1.2	Variáveis de saída do processo.....	58
3.1.3	Material da Peça.....	59
3.1.4	Equipamentos utilizados	61
4	RESULTADOS DOS TESTES	67
4.1	TESTE COM FLUIDO ABUNDANTE.....	67
4.1.1	Comportamento do desgaste da ferramenta (VBmax)	73
4.2	TESTE A SECO	76
4.2.1	Comportamento do desgaste da ferramenta (VBmax)	83

4.3	TESTE COM MQL.....	87
4.3.1	Comportamento do desgaste da ferramenta VBmax	91
4.4	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	95
5	CONCLUSÃO.....	101
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	103
7	REFERÊNCIAS.....	104

1 INTRODUÇÃO

A indústria metalúrgica desempenha um grande papel na produção de uma ampla variedade de produtos, desde componentes automotivos, peças de máquinas, estruturas de construção e equipamentos industriais, utilizando vários processos de fabricação, como fundição e usinagem.

Na indústria metalúrgica e fundição, o ferro fundido cinzento é um material amplamente utilizado devido às suas excelentes propriedades mecânicas. Segundo Chiaverini (2005), ferro fundido é a liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2%, em quantidade superior à que pode ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita.

O processo de usinagem é um processo de fabricação amplamente utilizado na indústria metalmeccânica em todo o mundo, segundo Leal (2015). Esse processo consiste em modificar a forma e as dimensões de uma peça por meio da remoção de material, gerando cavacos. Cavacos são fragmentos de material retirados da peça pela ferramenta, sendo caracterizados por uma forma irregular.

O processo de usinagem consiste basicamente na remoção de material de uma peça a fim de atingir características dimensionais e geometrias necessárias para atender às especificações de projeto e aplicação. No processo de torneamento em desbaste analisado neste estudo, a quantidade percentual em peso do cavaco gerado é ligeiramente maior que o peso de peças geradas.

Para a remoção de material, são empregadas ferramentas de corte, geralmente com resistência mecânica superior à do material-base. Este processo gera uma quantidade de calor elevada e faz com que a peça e a ferramenta possam sofrer variações que interfiram na usinabilidade, no dimensional da peça e na vida útil do ferramental de corte.

Para a melhoria do processo de usinagem, é comumente utilizado um fluido lubrificante para minimizar os impactos causados tanto na ferramenta quanto na peça. Embora muitas operações de corte na indústria sejam realizadas sem o uso de fluido, em diversos casos é essencial aplicar um fluido lubrificante sobre a ferramenta para proporcionar o resfriamento e/ou a lubrificação necessários ao processo, segundo Wright e Trent (2000).

Com este trabalho de pesquisa, buscou-se entender o impacto no processo de usinagem com a redução e a eliminação do fluido lubrificante, mensurando o impacto no processo através da análise de desgaste da ferramenta.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

No processo de usinagem, tanto a peça de trabalho quanto a ferramenta são afetadas pelo calor gerado na interface cavaco/ferramenta, e a ferramenta de corte pode chegar ao colapso (Rezende, 2020). Por esse motivo, normalmente são aplicados aos processos de usinagem meios que visam reduzir a temperatura da ferramenta e da peça.

O processo em análise utiliza no processo de torneamento ferramentas de corte de metal-duro com revestimentos e refrigeração abundante. Nesse processo, o fluido lubrificante é utilizado de forma intensiva, durante o processo de usinagem (Silva; Lima, 2022).

Para Peixoto (2021) o fluido lubrificante é essencial para o processo de usinagem, mas gera impactos financeiros e ambientais significativos. Quando analisado sob a ótica da sustentabilidade, apresenta problemas como o alto consumo de água, toxicidade prejudicial aos operadores e ao meio ambiente, grandes volumes necessários, elevando custos, e custos elevados para descarte ou reuso devido a legislações rigorosas.

A aplicação do método de refrigeração abundante, associado a uma quantidade elevada de cavaco, gera atualmente neste processo de usinagem um alto consumo de fluido lubrificante. Isso causa um grande impacto no custo de fabricação e gera grandes quantidades de fluido lubrificante que são descartadas no ambiente. De acordo com Silva e Lima (2022), a partir da década de 1970, as autoridades sindicais e ambientais, ao se referirem à indústria de transformação metalmeccânica, firmaram uma legislação mais rigorosa para o controle dos produtos utilizados na usinagem dos materiais. Os fluidos lubrificantes, por exemplo, já não podem ser descartados de maneira indiscriminada devido à constante busca pela redução dos danos ambientais causados.

Portanto, este trabalho se justifica pela necessidade crescente de reduzir os custos de fabricação, diminuir os materiais aplicados no processo e minimizar o impacto ambiental causado pelo consumo e descarte do fluido lubrificante.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência do fluido lubrificante sobre o desgaste das ferramentas de corte e as alterações no processo de usinagem.

1.2.2 Objetivos específicos

Com o desenvolvimento do trabalho, pretende-se:

- Analisar o efeito do fluido lubrificante sobre o desgaste VB_{max} ;
- Definir os mecanismos de desgaste atuantes em cada sistema com diferentes tipos de fluidos;
- Avaliar a influência de cada tipo processo na limpeza e no manuseio; e
- Comparar custos de processo com as 3 condições de teste, considerando previsão de consumo de inserto e fluido lubrificante.

1.2.3 Delimitação da pesquisa

A pesquisa foi limitada à análise do comportamento do processo de usinagem de ferro fundido centrifugado, com foco nas variações do sistema de refrigeração da ferramenta e da peça.

A análise foi estruturada para entender o comportamento da usinagem, buscando um estudo detalhado da ferramenta de corte, seu desgaste e sua vida útil.

Outro ponto que avaliado é o impacto direto no processo, como a limpeza do torno CNC e o impacto no ambiente para o operador.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 USINAGEM

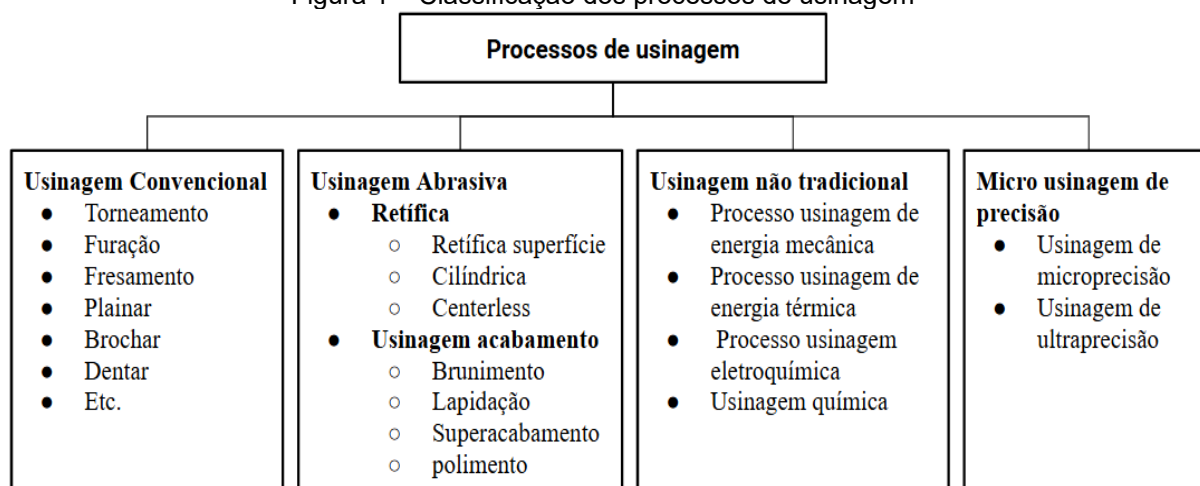
Usinagem é um termo que abrange um grande conjunto de processos de fabricação projetados para remover materiais indesejados, geralmente na forma de cavacos, de uma peça. A usinagem é usada para converter peças fundidas, forjadas ou blocos pré-formados de metal nos formatos desejados, com tamanho e acabamento especificados para atender aos requisitos de projeto ASM Handbook, (1995).

Para Peixoto (2021), os processos de usinagem oferecem várias vantagens, como a capacidade de usinar uma grande variedade de materiais e criar peças com formas complexas e características geométricas especiais. É possível obter bordas e superfícies muito retas, manter boa precisão dimensional, produzir acabamentos superficiais de alta qualidade e gerar detalhes geométricos específicos, como roscas e furos arredondados precisos.

A seleção do processo de usinagem adequado depende de alguns fatores. Os principais fatores são: o tipo do material e suas propriedades; as propriedades finais desejadas; o tamanho, forma e complexidade do componente; as tolerâncias e o acabamento superficial exigidos; o número de peças requeridas; entre outros.

De acordo com Huda (2020), existem diversos processos de remoção de material para atender aos requisitos básicos da usinagem. Esses processos podem ser amplamente classificados em quatro categorias, conforme pode ser observado na Figura 1: (a) processos de usinagem convencionais, (b) retificação e outros processos de usinagem abrasivos, (c) processos não tradicionais de usinagem (NTM) e (d) processos de usinagem de microprecisão e ultraprecisão (UPM).

Figura 1 – Classificação dos processos de usinagem



Fonte: O Autor (2025) - Adaptado de Huda (2020).

A definição do processo de usinagem depende da necessidade específica do produto a ser usinado, bem como das características e das tolerâncias necessárias para a peça. Neste trabalho, é abordado o processo de usinagem convencional de torneamento externo em desbaste, que é essencial para a remoção eficiente de material durante a fabricação de peças em revolução.

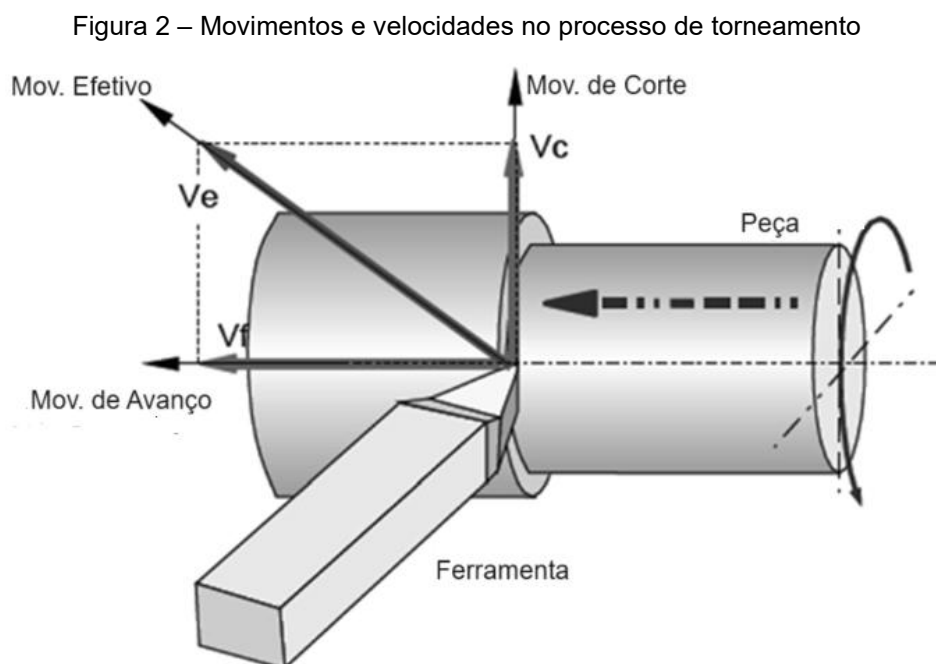
2.2 TORNEAMENTO

O torneamento é tradicionalmente caracterizado pela ação de uma ou mais ferramentas de corte sobre um material bruto em uma máquina-ferramenta com o objetivo de usiná-lo. Esse processo é amplamente empregado na fabricação de componentes para atender às exigências de diversos setores da indústria metalmeccânica. Com a crescente demanda por peças cada vez mais complexas, com tolerâncias dimensionais reduzidas e alta qualidade superficial, o torneamento tem se tornado um processo cada vez mais preciso (Bonandi, 2012).

Este processo combina dois movimentos principais: a rotação da peça e o movimento de avanço da ferramenta. No entanto, em algumas aplicações específicas, a peça pode permanecer estacionária, enquanto a ferramenta gira ao seu redor para promover a remoção do material (Bonandi, 2012).

Segundo Wright e Trent (2000), o torneamento é um dos processos de usinagem mais utilizados na indústria de corte de metais. Nesse procedimento, as

peças geralmente têm formato cilíndrico, uma vez que são giradas em torno de seu eixo, permitindo que a ferramenta de corte exerça pressão para remover a camada superficial. O torno mecânico é uma máquina-ferramenta extremamente versátil, utilizada na confecção ou no acabamento de peças dos mais diversos tipos e formas (Bonfá, 2013). A Figura 2 mostra os movimentos gerados no processo de torneamento.



Fonte: Cervelin (2009) – adaptado de Stoeterau.

Para uma compreensão mais aprofundada e a conseqüente otimização de qualquer processo de usinagem, é fundamental analisar certas grandezas. Amorim (2002) descreve dois dos principais parâmetros de corte envolvidos no torneamento, que são o avanço e a profundidade de corte, sendo estes definidos como:

- Avanço (f): A distância percorrida pela ferramenta por cada revolução da peça, expressa em mm/rev.
- Profundidade de corte (a_p): A espessura da camada de material removida, que corresponde à profundidade de penetração da ferramenta. Essa medida é perpendicular ao plano de trabalho, que é delimitado pelas direções do avanço e da velocidade de corte da ferramenta, expressa em milímetro (mm).

2.2.1 Ferramentas de corte

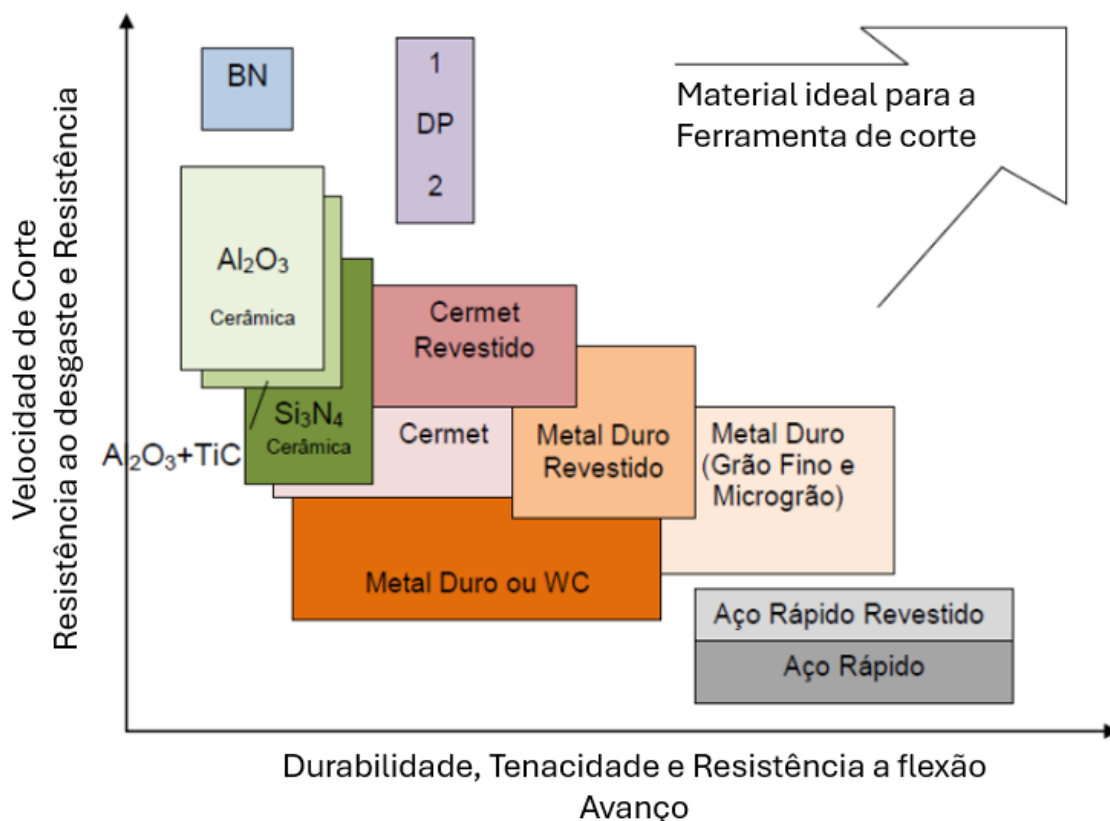
Em 1930, surgiu a primeira norma sobre ferramentas de corte, a DIN 768 – "Fundamentos Sobre as Ferramentas de Corte". Posteriormente, em 1939, foi criada a norma ASA B5.13 – "Terminologia e Definições de Ferramentas Monocortantes". Desde então, muitas mudanças ocorreram nas máquinas operatrizes, nas ferramentas de usinagem e nos conceitos de processo, o que requer análises mais detalhadas dos conceitos de usinagem e dos parâmetros de corte.

ASM Handbook (1995) diversos materiais podem ser empregados na fabricação de ferramentas de corte, sendo que estes se dividem em 3 tipos:

- HSS (Aço rápido) – Voltado para ferramentas de uso geral;
- Metal-duro – Aplicado em maiores velocidades de corte; e
- Cerâmica – Aplicado em maiores velocidades de corte.

Devido à grande variedade de materiais disponíveis para usinagem, são utilizados diferentes materiais na fabricação de ferramentas de corte, cada um com propriedades e características específicas, conforme ilustrado na Figura 3. A escolha desses materiais é baseada nos requisitos de desempenho, resistência e eficiência exigidos para cada operação de usinagem.

Figura 3 – Indicação de materiais de ferramentas de corte



Diamante policristalino (DP):

1 – Considerando a dureza

2 – Considerando a dureza e temperatura

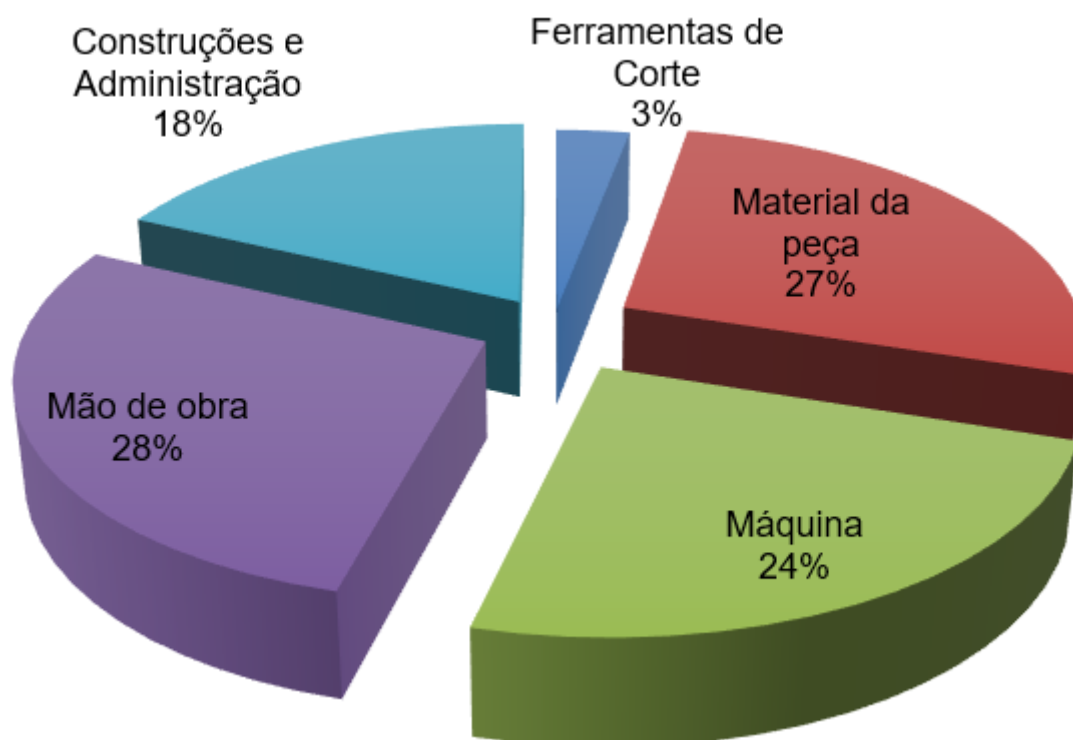
Fonte: Aleixo (2020) - Adaptado de Klocke (2011) 7.

Segundo Ferraresi (1977), a escolha da ferramenta de corte depende de diversos fatores, entre os quais se destacam o material a ser usinado, a natureza da operação de usinagem, as condições da máquina operatriz, a geometria e as dimensões da ferramenta, o custo do material utilizado na ferramenta, a utilização de refrigeração ou lubrificação, entre outros. Esses fatores influenciam diretamente no desempenho e na eficiência do processo de usinagem.

Além dos itens citados, é necessário considerar o custo total da usinagem, que vai além do preço da ferramenta. Esse custo deve englobar todos os gastos envolvidos no processo de fabricação, como o investimento em máquinas, as horas de usinagem e os gastos com retrabalhos e reprocessos. De acordo com a Sandvik Coromant (2025b), pode-se dividir os gastos de usinagem em cinco principais fatores, como mostrado na Figura 4, onde é demonstrado que os custos das

ferramentas de corte representam apenas 3% (três por cento) dos custos totais de fabricação.

Figura 4 – Divisão Custo na Usinagem



Fonte: Adaptado de Sandvik Coromant (2025a).

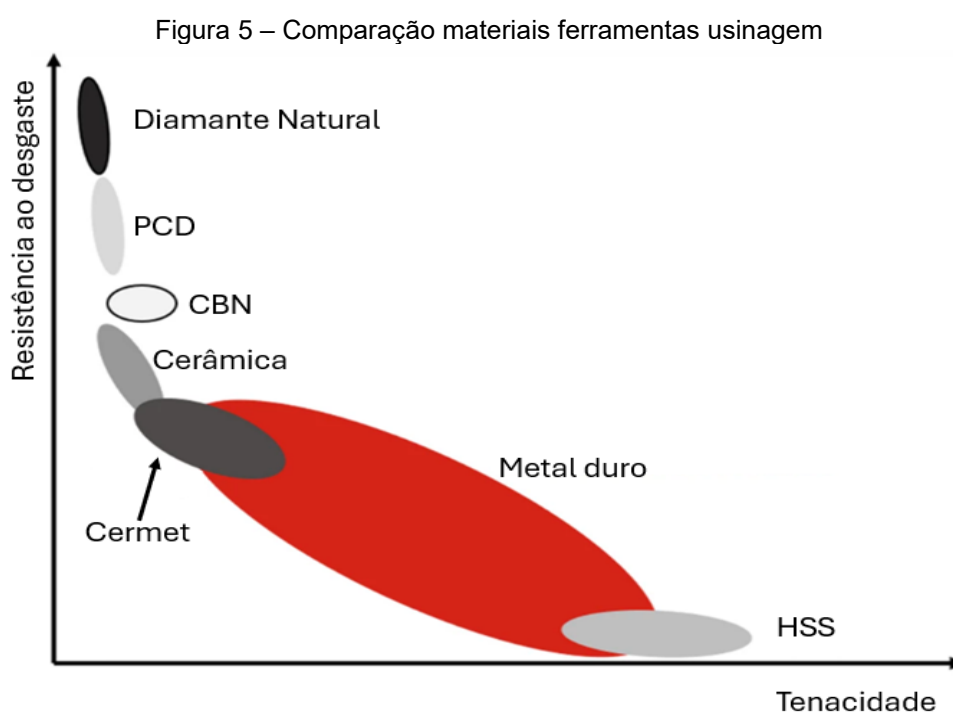
Há uma relação direta entre o desgaste das ferramentas e os tempos de troca, que, por sua vez, afetam os custos de fabricação, as máquinas, a mão de obra e as próprias ferramentas. O grau de desgaste é intrinsecamente ligado às propriedades dos materiais de que as ferramentas são feitas. Assim, o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte é um campo em constante progresso. O foco das pesquisas é aprimorar os materiais já estabelecidos e, ao mesmo tempo, descobrir novas composições que possam otimizar a performance de corte (Klocke, 2019).

2.2.2 Metal-duro

Hoje um dos materiais amplamente utilizados pela indústria metalmeccânica para a usinagem de peças é o metal-duro. Ele foi desenvolvido na Alemanha por meio da metalurgia do pó, aplicando um processo de sinterização dos pós de carboneto de tungstênio e cobalto (WC e Co).

Devido às suas características e aplicações, o metal-duro se tornou o tipo de ferramenta de corte dominante na indústria. Em 2013, a estimativa de consumo desse material ocupou a maior fatia do mercado global, com aproximadamente 53% (Peixoto, 2021).

Para Aleixo (2020), o metal-duro se distingue por sua alta dureza e resistência ao desgaste, características representadas na Figura 6. Ele é composto por grãos de carboneto de tungstênio (WC), de tamanho micrométrico, aglutinados por um ligante metálico, geralmente o cobalto (Co).

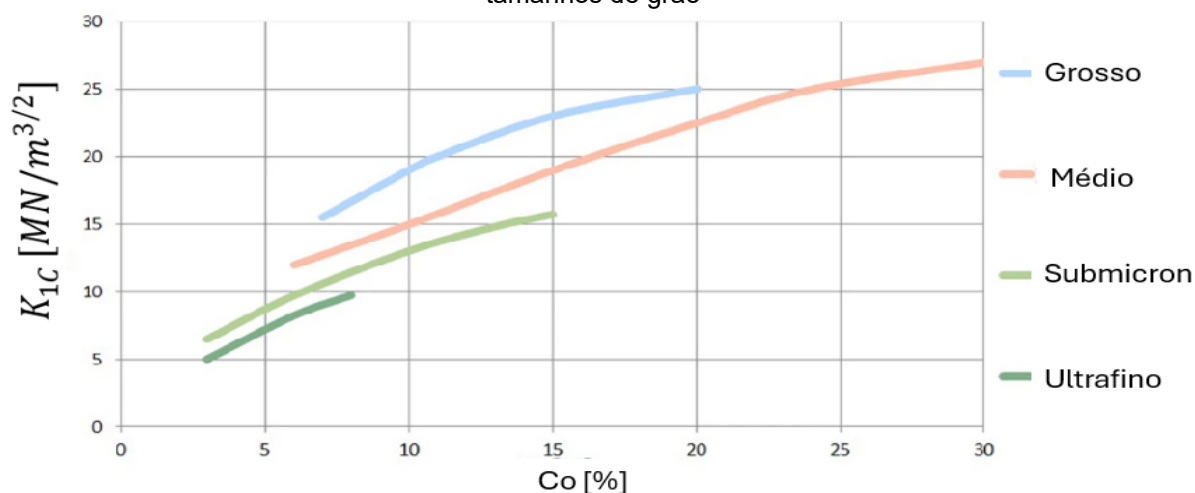


Fonte: Adaptado de Ceratizit Group (2025a).

O metal-duro é um material obtido por meio da metalurgia do pó, formado principalmente por partículas de carboneto de tungstênio (WC) unidas a um ligante de cobalto (Co). Em alguns casos, podem ser adicionados outros elementos, como carbonetos de titânio, tântalo e nióbio, para aprimorar suas propriedades (Lemes, 2021).

O tamanho de grão do metal-duro é um fator microestrutural determinante que confere características distintas às ferramentas de usinagem, conforme pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Diagrama de resistência à fratura: Comparação de tipos de metal-duro em diferentes tamanhos de grão



Fonte: Ceratizit Group (2025b).

Particularmente, ferramentas de metal-duro que incorporam grãos extrafinos e ultrafinos ($< 1,0 \mu\text{m}$) de carboneto de tungstênio (WC) são empregadas em aplicações que demandam elevada dureza a quente e superior resistência a microlascamentos. As propriedades mecânicas, como a relação dureza-tenacidade, são intrinsecamente influenciadas pelo tamanho do grão de WC e pela fração volumétrica do ligante de cobalto (Co). Uma elevada concentração de cobalto, aliada à redução do tamanho do grão de WC promove o aumento da tenacidade do substrato (Oschelski, 2020).

Adicionalmente, o refino do grão contribui significativamente para otimizar diversas características de usinagem. Entre elas, destacam-se: o aumento da resistência mecânica da ferramenta, a redução da condutividade térmica em direção ao corpo da ferramenta, o aumento da resistência da cunha cortante e a diminuição da tendência à adesão, em comparação com ferramentas que possuem grãos convencionais (Oschelski, 2020).

A aplicação do metal-duro no processo de usinagem é ampla, e o tipo de material varia conforme a aplicação. A norma ABNT NBR ISO 513:2013 divide os

tipos em seis grupos, designados pelas letras P, M, K, N, S e H, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Aplicação e classificação dos materiais duros de corte

Letra de identificação	Cor de identificação	Matérias a serem usinadas	Grupo de aplicação			
			P01 P10 P20 P30 P40	P05 P15 P25 P35 P45	A ↑	B ↓
P	Azul	Aço: Todos os tipos de aço e aço fundido, com exceção de aço inoxidável com uma estrutura austenítica.				
M	Amarela	Aço inoxidável: Aço inoxidável austeníticos, ferríticos e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	A ↑	B ↓
K	Vermelha	Ferro fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafite esferoidal e ferro fundido maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	A ↑	B ↓
N	verde	Materiais não ferrosos: Alumínio e outros materiais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	A ↑	B ↓
S	Marron	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes a altas temperaturas, baseadas em ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio.	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25	A ↑	B ↓
H	Cinza	Materiais com alta dureza: Aço temperado, material de aço fundido temperado, aço fundido em coquilha.	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	A ↑	B ↓

A = Aumentar a velocidade de corte, aumentando a resistência ao desgaste do material cortante.
B = Aumentar o avanço, aumentando a tenacidade do material cortante

Fonte: Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC (2025).

Para a usinagem de ferro fundido, utiliza-se a classe K de metal-duro, que é adequada para materiais de cavaco curto e maleáveis, como o ferro fundido comum, o coquilhado e o vermicular (Xavier, 2003).

A classe K é a indicada para a usinagem de ferro fundido cinzento. Esse material é caracterizado por formar cavacos curtos durante o processo (Sandvik Coromant, 2025c).

2.2.2.1 Revestimentos

O uso de revestimentos em ferramentas é uma estratégia amplamente adotada para aumentar sua durabilidade e aprimorar seu desempenho, especialmente em situações que demandam maior produtividade, utilização de parâmetros de corte mais intensos ou condições de trabalho mais rigorosas (Lemes, 2021). Revestimentos com alta resistência ao desgaste têm sido cada vez mais utilizados com o objetivo de prolongar a vida útil das ferramentas e aprimorar a qualidade dos processos em diversas aplicações industriais. Entre os métodos de deposição mais empregados, destacam-se a deposição física de vapor (*Physical Vapor Deposition* – PVD) e a deposição química em fase vapor (*Chemical Vapor Deposition* – CVD) (Ceratizit Group, 2025b).

Segundo Hong, Ding e Jeong (2021), a aplicação de revestimentos proporciona um aumento considerável na dureza superficial da ferramenta, minimizando a deformação plástica da peça usinada. Como resultado, obtém-se uma superfície mais íntegra, uma vez que, em geral, o revestimento reduz o atrito na interface entre o cavaco e a ferramenta.

Os materiais de revestimento resistentes ao desgaste, frequentemente utilizados em ferramentas de corte, são compostos refratários binários ou ternários, como TiN, Ti (C, N) e Al₂O₃. Esses materiais são muitas vezes aplicados em múltiplas camadas com o objetivo de promover um aumento significativo na vida útil da ferramenta (Jiang *et. al.*, 2006, *apud* Aleixo, 2020).

Os dois processos mais comuns utilizados para revestir as ferramentas são a Deposição Química de Vapor (CVD) e a Deposição Física de Vapor (PVD), os quais podem ser aplicados em camadas únicas ou múltiplas (Lemes, 2021).

O processo PVD é um processo de deposição de filmes metálicos finos sobre diversos tipos de substrato (Santos *et al.*, 2019). As coberturas PVD são cruciais para melhorar o desempenho das ferramentas. Elas aumentam a resistência ao desgaste devido à sua alta dureza. Além disso, as tensões de compressão presentes nas coberturas PVD melhoram a tenacidade do gume e a resistência contra trincas térmicas. Isso ajuda a proteger a ferramenta e a prolongar sua vida útil, especialmente em condições de trabalho mais exigentes (Sandvik Coromant, 2025d).

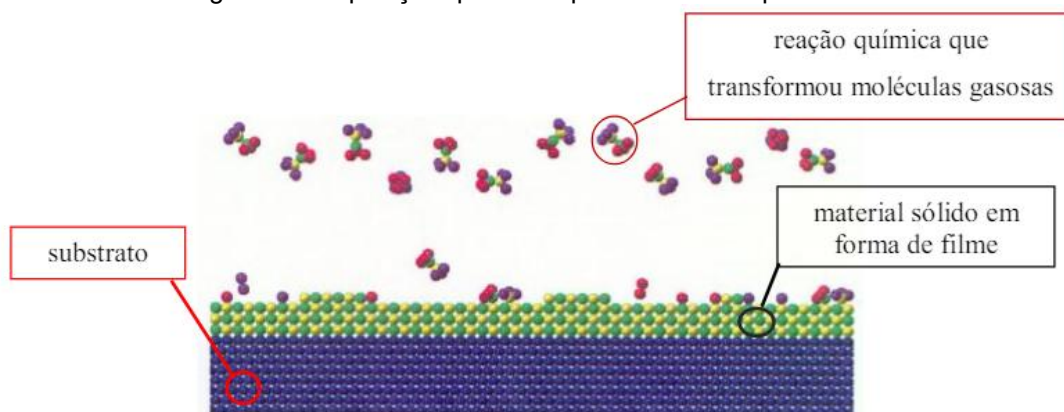
Existem no mercado uma ampla disponibilidade de revestimento de PVD, porém é possível destacar três, sendo:

- nitreto de titânio – TiN (titanium nitride): é o material mais utilizado para revestir ferramentas de corte devido às suas excelentes propriedades, com dureza de aproximadamente 2.300 HV0,5. Esse composto é formado pela combinação de titânio e nitrogênio, e proporciona uma significativa melhoria no desempenho e na durabilidade das ferramentas (Klocke, 2019). Os filmes de nitreto de titânio (TiN) possuem excelentes propriedades mecânicas, alta estabilidade química e térmica (Chavda *et al.*, 2016). Sua utilização é recomendada para materiais mais dúcteis, como aços de baixo carbono e alumínio, desde que sejam observadas baixas forças de corte (Kalzer, 2009). A Ceratizit Group (2025c) indica aplicar em aços com resistência menor que 900 N/mm², latão e ferro fundido;
- nitreto de cromo – CrN (chromium nitride): é um material altamente adequado para revestimento, pois combina as propriedades essenciais para atender às exigências de indústrias que necessitam de revestimentos duros e com excelentes características tribológicas. (Anicézio, 2015). É um excelente revestimento para ligas de alumínio e aços de baixa liga, com baixa tendência à formação de gume postiço (Cimm, 2025); e
- nitreto de alumínio titânio – TiAlN (titanium aluminum nitride): possui uma alta microdureza superficial, em torno de 3.500 HV 0,05, o que proporciona maior resistência ao desgaste (Lemes, 2021). Possui uma boa combinação de resistência à oxidação e tenacidade, o que melhora a resistência geral ao desgaste (Sandvik Coromant, 2025d). É ideal para uso em altas velocidades de corte e avanço, com a melhoria da vida útil da ferramenta. É utilizada em brocas e machos para corte a seco (sem lubrificante) (CIMM, 2025).

No processo CVD, a formação de um revestimento ocorre por meio de uma reação química entre o elemento a ser depositado e o substrato, conforme mostrado na Figura 7. O material do revestimento pode ser proveniente de um gás, de uma

mistura de gases ou do contato com sólidos, como no processo de *pack-cementation* (Costa, 2016).

Figura 7 – Deposição química a partir de fase vapor



Fonte: Costa (2016) – Adaptado de DOI (2009).

O processo CVD é usado para depositar camadas de 0,005 mm a 0,012 mm, podendo chegar a 0,020 mm. Este processo é a primeira escolha quando se busca resistência ao desgaste, como no torneamento de aço inox, pois esses revestimentos tendem a reduzir o desgaste por craterização. Já em furações, o CVD tende a ser usado nos gumes externos (Ceratzit Group, 2025a).

Segundo a Ceratzit Group (2025b), os revestimentos CVD mais adequados para usinagem são:

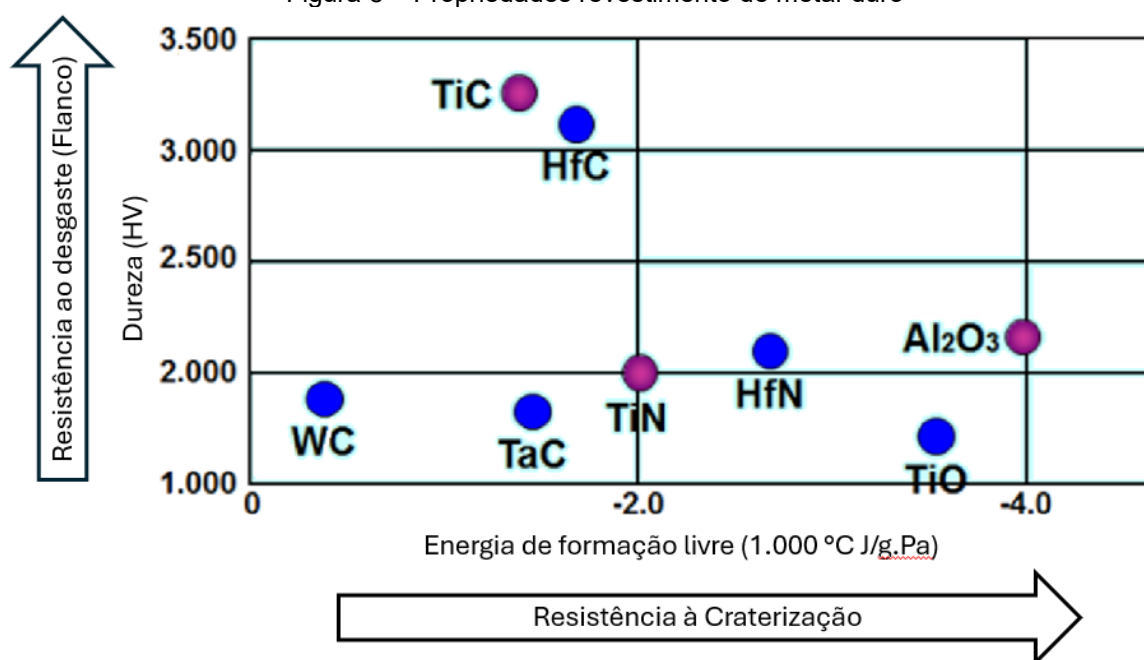
- carboneto de titânio (TiCN): Desenvolvido para condições exigentes, com durezas em torno de 3.500 HV. Este revestimento é aplicado em peças com alta resistência à tração (Dadic, 2013). Este revestimento possui alta dureza e, ao mesmo tempo, uma boa tenacidade. É normalmente aplicado na usinagem de aços com resistência acima de 1.300 N/mm² e aços inox (Ceratzit Group, 2025a);
- carbeto de titânio (TiC): A característica mais marcante do TiC em relação ao TiN é a sua dureza mais elevada, que lhe confere uma maior resistência à abrasão. Possui um baixo coeficiente de dilatação térmica, o que é uma característica importante em processos como o fresamento (Kanzler, 2009). A fina camada do revestimento, apesar de auxiliar na ligação e deposição, contém carbono, o que exige um

revestimento adicional para suportar altas temperaturas. Por isso, a combinação com Al_2O_3 se torna crucial (Teles, 2007).

- óxido de alumínio (Al_2O_3): é amplamente reconhecido por sua excepcional dureza, sendo considerado um dos materiais mais duráveis para aplicações abrasivas. Sua elevada temperatura de fusão também confere a ele uma notável resistência a altas temperaturas, o que o torna altamente adequado para uma variedade de aplicações industriais que envolvem condições extremas (Ruishi Abrasives, 2023). Tem como desvantagem a baixa resistência a oscilações de temperaturas e alta fragilidade (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014);
- nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) Revestido por WC/C: este revestimento tem como característica minimizar o uso de fluidos lubrificantes. A aplicação de uma camada de WC/C sobre o TiAlN reduz o coeficiente de atrito de 0,4 para 0,2, garantindo sua aplicação em processos de furação e rosqueamento (OERLIKON BALZERS, 2025). A aplicação deste revestimento é sugerida para aços com resistência de até 1.100 N/mm^2 , aço inoxidável, ligas de titânio, ferro fundido, alumínio, latão, bronze e plástico Ceratizit Group (2025a).

O tipo de revestimento influencia diretamente nas propriedades de resistência das ferramentas, esta condição pode ser observada na Figura 8, onde é mostrado variações de resistência a desgaste de flanco e craterização.

Figura 8 – Propriedades revestimento de metal-duro



Fonte: Costa (2016) – adaptado de Mitsubishi (2006).

A variação do tipo de revestimento está diretamente relacionada ao material e ao processo de usinagem. A escolha do revestimento influencia a vida útil da ferramenta, a variação dimensional da peça e a qualidade superficial. Em particular, a aplicação de revestimentos compostos no torneamento de ferro fundido cinzento – tanto em altas velocidades contínuas quanto em usinagem interrompida (em baixas e altas) – resulta em uma vida útil mais longa e estável para a ferramenta. Isso se deve à maior resistência da ligação entre as camadas de revestimento e ao tratamento especial da camada superior (Kyocera, 2025).

2.3 USINABILIDADE

Não existe de uma forma objetiva a definição de usinabilidade, porém existem variáveis envolvidas durante o processo que, com base nos resultados obtidos com estes itens, é possível definir a usinabilidade de um material. Segundo Gonçalves (2012), a usinabilidade pode ser definida como uma característica que indica a facilidade ou dificuldade de usinar um determinado material. Já Lemos *et al.* (2009) definem a usinabilidade como uma propriedade "tecnológica" (não intrínseca) dos materiais. O Índice de Usinabilidade de um material é sempre avaliado em relação a

outro material, que é adotado como referência ou padrão para essa medição. Lemos *et al.* (2009) também descrevem que essa característica é considerada tecnológica porque, além de depender das propriedades intrínsecas do material, ela também é influenciada por fatores como as condições de usinagem, as características da ferramenta e da máquina, a presença ou ausência de fluidos lubrificantes, entre outros aspectos.

A usinabilidade pode ser definida de várias formas, como pela avaliação do desgaste das ferramentas de corte, pelo acabamento da peça, pelo tipo de cavaco gerado durante o processo e pela dificuldade de remoção de material pela máquina.

A geometria da ferramenta de corte é um dos fatores mais importantes que influenciam a usinabilidade. Se essa característica não for avaliada de forma adequada, o processo de usinagem pode apresentar condições desfavoráveis, independentemente do material ou revestimento da ferramenta. De acordo com Machado *et al.* (2015), a geometria da ferramenta de corte tem um impacto significativo no desempenho da usinagem. Mesmo que o material da ferramenta seja de alta qualidade, se a geometria não for corretamente projetada, a operação de usinagem não terá sucesso. Dada a sua importância, é fundamental que existam normas para definir os ângulos da cunha cortante de forma padronizada, a fim de garantir uma nomenclatura uniforme entre profissionais e na literatura técnica especializada.

2.3.1 Qualidade Superficial

O nível de qualidade superficial de uma determinada peça ou componente depende de quanto crítica é sua aplicação, pois quanto maior forem as exigências, maior será o custo de fabricação (Cardoso; Santos; Sales, 2007). Para determinação da qualidade superficial, é utilizado um aparelho chamado Rugosímetro, que mede a topografia da superfície utilizando uma ponta extremamente fina de diamante

Os instrumentos de medição utilizados para análise da qualidade de superfície são, normalmente, de contato mecânico e podem ser classificados como métodos de varredura ou de sensoriamento. No método de varredura, um palpador de

contato desce sobre a superfície a ser testada em uma frequência específica. A superfície é guiada sob a agulha com uma taxa de avanço constante (Klocke, 2019).

O perfil de uma superfície, que é uma representação aproximada da sua realidade, depende do procedimento de medição e do filtro utilizados. Conforme a norma DIN EN ISO 4287, com diferentes procedimentos de medição e filtros é possível determinar o P-Profile (perfil primário), o R-Profile (perfil de rugosidade) e o W-Profile (perfil de onda). Entre os perfis de rugosidade do tipo R-Profile, os mais utilizados são Rp, Rz, Ra, Rv e Rt (Klocke, 2019).

2.3.2 Cavaco de usinagem

O cavaco consiste em fragmentos de material de formato não uniforme, gerados pela ação de remoção de uma ferramenta de corte (Valim, 2018). Para Amorim (2002) e Gama (2014) apesar de ser um subproduto da usinagem, o cavaco gerado pode representar, simultaneamente, tanto uma evidência quanto uma causa de problemas no processo de usinagem.

A formação do cavaco pode causar problemas tanto na ferramenta quanto no processo de usinagem, como dificuldades na sua remoção da máquina e da ferramenta. Uma avaliação criteriosa do cavaco permite entender se as condições e os parâmetros de usinagem estão adequados.

Os tipos básicos de cavacos podem ser classificados em três tipos de acordo com Ferraresi (1977), sendo:


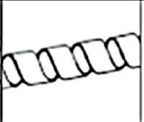


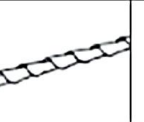

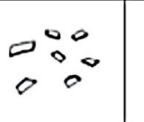





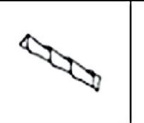
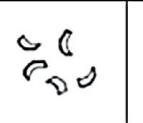




- Cavaco contínuo – cavacos grandes e longos, normalmente em fita contínua. Esse fenômeno ocorre em materiais dúcteis e, geralmente, é produzido com pequenos e médios avanços, altas velocidades de corte e grandes ângulos de saída (Valim, 2018);
- Cavaco arrancado, descontínuo ou ruptura – É muito comum em usinagem de materiais frágeis, como o ferro fundido cinzento e latão (Ferraresi, 1977). Também ocorre em materiais menos frágeis, quando a usinagem é realizada a baixas velocidades de corte, com grandes avanços e ângulo de saída pequeno. O cavaco é formado por fragmentos do material usinado, que se desprendem em grupos

lamelares após a ruptura completa na região de cisalhamento, permanecendo separados (Gama, 2014); e

- Cavaco de Cisalhamento ou parcialmente contínuo – Trata-se de uma mistura entre os dois tipos de cavaco mencionados. A formação desse tipo ocorre quando uma trinca se propaga no plano de cisalhamento, causando a ruptura completa do material. Posteriormente, devido à pressão e à temperatura, o cavaco é ressoldado, resultando em lamelas justapostas e bem definidas. Esse processo é favorecido pela redução da resistência do material no plano de cisalhamento (Gama, 2014).

Para Gama (2014), é crucial evitar ao máximo alterar as condições de usinagem apenas para moldar o cavaco, pois a velocidade de corte e o avanço devem ser definidos primariamente pelas condições econômicas do processo. A norma ISO 3685 classifica os cavacos de forma detalhada, conforme mostrado na Figura 9 abaixo.

Figura 9 – Classificação detalhada da forma dos cavacos

1 - Cavaco em fita	2 - Cavaco tubular	3 - Cavaco espiral	4 - Cavaco hel. tipo arruela	5 - Cavaco hel. cônico	6 - Cavaco em arco	7 - Cavaco fragmentado	8 - Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
							
1-3 - Emaranhado	2-3 - Emaranhado		4-3 - Emaranhado	5-3 - Emaranhado			

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017).

No processo de usinagem de ferro fundido cinzento, o cavaco normalmente encontrado está classificado como item 6 e 7 da Figura 9, sendo este cavaco fragmentado e cavaco em arco solto.

2.3.3 Desgaste de ferramenta

Durante a usinagem, a região do gume é palco de deformação, separação e atrito. As ferramentas de corte são submetidas a elevadas cargas, incluindo altas tensões de compressão, velocidades elevadas e temperaturas intensas. Com os parâmetros de corte usuais, o desgaste progressivo nas faces de saída e de flanco leva ao fim da vida útil da ferramenta (Klocke, 2019). O desgaste é compreendido como a degradação gradual da cunha de corte, causada por solicitações mecânicas, fadiga e abrasão (Santos *et al.*, 2019).

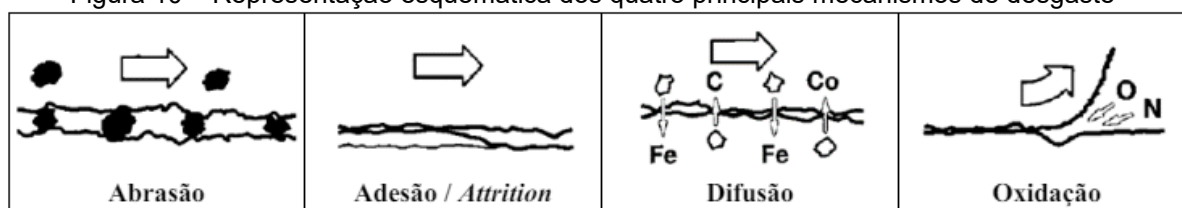
Condição similar é citada por Soori e Arezoo (2022), que afirmam que o trabalho mecânico é convertido em deformação plástica, o que gera atrito entre a ferramenta de corte e a peça, além de aumentar a produção de calor.

O desgaste, segundo a norma ISO 3685, pode ser entendido como a modificação do formato original da ferramenta durante o processo de corte, resultando na perda gradual e progressiva de material em pequenas proporções.

2.3.3.1 Mecanismos de desgaste

Os principais mecanismos responsáveis pelo desgaste incluem lascamento, trincas, abrasão, aderência, oxidação e difusão (Pivoto, 2020). Para Klocke (2019), cinco fatores definem o desgaste da ferramenta, sendo um dano superficial nas ferramentas e 4 fatores representados na Figura 10.

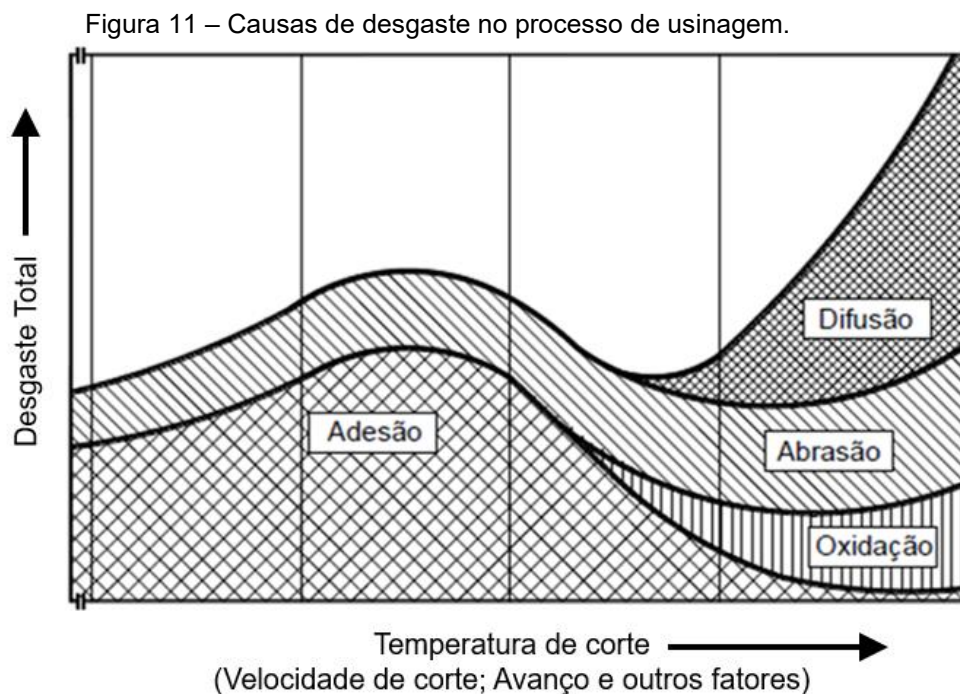
Figura 10 – Representação esquemática dos quatro principais mecanismos de desgaste



Fonte: Rosa, 2017, *apud* Astakhov, 2011.

O desgaste nas ferramentas de usinagem é influenciado por diversos fatores, como o material da peça, o material do inserto, o revestimento do inserto e a máquina. Devido a esses fatores, os quatro mecanismos de desgaste normalmente

ocorrem por causa da variação de temperatura de corte, como mostrado na Figura 11.



Fonte: Klocke (2019).

Para Machado *et al.* (2015), os mecanismos de abrasão, adesão, difusão e oxidação ocorrem principalmente em função da temperatura de corte. A temperatura de corte, por sua vez, tende a ser influenciada principalmente pela velocidade de corte e pelo avanço, embora outros fatores também possam afetá-la. Em temperaturas mais baixas, os mecanismos de adesão e abrasão tendem a ser os predominantes durante o processo.

A falha de ferramentas, decorrente do desgaste, é um fenômeno recorrente na usinagem, passível de análise e gestão eficaz por meio de sistemas de monitoramento. O desgaste, em sua essência, é um processo gradual e cumulativo que impacta diretamente a vida útil da ferramenta. Suas características e taxa de progressão são intrinsecamente influenciadas por múltiplos parâmetros de corte, tais como a geometria da ferramenta, a profundidade e velocidade de corte, além do tipo de fluido lubrificante utilizado. Essa degradação resulta não apenas na redução da capacidade de corte e eficácia da ferramenta, mas também na alteração de sua geometria original (Lauzier, 2025).

A eficiência da ferramenta está relacionada aos mecanismos de desgaste, que são acionados pelo aumento da temperatura na interface entre o gume de corte e a peça. As ferramentas sofrem estresse ao longo do tempo devido ao contato constante com altos níveis de atrito e fricção (Soori; Arezoo, 2022).

O monitoramento e o controle do desgaste e danos nas ferramentas de corte ao longo da usinagem desempenham um papel crucial na garantia da qualidade do componente final (Pivoto, 2020). É fundamental prever com precisão o desgaste da ferramenta durante o processo de usinagem, garantindo sua substituição antes que danos significativos à superfície da peça de trabalho ocorram (Soori; Arezoo, 2022).

2.3.3.2 Abrasão

O desgaste mecânico ou desgaste abrasivo ocorre em baixas e altas velocidades e se manifesta em forma de canais ou sulcos (Klocke, 2019). A abrasão mecânica é um mecanismo de desgaste que ocorre quando partículas duras removem ou deslocam material da superfície. Essas partículas podem estar soltas entre duas superfícies em movimento relativo ou ser parte integrante de uma das superfícies envolvidas (Rosa, 2017).

O desgaste por abrasão também pode ser causado pela adesão ou por produtos da tribo-oxidação, que são removidos por fadiga da superfície ou por abrasão (Klocke, 2019).

2.3.3.3 Adesão

Durante o processo de corte, devido ao esforço de trabalho, são geradas altas temperaturas, o que pode resultar em adesão. Os cavacos que fluem sobre a face da ferramenta podem aderir a ela, criando um efeito de soldagem (Lauzier, 2025).

A adesão por pressão acontece quando o material da peça exerce pressão sobre o gume de corte, criando uma interação química, juntamente com alta pressão e temperatura na zona de corte. Com o tempo, o gume aderido se rompe, levando consigo fragmentos do gume de corte, o que provoca lascamento e acelera o desgaste do flanco (Seco Tools, 2023). Dependendo das condições de corte, partículas acumuladas no gume deslizam periodicamente entre a face do flanco e a

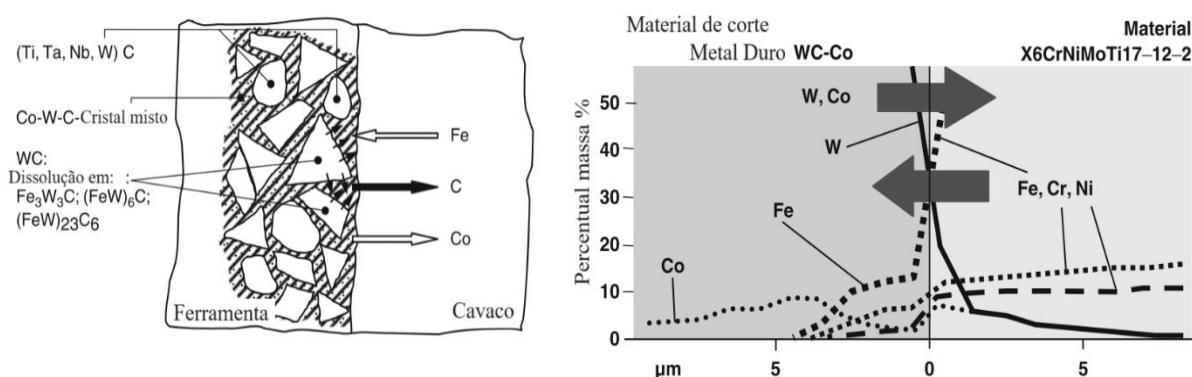
superfície de corte. Em caso de alta dureza e frequências de remoção de até cerca de 1,5 kHz, essas partículas aumentam o desgaste da face de flanco e deterioram consideravelmente a qualidade da superfície da peça (Klocke, 2019).

2.3.3.4 Difusão

De acordo com Klocke (2019) Em ferramentas de metal-duro termicamente resistentes, o desgaste por difusão é previsto em altas velocidades de corte, quando há solubilidade mútua entre os materiais, conforme a Figura 12. Ao usinar peças com substratos de metal-duro sem revestimento, as seguintes reações podem ocorrer:

- Difusão de ferro (Fe) na fase ligante de cobalto (Co); e/ou
- Difusão de cobalto (Co) no aço, onde Fe e Co formam uma série contínua de cristais mistos.

Figura 12 – Fenômenos de difusão em ferramentas de metal-duro



Fonte: Klocke (2019).

O desgaste por difusão é uma das principais causas do desgaste do flanco, pois altas velocidades de corte geram temperaturas elevadas na extremidade de corte, criando condições propícias para a difusão (Seco Tools, 2023). Em altas velocidades de corte, o desgaste ocorre principalmente devido a fatores influenciados pela elevação da temperatura, como a abrasão mecânica, a difusão entre materiais e a oxidação (Borelli, 2000).

2.3.3.5 Oxidação

O desgaste eletroquímico refere-se à tribo-corrosão. Sob a influência de altas temperaturas e oxigênio, formam-se frágeis camadas de oxidação. Sua formação e destruição contínuas causam a perda de material (Dadic, 2013). Mesmo em condições de corte típicas, uma camada de óxido se forma nas ferramentas de metal-duro, especificamente na região do gume. Isso ocorre devido à influência das temperaturas de corte elevadas e da presença de oxigênio atmosférico. Essa camada protetora reveste as áreas acessíveis ao oxigênio, como as extremidades das zonas de contato na face de folga, na face de folga secundária e na face de ataque (Klocke, 2019).

A Oerlikon Balzers (2025) define que a corrosão é um processo caracterizado por reações químicas ou eletroquímicas entre um metal e substâncias com as quais ele entra em contato, como soluções eletrolíticas, gases úmidos ou fusões. Além disso, as cargas mecânicas também podem contribuir para a aceleração da corrosão.

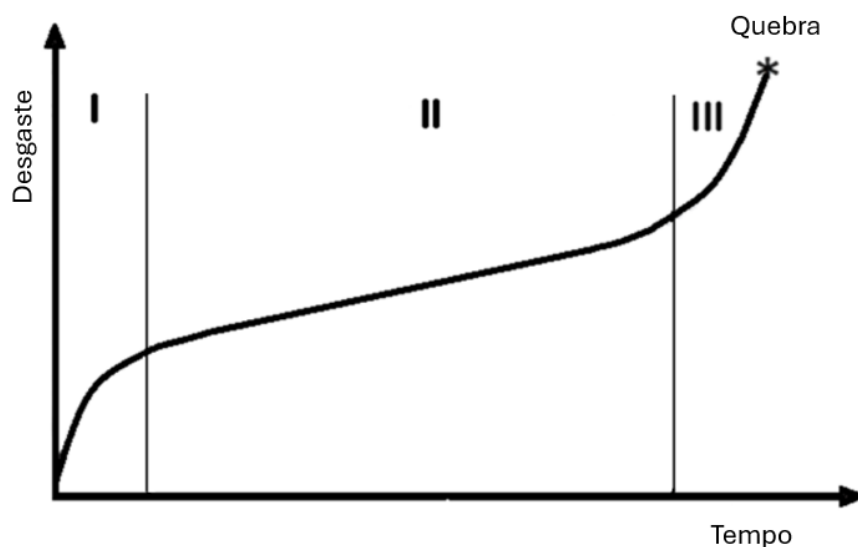
O impacto prejudicial da oxidação na estrutura do metal-duro fica especialmente evidente na face do flanco menor. Ali, forma-se um óxido complexo de tungstênio-cobalto-ferro. Devido ao seu maior volume molar em comparação com o metal-duro, esse óxido se desenvolve de forma semelhante a uma verruga, o que pode, em última instância, resultar na quebra dos cantos da ferramenta (Klocke, 2019).

2.3.3.6 Comportamento do desgaste

Para Machado *et al.* (2015) existem três estágios no processo de desgaste de uma ferramenta, como mostrado na Figura 13, sendo:

- Estágio 1 – ocorre no início da usinagem, com uma alta taxa de desgaste, devido a adequação do sistema tribológico envolvido;
- Estágio 2 – taxa de desgaste constante, onde a ferramenta já está totalmente adequada ao processo e mecanismos; e
- Estágio 3 – acontece um aumento acentuado no desgaste e é promovido em um curto espaço de tempo, ocasionando assim um colapso da ferramenta.

Figura 13 – Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte



Fonte: Machado *et al.* (2015).

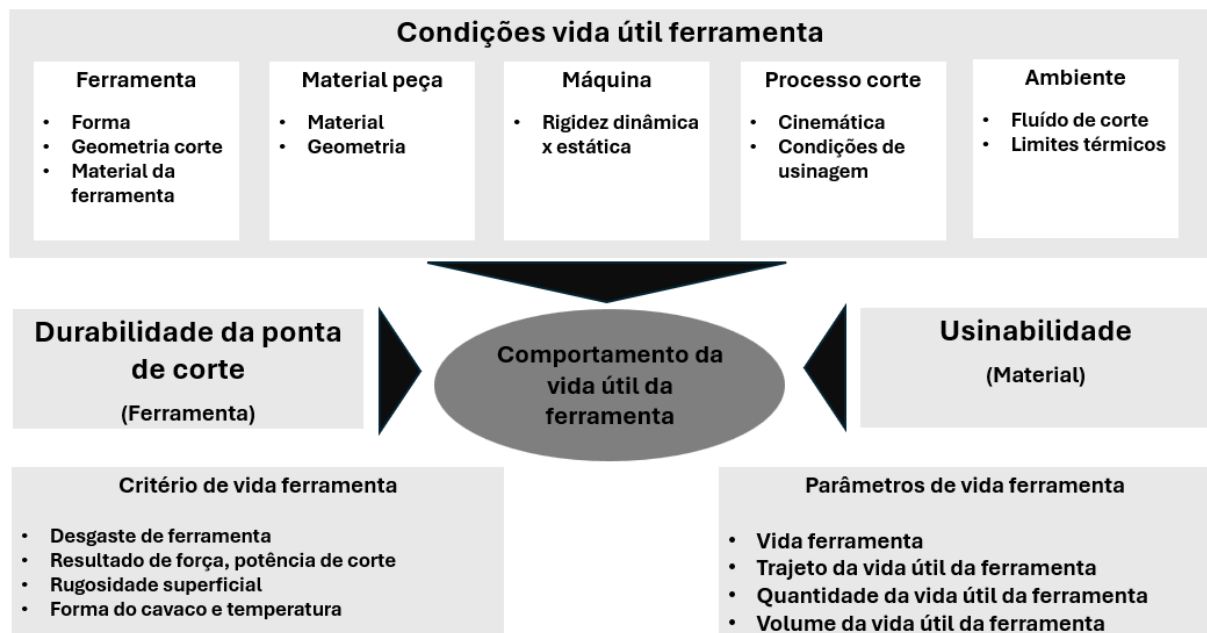
É importante atenção ao processo de usinagem, para estar atento à evolução dos desgastes. Avaliação e entendimento do comportamento do desgaste trarão informação sobre o momento exato da troca de ferramenta, a fim de evitar que o estágio 3 do processo de desgaste, colapso da ferramenta, venha a ocorrer.

2.3.3.7 Vida útil e desgastes

A vida útil da ferramenta refere-se ao tempo de sua operação efetiva, descontando períodos de inatividade como a troca de peças ou movimentos de aproximação. Esse período se estende até o momento em que a capacidade de corte é comprometida, de acordo com um critério predefinido (Valim, 2018).

O desgaste de ferramentas de corte ocorre de forma contínua e microscópica devido ao uso, resultando em uma perda gradual de material. Esse processo compromete a produção, afeta a qualidade do produto e impacta negativamente o processo de usinagem (Santos *et al.*, 2019). A Figura 14 apresenta as condições de processo que influenciam a vida útil da ferramenta.

Figura 14 – Comportamento da vida útil da ferramenta



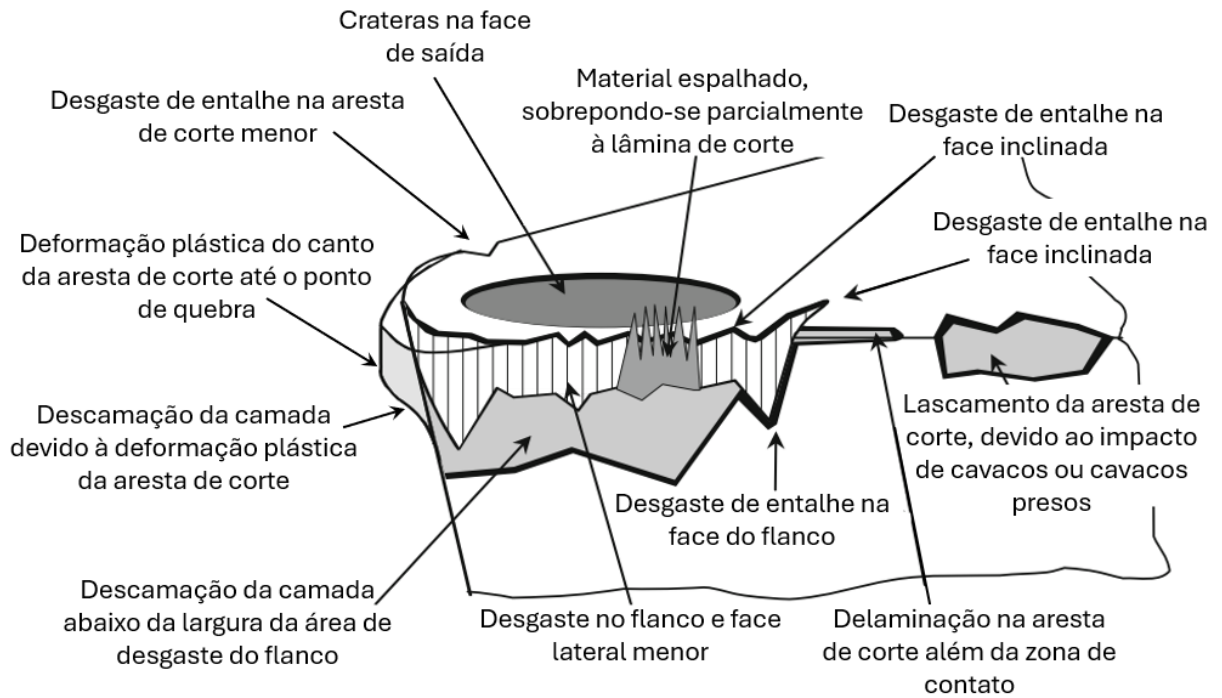
Fonte: Klocke (2019).

A perda da capacidade de usinagem de uma ferramenta indica que ela chegou ao fim de sua vida útil. Para determinar isso, são definidos critérios de avaliação, que podem ser divididos em duas categorias principais:

- **Análise da ferramenta:** Os limites de desgaste são definidos por meio de estudos e padrões. A medição da ferramenta é realizada para aprová-la ou reprová-la, ou a troca pode ser feita com base em um padrão de vida útil predefinido; e
- **Análise do processo:** A vida útil da ferramenta é analisada com base nos resultados obtidos no processo de usinagem, avaliando o acabamento superficial e a variação dimensional da peça.

Cada processo de usinagem gera condições de desgaste em diferentes posições da ferramenta, que são influenciadas pelo material da peça, pelas condições de usinagem e pelo material da ferramenta. A Figura 15 mostra as principais regiões e características de desgaste das ferramentas em uma operação de torneamento.

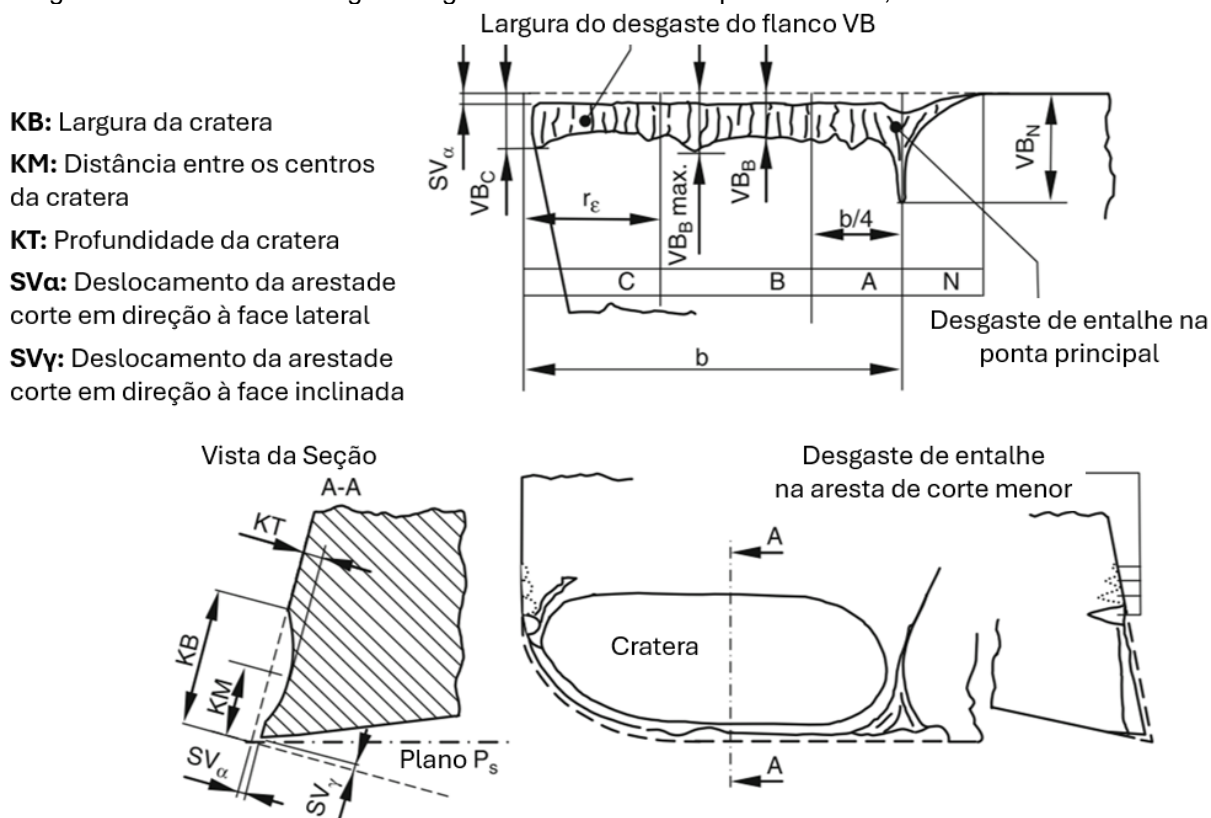
Figura 15 – Desgaste característico se forma na ferramenta de corte durante o processo de torneamento



Fonte: Klocke (2019).

Os fenômenos de desgaste gerados na peça cortante durante o corte variam muito e dependem do tipo e da duração das tensões. A ferramenta de corte é desgastada na face de saída (desgaste de cratera), bem como nas faces de flanco maior e menor (desgaste da face de flanco), consoante Klocke (2019). A representação esquemática da forma e das dimensões do desgaste pode ser avaliada na Figura 16.

Figura 16 – Formas de desgaste e grandezas medidas na parte de corte, conforme DIN ISO 3685



Fonte: Klocke (2019).

Em particular, é possível distinguir diversas medidas: a largura da superfície de desgaste do flanco (VB), o deslocamento do gume em direção à face do flanco (SV α) e à face de ataque (SV γ), a profundidade da cratera (KT) e a distância do centro da cratera (KM). A partir dessas últimas, forma-se a razão de cratera $K = KT/KM$ (Klocke, 2019).

Carvalho (2005) avaliou que no processo de torneamento há a ocorrência de um elevado gradiente térmico na ferramenta de corte. A diferença de temperatura é de aproximadamente 750°C, medida entre a interface de contato e um ponto a 3 mm de distância. Salientou que esse elevado gradiente térmico é um dos principais fatores que contribuem para o aumento do desgaste e, conseqüentemente, para a redução da vida útil da ferramenta.

2.4 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Historicamente, a água foi utilizada para refrigerar o processo de usinagem, devido à sua alta capacidade térmica de remoção de calor e à sua ampla

disponibilidade (Silva; Lima, 2022). Um dos principais problemas do uso da água no processo de usinagem, especialmente para a maioria dos materiais, é a oxidação tanto da peça quanto do equipamento de usinagem. Além disso, a água apenas proporcionava refrigeração, sem oferecer a lubrificação necessária entre a ferramenta de corte e a peça.

2.4.1 Fluidos lubrificantes

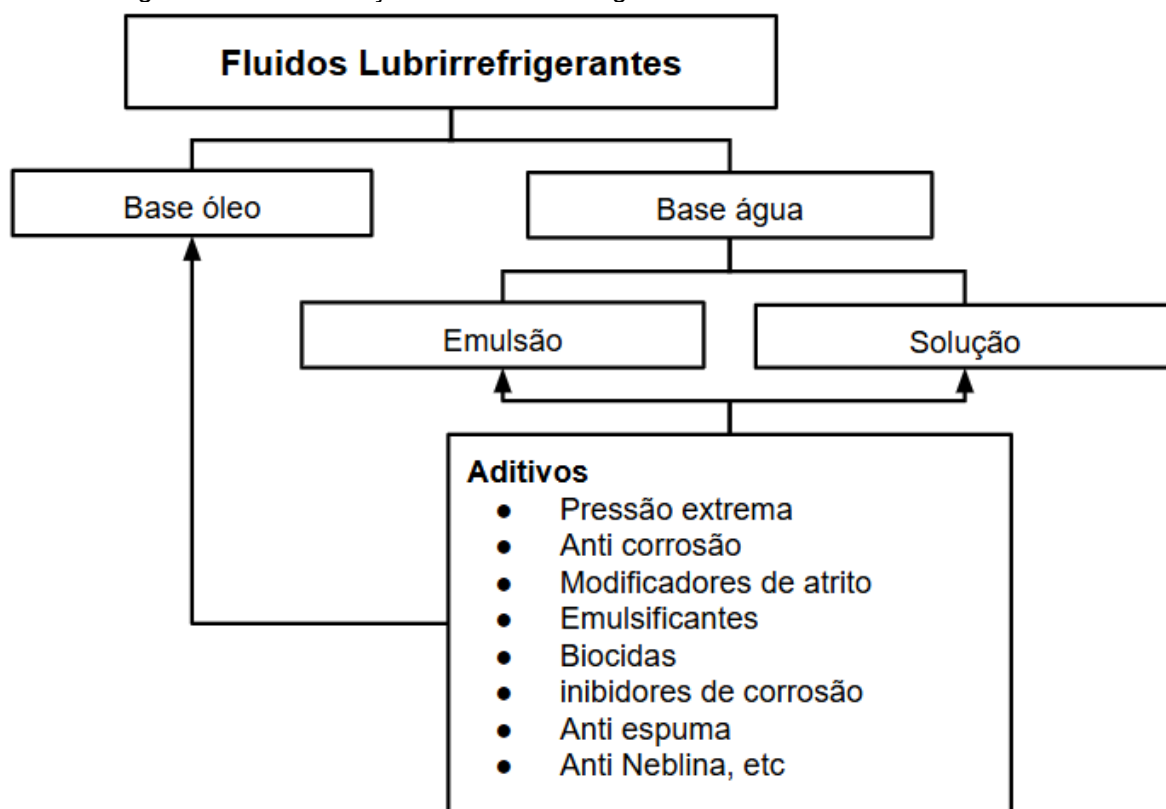
Há mais de 100 anos, Mallock escreveu: “Lubrificantes parecem agir diminuindo a fricção entre a superfície da ferramenta e o cavaco, e a dificuldade é ver como o lubrificante se comporta nesta região” (Tasdelen *et al.*, 2007, p. 222, *apud* Silva; Lima, 2022).

Ao desempenhar suas funções primárias de resfriamento, lubrificação e remoção de cavacos, os modernos fluidos de corte contribuem substancialmente para o elevado desempenho dos processos de fabricação. Essa atuação multifuncional é crucial para otimizar a usinagem, elevando a eficiência e a qualidade do processo produtivo.

Na usinagem, o uso adequado de fluidos lubrificantes oferece diversos benefícios. Isso porque as altas temperaturas geradas durante o processo são um dos principais fatores que afetam a integridade da superfície da peça, e esses fluidos ajudam a controlar esse calor, agindo como refrigerantes e/ou lubrificantes. (Silva; Lima, 2022).

De acordo com Afonso *et al.* (2023), a norma DIN 51385 classifica os fluidos lubrificantes com base em sua composição, sendo as categorias mais comuns à base de óleo ou à base de água. Propriedades específicas são alcançadas por meio da adição de substâncias químicas particulares, conhecidas como aditivos. A Figura 17 classifica os tipos de fluidos lubrificantes de acordo com essa norma, apresentando também algumas classes típicas de aditivos.

Figura 17 – Classificação fluidos lubrificadorres de acordo com a DIN 51385



Fonte: Adaptado de Afonso *et al.* (2023).

Durante as interações entre a ferramenta de corte e o material, o fluido lubrificadorres desempenha um papel crucial na remoção de calor. Ele permite a manutenção de uma faixa térmica controlada durante o processo de usinagem, resultando em um ciclo térmico que pode contribuir para a maior durabilidade da pastilha e da ferramenta de corte, além de favorecer a eficiente quebra dos cavacos (Soori; Arezoo, 2022).

Existem diferentes tipos de fluidos de usinagem que podem ser usados para refrigerar a região de corte durante o processo. Eles são normalmente divididos em três grupos: óleos de corte integral (puro), gases e óleos de corte solúveis em água. Este último, por sua vez, pode ser classificado como óleos emulsivos (solúveis), fluidos químicos sintéticos e fluidos semissintéticos.

Posteriormente, descobriu-se que a adição de óleo à água, com o uso de um emulsificante adequado, proporcionava boas propriedades de lubrificação, além de efeitos eficazes de resfriamento. Esses fluidos passaram a ser conhecidos como óleos solúveis (Silva; Lima, 2022).

Os óleos emulsionáveis mais comuns (solúveis em água) são óleos minerais leves com os seguintes aditivos: sulfonato de petróleo, ácidos aminograxos, condensados de resina e oleatos de cromo (Almeida, 2015).

A função do fluido lubrificante-refrigerante, segundo Almeida (2015) é:

- refrigerar a ferramenta de corte e a peça;
- criar uma película entre a gume de corte e a superfície da peça (função lubrificante);
- reduzir o esforço de corte;
- melhorar o acabamento superficial da peça;
- evitar que as partes da máquina sem proteção se oxidem; e
- auxiliar na remoção de cavacos (ação de lavagem).

No processo de usinagem de peças ferrosas, os principais pontos para a escolha do fluido lubrificante-refrigerante são: refrigeração, lubrificação e eliminação da oxidação, devido à:

- refrigeração – Atua sobre a ferramenta, prevenindo que ela atinja temperaturas excessivas e perca suas propriedades de corte. Também age sobre a peça, evitando deformações provocadas pelo calor" (Almeida, 2015); e
- lubrificante – facilita o deslizamento do cavaco sobre a ferramenta, reduzindo o atrito entre a peça e a ferramenta. Ele também previne o surgimento de gume postiço, diminui o coeficiente de atrito na região de contato entre a ferramenta e o cavaco e reduz as solicitações dinâmicas na máquina (Almeida, 2015).

O refrigerante na ferramenta ajuda a reduzir o desgaste por oxidação e, na máquina, ajuda a evitar a oxidação das regiões sem proteção. Para este processo, podem ser usados diferentes processos refrigeração e lubrificação do gume de corte e peça, sendo eles:

- lubrificação abundante;
- MQF – mínima quantidade de fluido;
- MQL – mínima quantidade de lubrificante; e
- Ar Comprimido.

Todos estes processos são utilizados com intuito de auxiliar e melhorar a condição de usinagem, buscando sempre redução no custo de fabricação,

possibilitando aumento nos parâmetros de corte, redução no tempo de usinagem, aumento na vida útil da ferramenta e equipamentos de usinagem.

A Tabela 2 mostra os principais aditivos utilizados em fluidos lubrificantes, com o objetivo de melhorar o processo de usinagem, reduzir o desgaste da ferramenta e aumentar a vida útil do equipamento.

Tabela 2 – Principais aditivos utilizados em lubrificantes

Tipo de aditivo	Origem química	Propriedade
Detergente básico	Sulfonatos, fenatos ou salicilatos de cálcio, bário ou magnésio.	Neutralizar ácidos e prevenir formação de gomas e lacas.
Antiespumante	Compostos de silicões ou metacrilatos.	Prevenir a formação de espuma em condições de agitação severa.
Dispersante de cinzas	Éster poli-isobutenilsuccínico ou succinimidas.	Prevenir depósitos de fuligem e oxidação.
Antioxidante	Ditiofosfato de zinco, compostos fenólicos, olefinas e salicilatos metálicos.	Prevenir a oxidação e o espessamento do lubrificante.
Anti-desgaste e extrema pressão	Compostos orgânicos de enxofre e fósforo, compostos clorados e ditiofosfato de zinco.	Prevenir o desgaste dos cames, ressaltos e excêntricos.
Anticorrosivo	Sulfonatos de cálcio, sódio ou bário, aminas orgânicas etc.	Prevenir a corrosão.
Melhorador da viscosidade	Polímeros como o poliestireno e copolímeros derivados do etileno e propileno.	Reduzir a perda de viscosidade em alta temperatura.
Melhorador do ponto de mínima fluidez	Metacrilatos	Aumentar as propriedades de fluidez a baixas temperaturas.

Fonte: Almeida (2015).

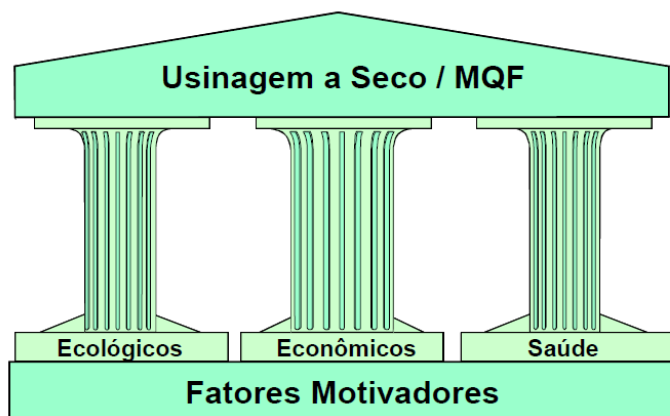
A usinagem a seco (sem fluido lubrificante) gera maior atrito entre a ferramenta e a peça, e entre o cavaco e a ferramenta, além de dificultar a remoção do cavaco da região de usinagem. As ferramentas de corte passam a receber uma maior carga térmica, gerando maiores desgastes por adesão, difusão e oxidação, o que reduz a vida útil da ferramenta (Scandiffio, 2000).

Scandiffio (2000) menciona em seu trabalho, que a técnica do MQL é mais comumente aplicada na substituição de usinagens a seco. Este processo reduz o atrito e a temperatura na região de corte, quando comparado com a usinagem a seco.

Zeilmann (2003) traz que os principais fatores para eliminação do fluido abundante na usinagem e a busca por alternativas como usinagem a seco e MQL são

aspectos ecológicos, econômicos e os referentes à saúde, como pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 – Fatores de motivação para a usinagem a seco / MQL



Fonte: Zeilmann (2003).

Diversos fatores têm impulsionado a busca por alternativas tecnológicas e pelo aprimoramento de métodos de usinagem que minimizam ou eliminam o uso de fluidos lubrificantes. O objetivo é garantir a sustentabilidade e a eficiência dos processos produtivos.

Para Santos *et al.* (2019), a usinagem a seco, realizada sem a utilização de fluidos lubrificantes, tem ganhado crescente atenção de pesquisadores e profissionais devido às suas vantagens econômicas e ambientais. Do ponto de vista técnico, esse processo só é considerado viável quando o tempo de usinagem, a durabilidade da ferramenta e a qualidade da superfície da peça são, no mínimo, equivalentes aos resultados alcançados com a usinagem convencional, que emprega fluidos lubrificantes.

2.4.1.1 Mínima quantidade de Lubrificante – MQL

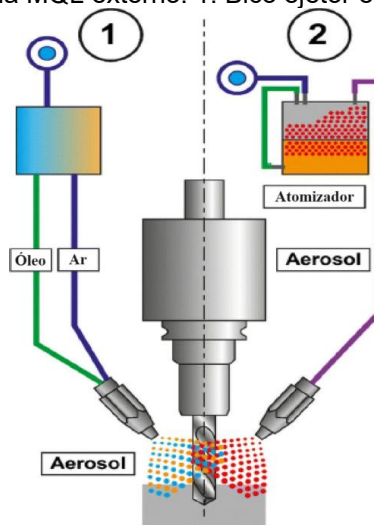
Na década de 1990, a Ford iniciou pesquisas sobre métodos de usinagem para alumínio que pudessem substituir a refrigeração convencional por imersão. Nos Estados Unidos, a empresa participou de um projeto conjunto com o objetivo de eliminar totalmente os fluidos lubrificantes, permitindo a usinagem de alumínio em condições completamente secas. É importante notar que, para componentes

ferrosos, muitas operações de usinagem já eram e continuam sendo realizadas a seco (Tai *et al.*, 2014).

O processo de MQL envolve a formação de um aerossol a partir da combinação de óleo com ar pressurizado. Esse aerossol é então direcionado, por meio de um bico, para a proximidade do gume, alcançando a zona de usinagem em alta velocidade. No aerossol, o ar desempenha o papel de refrigerar e auxiliar na remoção dos cavacos, enquanto o óleo é responsável pela lubrificação e pelo resfriamento através da evaporação de suas gotículas (Upadhyay; Jain; Mehta, 2012).

Tai *et al.* (2014) concluíram que a eliminação do fluido abundante, assim como dos equipamentos e da área de piso a ele relacionados, resultou na maior parcela da economia observada. Esse avanço tornou o processo mais sustentável e ecologicamente viável, graças à diminuição substancial de efluentes e da liberação de substâncias termicamente degradáveis. A indústria automotiva tem se dedicado intensamente ao desenvolvimento e à aplicação do MQL. Na Figura 19, é possível verificar a ilustração de dois sistemas de MQL.

Figura 19 – Sistema MQL externo: 1. Bico ejetor e 2. Bico convencional



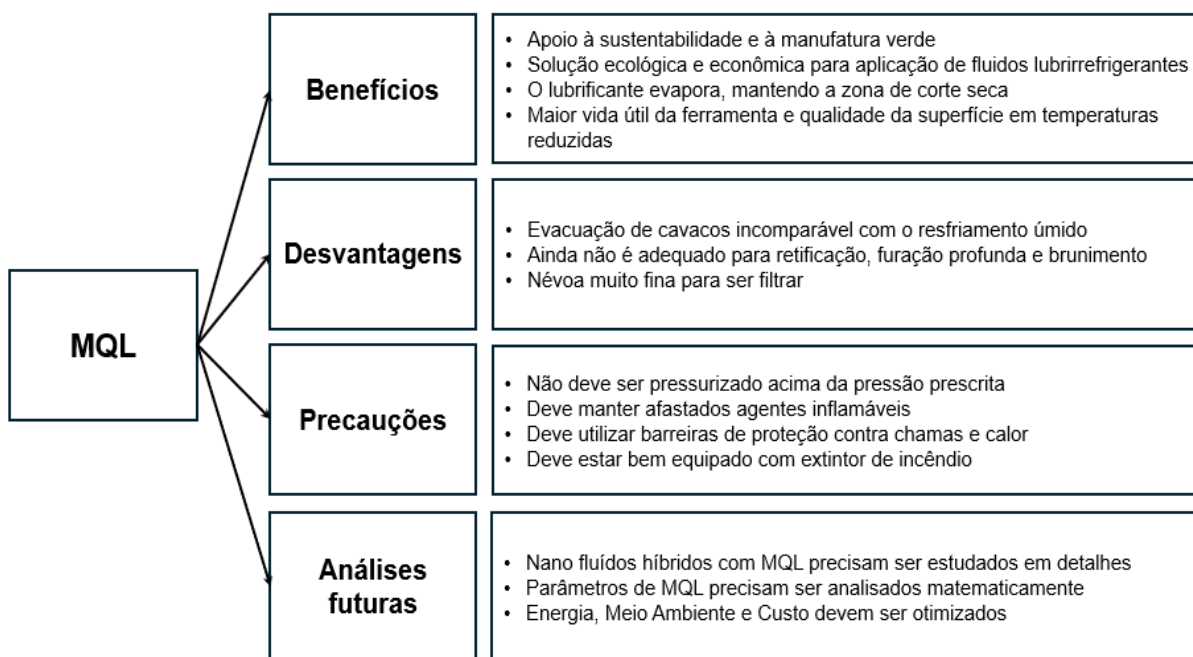
Fonte: Sen *et al.* (2021).

A mistura de óleo e ar no sistema MQL pode ser gerada, basicamente, de duas formas. A Figura 19 ilustra, na região 1, a mistura direta de ar e fluido realizada no próprio bico aplicador, enquanto na região 2 a mistura ocorre em um sistema atomizador antes de ser conduzida ao bico.

Amplamente utilizado na fabricação de produtos com geometria rotacional, o torneamento é um processo de usinagem que frequentemente incorpora estratégias

de MQL. Ele permite o trabalho com diversos materiais, como diferentes tipos de aços (incluindo os endurecidos e ligas), ligas de níquel e titânio e ligas de alumínio e magnésio (Sen *et al.*, 2021). Sen *et al.* (2021) também avaliou alguns pontos na aplicação o MQL, como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – Benefícios, desvantagens, precauções e análises futuras. Estratégia do uso do MQL



Fonte: Sen *et al.* (2021).

Conforme mostrado na Figura 20, o processo MQL traz benefícios para a usinagem, mas também apresenta desvantagens e a necessidade de cuidados adicionais que não existem no processo de lubrificação convencional.

Blanes *et al.* (2022) avaliaram o processo de fresamento de Aço ABNT 1045 e encontraram forças de corte menores quando comparado à usinagem a seco. Eles também constataram que a variação da vazão de 50 ml/h a 200 ml/h gerou resultados semelhantes para a força de corte e a rugosidade, com uma redução considerável no consumo de óleo. Klocke (2019) descreve que valores abaixo de 50ml/h de fluido lubrificante é o ideal para processos otimizados, desta forma é possível conseguir valores consideráveis de redução no consumo de óleo. Ele ainda descreve que o ideal deste processo é que ferramentas, cavacos e peças permaneçam secos.

2.4.1.2 Usinagem a seco

A usinagem a seco elimina a necessidade de fluidos de corte contudo, a adoção dessa técnica significa que as principais funções desses fluidos deixam de ser realizadas, impactando diretamente o processo: lubrificação, dissipação térmica (resfriamento) e remoção de cavacos (Teles, 2007).

O uso de fluidos de corte em processos de usinagem acarreta um conjunto de despesas que podem exceder 15% (quinze por cento) dos custos totais de produção. Essas despesas, que incluem a aquisição, o armazenamento, a manutenção e o descarte, somam-se aos riscos à saúde do operador e às rígidas regulamentações ambientais, tornando o gerenciamento desses fluidos um desafio com múltiplos aspectos (Silva; Lima, 2022).

A usinagem de ferro fundido e aços ferríticos-perlíticos sem fluido lubrificante já é amplamente utilizada com ferramentas de cerâmica. O ferro fundido cinzento foi o primeiro a ser usinado a seco em operações de torneamento e atualmente é possível usinar a seco também materiais mais duros (Meurer; Boehs; Guesser, 2007). A usinagem a seco foi considerada bem-sucedida com alguns materiais, como o ferro fundido, mas observou-se uma menor eficácia quando são necessárias altas taxas de produção e eficiência de usinagem (Upadhyay; Jain; Mehta, 2012).

Leal (2015) avaliou o comportamento de ferramentas de corte texturizadas na usinagem de ferro fundido cinzento. Ele observou que o uso dessas ferramentas em usinagem a seco não é vantajoso para a redução de forças.

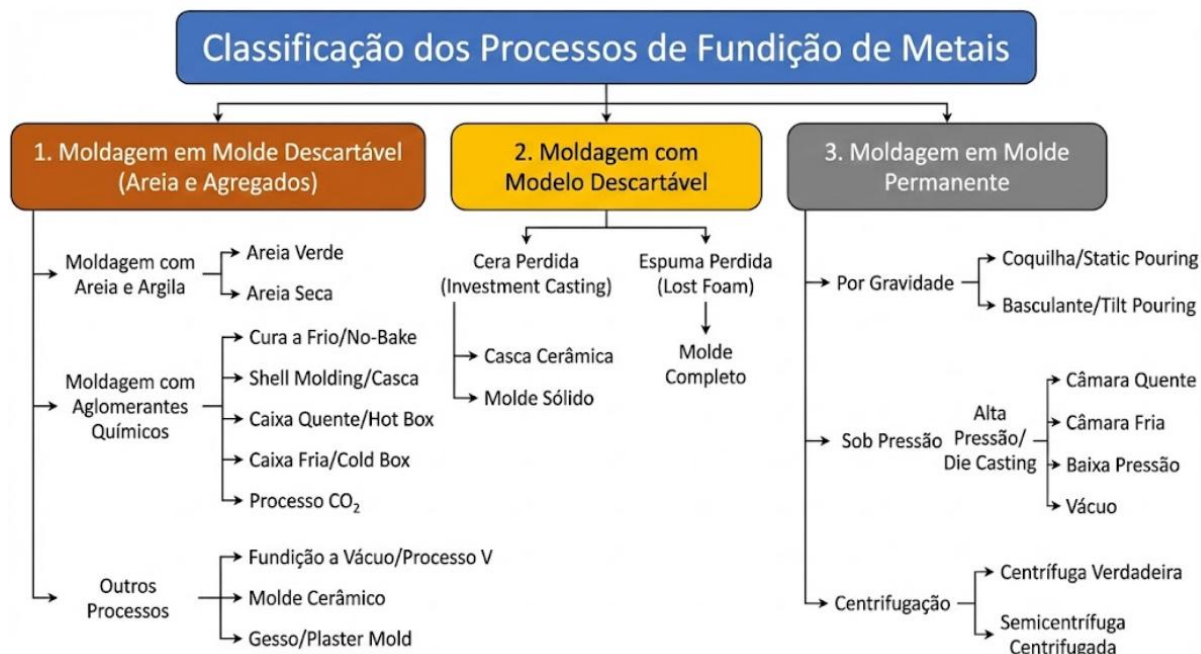
O desgaste das ferramentas utilizadas na usinagem de ferro fundido cresce rapidamente quando o desgaste de flanco excede 0,20 mm. Isso ocorre devido à deterioração do revestimento no gume, causando uma elevação da sollicitação térmica e uma maior abrasão no substrato da ferramenta (Boehs; Aguiar; Ferreira, 2000, *apud* Teles, 2007, p.).

2.5 FUNDIÇÃO

De acordo com Mckie (2015), existem inúmeros métodos de fundição utilizados em todo o mundo. Os processos escolhidos dependem do material a ser fundido, do peso do fundido e da qualidade de acabamento necessária.

Os processos de fundição podem ser divididos em duas classes: moldes descartáveis e moldes não descartáveis, também conhecidos como moldes permanentes. Existem diversos processos de fundição, que são selecionados conforme os requisitos de cada peça, como especificação e material, como pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 – Classificações dos processos de fundição



Fonte: O Autor (2025) - Adaptado de Mckie (2015).

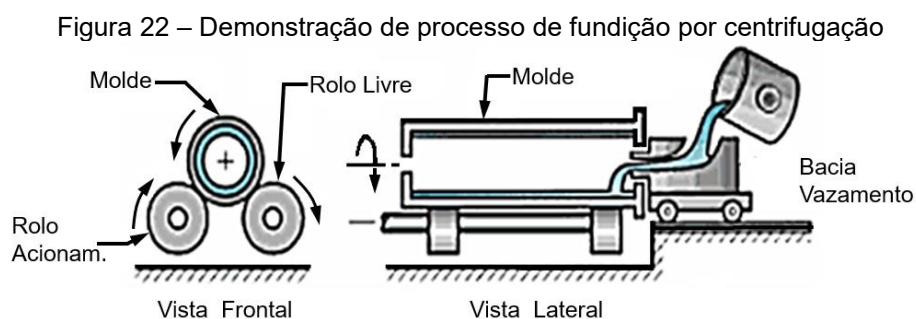
O processo de fundição por centrifugação faz parte do grupo de moldes permanentes, no qual a peça é produzida diretamente no ferramental de fundição. Esse método oferece características positivas para a peça, como a eliminação de sistemas de alimentação, canais e massalotes. No entanto, é um processo limitado em relação às geometrias que podem ser produzidas, como os tubos estudados neste caso.

No processo de fundição em areia, todas as ligas fundidas, independentemente de sua composição química, microestrutura e elementos de liga, possuem uma superfície bruta de fundição. Essa camada superficial precisa ser tratada adequadamente, pois, caso contrário, pode causar grandes perdas na usinagem. Os problemas encontrados na superfície geralmente se originam da interação do metal líquido com o molde de areia, resultando em partículas aderidas à peça. Além disso,

podem ser encontrados na superfície danos causados por tratamentos térmicos, que formam óxidos de ferro superficiais (Christopher; Grabel, 2003, *apud* Meurer; Boehs; Guessser, 2007).

2.5.1 Fundição por centrifugação

O processo consiste no vazamento do metal líquido dentro de um molde metálico que gira em alta rotação, fazendo com que a força centrífuga deposite o metal nas paredes do molde. Isso pode ser visto na Figura 22.



Fonte: Mckie (2015).

O processo de fundição por centrifugação é relativamente simples e consiste no vazamento do metal fundido em um molde rotativo, geralmente disposto na posição horizontal. A rotação do molde, elemento fundamental do método, assegura a distribuição uniforme do metal ao longo das paredes internas, possibilitando a produção de peças ocas, como canos e tubos, com alta precisão dimensional.

O processo consiste em três passos principais Sparow Hipotind (2024), sendo:

1. O molde é previamente aquecido e revestido com uma pasta cerâmica, uma etapa essencial para garantir um recobrimento seguro e uniforme. Após a aplicação, o molde passa por um processo completo de secagem e cura, que promove a solidificação da camada refratária; e
2. O metal fundido, aquecido à temperatura adequada, é então introduzido no molde por vazamento direto, o que elimina a necessidade de um sistema de canais. Durante o vazamento e até a solidificação do metal, o molde permanece em rotação. Essa rotação é essencial para a geração de forças centrífugas que impulsionam o

metal fundido contra as paredes do molde, assegurando sua distribuição uniforme.

O molde é aberto para permitir a remoção da peça fundida, que já está acabada e solidificada.

Este processo possui algumas vantagens e desvantagens, como mostrado abaixo por Engineering Product Design (2021). No que se refere às vantagens, é válido destacar que:

- essas peças fundidas apresentam alta densidade, alta resistência mecânica, excelente acabamento superficial externo e estrutura de granulação fina;
- impurezas e inclusões podem ser facilmente removidas;
- não são necessários canais de entrada e massalotes;
- são formados tubos prontos;
- podem moldar peças muito grandes com alta precisão;
- baixo custo de equipamento e mão de obra; e
- baixo índice de refugos.

Quanto às desvantagens, é possível citar:

- o diâmetro interno não possui precisão dimensional, devido à variação da quantidade de metal;
- Este método pode não ser adequado para todas as ligas;
- O verdadeiro processo de fundição centrífuga limita-se a peças cilíndricas; e
- A usinagem secundária é frequentemente necessária para o diâmetro interno.

2.5.2 Ferro fundido cinzento

Segundo Callister (2002) os ferros fundidos são ligas de ferro-carbono com teores de carbono geralmente superiores a 2%. Esse carbono está presente em quantidade maior do que a que pode ser retida em solução sólida na austenita (γ), o que resulta em carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita.

O ferro fundido cinzento é amplamente utilizado em diversos setores da indústria, não apenas por suas características mecânicas, mas também pela sua

versatilidade em termos de geometrias. Este material apresenta variações de ligas que têm como objetivo melhorar suas propriedades mecânicas.

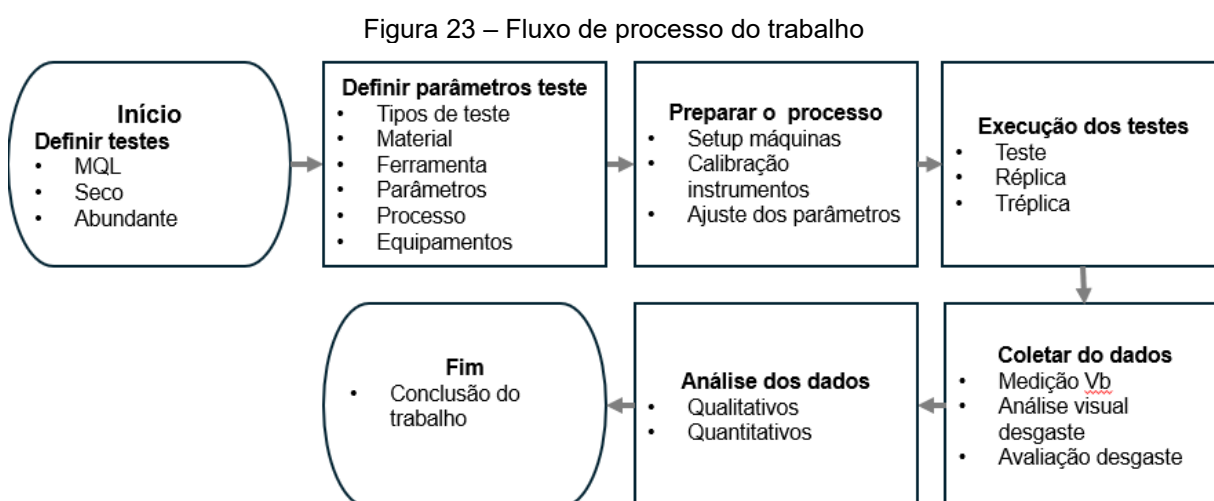
De acordo com Teles (2007), as propriedades mecânicas, como resistência, ductilidade e módulo de elasticidade, estão fortemente relacionadas à estrutura e à distribuição dos constituintes microestruturais. Da mesma forma, as propriedades físicas, como condutividade térmica e capacidade de amortecimento, também são amplamente influenciadas pela microestrutura.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, é apresentada a metodologia experimental aplicada, os testes realizados, as ferramentas e as máquinas utilizadas. Com base nessas informações, foram demonstrados os resultados obtidos.

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O processo de desenvolvimento do artigo foi desenvolvido em oito fases, como pode ser observado na Figura 23.



Fonte: O autor (2025).

O processo tem início com a identificação da necessidade de testes experimentais no contexto produtivo, com o objetivo de aprimorar o desempenho operacional, reduzir custos, avaliar novas tecnologias ou definir parâmetros ideais para aplicação em escala industrial.

Para que o processo ocorra de forma eficiente, é necessário definir previamente quais fatores são relevantes. Assim, foram estabelecidas como condições essenciais as seguintes variáveis:

- Material: tipo, especificações técnicas e propriedades mecânicas da peça a ser usinada;
- Ferramentas: seleção baseada na geometria, material de corte, revestimento e compatibilidade com o processo. Foi utilizada uma

ferramenta nova para cada estágio de teste (teste, réplica e tréplica) a fim de eliminar interferências associadas ao desgaste acumulado;

- Equipamentos: máquinas-ferramenta, sistemas de fixação e dispositivos auxiliares devidamente calibrados e em condições operacionais ideais;
- Parâmetros de Processo: valores fixos de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, tipo de óleo, vazão, sendo definidos com base em recomendações do fabricante, ensaios preliminares e análise de trabalhos similares; e
- Condições de Lubrificação: foram testadas três condições distintas — MQL (mínima quantidade de lubrificante), usinagem a seco e lubrificação abundante.

As condições de lubrificação foram avaliadas de forma controlada e padronizada. O protocolo experimental seguiu uma sequência escalonada de usinagem, com substituição da ferramenta a cada estágio, conforme descrito a seguir:

- 1º Teste: ferramenta nova, usinagem de 0,67 metros lineares, equivalente a 3 peças;
- 2º Teste: nova ferramenta, usinagem de 1,34 metros lineares, equivalente a 6 peças;
- 3º Teste: nova ferramenta, usinagem de 2,01 metros lineares, equivalente a 9 peças; etc.

A execução dos ciclos subsequentes seguiu um padrão progressivo de acréscimos de 0,67m, sempre utilizando ferramentas novas, nunca utilizando a ferramenta do teste anterior, até que o desgaste de flanco (VB_{max}) atingisse o valor limite de 0,3 mm. Assim sendo possível garantir que não ocorresse paradas para as ferramentas, apenas o tempo de parada para troca de peças.

A preparação para os testes envolve a necessidade de ajustes e planejamento, incluindo o *setup* dos equipamentos, a calibração dos instrumentos, o ajuste dos parâmetros de corte e do fluido lubrificante, além da análise dos sistemas de lubrificação.

Os testes foram realizados conforme o plano experimental, sempre acompanhados de réplica e tréplica, a fim de possibilitar uma análise mais precisa dos resultados. Os registros foram feitos de forma contínua para a coleta dos dados, sendo posteriormente organizados para avaliação estatística:

- Usinagem do comprimento estipulado por etapa; e
- Medição do desgaste de flanco (VBmax) com auxílio de microscópio digital.

A análise do processo resultou na comparação dos três testes, considerando:

- evolução do desgaste de flanco;
- vida útil da ferramenta em metros usinados (número de peças foi usado como referência);
- comportamento do processo, avaliando os tipos de mecanismos de desgaste em cada teste; e
- análise do processo, facilidade e dificuldades encontradas em cada teste.

Após a realização dos testes e a coleta das informações, foram conduzidas análises dos resultados, considerando-se tanto os aspectos qualitativos quanto os quantitativos, com o objetivo de definir a melhor condição de processo.

3.1.1 Variáveis de entrada

No processo de usinagem, diversas variáveis influenciam significativamente os resultados obtidos. Para minimizar o impacto dessas variáveis e assegurar a confiabilidade dos dados coletados nos testes, os parâmetros de lubrificação e refrigeração foram ajustados e controlados conforme detalhado a seguir:

- Emulsão em Abundância: O fluido utilizado é o ALL PS100 SS, do fabricante ALL Lubrificantes. Os valores de concentração na máquina, foram de 9,9% a 16,5% de óleo por litro de fluido lubrificante.
- MQL – óleo integral: utilização do óleo integral Quimatic JET, do fabricante Quimatic. A pressão do ar comprimido é de no mínimo 4 bar, e a vazão é de 42 ml/hora. Foi utilizado um nebulizador Quimatic IV, com o jato direcionado ao ponto exato de cisalhamento.
- a seco: usinagem sem a utilização de fluido lubrificante.

Os parâmetros de corte e os dados de processo foram mantidos fixos em todos os testes estão apresentados a seguir:

- Velocidade de corte utilizada – 365 m/min;
- Número de passes – 1 passe por peça;
- Fz – Avanço – 0,35 mm;

- Comprimento torneado – 0,67 metros (3 peças de 224,3mm);
- ap – profundidade de corte axial – 2,3 mm;
- Inseto de usinagem – Fabricante Mitsubishi SNMA 120412 MC5005;
- Material – ferro fundido cinzento conforme LIGA 8 ABNT NBR 16080;
- Condição do material de acabamento: fundido e jateado. A peça fundida apresenta uma casca externa, uma característica intrínseca do processo de fundição por centrifugação, como mostrado na Figura 27.

Os dados de consumos de fluido abundante e produção peças / hora já foram coletados e estão disponíveis pela empresa. Para cálculos dos e comparativo de custos de processo foram usadas as seguintes informações:

- Produção / hora = 9,64 metros, equivalente à 43 peças / hora;
- Fluido lubrificante = consumo de fluido por metro usinado no torno CNC desbaste, R\$0,80 / metro, equivalente a R\$0,018 / peça;

MQL – Custo de entrada de R\$63,24 para 5 litros. Com vazão considera de 42 ml/hora, o consumo médio por metro usinado foi de R\$0,045 / metro, equivalente a R\$0,010 / peça.

3.1.2 Variáveis de saída do processo

Foram avaliados os resultados referentes ao desgaste do gume de corte em cada condição testada. Foram analisados os seguintes parâmetros:

- mecanismos de desgaste – para análise e registros, foram executadas análises visuais e registros fotográficos, para buscar entender o comportamento em cada teste;
- avaliação dos tipos de desgastes ocorridos com foco na análise de VB e VBmax. Considerando como fim de vida, VBmax, 0,3mm máx; e
- vida útil da ferramenta: a medição da vida útil foi feita com base na relação entre o comprimento usinado e o desgaste de flanco (VBmax). O desgaste foi medido a cada 3 peças usinadas, o que corresponde a 0,67 m de comprimento total torneado (3 peças de 224,3 mm/cada).

Para a análise dos resultados, os dados foram coletados, tabulados e comparados, utilizando análise de regressão e tendência no Microsoft Excel. As tendências identificadas foram empregadas no cálculo da vida útil estimada das

ferramentas. Essas informações subsidiaram a análise financeira comparativa dos três testes.

3.1.3 Material da Peça

A usinagem foi feita em tubos de ferro fundido cinzento, produzidos por centrifugação, com a liga Riosulense, que é similar à liga 8 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). As características a seguir foram encontradas no núcleo da peça acabada:

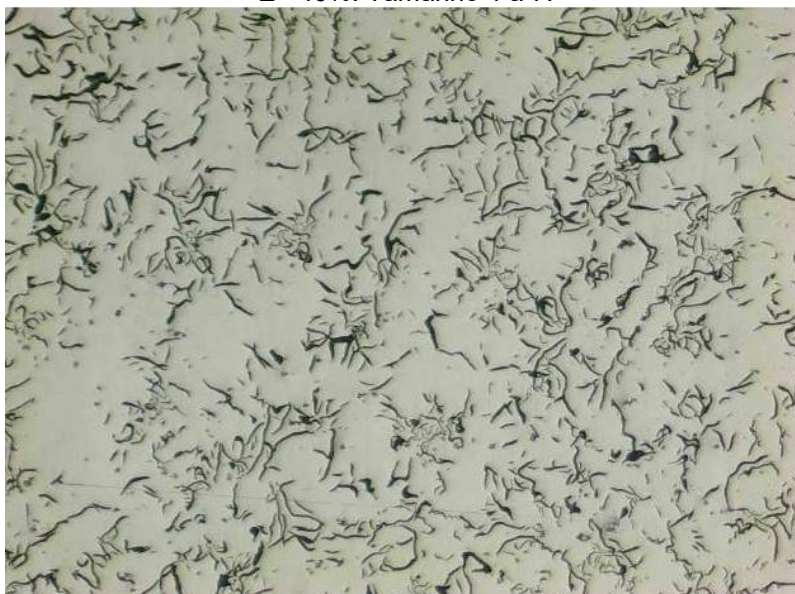
- composição química referência, ver Figura 24;
- grafita – Forma I, tipo A e B predominante, D e E 40% máximo. Tamanho de 4 a 6 (ver Figura 25); e
- matriz – Perlita com 90% mínimo, Ferrita 10% máximo, carbonetos dispersos 1% máximo e rede aberta de steadita (ver Figura 26).

Figura 24 – Composição química em massa da LIGA 8. ABNT NBR 16080

Liga	C Carbono	Si Silício	P Fósforo	S Enxofre	Cr Cromo	Cu Cobre
8	3,20 - 3,60	1,80 - 2,80	0,20 - 0,50	0,12 máx.	0,20 - 0,60	0,50 máx.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013).

Figura 25 – Análise metalográfica da grafita, ampliação 100X. Forma I, Tipo A e B predominante, D e E <40%. Tamanho 4 a 7.



Fonte: O Autor (2025).

Figura 26 – Análise metalográfica da matriz com ampliação de 100X. Perlítica com rede aberta de Steadita. Carboneto <1%



Fonte: O Autor (2025).

Os ferros fundidos cinzento, nodular e vermicular são reconhecidos por sua boa usinabilidade, embora apresentem características distintas entre si. Dentre esses, os ferros fundidos cinzentos oferecem os melhores resultados em termos de facilidade e qualidade de usinagem (Meurer; Boehs; Guessser, 2007).

Outro fator importante a ser considerado no processo de centrifugação é a utilização de moldes metálicos. O metal líquido entra em contato com o molde e é rapidamente resfriado em um curto intervalo de tempo. Esse resfriamento brusco pode provocar a formação indesejada de traços de carbonetos na superfície externa da peça.

Em condições normais, o ferro fundido cinzento apresenta características de usinagem relativamente simples; entretanto, as impurezas e a presença de carbonetos na extremidade do tubo geram condições mais severas para a ferramenta de corte e para a máquina. A Figura 27 mostra o acabamento superficial do tubo fundido.

Figura 27 – Tubos fundidos, antes da operação de torneamento externo em desbaste.



Fonte: O Autor (2025).

A Figura 27 apresenta o acabamento superficial característico dos tubos fundidos pelo processo de centrifugação. Esses tubos exibem uma superfície bastante rugosa que, mesmo após operações de limpeza por jateamento, ainda mantém resquícios da tinta refratária utilizada na fundição.

3.1.4 Equipamentos utilizados

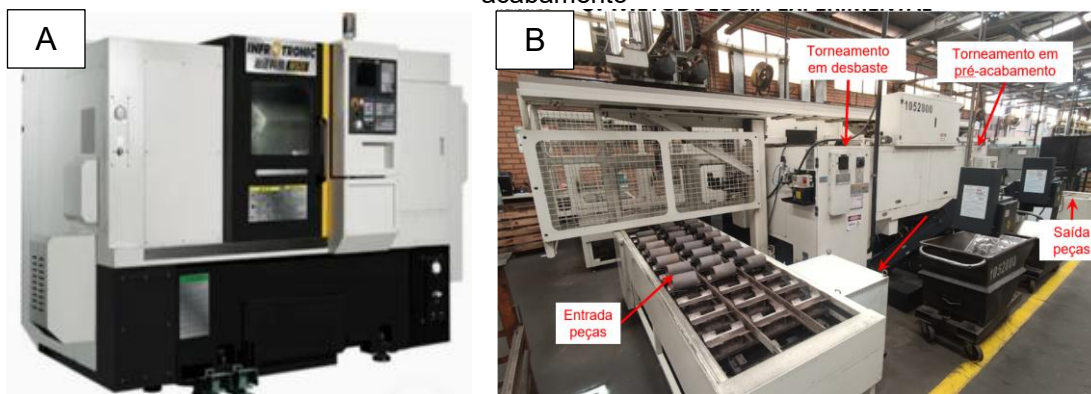
3.1.4.1 Torno CNC

Para a usinagem das peças, foi utilizado um torno CNC horizontal Infrotronic modelo QT150, ano 2019, que possui um sistema de carga e descarga automática

com um robô linear tipo *gantry*, conforme a Figura 28. A máquina conta com dois tornos CNC acoplados, executando a usinagem simultânea de duas operações, sendo elas:

- Máquina 1 – A usinagem do diâmetro externo é feita em desbaste e acabamento em uma das faces. As ferramentas de desbaste e faceamento são distintas, sendo que apenas a ferramenta utilizada na operação de desbaste do diâmetro externo foi avaliada; e
- Máquina 2 – Acabamento do diâmetro externo e acabamento da segunda face. Esta operação não foi avaliada.

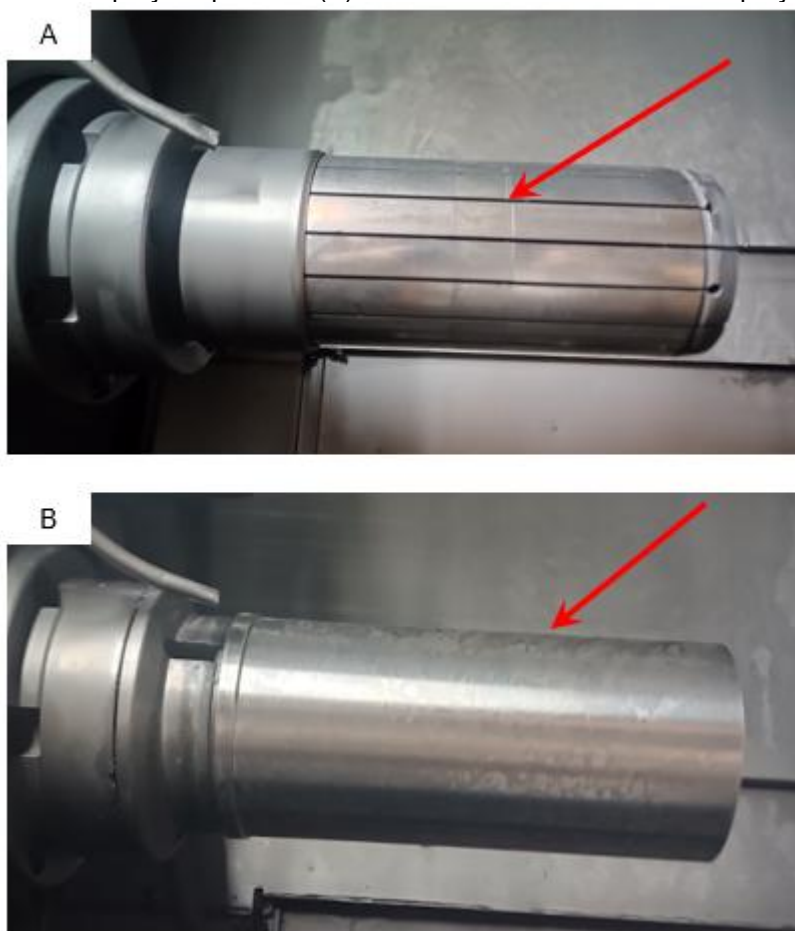
Figura 28 – Torno CNC QT 150 (A) e sistema de torneamento com dois Tornos CNC QT 150 com carga e descarga automática por robô (B), para usinagem das operações de desbaste e pré-acabamento



Fonte. O autor (2025).

Para a fixação da peça no torno CNC, foi utilizado sistema de pinça expansível e um batente de fim de curso, com mínima variação em relação ao diâmetro interno da camisa do cilindro, como pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 – Sistema de pinça expansível (A) e camisa de cilindro fixada com pinça expansível (B)



Fonte: O Autor (2025).

A fixação por pinça expansível aplica uma pressão robusta e uniforme sobre a peça, minimizando as variações dimensionais causadas por deformação. Além disso, a fixação com pinça expansível garante baixos valores de concentricidade entre o diâmetro interno (usado para a fixação) e o diâmetro externo da peça.

3.1.4.2 Microscópios

Para a análise do desgaste das ferramentas de corte, foi utilizado um microscópio óptico, modelo Dino-Lite (Figura 30), disponível no laboratório de metrologia da empresa.

Figura 30 – Microscópio Dino Lite



Fonte: O autor (2025).

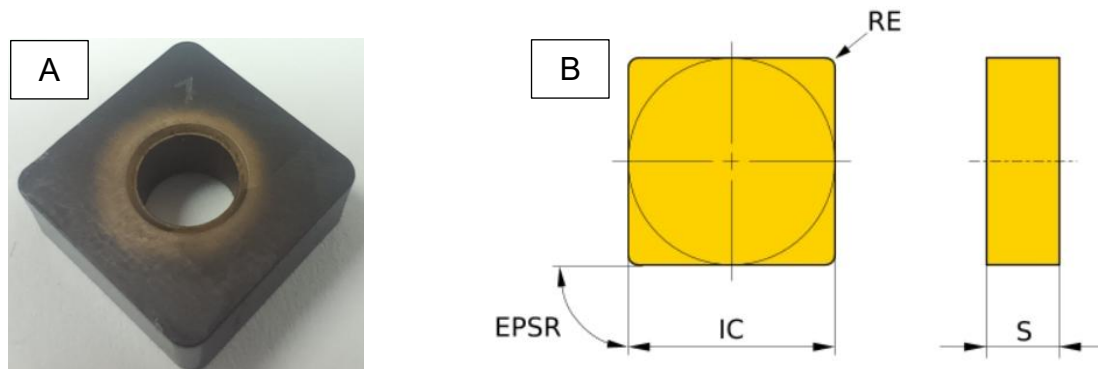
O sistema permite uma análise detalhada dos defeitos por meio de ampliações que variam de 20 a 100 vezes, proporcionando uma inspeção minuciosa das características superficiais e estruturais das amostras. Essa capacidade de ampliação facilita a identificação dos mecanismos de desgaste e o dimensionamento do desgaste, que são essenciais para a análise do desgaste das ferramentas.

A avaliação detalhada do desgaste nos insertos foi conduzida no empregando-se, a microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEV-FEG) e a Espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS). Para as medições via MEV-FEG, foi selecionado o microscópio MIRA3, da marca Tescan, equipamento este localizado no Laboratório Central de Microscopia Professor Israel Baumvol (LCMIC) da UCS. Por sua vez, a análise elementar por EDS foi realizada utilizando-se o detector X-Max50, da marca Oxford, que se encontrava acoplado ao microscópio eletrônico de varredura.

3.1.4.3 Ferramenta de corte

A usinagem executada utilizando uma ferramenta de corte com as especificações SNMA 120412 MC5005 do fabricante Mitsubishi, de classe K, conforme mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Inserto SNMA 120412 MC5005 do fabricante Mitsubishi, classe K (A) e geometria e características do inserto (B)



Fonte: O Autor (2025) (A) e Mitsubishi Materials (2025) (B).

Esta ferramenta possui as seguintes características informadas pelo fabricante:

- Tipo de inserto – SNMA:
 - S – Forma do Inserto = Quadrado;
 - N – Ângulo de Folga = 0° ;
 - M – Classe de tolerância fabricação; e
 - A – Fixação e ou superfície de Saída = Com furo cilíndrico e quebra cavaco plano.
- Revestimento do inserto – MC5005 = revestimento de $\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$ (carboneto de titânio + óxido de alumínio) – O inserto utilizado possui duplo revestimento com acabamento superficial com nano texturas.
- Classe do inserto - K – Metal-duro, WC + Co (WC – Carboneto de Tungstênio + Co – Cobalto), aplicado para ferro fundido.
- Sentido de corte – N.
- Largura do inserto IC – 12,7 mm.
- Ângulo EPSR – 90° .
- Raio da Ponta RE – 1,2 mm.
- Quebra cavaco – Face placa.

Para quantificar o impacto financeiro na estrutura de custos do processo, adotou-se o valor médio de R\$14,27 como custo de referência para cada inserto. Dado que cada inserto dispõe de 8 arestas de corte, o custo alocado a cada aresta foi

determinado mediante a divisão do custo total pelo número de arestas disponíveis, resultando no valor de R\$1,78 por aresta.

O suporte utilizado para a fixação da ferramenta durante a operação de torneamento, ilustrado na Figura 32, apresenta uma inclinação de 15°, característica comumente empregada em processos de usinagem com insertos cerâmicos.

Figura 32 – Suporte para Inserto SNMA



Fonte: O Autor (2025).

A definição do tipo de inserto e a padronização dos parâmetros de corte seguem os valores já utilizados no processo de usinagem desses componentes.

4 RESULTADOS DOS TESTES

Os testes foram realizados em três etapas distintas. Para a sua execução, foi necessário fixar variáveis relacionadas à ferramenta de usinagem, controlar a variação da matéria-prima dentro de um mesmo lote e considerar as variações dimensionais e de acabamento superficial dos tubos fundidos.

Foram realizados três testes com cada inserto, conforme exemplificado no item 3.1, sendo conduzidos o ensaio, a réplica e a tréplica para cada condição. Essa abordagem visa garantir maior confiabilidade na análise dos resultados.

Para os tubos fundidos, todos os ensaios de material e testes nos lotes de produção utilizados foram realizados de acordo com os padrões de qualidade estabelecidos pela Metalúrgica Riosulense. As análises dos materiais apresentaram resultados de propriedades mecânicas e químicas dentro dos limites especificados pela norma NBR 16080, e, portanto, foram considerados aprovados.

Foram executados testes sob três condições distintas: fluido abundante, a seco e com MQL (Mínima Quantidade de Lubrificação). Os resultados obtidos em cada condição estão detalhados no próximo tópico.

4.1 TESTE COM FLUIDO ABUNDANTE

Os testes realizados com a utilização de fluido abundante demonstraram estabilidade no processo, considerando-se os resultados obtidos na primeira medição e sua comparação com a réplica e a tréplica. Essa condição pode ser observada por meio dos baixos valores de amplitude registrados, conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados coletados de VBmax teste com fluido abundante

Ferramenta #	Peças Usinadas	VBmax			VBmax médio	Amplitude	Desvio padrão
		Teste	Réplica	Tréplica			
1	3	0	0	0,068	0,023	0,068	0,039
2	6	0,068	0,068	0,065	0,067	0,003	0,002
3	9	0,086	0,09	0,077	0,084	0,013	0,007
4	12	0,081	0,11	0,091	0,094	0,029	0,015
5	15	0,115	0,101	0,104	0,107	0,014	0,007
6	18	0,068	0,094	0,088	0,083	0,026	0,014
7	21	0,111	0,103	0,082	0,099	0,029	0,015
8	24	0,182	0,149	0,188	0,173	0,039	0,021

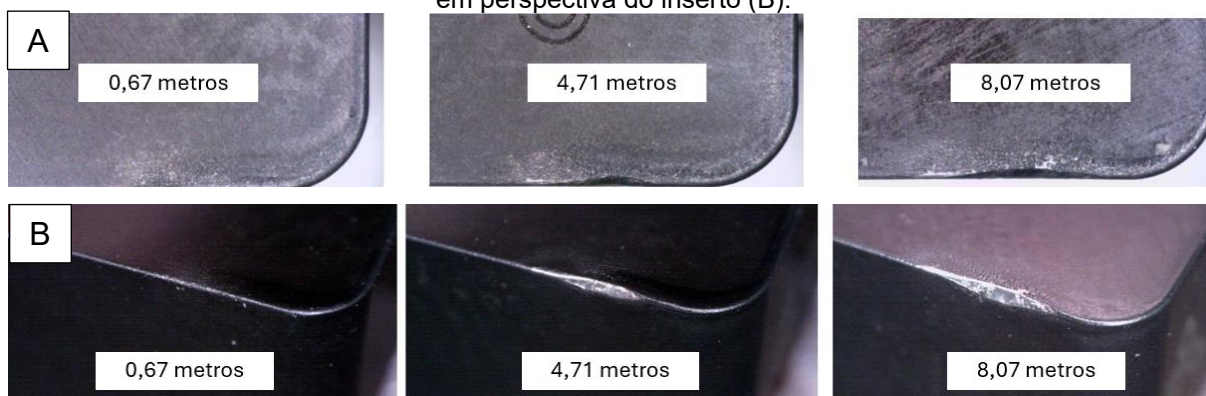
9	27	0,183	0,185	0,174	0,181	0,011	0,006
10	30	0,19	0,182	0,162	0,178	0,028	0,014
11	33	0,187	0,311	0,218	0,239	0,124	0,065
12	36	0,207	0,24	0,172	0,206	0,068	0,034
13	39	0,174	0,186	0,274	0,211	0,100	0,055
14	42	0,288	0,257	0,275	0,273	0,031	0,016
15	45	0,401	0,332	?	0,367	0,069	0,049

Fonte: O autor (2025).

Os pontos indicados na Tabela 3 com um ponto de interrogação correspondem a testes em que ocorreu lascamento do inserto, o que impossibilitou a consideração dos valores obtidos. Nesses casos, para a avaliação do desgaste máximo de flanco (VBmax), foram utilizados apenas os resultados da réplica válida.

Os desgastes observados na ferramenta podem ser caracterizados predominantemente como desgaste de flanco, como pode ser observado na Figura 33.

Figura 33 – Evolução desgaste flanco com fluido abundante, com vista superior do inserto (A) e vista em perspectiva do inserto (B).



Fonte: O autor (2025).

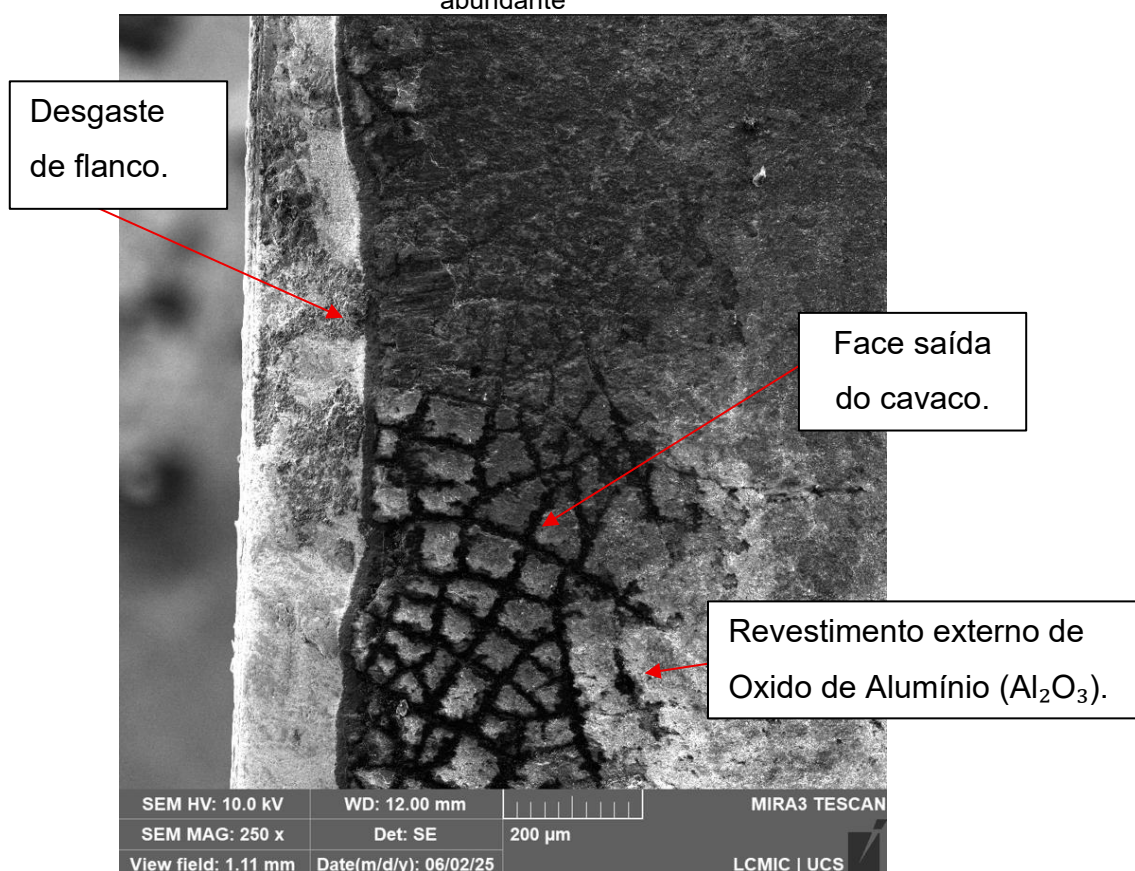
A maior intensidade de desgaste foi apresentada inicialmente na região de contato entre a ferramenta e a superfície externa do tubo fundido. A Figura 33 ilustra a evolução desse desgaste ao longo dos testes, sendo mostradas duas posições de desgaste. As imagens A e B não representam os mesmos insertos.

No teste, observou-se um desgaste de flanco gradual, conforme o padrão esperado, caracterizado predominantemente por atrito gerando assim mecanismo abrasão pelo aspecto do desgaste. Esse tipo de desgaste tende a ser exacerbado pela presença de altas temperaturas, forças de corte elevadas e possíveis inclusões duras no material usinado. Teles (2007) identificou na usinagem de ferro fundido

nodular ferritizado com nióbio, condições de desgaste semelhantes no processo, mesmo com a utilização de fluido lubrificante-refrigerante.

A compreensão dos mecanismos de desgaste das ferramentas é fundamental para a otimização dos processos de usinagem e para o aumento da vida útil das ferramentas. Na Figura 34, é possível avaliar de forma mais detalhada o desgaste de um inserto com 10,09 metros de usinagem, utilizando o ensaio do MEV, com ampliação de 250 vezes.

Figura 34 – Análise com MEV 250X de ampliação na região de saída do cavaco, com uso de fluido abundante



Fonte: O autor (2025).

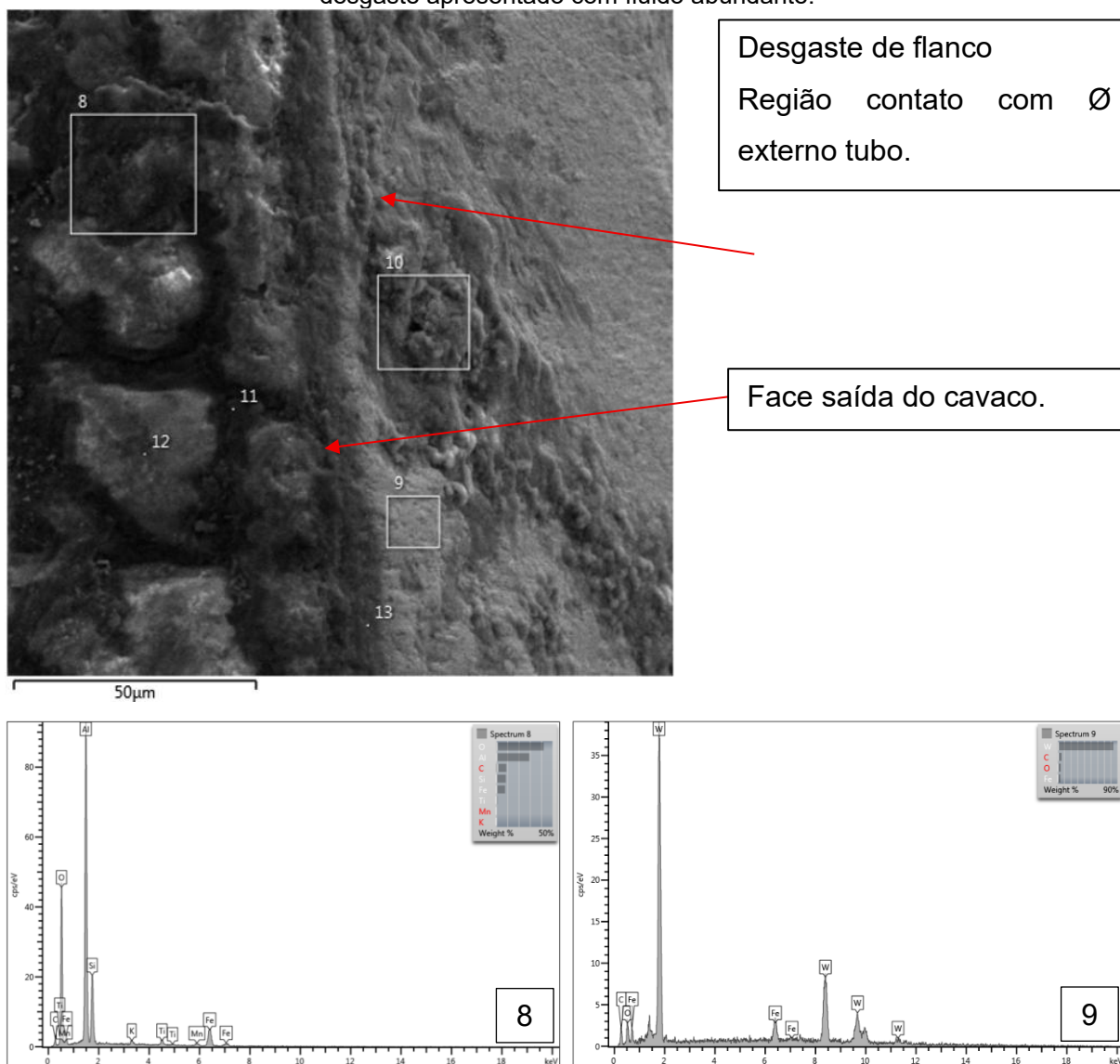
Na Figura 34 feita com auxílio do MEV, é possível identificar duas condições, sendo:

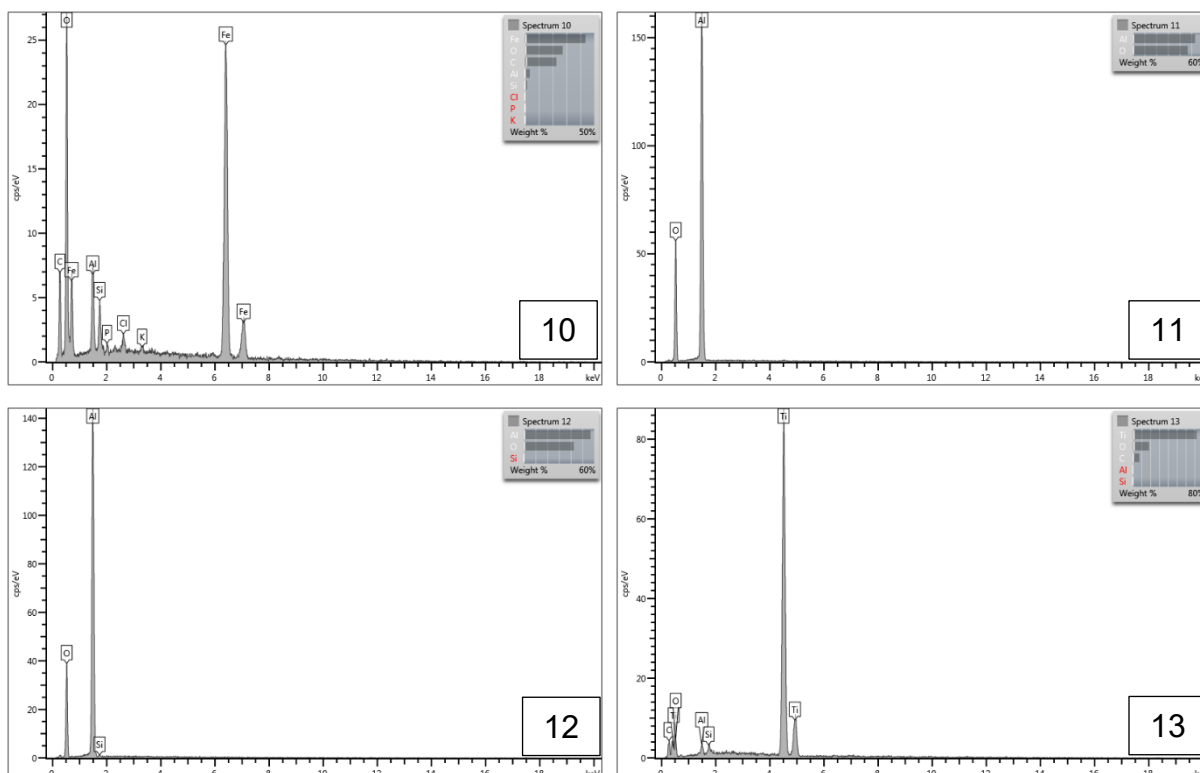
- Desgaste na face saída de cavaco – Início de formação do desgaste de cratera com formação visual, similar a “ilhas”. Essa estrutura é similar a colunas, condição observada por Klocke (2019) em revestimentos com crescimento colunar. Essa condição sugere a fase inicial de exposição do revestimento de carboneto de titânio; e

- Uma região com aspecto liso e prateado, que corresponde à camada de óxido de alumínio (Al_2O_3), ou seja, o revestimento original da superfície externa do inserto.

Para complementar a análise do MEV, o EDS foi utilizado para buscar entender as condições identificadas na Figura 34. As imagens de MEV e os resultados de EDS podem ser avaliadas na Figura 35.

Figura 35 - Análise MEV e resultados de EDS. Imagem da face de saída de cavaco e flanco, do desgaste apresentado com fluido abundante.





Fonte: O autor (2025).

A análise por EDS revelou diferentes fases e elementos que caracterizam o processo de desgaste. Nos pontos 8, 11 e 12, foi possível identificar o revestimento de óxido de alumínio, que é a camada cerâmica externa do inserto. Nesses pontos, o desgaste não chegou a degradar o revestimento.

No ponto 13, localizado entre as "ilhas" mostradas na Figura 34, é possível identificar o revestimento de carboneto de titânio (TiC), que é a camada intermediária do revestimento da ferramenta. A exposição da camada intermediária de carboneto indica o comportamento do desgaste da cobertura protetora superficial, composta por óxido de alumínio (Al_2O_3).

Šramhauser *et al.* (2022) observaram, em sua análise de desgaste de ferramentas e tipo de cavaco, condições de desgaste similares na região de saída de cavaco em diferentes insertos de metal-duro revestidos no torneamento de aço 1.6582 endurecido. A Figura 9b de seu trabalho apresenta condições visuais de desgaste semelhantes às observadas no teste com fluido abundante. Essa condição pode ser atribuída à abrasão contínua, gerada pela ação mecânica dos cavacos sobre o revestimento.

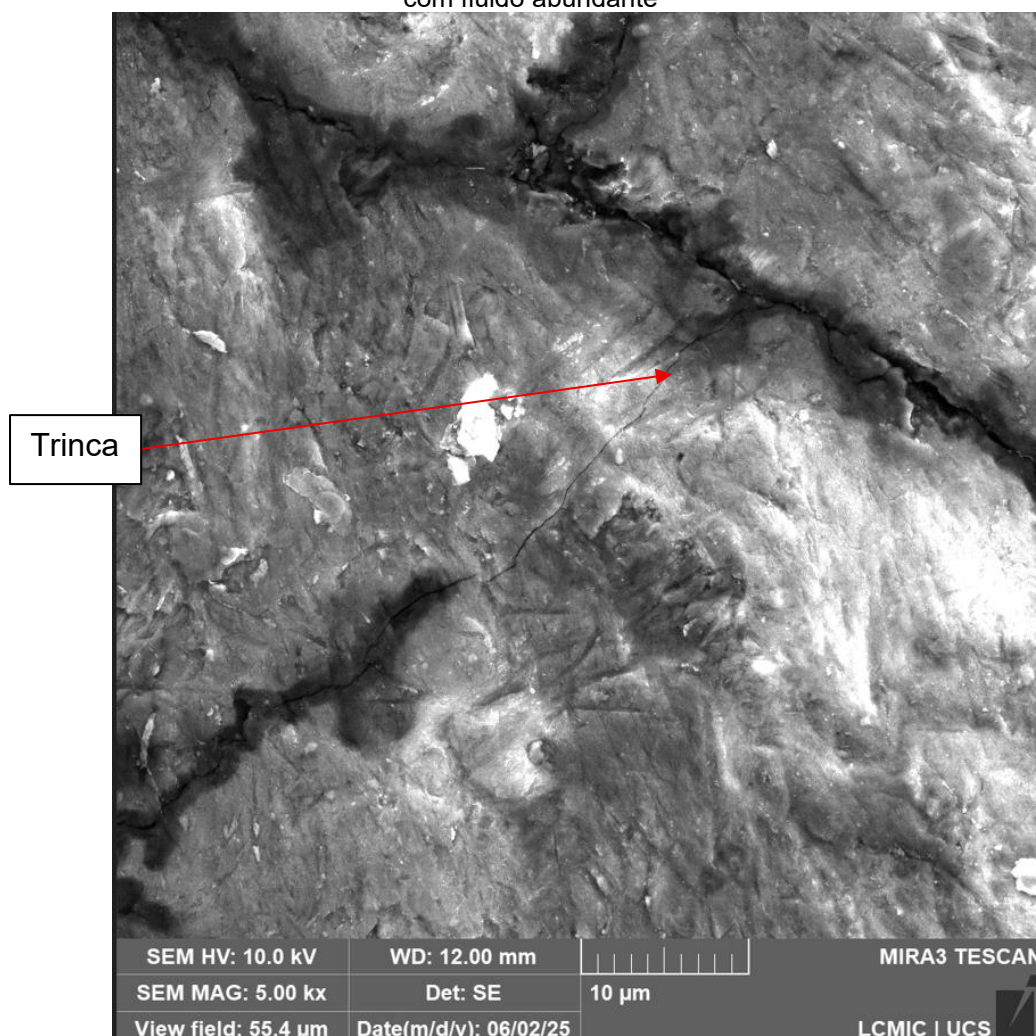
Na região de desgaste de flanco, foram analisados os pontos 9 e 10. No ponto 9, foi encontrado um alto percentual de tungstênio (W), que é um material

característico do metal-duro ou carboneto de tungstênio (WC). Já no ponto 10, a análise revelou altos valores de ferro (Fe) e oxigênio (O), o que caracteriza a adesão de óxido de ferro.

Com base nesses resultados, pode-se concluir que os mecanismos de desgaste no flanco incluem adesão, abrasão e oxidação.

Durante as análises MEV, foi possível observar com ampliações de 5.000 vezes de micro trincas na face de saída de cavaco, como pode observar na Figura 36.

Figura 36 – Trincas identificadas no revestimento, na região de saída de cavaco - peças usinadas com fluido abundante



Fonte: O autor (2025).

A presença de trincas pode estar relacionada à fadiga mecânica e a choques térmicos ou mecânicos. Klocke (2019) cita em seu trabalho que as camadas de revestimento possuem tensões residuais. Essas baixas tensões residuais na camada do revestimento podem gerar uma propagação da trinca para o substrato de metal-duro. O autor também menciona que ferramentas de corte com multicamadas de

revestimento, como a ferramenta avaliada, podem melhorar a condição de propagação da trinca do revestimento para o substrato.

As trincas são comumente observadas em ferramentas de corte de metal-duro e Cermet. Machado *et al.* (2015) mencionam que essa condição é rara em processos contínuos, como o torneamento, a menos que as condições de corte estejam muito acima do recomendado, a geometria seja incorreta ou, em casos extremos, a ferramenta já possua essa condição. Os autores também afirmam que esse defeito é mais comum em usinagens com corte interrompido, como o fresamento, devido ao constante choque térmico.

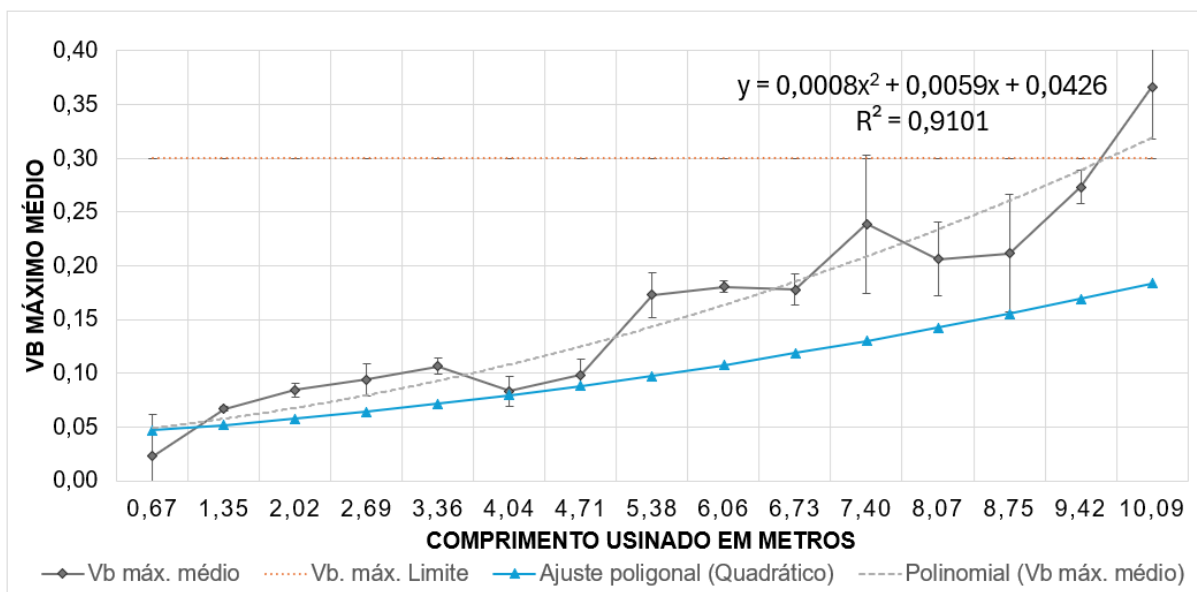
Almeida (2015) também identificou trincas em insertos na superfície de saída da ferramenta. Os testes foram realizados com fresamento de aço ABNT 4140 laminado a quente, temperado e revenido. O autor identificou as trincas como de origem térmica.

As trincas encontradas na Figura 36 não estavam no gume, mas sim na região de saída de cavaco. Conforme mencionado por Klocke (2019), essa condição pode estar relacionada ao deslocamento do revestimento, devido às tensões residuais do próprio revestimento.

4.1.1 Comportamento do desgaste da ferramenta (VBmax)

A análise do desgaste da ferramenta foi realizada com base no parâmetro desgaste máximo do gume (VBmax), em função do número de peças usinadas. Os dados obtidos demonstraram um comportamento característico, dividido em três fases distintas. As análises foram tabuladas, e o gráfico gerado a partir das médias de desgaste (VBmax) está apresentado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Desgaste Médio (VBmax) x Comprimento usinado em metros). Análise de tendência Polinomial de ordem 2. Teste com fluido abundante



Fonte: O autor (2025).

A análise dos dados coletados busca resultados de tendência similares aos apresentados por Machado *et al.* (2015) que descrevem três estágios de desgaste distintos. Com base na análise visual e dimensional do desgaste (VBmax) ao longo do comprimento usinado, a fase inicial (estágio 1), que se estabelece nos primeiros ciclos de usinagem, pode ser observada até o teste 2, com usinagem de 1,35 m, onde o desgaste é de 0,067 mm.

A segunda fase (estágio 2) é considerada a condição mais representativa para os testes, pois permite a visualização e o entendimento do comportamento da ferramenta ao longo do tempo de usinagem. Essa fase ocorreu entre o teste 2, com comprimento de 1,35 m, e o teste 13, com 8,75 m de usinagem. Nesse intervalo, observou-se um aumento progressivo no desgaste de flanco (VBmax) variando de 0,067 mm a 0,211 mm.

Com base nesses dados, foi aplicada uma regressão polinomial, resultando em um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,9101$ e na equação polinomial $y = 0,0008x^2 + 0,0059x + 0,0426$. Esse valor de R^2 indica que aproximadamente 91,01% da variação no desgaste médio pode ser explicada pelo modelo, evidenciando uma forte correlação entre os dados experimentais e a tendência de desgaste da ferramenta.

Considerando desgaste inicial zero, os dados obtidos indicam uma taxa média de desgaste de flanco (VBmax) de 0,039 mm/m no primeiro teste, 0,032 mm/m na réplica e 0,029 mm/m na tréplica. Considerando esses resultados, a taxa média geral

de desgaste foi estimada em 0,033 mm/m. Essa taxa serve como referência para a avaliação do desempenho da ferramenta nas condições de usinagem analisadas.

Considerando o valor padrão de 0,3 mm para a fase crítica da ferramenta (VBmax) e com base na taxa de desgaste apresentada nos testes, estima-se que esse limite foi atingido após usinar 7,55 m na pior condição, 10,27 m na melhor condição e 8,83 m na média dos três testes.

Após esse ponto, os dados mostram uma aceleração no desgaste, o que aumenta o risco de falha da ferramenta e marca a chegada ao estágio 3. Uma falha nesse estágio pode gerar: problemas dimensionais e de acabamento da peça; o risco de danificar o suporte de fixação da ferramenta; e um esforço adicional na peça e no equipamento.

Os valores médios de VBmax dos três testes (teste, réplica e tréplica) foram analisados por meio de uma regressão linear, conforme observado na Figura 37.

Figura 37 – Análise de regressão linear dos valores de VBmax médio dos resultados obtidos no teste com fluido abundante

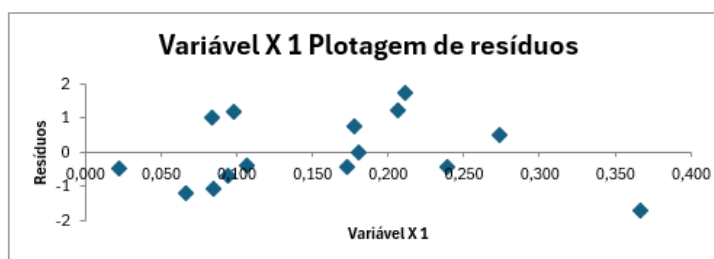
Estatística de regressão	
R múltiplo	0,94109
R-Quadrado	0,88566
R-quadrado ajustado	0,87686
Erro padrão	1,056
Observações	15

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	Probabilidade de significação
Regressão	1	112,2856	112,2856	100,6919581	1,7287E-07
Resíduo	13	14,49682	1,11514		
Total	14	126,7824			

	Coefficiente	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	0,4677	0,560628	0,834248	0,419207612	-0,74346	1,678864891	-0,743460038	1,678864891
Variável X 1	30,9216	3,081513	10,03454	1,72866E-07	24,2643572	37,57876601	24,26435717	37,57876601

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Y previsto	Resíduos
1	1,16859	-0,495691
2	2,53945	-1,193647
3	3,07542	-1,056721
4	3,37433	-0,682729
5	3,766	-0,401502
6	3,0445	0,992901
7	3,51863	1,19167
8	5,81713	-0,433933
9	6,0542	0,001902
10	5,97174	0,75726
11	7,84765	-0,445748
12	6,84785	1,226949
13	7,00246	1,745241
14	8,9196	0,501004
15	11,8005	-1,706955



Fonte: O autor (2025).

Os resultados da regressão linear mostram um coeficiente de determinação (R^2) de 0,885. Esse valor, que corresponde a 88,5%, significa que aproximadamente 88,5% da variação na variável dependente é explicada pelas mudanças na variável independente (X1). Esse é um valor considerado razoável, indicando que a variável X1 tem um poder preditivo significativo.

A partir desses valores, a análise de regressão indica que a Variável X1 (Valor-P 1,72866E-07) é baixo, sendo que é um preditor forte e estatisticamente significativo da sua variável dependente, pois está abaixo de 0,05. O modelo é válido, explica uma grande parte da variação nos dados e mostra uma relação positiva clara, onde um aumento na Variável X1 leva a um aumento na variável dependente.

Apesar do alto valor de R^2 , o gráfico de resíduos revela um problema: os pontos não estão aleatoriamente distribuídos; eles formam um claro padrão de curva. Os valores começam negativos, sobem para se tornarem positivos e depois voltam a ser negativos. Essa condição demonstra que a relação entre a variável X1 e a variável dependente não é linear. A curva nos resíduos sugere que um modelo polinomial (de ordem 2 ou mais) seria uma escolha muito mais apropriada, como analisado no Gráfico 1.

4.2 TESTE A SECO

Os testes realizados sob a condição de usinagem a seco demonstraram estabilidade na maioria das análises, com base na comparação entre os resultados da medição inicial, réplica e tréplica. As amplitudes observadas nesses testes variaram de 0,00mm a 0,341mm, com os maiores valores registrados próximos ao limite de desgaste de flanco (VB_{max}) de 0,3mm. Essa tendência pode ser confirmada pelos dados apresentados na Tabela 4, que evidenciam o comportamento do desgaste ao longo dos ensaios.

Tabela 4 – Dados coletados de VBmax teste à seco.

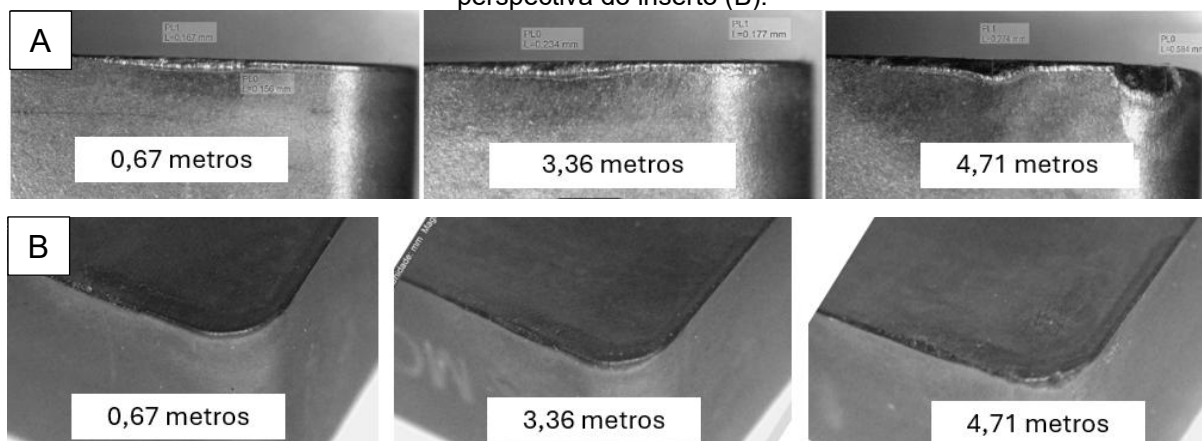
Ferramenta #	Comprimento Usinado (m)	Peças Usinadas	VBmax			VBmax médio	Amplitude
			Teste	Réplica	Tréplica		
1	0,67 m	3	0,145	0,167	0,145	0,152	0,022
2	1,35 m	6	0,16	0,21	0,175	0,182	0,050
3	2,02 m	9	0,21	0,202	0,193	0,202	0,017
4	2,69 m	12	0,221	0,218	0,22	0,220	0,003
5	3,36 m	15	0,247	0,234	0,235	0,239	0,013
6	4,04 m	18	0,236	0,55	0,209	0,332	0,341
7	4,71 m	21	0,584	0,609	?	0,597	0,378

Fonte: O autor (2025).

Os pontos indicados na Tabela 4 com um ponto de interrogação correspondem a testes nos quais foi observado o lascamento do inserto. Devido à falha prematura da ferramenta, esses valores foram desconsiderados na análise. Apenas os valores de VBmax do teste e da réplica correspondente foram considerados.

Ao analisar o processo de desgaste na Figura 38, observa-se o início do desgaste na região do flanco da ferramenta, semelhante ao comportamento identificado na usinagem com fluido abundante. No entanto, é importante destacar que, nesta condição, o desgaste também se inicia na região do gume de corte, conforme evidenciado nas imagens.

Figura 38 – Evolução desgaste flanco e Gume a Seco, com vista flanco do inserto (A) e vista em perspectiva do inserto (B).



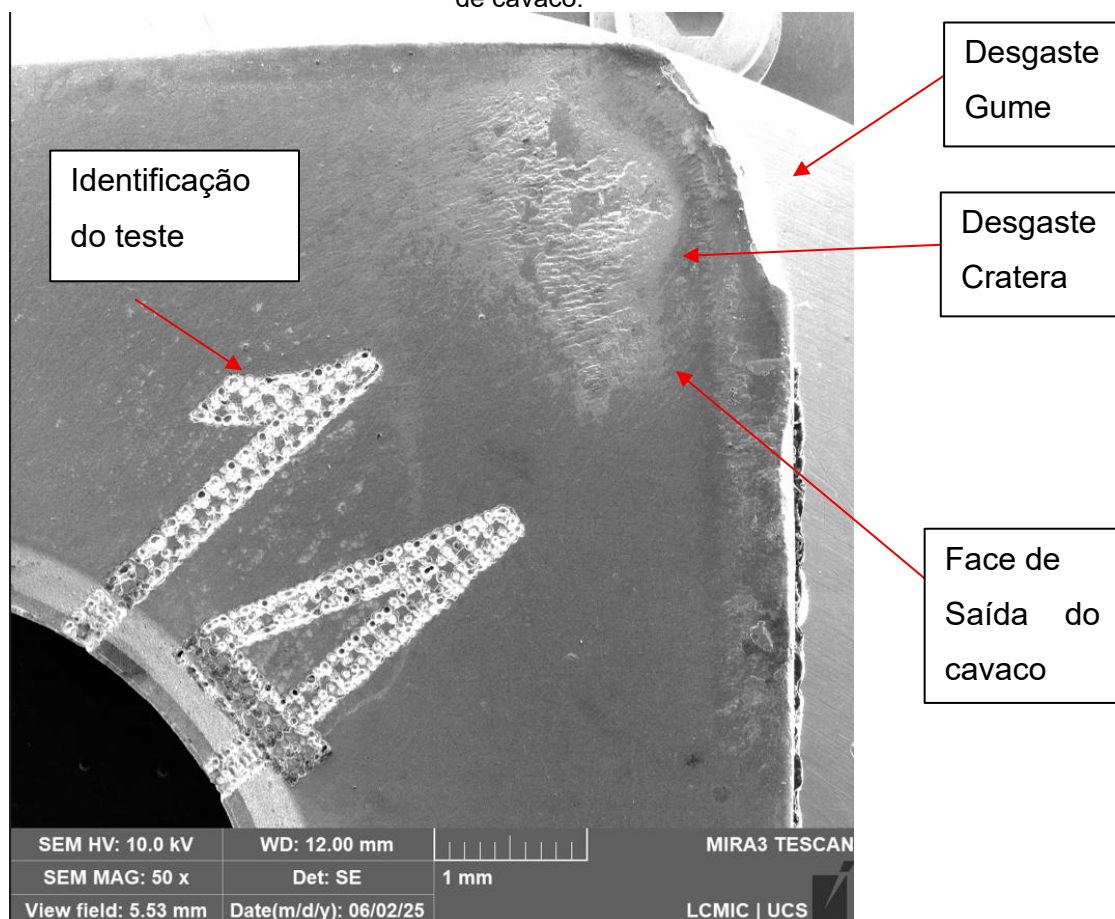
Fonte: O autor (2025).

A maior intensidade de desgaste foi apresentada inicialmente na região de contato entre a ferramenta e a superfície externa do tubo fundido. A Figura 38 ilustra a evolução desse desgaste ao longo dos testes, sendo A imagem frontal do flanco e

B vista em perspectiva das ferramentas. As imagens A e B não representam os mesmos insertos. Ao aumentar o comprimento usinado, é possível avaliar o crescente desgaste do gume.

A compreensão dos mecanismos de desgaste das ferramentas é essencial para a otimização dos processos de usinagem e para o aumento de sua vida útil. A Figura 39 apresenta a análise visual de um inserto após 5,38 metros de usinagem, evidenciando desgaste de flanco e um desgaste acentuado na região do gume de corte.

Figura 39 – Imagem da ferramenta utilizada no teste a seco, mostrando a condição da face de saída de cavaco.

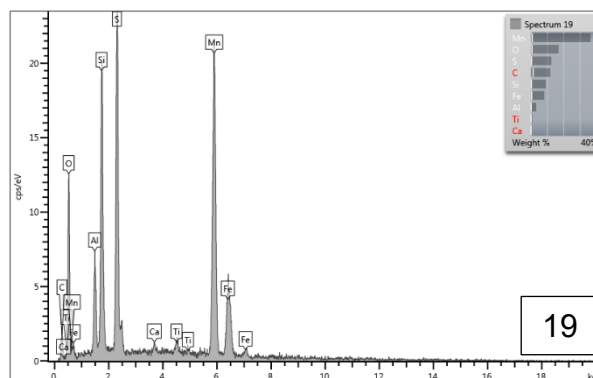
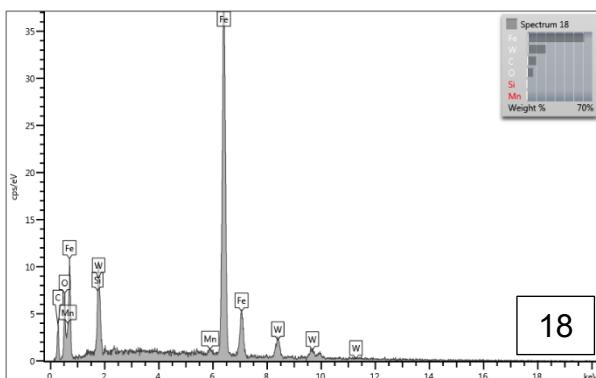
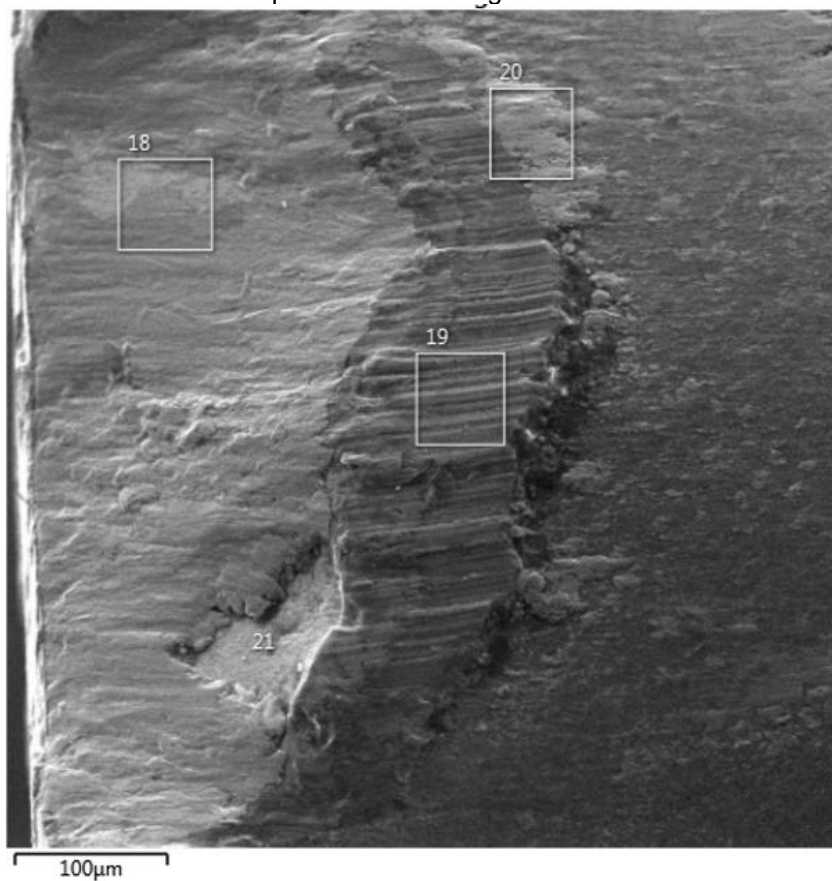


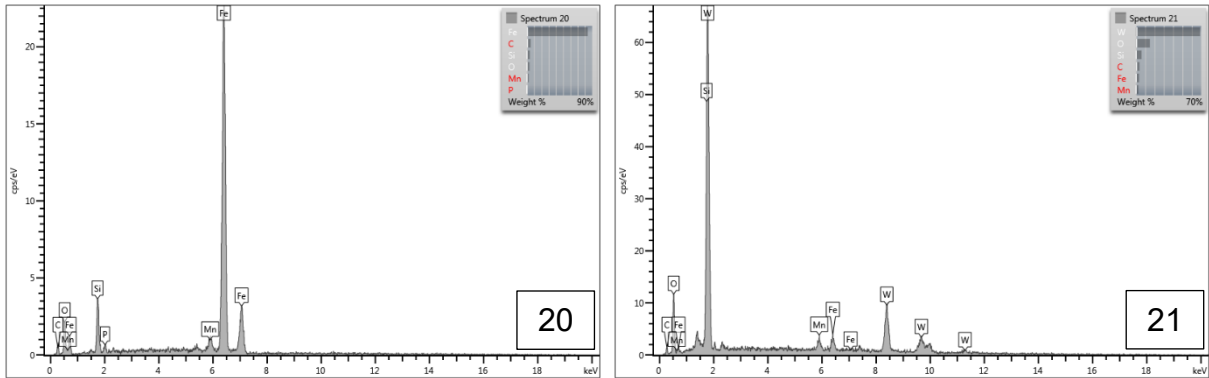
Fonte: O autor (2025).

A análise no inserto, realizada com ampliação de 50 vezes por meio de MEV e apresentada na Figura 39, evidencia três condições distintas: desgaste de flanco, desgaste do gume e a presença de um padrão superficial na região de saída de cavaco. Esse padrão é caracterizado por uma textura superficial que difere do padrão original do inserto, similar ao material aderido na superfície.

Para complementar a análise do MEV, o EDS foi utilizado para entender as condições identificadas na Figura 39, os resultados do desgaste do gume podem ser observados na Figura 40.

Figura 40 - Análise MEV e resultados de EDS. Imagem do Gume mostrando desgaste apresentado com processo de usinagem a seco.

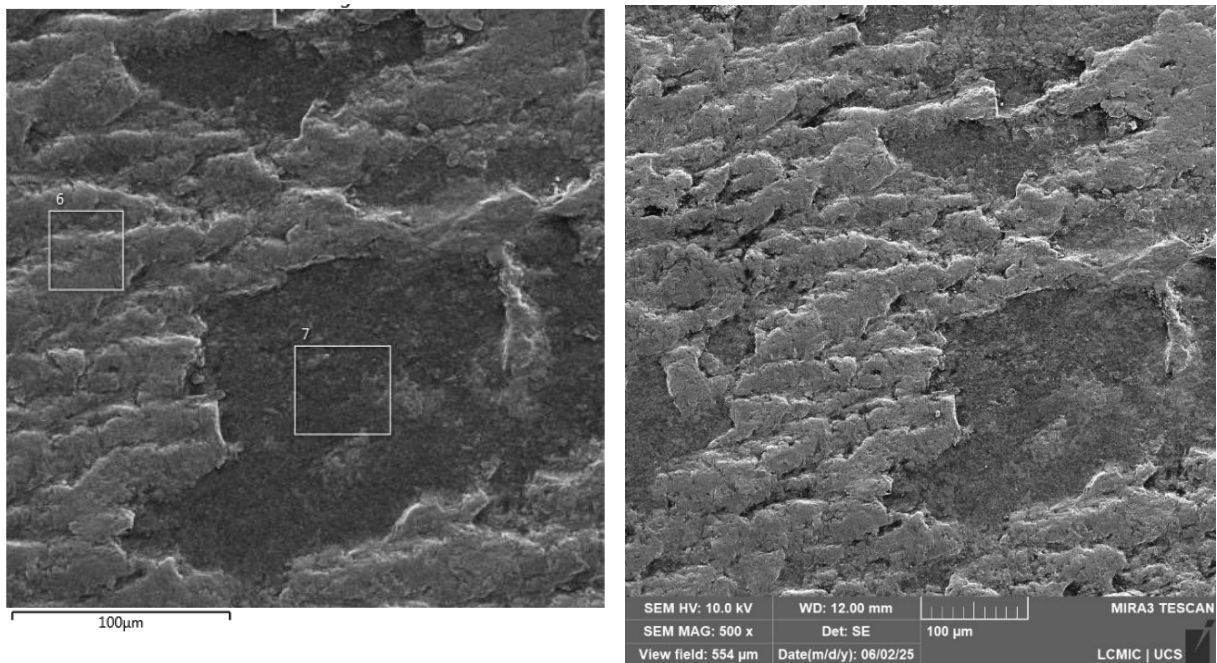


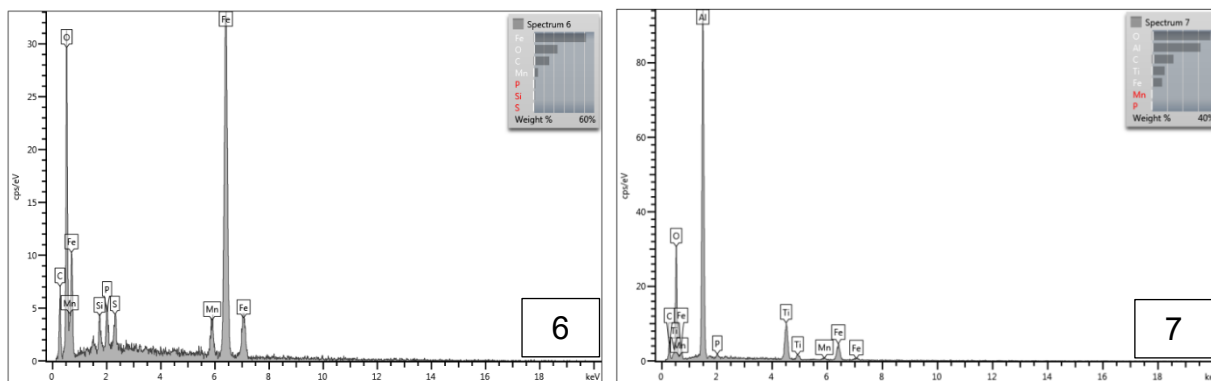


Fonte: O autor (2025).

A face de saída de cavaco, na qual é possível identificar uma textura superficial distinta do padrão original do inserto, apresentou condições iniciais de desgaste de cratera. Condições similares foram identificadas nos testes de "Avaliação da usinabilidade de insertos de metal-duro revestidos no torneamento de aço inoxidável super-duplex", realizados por Parsi *et al.* (2020). Para análise mais detalhada, foi utilizado análise de MEV e EDS, como mostrado na figura 41.

Figura 41 – Análise por MEV e resultados de EDS, da superfície de saída de cavaco ferramenta com usinagem à seco.





Fonte: O autor (2025).

A análise por EDS revelou diferentes fases e elementos que caracterizam o processo de desgaste. Nos pontos 19 e 20, mostrados na Figura 41, foi possível identificar a presença de ferro (Fe), carbono (C) e manganês (Mn). Essa condição pode ser caracterizada pela adesão de material sobre o inserto. A adesão à superfície do inserto, seguida pela remoção dessas partículas soldadas, provoca o deslocamento desse material juntamente com fragmentos do próprio inserto.

Na área 18, foi evidenciada a presença significativa de ferro (Fe) e tungstênio (W). Isso indica um mecanismo de adesão na superfície do metal-duro. Os elevados teores desses elementos também sugerem a possível ocorrência de difusão de material do cavaco para o inserto, um fenômeno descrito por Klocke (2019) e ilustrado na Figura 12.

Já no ponto 21, observa-se a presença de adesão de óxidos, o que reforça a atuação simultânea de múltiplos mecanismos de desgaste na interface ferramenta-cavaco.

Na região de saída de cavaco, a análise por EDS confirmou a presença de adesão de material sobre a superfície da ferramenta, conforme ilustrado na Figura 39. Essa mesma condição foi relatada por Meurer, Boehs e Guesser (2007) em seus estudos sobre a usinabilidade de ferro fundido cinzento ligado, que utilizavam insertos cerâmicos. Os autores observaram, nessa região, a ocorrência simultânea de adesão e formação de crateras, o que caracteriza um mecanismo combinado de desgaste por adesão e craterização. Uma condição similar também foi observada em Parsi *et al.* (2020).

Meurer, Boehs e Guesser (2007) obtiveram, em sua análise, resultados que revelaram um desgaste significativamente maior nas ferramentas submetidas à remoção da camada bruta de fundição, quando comparadas àquelas utilizadas no

desbaste posterior. Essa diferença no desgaste impactou diretamente o desempenho das ferramentas: a usada na primeira etapa demonstrou uma redução de rendimento doze vezes maior, atingindo um desgaste de flanco de 0,4mm mais rapidamente do que a ferramenta de desbaste secundário.

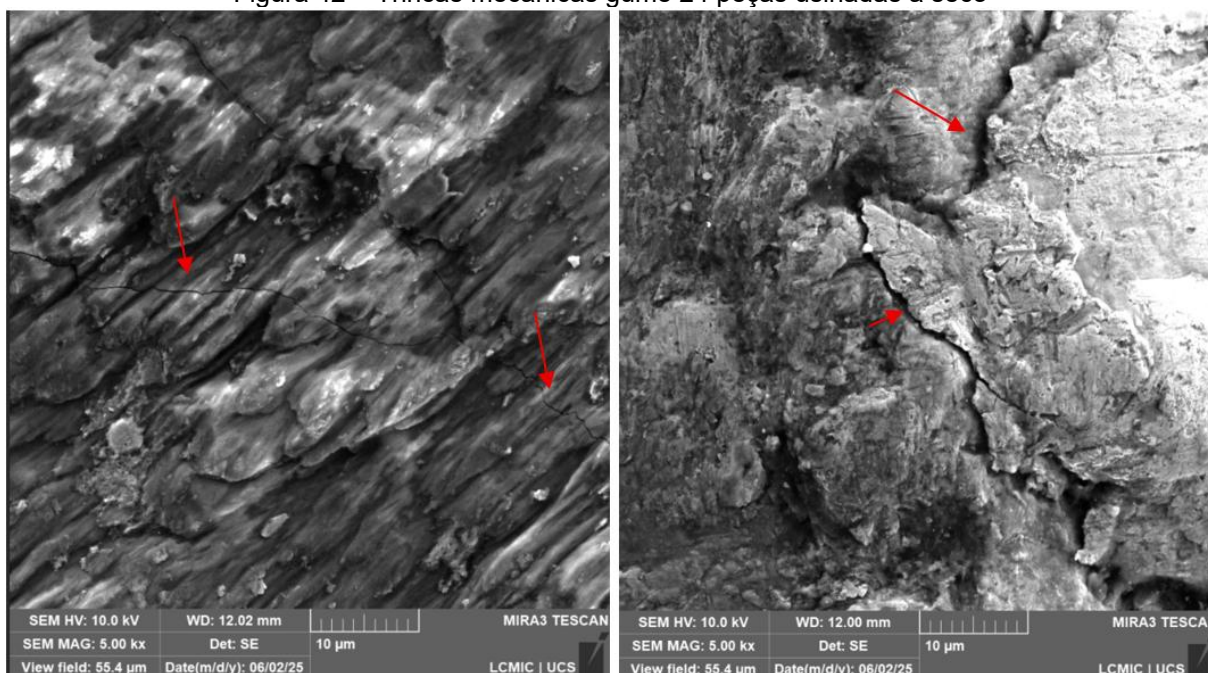
O processo de desgaste por craterização ocorre principalmente devido à reação química entre a ferramenta e o material da peça, intensificada por altas velocidades de corte (Sandvik Coromant, 2025a). Essa condição pode ser observada na Figura 39 e, com maior detalhe, na Figura 41, onde há uma região lisa com material depositado na superfície. Parsi *et al.* (2020) observaram que a região de saída do cavaco apresentava uma superfície lisa, similar à encontrada em testes a seco, e atribuíram essa condição ao desgaste por difusão.

Com a eliminação do fluido lubrificante, a temperatura e o atrito na face de saída do cavaco aumentam. Segundo Parsi *et al.* (2020), este fenômeno depende de vários fatores durante a usinagem: a temperatura de corte, a solubilidade dos elementos na zona de cisalhamento secundária e o tempo de contato entre a peça e a ferramenta. Na maioria dos casos, a difusão é restrita a uma zona fina na interface ferramenta-cavaco, o que resulta no desgaste da ferramenta. Šramhauser *et al.* (2022) observaram desgastes de cratera e os relacionaram ao desgaste abrasivo na região de saída de cavaco.

Na análise da usinabilidade de ferro fundido cinzento ligado, utilizado na fabricação de discos de freios automotivos, feita por Meurer, Boehs e Guessser (2007), foi observado que a usinagem da camada bruta de fundição, usando insertos cerâmicos, causa um pequeno desgaste por cratera. Esse fenômeno é favorecido por condições de corte inadequadas, como velocidades muito baixas ou taxas de avanço excessivamente altas, que elevam a temperatura e intensificam o atrito na interface ferramenta-cavaco. Em operações de corte ortogonal, o desgaste por cratera tende a se concentrar na região de maior temperatura, geralmente localizada a uma altura próxima à profundidade de corte do material (Soori; Arezoo, 2022).

Além dos mecanismos de desgaste identificados através do MEV e EDS, foi possível constatar a presença de microtrincas nos insertos testados a seco, conforme identificado na Figura 42.

Figura 42 – Trincas mecânicas gume 24 peças usinadas a seco



Fonte: O autor (2025).

Por meio das análises realizadas com MEV, foi possível identificar a presença de microtrincas na superfície da ferramenta, fenômeno também observado nas condições de usinagem com fluido lubrificante abundante. No entanto, em comparação com essa condição, o processo a seco apresentou uma quantidade maior de trincas e com dimensões mais pronunciadas, o que indica uma intensificação dos esforços (solicitações) térmicos e mecânicos sobre o material da ferramenta.

Assim como observado na usinagem com fluido lubrificante, as trincas identificadas na Figura 42 não foram encontradas no gume, mas sim na região de saída de cavaco. Como mencionado por Klocke (2019), essa condição pode estar relacionada ao deslocamento do revestimento devido a tensões residuais do próprio revestimento.

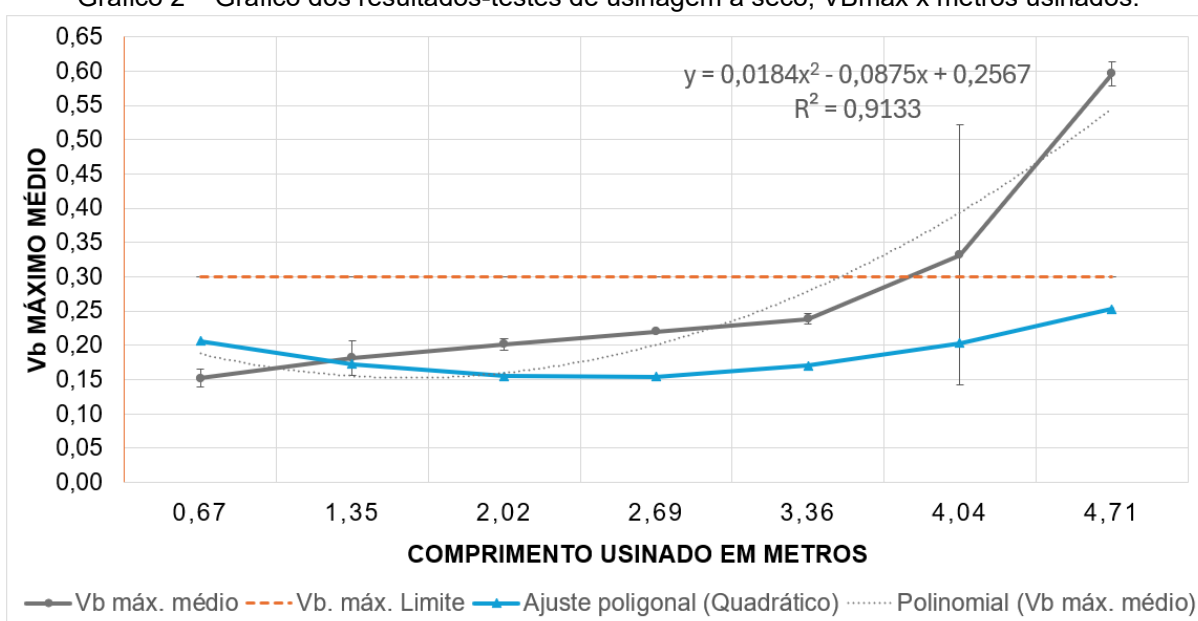
4.2.1 Comportamento do desgaste da ferramenta (VBmax)

Os dados de desgaste foram analisados com base na divisão clássica em três fases: fase 1 (inicial), fase 2 (estável) e fase 3 (crítica). No entanto, ao considerar os registros visuais e dimensionais do desgaste de flanco máximo (VBmax) ao longo do comprimento usinado (mm), não foi possível identificar com clareza a fase inicial, que normalmente ocorre nos primeiros ciclos de usinagem.

Em particular, nos testes realizados a seco, observou-se um valor elevado de desgaste logo na primeira medição. Isso indica que o intervalo de medição adotado — a cada 0,67 metros de usinagem, equivalente a três peças — não foi suficiente para capturar a transição da fase inicial. Como resultado, a primeira leitura já apresentou um desgaste médio de 0,152 mm, sugerindo que a fase 1 do desgaste pode ter ocorrido entre o início da usinagem e a primeira medição registrada.

O comportamento do desgaste da ferramenta sob condição de usinagem a seco pode ser mais bem visualizado no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Gráfico dos resultados-testes de usinagem a seco, VBmax x metros usados.



Fonte: O autor (2025).

Após o estágio inicial do processo, tem início a fase de desgaste estável, considerada a condição mais desejável em operações de usinagem, pois permite prever o comportamento da ferramenta ao longo do tempo.

Nos testes de 1 a 5, observou-se uma evolução do desgaste de flanco máximo (VBmax) de 0,152 mm a 0,239 mm. A análise dos dados por regressão polinomial, baseada nos valores experimentais, resultou em um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,9133$ e na seguinte equação: $y = 0,0184x^2 - 0,0875x + 0,2567$.

Esse valor de R^2 indica que aproximadamente 91,33% da variação no desgaste médio pode ser explicada pelo modelo de regressão proposto, demonstrando uma forte correlação entre as medições e validando a consistência dos dados obtidos.

A partir da análise dos dados, foi possível identificar as seguintes taxas de desgaste: 0,123 mm/m no primeiro teste, 0,129 mm/m na réplica e 0,051 mm/m na tréplica, resultando em uma taxa média geral de 0,1266 mm/m.

A taxa reduzida observada na tréplica deve-se à quebra do inserto durante o Teste 7, o que fez com que fossem considerados na análise apenas os dados de desgaste até o Teste 6. Essa limitação justifica a discrepância entre os valores e destaca a importância de avaliar a integridade da ferramenta ao longo dos ensaios para garantir a representatividade dos resultados.

Com base nos dados analisados, considerando o limite de $VB_{max} = 0,3$ mm como referência para a fase crítica de desgaste da ferramenta, foi possível estimar o tempo necessário para atingir esse valor. Atingiria 2,32 metros de usinagem na pior condição, 5,79 metros na melhor, e uma média de 2,36 metros em todos os ensaios.

A partir de um desgaste de $VB_{max} = 0,3$ mm, os dados coletados no teste de usinagem a seco indicam um desgaste acelerado, conforme pode ser observado no Gráfico 2.

Essa aceleração significativa no desgaste eleva o risco de falha da ferramenta. Tais falhas podem comprometer a precisão dimensional e o acabamento superficial da peça, além de representar riscos à integridade do suporte de fixação da ferramenta e aumentar os esforços aplicados à peça e ao equipamento.

Os valores de erro, calculados por desvio padrão e acrescentados no Gráfico 2, indicam que, após 3,36 metros, os resultados de VB_{max} apresentaram maiores variações entre o teste, a réplica e a tréplica. Isso demonstra que a ferramenta já estava chegando ao fim de sua vida útil.

Os valores de VB_{max} médio dos três testes (teste, réplica e tréplica) foram analisados utilizando a análise estatística de regressão linear, conforme observado na Figura 43.

Figura 43 – Análise de regressão linear dos valores de VBmax médio da análise dos resultados obtidos no teste a seco.

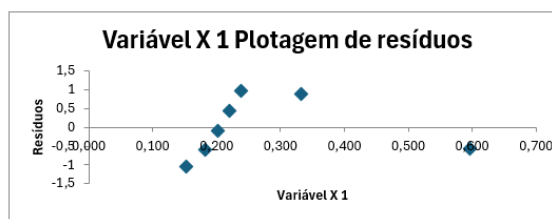
Estatística de regressão	
R múltiplo	0,84295362
R-Quadrado	0,710570806
R-quadrado ajustado	0,652684967
Erro padrão	0,856674243
Observações	7

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	9,008789686	9,008789686	12,27538238	0,017217573
Resíduo	5	3,669453794	0,733890759		
Total	6	12,67824348			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	0,489573718	0,707003001	0,692463422	0,519483857	-1,327835356	2,306982791	-1,327835356	2,306982791
Variável X 1	8,019171409	2,288821804	3,503624177	0,017217573	2,135567655	13,90277516	2,135567655	13,90277516

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Y previsto	Resíduos
1	1,711160829	-1,038260829
2	1,946389857	-0,600589857
3	2,106773285	-0,088073285
4	2,25111837	0,44048163
5	2,403482627	0,961017373
6	3,149265568	0,888134432
7	5,273009463	-0,562709463



Fonte: O autor (2025).

Esses resultados de regressão mostram uma diferença significativa entre o R-quadrado (R^2) de uma regressão linear (0,71) e o R^2 de uma regressão polinomial de ordem 2 (0,9133).

O valor de 0,71 (ou 71%) na regressão linear indica que aproximadamente 71% da variação na sua variável dependente é explicada pela variável X1. Este é um valor razoável, sugerindo que a variável X1 tem um poder preditivo considerável para o modelo linear.

Com base nos resultados, o valor-p de 0,0172 para a Variável X1 confirma que ela é um preditor forte e estatisticamente significativo da variável dependente. Como o valor-p é menor que o nível de significância padrão (geralmente 0,05), é possível rejeitar a hipótese nula de que não há relação entre as variáveis.

Os valores de resíduos representados na Figura 43 mostram a diferença entre o valor real (observado) da variável dependente e o valor previsto pelo modelo de regressão para cada condição.

Observa-se que os pontos dos resíduos parecem formar uma curva (uma parábola), o que é considerado um "padrão indesejado" e sugere que a relação entre as variáveis pode não ser linear. Dessa forma, a análise indicada para este caso é um modelo polinomial de ordem 2, pois oferece um melhor ajuste.

4.3 TESTE COM MQL

Os testes realizados no processo, com o uso de MQL, apresentaram pouca estabilidade. Isso pode ser observado ao comparar os resultados da primeira medição com a réplica e a tréplica, que mostraram variações de 0,008 a 0,196 mm antes de atingir o VBmax.

Os valores encontrados de desgaste e valores de amplitude, está tabulado na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5 – Resultados de desgaste VBmax com teste MQL

Ferr. #	Comp. Usinado (m)	Peças Usinadas	VBmax			VBmax médio	Amplitude	Desvio padrão
			Teste	Réplica	Tréplica			
1	0,67 m	3 pçs	0,154	0,096	0,165	0,138	0,069	0,037
2	1,35 m	6 pçs	0,180	0,183	0,175	0,179	0,008	0,004
3	2,02 m	9 pçs	0,144	0,340	0,230	0,238	0,196	0,098
4	2,69 m	12 pçs	0,418	0,364	0,267	0,350	0,151	0,077
5	3,36 m	15 pçs	0,305	0,303	0,160	0,256	0,145	0,083
6	4,04 m	18 pçs	0,316	0,370	0,267	0,318	0,103	0,052
7	4,71 m	21 pçs	0,281	0,281	0,253	0,272	0,028	0,016
8	5,38 m	24 pçs	?	0,421	?	0,421	---	---

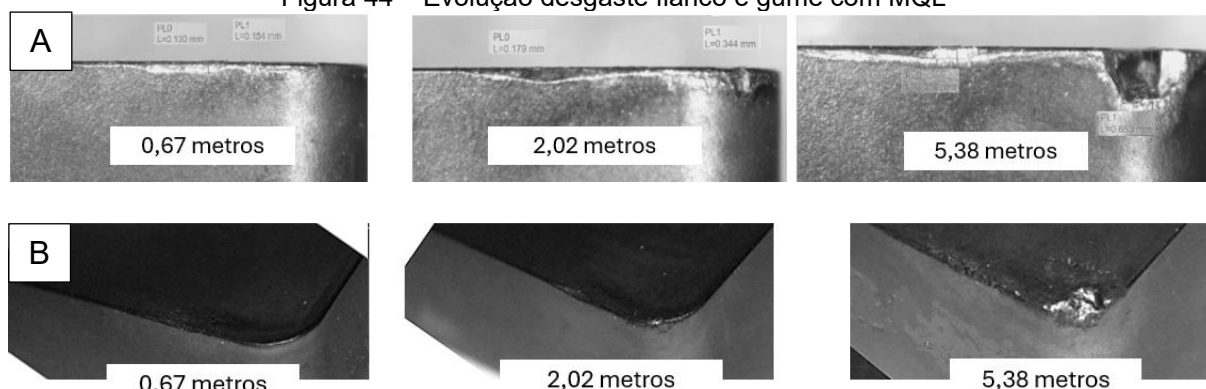
Fonte: O autor (2025).

Nos pontos indicados na Tabela 5 com um ponto de interrogação, os testes apresentaram lascamento do inserto, e os valores não foram considerados na análise de VBmax utilizando-se apenas os dados da réplica.

Devido a essa condição, não foi possível calcular os valores de amplitude e desvio padrão. Como pode ser observado na Tabela 5, os valores de amplitude e desvio padrão que foram calculados mostram grande variação.

O comportamento do desgaste está ilustrado na Figura 44, sendo A vista do frontal do inserto, mostrando o flanco e B vista em perspectiva do inserto. Inicialmente, os desgastes observados nos testes foram classificados como desgaste de flanco. Contudo, após a usinagem de 9 peças, iniciou-se o processo de desgaste no gume, caracterizado pelo surgimento de desgaste em entalhe.

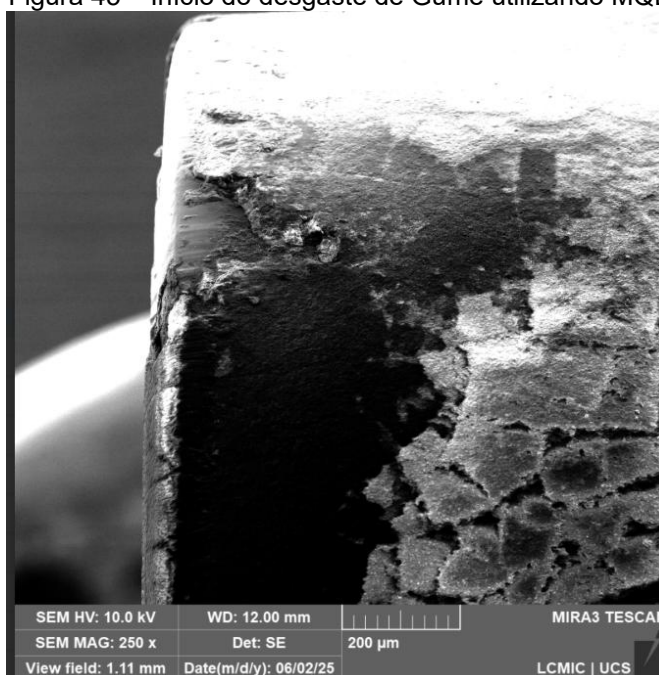
Figura 44 – Evolução desgaste flanco e gume com MQL



Fonte: O autor (2025).

A Figura 44 ilustra a evolução desse desgaste ao longo dos testes, sendo mostradas duas posições de desgaste. As imagens A e B não representam os mesmos insertos. O desgaste por entalhe no gume pode ser mais bem observado por meio de uma ampliação de 250 vezes, utilizando MEV, conforme evidenciado na Figura 45.

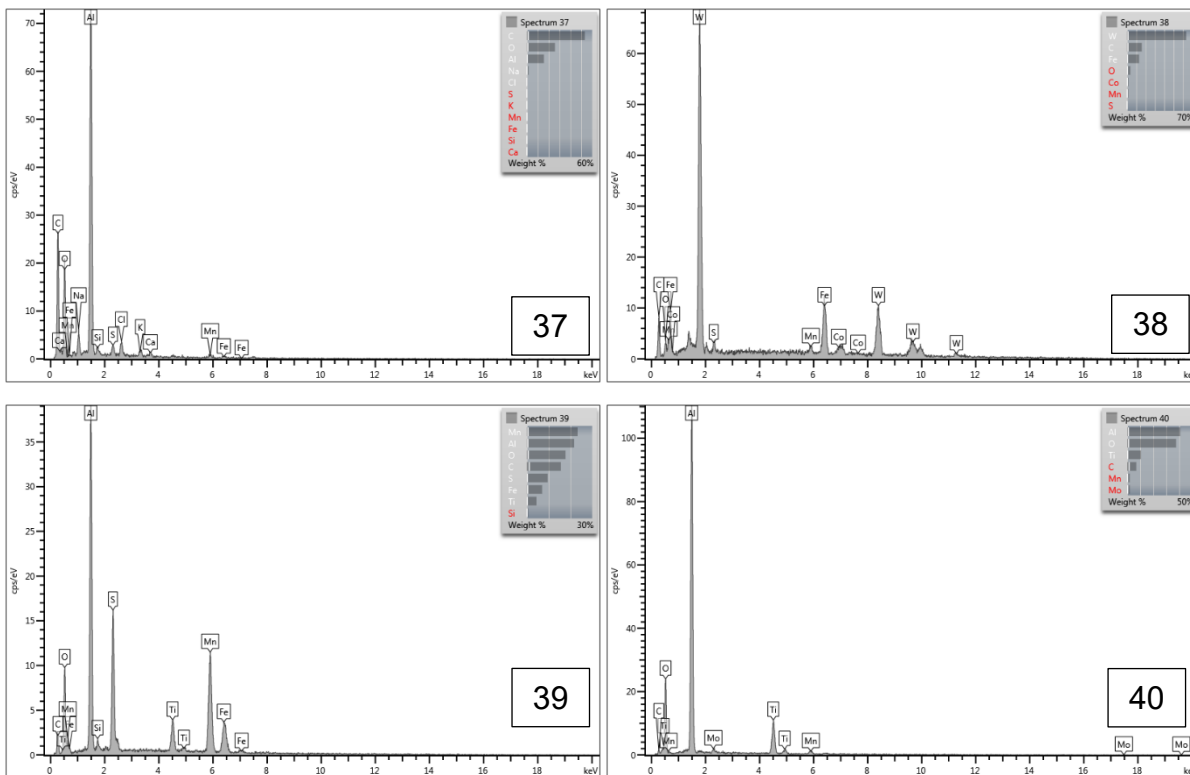
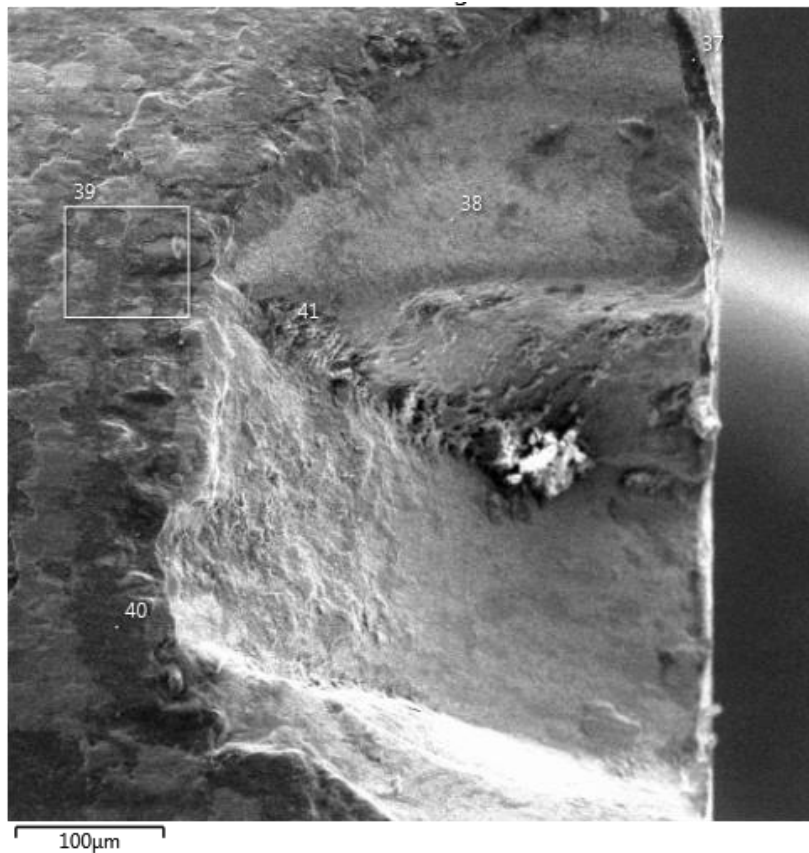
Figura 45 – Início do desgaste de Gume utilizando MQL

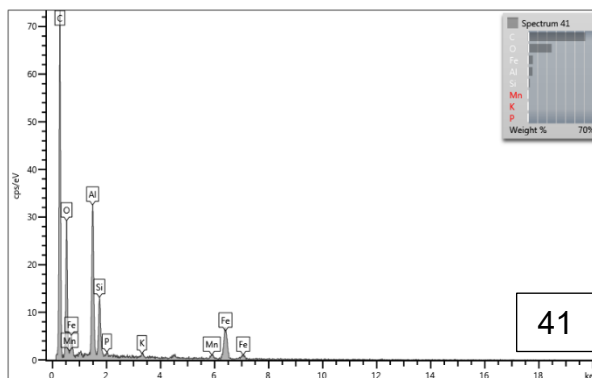


Fonte: O autor (2025).

Para complementar a análise do MEV, o EDS foi utilizado com o objetivo de entender as condições identificadas na Figura 45. A imagem ampliada e os dados de EDS pode ser avaliado na Figura 46.

Figura 46 – Análise do Gume utilizando MEV e EDS para análise de ferramenta desgastada usando no teste com MQL.





Fonte: O autor (2025).

A análise dos pontos 37 e 41 revelou um elevado teor de carbono e oxigênio, o que sugere a presença de um depósito predominantemente carbonáceo. Essa formação pode ser resultado de reações químicas entre o material da peça e o óleo utilizado no sistema MQL.

Essa condição caracteriza a ocorrência simultânea dos mecanismos de desgaste por oxidação e adesão.

O ponto 38 corresponde basicamente ao metal-duro base do inserto. Já o ponto 39 evidencia a presença de adesão, identificada pela composição química que contém ferro, manganês, alumínio, titânio, além de oxigênio e enxofre.

A presença significativa de oxigênio (18%) sugere a oxidação do material aderido. Por sua vez, o ponto 40 indica predominantemente o revestimento externo do inserto, que é de óxido de alumínio (Al_2O_3).

Teles (2007), em sua análise, observou que o uso do fluido lubrificante na usinagem de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio resultou em condições de desgaste por entalhe similares às aquelas obtidas com a redução do fluido lubrificante.

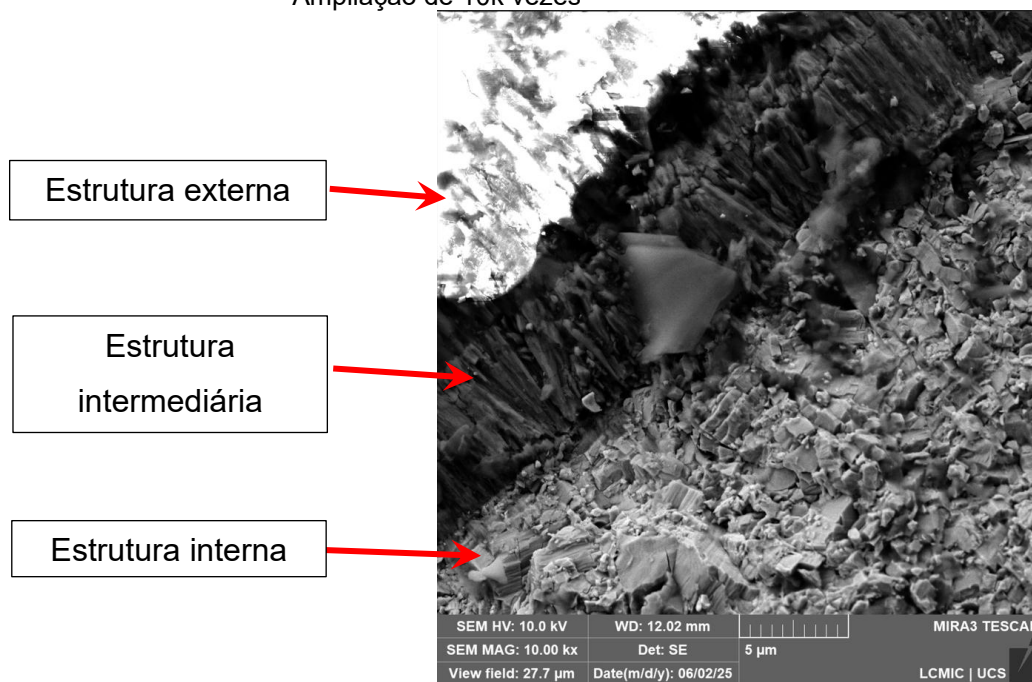
Leal (2015) identificou, em suas análises, variações nas forças resultantes entre os processos de usinagem a seco e com MQL. Ele observou uma leve melhora no desempenho com MQL. No entanto, o autor também constatou uma maior variabilidade nos valores obtidos, o que indica que o sistema MQL não garante uniformidade constante nas interfaces peça/ferramenta e cavaco/ferramenta. Uma condição similar foi observada nos testes realizados neste estudo, especialmente na análise do desgaste dos insertos, que apresentou variações atípicas.

Nos testes de usinagem de Polly (2019), que comparou o desempenho de ferramentas de metal-duro e cerâmica mista no torneamento de aço SAE 4340

endurecido, também foram identificados desgastes de entalhe nos testes realizados com MQL. de entalhe nos testes realizados com MQL

Durante os testes com MQL, foram observados desgastes por lascamento em alguns insertos, conforme ilustrado na Figura 47.

Figura 47 – Ferramenta danificada durante a usinagem com MQL. Estrutura da ferramenta. Ampliação de 10k vezes



Fonte: O autor (2025).

A análise de um dos insertos que apresentou lascamento, utilizando o MEV com uma ampliação de 10 mil vezes, é apresentada na Figura 47. Na imagem, é possível identificar três estruturas distintas: o metal-duro, o revestimento intermediário de carboneto de titânio e o revestimento externo de óxido de alumínio.

Como observado em uma vista superior nas Figuras 35 e 36, o carboneto de titânio possui uma estrutura colunar e este pode ser evidenciado na Figura 47.

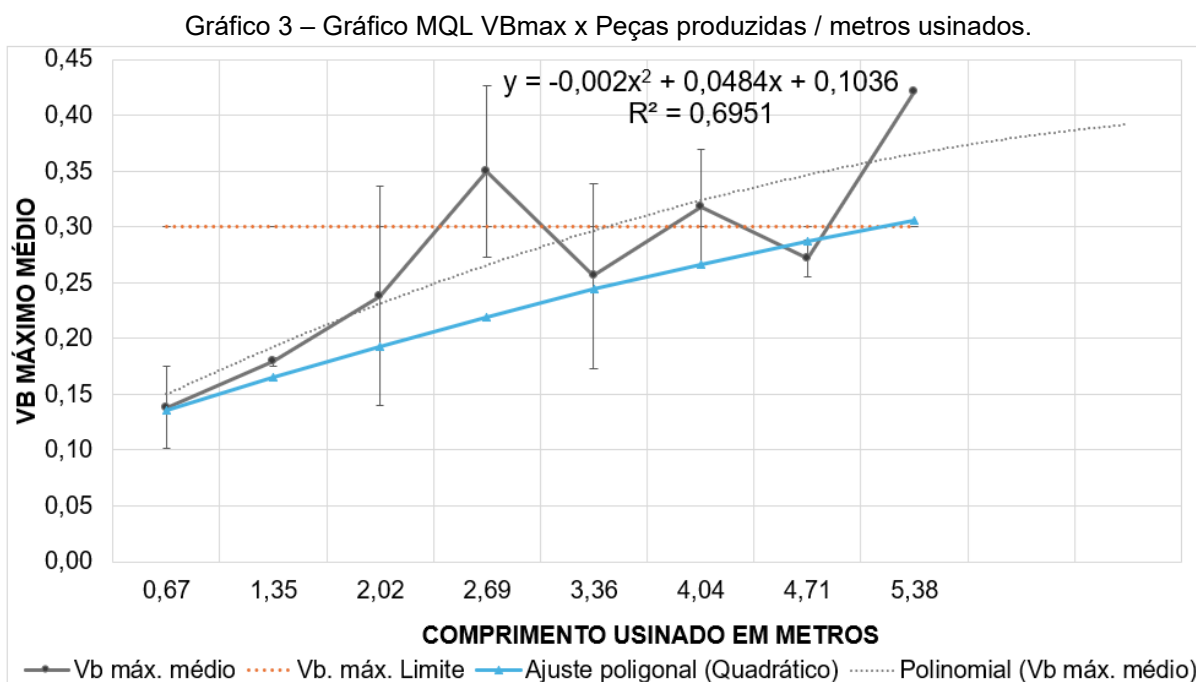
Nos ensaios a seco e com MQL realizados por Polly (2019) as ferramentas de metal-duro apresentaram avarias causadas por lascamento do gume, condições similares à condição apresentada nos testes com MQL.

4.3.1 Comportamento do desgaste da ferramenta VBmax

Conforme analisado nos testes anteriores, a avaliação do desgaste da ferramenta é dividida em três fases: fase 1 (inicial), fase 2 (estável) e fase 3 (crítica),

com base na análise visual dos dados de desgaste (VBmax) ao longo do comprimento usinado (mm).

A medição do desgaste, realizada a cada 0,67 metros (equivalente a três peças usinadas), não foi suficiente para captar detalhadamente o desgaste inicial da ferramenta. O comportamento do desgaste ao longo do tempo pode ser mais bem visualizado no Gráfico 3.



Após a fase inicial, esperava-se o início do processo de desgaste estável, que é a fase ideal em operações de usinagem, pois permite prever o comportamento da ferramenta ao longo do tempo. No entanto, essa condição não foi claramente identificada nos testes realizados.

A análise dos dados experimentais, utilizando regressão polinomial, revelou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,6951, com a equação: $y = -0,002x^2 + 0,0484x + 0,1036$. Esse resultado indica que aproximadamente 69,51% da variação no desgaste médio pode ser explicada pelo modelo, o que sugere uma correlação de moderada a baixa entre as medições, considerando assim valor de R^2 muito abaixo do esperado para o teste.

Esse comportamento indica que fatores adicionais, além do número de peças usinadas, como o sistema de lubrificação e refrigeração adotado, podem influenciar significativamente o desgaste médio observado.

A análise dos dados do processo indicou taxas médias de desgaste de 0,059 mm/m no primeiro teste, 0,078 mm/m na réplica e 0,053 mm/m na tréplica, resultando em uma taxa média geral de 0,078 mm/m.

Considerando o limite de $VB_{max} = 0,3$ mm como critério para a fase crítica da ferramenta, e com base nas taxas de desgaste observadas nos testes, estima-se que esse valor foi atingido após a usinagem de aproximadamente 3,83 metros na pior condição, 5,58 metros na melhor, e 3,83 metros na média dos três testes. A partir desse ponto, inicia-se a fase 3 do desgaste, conforme Machado *et al.* (2015).

Os valores de erro, calculados por desvio padrão e apresentados na Tabela 5 e no Gráfico 3, indicam uma grande variação entre os testes nas mesmas condições.

Essa condição de usinagem com MQL apresentou uma variação considerável em relação aos outros dois testes (com fluido abundante e a seco).

Os valores de VB_{max} médio dos três testes (teste, réplica e tréplica) foram analisados por meio da análise estatística de regressão linear, conforme observado na Figura 48.

Figura 48 – Análise de regressão linear dos valores de VBmax médio, para os resultados obtidos no teste com MQL

RESUMO DOS RESULTADOS

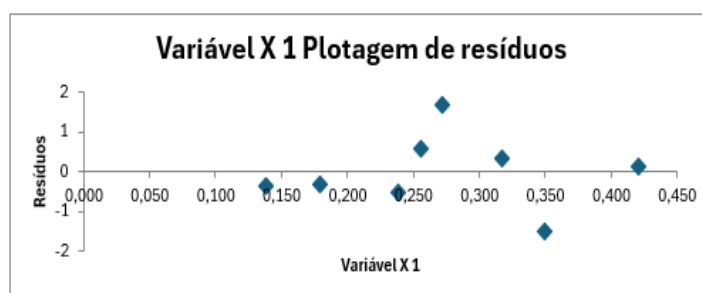
Estatística de regressão	
R múltiplo	0,82703292
R-Quadrado	0,68398345
R-quadrado ajustado	0,63131402
Erro padrão	1,00081652
Observações	8

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	13,00756299	13,00756299	12,98635	0,011316717
Resíduo	6	6,009802231	1,001633705		
Total	7	19,01736522			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	-1,0308285	1,180595324	-0,873142927	0,416157	-3,919641148	1,857984233	-3,91964115	1,857984233
Variável X 1	14,9521233	4,149152186	3,603657465	0,011317	4,799513594	25,10473291	4,799513594	25,10473291

RESULTADOS DE RESÍDUOS

Observação	Y previsto	Resíduos
1	1,03754859	-0,364648592
2	1,65058565	-0,304785646
3	2,52777688	-0,509076876
4	4,19743064	-1,505830639
5	2,79691509	0,567584905
6	3,7189627	0,318437305
7	3,03116503	1,679134974
8	5,26401543	0,119184569



Fonte: O autor (2025).

Esses resultados mostram que, utilizando a regressão linear, o R-quadrado (R^2) obteve o valor de 0,683. Esse valor é ligeiramente diferente do apresentado no Gráfico 3, onde o R-quadrado foi calculado por uma linha de tendência de polinômio de ordem 2, resultando em 0,695.

Normalmente, o modelo polinomial de ordem 2 possui um melhor ajuste. Esses valores de R-quadrado são considerados razoáveis, indicando que a Variável X1 tem um poder preditivo significativo.

Com base nesses valores, a análise de regressão indica que a Variável X1 (Valor-p 0,0113) é um preditor forte e estatisticamente significativo da variável dependente, pois seu valor é menor que 0,05. O modelo é válido e explica uma grande parte da variação nos dados, além de mostrar uma relação positiva clara, onde um aumento na Variável X1 leva a um aumento na variável dependente.

Os valores de resíduos representados na Figura 48 mostram a diferença entre o valor real (observado) da variável dependente e o valor previsto pelo modelo de regressão para cada condição, sendo:

- Ausência de Padrão: os pontos parecem estar dispersos aleatoriamente em torno da linha horizontal do zero, o que é um bom sinal. Não há um padrão claro, como uma curva ou um funil, o que sugere que as suposições de linearidade e homoscedasticidade do modelo podem ser válidas.
- Variação: a dispersão dos resíduos parece razoavelmente constante ao longo do eixo X (Variável X1). Isso é conhecido como homoscedasticidade e é uma suposição importante para a validade do modelo.

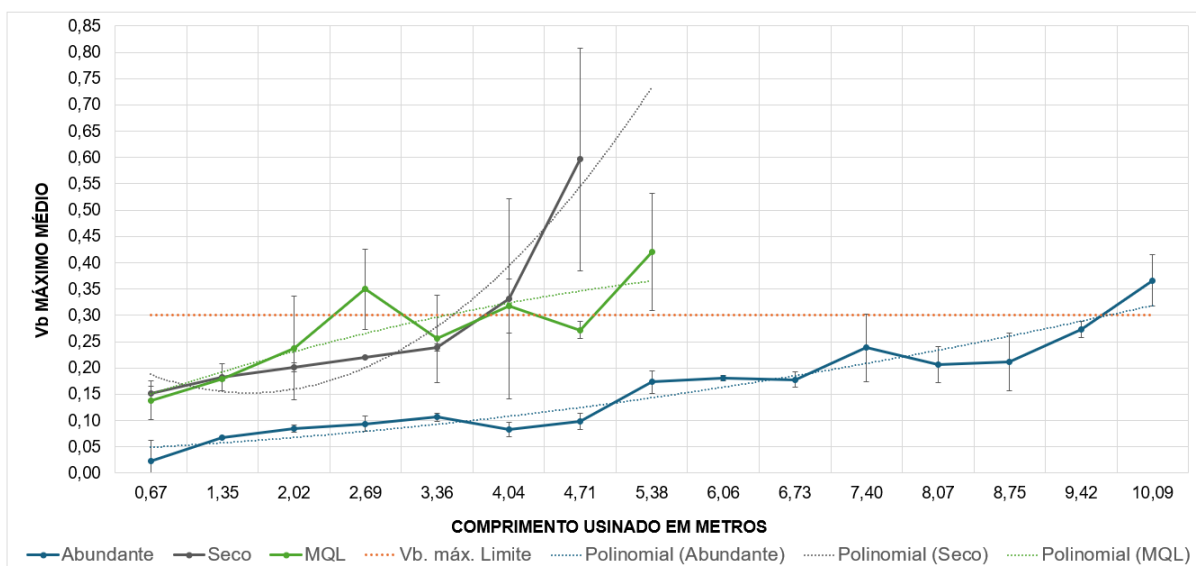
Em resumo, a análise dos resíduos mostra que seu modelo de regressão linear parece ser um bom ajuste para os dados, pois os resíduos não exibem padrões que indiquem problemas sérios com as suposições do modelo. Contudo, a avaliação conjunta dos valores-P e da dispersão dos resíduos aponta para a provável influência de fatores não modelados ou não controlados que podem ter interferido na precisão dos resultados experimentais.

Em processos de usinagem que utilizam MQL, a variabilidade observada pode ser atribuída a fatores determinantes de natureza prática, como o posicionamento e a regulagem precisa do bico de MQL na região de corte da ferramenta, o tipo de fluido empregado e os parâmetros de pressão e vazão estabelecidos para o teste.

4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Os dados analisados apresentaram resultados de desgaste distintos entre os três testes realizados, conforme observado no Gráfico 4. Os melhores resultados foram nos testes de usinagem com fluido abundante, que apresentaram valores superiores de vida útil, seguidos pelos testes com MQL e a seco. Condições similares foram encontradas por Silva e Lima (2022).

Gráfico 4 – Comparativo de desgastes VBmax e desvio padrão nos testes com fluido abundante, a seco e MQL



Fonte: O autor (2025).

O Gráfico 4 demonstra, de forma clara, que o desgaste das ferramentas nos testes a seco e com MQL teve condições muito semelhantes até 4,04 metros de usinagem. No entanto, esses valores estão bem acima dos apresentados nos testes com fluido abundante.

Essa condição também foi observada por Marques (2015) que obteve um incremento de 200% na vida útil da ferramenta com usinagem convencional (fluido abundante) em comparação com a usinagem com MQL. Já Polly (2019) obteve um resultado melhor no desgaste de ferramenta com a utilização do MQL em comparação à usinagem a seco.

Scandiffio (2000) testou a usinagem de aço 1045 com velocidades de corte elevadas e comparou os processos a seco, com fluido abundante e com MQL. Ele obteve resultados similares, nos quais o MQL também apresentou um resultado inferior na vida útil da ferramenta.

Já Bonfá (2013) comparou a usinagem a seco e com MQL na usinagem de Aço AISI D6 endurecido e encontrou resultados de desgastes de VBmax menores no processo com MQL em comparação com o processo a seco.

A análise comparativa do Gráfico 4 mostra a constância do desvio padrão encontrado entre o teste, a réplica e a tréplica de usinagem com fluido abundante, onde as variações obtidas foram de 0,002 a 0,065.

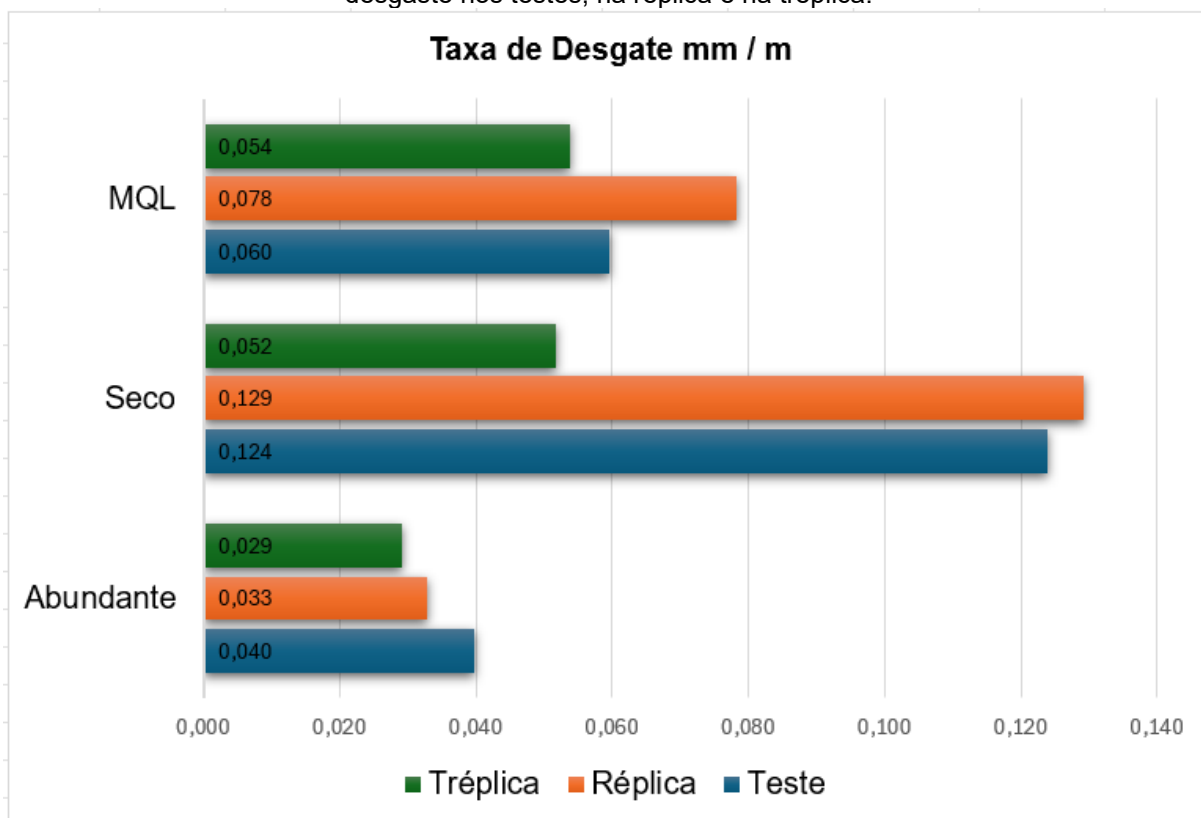
Já nos testes com MQL e a seco, as variações do desvio padrão foram maiores. O MQL apresentou desvio padrão de 0,004 a 0,098, enquanto o teste a seco teve um desvio padrão de 0,002 a 0,211.

Ao analisar e comparar os resultados de taxa de desgaste, é possível observar que os testes com fluido abundante (teste, réplica e tréplica) apresentaram taxas similares, variando de 0,029 mm/m a 0,040 mm/m, com uma variação de 0,011 mm/m entre eles.

Nos resultados dos testes com MQL e a seco, não foi possível observar essa mesma constância. O MQL teve uma taxa média de 0,078 mm/m e uma amplitude entre os testes de 0,024 mm/m. Já o processo a seco apresentou uma taxa média de 0,127 mm/m e uma amplitude de 0,077 mm/m, conforme o Gráfico 5.

Os testes foram realizados usando a casca do fundido, assim os resultados obtidos podem ser atribuídos a esta condição. Meurer, Boehs e Guessser (2007) também relataram que obtiveram taxas de desgaste maiores ao usinar a casca externa do ferro fundido.

Gráfico 5 - Comparativo das taxas de desgaste nos 3 testes realizados, mostrando a taxa de desgaste nos testes, na réplica e na tréplica.



Fonte: O autor (2025).

Além dos dados coletados referentes ao desgaste da ferramenta, é fundamental analisar e avaliar as demais condições impactadas pelas variações feitas entre os testes com fluido abundante, a seco e MQL.

Para isso, foi realizado um comparativo entre os processos de usinagem, como mostrado na Tabela 6, com uma análise qualitativa. Nela, foram elencados e avaliados os principais fatores observados durante o processo.

Tabela 6 – Tabela de avaliação qualitativa dos Métodos de Usinagem

Matriz	Processo	Alteração processo / Equipamento	Dificuldade de uso
Fluido Abundante	Boa estabilidade	Sem modificações	Nenhuma
SECO	Média estabilidade	Sem modificações	Nenhuma
MQL	Baixa estabilidade	Necessário investimento equipamento	Complexo

Fonte: O autor (2025).

A Tabela 6 apresenta uma comparação qualitativa entre os métodos de usinagem com fluido abundante, a seco e MQL, considerando critérios práticos de operação e manutenção. A Tabela 6 foi dividida em 3 análises, sendo:

- Processo – como pode ser observado no Gráfico 4, o processo com fluido apresentou maior estabilidade nas três análises, utilizando o desvio padrão como critério;
- Alterações do processo e equipamento – os processos com fluido abundante e a seco não exigem melhorias ou adaptações no equipamento existente. No entanto, para a aplicação do MQL, é necessário investir na adaptação do sistema; e
- Dificuldades de uso – no processo com fluido abundante e a seco, o equipamento está preparado para esse conceito de usinagem. Já no processo com MQL, a implantação foi ligeiramente complexa. Além da instalação do sistema no torno CNC, com o uso da torre de troca de ferramentas, foi necessário ter cuidado com as mangueiras de ar comprimido e fluido lubrificante para evitar que fossem arrancadas. Outra dificuldade encontrada foi o ajuste da vazão, que demanda tempo e é feito de forma muito artesanal no equipamento.

Quanto a limpeza da máquina, como esperado, no processo com fluido abundante, o fluido lubrificador removeu a maior parte do cavaco, deixando apenas concentrações nos cantos da máquina, sobre a torre e porta ferramentas. Nos testes com MQL e a seco, houve acúmulo de cavaco, e a estrutura interna da máquina ficou com acúmulo de pó de ferro. Esta condição pode apresentar condições prejudiciais ao processo e equipamento a longo tempo.

Para a implantação do sistema MQL, foi necessário usar um sistema externo ao equipamento, conforme ilustrado na Figura 49. Os custos de aquisição e adaptação dos equipamentos não foram considerados neste trabalho, mas precisam ser avaliados.

Figura 49 - Adaptação sistema MQL para realização dos testes



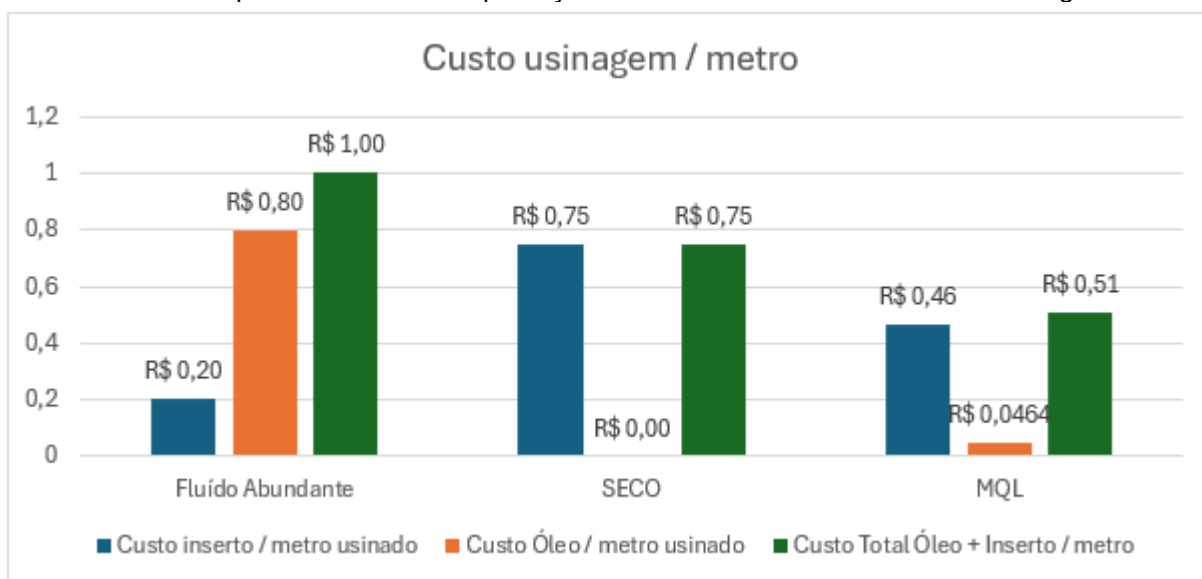
Fonte. O autor (2025).

A Figura 49 mostra a adaptação do sistema MQL no sistema de torre porta-ferramentas. A implantação desse sistema em tornos CNC com sistema de torre troca ferramenta exige cautela, pois durante o giro da torre, as mangueiras podem ser arrancadas.

Outra condição a ser avaliada é o número de ferramentas utilizadas no processo de usinagem. Neste teste, foi usada apenas uma ferramenta, com o bico do MQL direcionado para ela. No entanto, em caso de utilização de mais ferramentas, é necessário analisar a possibilidade de sistemas com um maior número de bicos.

Um fator importante a ser analisado no processo de usinagem são os custos operacionais. Os resultados dos custos avaliados nos três testes podem ser mais bem visualizados em um formato gráfico, conforme ilustrado no Gráfico 6.

Gráfico 6 Comparativo de custo de produção Ferramenta de corte + Fluido lubrificante.



Fonte: O autor (2025).

A vida útil da ferramenta foi estimada pela taxa média de desgaste observada nos três testes, utilizando 0,3 mm de VBmax como critério de desgaste máximo. Com esta condições observa-se que o processo com menor custo operacional é o MQL, seguido pela usinagem a seco e, por último, o uso de fluido abundante. Para essa análise de custos, foram considerados apenas o valor de aquisição dos insertos e o consumo de fluido lubrificante. Como apresentado nos resultados do teste MQ, os valores de resíduos apresentados indicam possíveis condições que interferiram nos resultados do teste, causando estabilidade. Para validar os dados de custos é necessário estudos mais longos para o MQL.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho investigou a influência de diferentes métodos de lubrificação (fluido abundante, a seco e MQL) no desempenho de ferramentas de metal duro revestidas durante o torneamento de tubos fundidos.

Sobre a Influência do fluido sobre o desgaste VB_{max} e vida útil, aplicação de fluido lubrificante abundante demonstrou ser a condição mais estável e eficaz para o controle do desgaste.

O processo com fluido abundante apresentou a menor taxa média de desgaste (0,033mm/m) e a maior previsibilidade, com um desvio padrão reduzido entre as réplicas. A vida útil estimada atingiu uma média de 8,83 metros usinados até o critério de fim de vida (VB_{max} de 0,3mm).

A usinagem a seco resultou no desempenho inferior, com uma taxa de desgaste acelerada (0,127mm/m) e uma vida útil média de apenas 2,36 metros. A ausência de refrigeração eliminou a fase de amaciamento (*break-in*) visível, levando a ferramenta a um desgaste severo prematuro.

A aplicação de MQL apresentou um comportamento intermediário em termos de taxa de desgaste (0,078 mm/m) e vida útil (3,83 metros). Contudo, o processo revelou-se estocástico e instável (R^2 aproximadamente 0,69), com alta variabilidade nos resultados e ocorrência de falhas catastróficas (lascamento) antes do desgaste progressivo, comprometendo a confiabilidade do processo.

Para caracterização dos mecanismos de desgaste foram utilizadas análises via MEV e EDS, que permitiram identificar mecanismos distintos atuantes em cada condição. No fluido Abundante, o mecanismo predominante foi a abrasão, com desgaste de flanco progressivo e controlado. A presença de microtrincas foi observada, porém em menor escala, associada às tensões residuais do revestimento.

Na usinagem a Seco, houve a predominância de mecanismos termicamente ativados, como adesão e difusão, evidenciados pela transferência de material (Fe, Mn) para a ferramenta e craterização na face de saída. A severidade térmica resultou em trincas pronunciadas e desgaste acentuado no gume.

No processo com MQL, observou-se um mecanismo complexo envolvendo oxidação, adesão e desgaste por entalhe. Possíveis variações geradas no processo de nebulização favoreceu o choque térmico, resultando em lascamento e na deposição de camadas carbonáceas no gume, provenientes da degradação do óleo.

A avaliação qualitativa e operacional, sob o aspecto operacional, os métodos apresentaram impactos distintos no ambiente fabril. A condição de fluido abundante mostrou-se a mais eficiente na remoção de cavacos e na limpeza da zona de corte, não exigindo alterações no equipamento padrão. Já a usinagem a seco e MQL apresentaram desvantagens operacionais significativas, como o acúmulo de cavacos e pó metálico na estrutura da máquina, o que pode acelerar o desgaste de guias e componentes móveis. Adicionalmente, a implementação do MQL exigiu adaptações complexas de setup e regulação de vazão, que se mostraram críticas para a estabilidade do processo.

A análise comparativa de custos, visando estritamente condições econômicas de consumo de insertos e fluido, apresentou o MQL como teoricamente, com o menor custo operacional por peça, seguido pela usinagem a seco. O processo com fluido abundante resultou no maior custo global. No entanto, conclui-se que a vantagem econômica do MQL é suplantada pela sua baixa confiabilidade técnica nas condições testadas. A alta variabilidade do desvio padrão e o risco de quebra prematura da ferramenta introduzem custos ocultos (paradas de máquina e refugo) que não justificam a sua adoção sem uma otimização rigorosa dos parâmetros de aplicação.

Para a usinagem da liga fundida estudada, o método de refrigeração abundante permanece como a opção mais robusta tecnicamente, garantindo a integridade da ferramenta e a estabilidade dimensional. A usinagem a seco é inviável devido à degradação térmica acelerada, enquanto o MQL, embora promissor economicamente, carece de estabilidade de processo para ser implementado, sendo necessário maiores estudos e testes.

Com base nos resultados obtidos e nos conhecimentos adquiridos ao longo desta pesquisa, o fluido lubrificante influenciou diretamente o comportamento de desgaste, reduzindo-o consideravelmente. O MQL necessita maiores estudos quanto a forma de aplicação e a quantidade. A usinagem a seco demonstrou um bom desempenho, mas, com os parâmetros de corte utilizados, apresentou um comportamento de desgaste acelerado em comparação com os outros testes.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Estudo do comportamento do VBmax com variação do avanço: avaliar os efeitos do aumento do avanço acima do 0,35 mm, buscando avaliar a melhor condição de avanço a fim de otimizar o processo;
- Estudo do comportamento do VBmax com variação da velocidade de corte: avaliar os efeitos da variação de velocidade de corte abaixo de 365 mm/min e acima de 400 mm/min, para tentar identificar o ponto com melhor rendimento em cada caso;
- Otimização da vazão e pressão do MQL: avaliar como diferentes combinações de vazão de fluido e pressão de ar afetam o desgaste da ferramenta. O objetivo seria encontrar a quantidade ideal de fluido para maximizar a vida útil da ferramenta sem desperdício de material;
- Novos tipos de fluidos no MQL: testar a aplicação de novos fluidos MQL, investigando como eles se comportam e se oferecem resultados superiores ao fluido testado;
- Análise de variância (anova): aplicar anova para determinar quais fatores (tipo de fluido, parâmetros de corte etc.) têm a maior influência estatística sobre o desgaste da ferramenta; e
- Otimização dos parâmetros de corte: realizar uma análise mais detalhada para identificar os parâmetros de corte (velocidade, avanço, profundidade) que minimizem o desgaste na usinagem a seco, tornando o processo mais viável.

7 REFERÊNCIAS

- AFONSO, I. S. *et al.* Conventional and recent advances of vegetable oils as metalworking fluids (MWFs): a review. **Jornal MDPI**, [s.n], 30 mar. 2023. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/369626537_Conventional_and_Recent_Advances_of_Vegetable_Oils_as_Metalworking_Fluids_MWFs_A_Review. Acesso em: 20 jul. 2025.
- ALEIXO, G. de S. **Avaliação do desempenho de ferramentas de metal-duro e cermet no torneamento do aço ABNT 1045**. 2020. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2020. Disponível em:
<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/39640/1/vers%c3%a3o%20final.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- ALMEIDA, P. S. De. **Processos de usinagem**. 1. ed. [S. l.: s. n.], 2015.
- AMORIM, H. J. de. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal-duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002. Disponível em:
<http://hdl.handle.net/10183/3791>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- ANICÉZIO, T. M. F. de. **Avaliação da resistência ao desgaste microabrasivo da liga ti-12cr revestida por filmes finos de TiN e CrN**. 2015. 97 f. Dissertação (Mestrado de Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília. Brasília, 2015. Disponível em:
https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/18434/1/2015_TaiseMariaFrazaoDeAnicezio.pdf. Acesso em: 23 mar. 2025.
- ASM HANDBOOK. **Machining**. 9th. ed. [S. l.]: ASM Handbook, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16080**: motores de combustão interna — camisas de cilindro montadas no bloco com ou sem contato com o fluido refrigerante (tipo molhada e seca respectivamente). 2º ed. [S. l.: s. n.], 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO3685**: ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. [s. l.], n. 1, 2017.
- BLANES, J. M. da S. *et al.* **Otimização da vazão de lubrificação por MQL na usinagem do aço ABNT 1045**. SANTA MARIA: [s. n.], 2022. Disponível em:
<https://www.sistema.abcm.org.br/articleFiles/download/34348>. Acesso em: 31 jul. 2025.
- BOEHS, L.; AGUIAR, C. G.; FERREIRA, J. C. A Usinagem do ferro fundido nodular de fundição contínua. **Máquinas e metais**, [s. l.], p. 58–72, 2000.

BONANDI, M. **Estudo das condições de corte no torneamento do aço Aisi M4 endurecido, utilizando a metodologia de projeto de experimentos**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Nove de Julho, São Paulo. São Paulo, 2012. Disponível em: https://bibliotecatede.uninove.br/bitstream/tede/186/1/B_Marcelo%20Bonandi.pdf. Acesso em: 29 ago. 2025.

BONFÁ, M. M. **Torneamento de aço endurecido AISI D6 utilizando mínima quantidade de fluido de corte**. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14939/1/TorneamentoAcoEndurecido.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2025.

BORELLI, J. E. **Diagnóstico do estado de desgaste de ferramentas para o monitoramento de condições de usinagem de alto desempenho**. 2000. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-14112017-104229/publico/Dissert_Borelli_JoaoE.pdf. Acesso em: 9 mar. 2025.

CALLISTER JR., William D.. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 6.ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2002.

CARDOSO, S.; SANTOS, W.; SALES, F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: [s. n.], 2007.

CARVALHO, S. R. de. **Determinação do campo de temperatura em ferramentas de corte durante um processo de usinagem por torneamento**. 2005. 109 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14729/1/SRCarvalho1TESPRT.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2025.

CERATIZIT GROUP. **Ferramentas de corte – Qual é a cobertura certa?**. [S. l.], 2025a. Disponível em: https://cuttingtools.ceratizit.com/br/pt/conte_uacute_do/turneamento/informa_ccedil_otildees-uacuteteis/ferramentas-de-corte-coberturas.html. Acesso em: 18 jul. 2025.

CERATIZIT GROUP. **metal-duro – de produto do acaso a produto versátil para a proteção contra o desgaste**. [S. l.], 2025b. Disponível em: <https://www.ceratizit.com/int/pt/sustainability/blog/2021/blogposting-cemented-carbide.html>. Acesso em: 15 jul. 2025.

CERATIZIT GROUP. **Usinagem de metal-duro**. [S. l.], 2025c. Disponível em: <https://www.ceratizit.com/int/pt/company/passion-for-cemented-carbide/machining.html>. Acesso em: 15 jul. 2025.

CERVELIN, J. E. **Estudo teórico-experimental das forças de corte no processo de torneamento**. São Carlos: [s. n.], 2009. Disponível em:

<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18140/tde-28092009-152513/publico/JoseEduardoCervelin.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2025.

CHAVDA, M. R. *et al.* Tribological Characterization of TiN Coatings Prepared by Sputtering. **Procedia Technology**, [s. l.], v. 23, p. 36–41, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/372948066_ScienceDirect_Tribological_Characterization_of_TiN_Coatings_prepared_by_Sputtering. Acesso em: 23 mar. 2025.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7° ed. São Paulo: [s. n.], 2005.

CIMM. **Revestimentos superficiais para aços ferramenta**. [S. l.], 2025. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6398-revestimentos-superficiais-para-acos-ferramenta#. Acesso em: 18 jul. 2025.

COSTA, A. F. da. **Análise comparativa de ferramentas revestidas por PVD e CVD no torneamento do aço ABNT 8620**. 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/e5a6ec57-4b32-4c21-887c-5be93a4ff05f/content>. Acesso em: 9 mar. 2025.

CRISTOPHER, J.; GRABEL, J. Machining and grinding of iron castings. **G M. Iron Castings Engineering Handbook**, [s. l.], 2003.

DADIC, Z. Tribological principles and measures to reduce cutting tools wear. **International conference “Mechanical Technologies and Structural Materials” Split**, [s. l.], 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277202973_Tribological_principles_and_measures_to_reduce_cutting_tools_wear. Acesso em: 9 mar. 2025.

DINIZ, A. E.; MARCONDEZ, C. F.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: [s. n.], 2014. Disponível em: https://www.artliber.com.br/amostra/tecnologia_da_usinagem.pdf. Acesso em: 9 mar. 2025.

ENGINEERING PRODUCT DESIGN. **Centrifugal casting**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/centrifugal-casting/#:~:text=Como%20funciona%20a%20fundido%20centr%C3%A7%C3%A3o%20centr%C3%ADfuga%20verdadeira?,pe%20removida%20para%20p%C3%B3s%20processamento>. Acesso em: 15 ago. 2025.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Carlos: [s. n.], 1977. Disponível em: https://www.academia.edu/26166592/Fundamentos_Da_Usinagem_Dos_Metals_Dino_Ferraresi?auto=download. Acesso em: 18 jul. 2025.

GAMA, R. P. **Estudo da formação do cavaco no torneamento de superliga de níquel**. 2014. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade estadual Paulista. Guaratinguetá, 2014. Disponível em: <https://sucupira->

legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=150655. Acesso em: 18 jul. 2025.

GONÇALVES, R. A. **Investigação da usinabilidade das ligas de alumínio da série 6xxx**. 2012. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14911/1/Investiga%c3%a7%c3%a3oUsinabilidadeLigas%20.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2025.

HONG, S. Y.; DING, Y.; JEONG, W. Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti–6Al–4V. **International journal of machine tools and manufacture**, [s. l.], n. 15, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695501000293?via%3Dihub>. Acesso em: 9 mar. 2025.

HUDA, Z. **Machining processes and machines**. [S. l.]: CRC Press, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/347527876_Machining_Processes_and_Machines_Fundamentals_Analysis_and_Calculations Acesso em: 10 mar. 2025.

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Aplicação e classificação dos metais duros de corte**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://docente.ifsc.edu.br/cleverson.guandalin/fic/ClassificacaoMetaisDuros.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2025.

KANLZER, G. **Cobertura em pastilhas intercambiáveis**. [s. l.], 2009. Disponível em: <http://usinagemvirtual.blogspot.com/2009/09/cobertura-em-pastilhas-intercambiaveis.html>. Acesso em: 9 mar. 2025.

KANZLER, G. **Cobertura em pastilhas intercambiáveis**. [S. l.], 2009. Disponível em: <http://usinagemvirtual.blogspot.com/2009/09/cobertura-em-pastilhas-intercambiaveis.html>. Acesso em: 23 mar. 2025.

KLOCKE, F. **Manufacturing process 1: Cutting**. Aachen, Germany: [s. n.], 2019.

KYOCERA. **Insert grades**. [S. l.: s. n.], 2025. Disponível em: https://www.kyocera-components.com.br/catalog/A_EN.pdf. Acesso em: 18 jul. 2025.

LAUZIER, J. **How to identify and reduce tool wear to improve quality**. [s. l.], 2025. Disponível em: <https://www.machinemetrics.com/blog/tool-wear>. Acesso em: 9 mar. 2025.

LEAL, C. A. A. **Torneamento do ferro fundido cinzento com ferramentas de corte texturizadas**. 2015. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-A8ZQUM/1/dissertacao_final.pdf. Acesso em: 9 mar. 2025.

LEMES, C. V. **Estudo da influência dos tipos de revestimentos em ferramentas de metal-duro no torneamento de titânio comercialmente puro grau 4**. 2021. 93

f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=546421>. Acesso em: 9 mar. 2025.

LEMOS, N. C.; DUTRA, J. C.; SANTOS, R. S. dos. Usinabilidade e resistência à usinagem dos materiais: propostas de novas aplicações destas propriedades. *In: 64º Congresso Anual da ABM*, 2009, Belo Horizonte. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/2594-5327-15332. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/usinabilidade-e-resistncia-usinagem-dos-materiais-propostas-de-novas-aplicaes-destas-propriedades>. Acesso em: 9 mar. 2025.

MACHADO, Á. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. [S. l.: s. n.], 2015. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521208440>. Acesso em: 11 maio 2024.

MARQUES, armando. **Torneamento Inconel 718 com aplicação de lubrificantes sólidos**. 2015. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14776/1/TorneamentoInconel718.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2025.

MCKIE, M. Ph.D. Chapter 2 - **Background information on casting methodologies**. *In: [S. l.: s. n.]*, 2015. p. 7–30. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330423261_PhD_Chapter_2_-_Background_Information_on_Casting_Methodologies. Acesso em: 9 mar. 2025.

MEURER, P. R.; BOEHS, L.; GUESSER, W. L. **Usinabilidade de ferro fundido cinzento ligado utilizado na fabricação de discos de freios automotivos**. [S. l.: s. n.], 2007. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2007/files/011039085.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2025.

MITSUBISHI MATERIALS. **Insertos de torneamento**. [S. l.], 2025. Disponível em: https://www.mitsubishicarbide.net/mht/enuk/turning_inserts/no_srs/20092820. Acesso em: 9 mar. 2025.

OERLIKON BALZERS. **Desgaste e tribologia: Efeitos tribológicos**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.oerlikon.com/balzers/br/br/portfolio/tecnologias-de-superficie/desgaste-e-tribologia/#612596>. Acesso em: 18 mar. 2025.

OSCHELSKI, T. B. **Aplicação de métodos alternativos de lubrificação no torneamento da liga de níquel Hastelloy® C-276**. 2020. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/218206>. Acesso em: 13 jul. 2025.

PARSI, P. K. *et al.* Machinability evaluation of coated carbide inserts in turning of super-duplex stainless steel. **Jornal Springer Nature Link**, [s. l.], v. 2, n. 11, 2020.

Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-03570-9>. Acesso em: 30 ago. 2025.

PEIXOTO, A. **Análise da força de corte e rugosidade no torneamento de ferro fundido cinzento utilizando sistemas de resfriamento interno de ferramenta**. 2021. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/32851>. Acesso em:

PIVOTO, L. B. **Aplicação de insertos de metal-duro com diferentes Acabamentos no torneamento da liga Ti-15Mo**. 2020. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de de pós-graduação em engenharia) – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18163/tde-25092020-110400/publico/DissertPivottoLeonildoBernardoCorrig.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2025.

POLLY, M. dos S. **Análise comparativa de ferramentas de metal-duro classe S e cerâmica mista no torneamento a seco e com MQL do aço SAE 4340 endurecido**. 2019. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/194353>. Acesso em: 20 jun. 2025.

REZENDE, B. A. **Modelagem analítica da temperatura de corte no torneamento do ferro fundido vermicular utilizando insertos de metal-duro revestidos experimentalmente pelo processo sol-gel**. 2020. 176 f. Dissertação (Doutorado Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/34978/1/TESE%20-%20BRUNA%20APARECIDA%20REZENDE.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2025.

ROSA, G. C. Da. **Estudo da usinabilidade no torneamento a seco do aço inoxidável martensítico Aisi 420 C endurecido com ferramenta de metal-duro**. 2017. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.

RUIISHI ABRASIVES. **Compreendendo a dureza e as propriedades do material do óxido de alumínio (Al₂O₃)** – um óxido refratário cerâmico. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://ruishi-abrasives.com/pt/blog/dureza-do-oxido-de-aluminio/>. Acesso em: 23 mar. 2025.

SANDVIK COROMANT. **Desgaste das arestas de corte**. [S. l.], 2025a. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/wear-on-cutting-edges>. Acesso em: 9 mar. 2025.

SANDVIK COROMANT. **Estratégias de redução de custos na manufatura**. [S. l.], 2025b. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/manufacturing-wellness/take-a-holistic-perspective/cost-reduction>. Acesso em: 13 jul. 2025.

SANDVIK COROMANT. **Materiais da peça**. [S. l.], 2025c. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/workpiece-materials>. Acesso em: 16 jul. 2025.

- SANDVIK COROMANT. **Materiais de ferramentas de corte**. [S. l.], 2025d. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting-tool-materials>. Acesso em: 16 jul. 2025.
- SANTOS, T. da C. *et al.* Utilização de ferramentas de corte revestidas em processos de usinagem. **International Symposium on Innovation and Technology**, [s. l.], 2019. Disponível em: <https://pdf.blucher.com.br/engineeringproceedings/siintec2019/68.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- SCANDIFFIO, I. **Uma contribuição ao estudo do corte a seco e ao corte com mínima quantidade de lubrificante em torneamento de aço**. 2000. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2000. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detail/197860>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- SECO TOOLS. **Visão geral dos padrões básicos de desgaste singular em usinagem**. [s. l.], 2023. Disponível em: <https://www.secotools.com/article/122073?language=pt>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- SEN, B. *et al.* Eco-Friendly Cutting Fluids in Minimum Quantity Lubrication Assisted Machining: a review on the perception of sustainable manufacturing. **Jornal Springer Nature Link**, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-019-00158-6>. Acesso em: 21 jul. 2025.
- SILVA, A. B. B.; LIMA, R. O. C. Estudo da influência do método de lubrificação no acabamento da peça usinada e na vida da ferramenta de corte. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 12, n. 2, p.15-26, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/r4em/article/view/10996/10969>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- SOORI, M.; AREZOO, B. Cutting tool wear prediction in machining operations, a review. **J. New Technol. Mater**, v. 12, n. 2, pág 15-26, dec., 2022. Disponível em: <https://hal.science/hal-03888252v1>. Acesso em: 15 ago. 2025
- SPAROW HIPOTIND. **Fundição centrífuga: tipos, processos e aplicações Industriais**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://hitopindustrial.com/pt/fundicao-centrifuga/#:~:text=O%20que%20%C3%A9%20fundição%20centrífuga,a%20produção%20de%20componentes%20similares>. Acesso em: 15 ago. 2025.
- ŠRAMHAUSER, K. *et al.* Analyses of tool wear and chip type for different coated carbide inserts in turning hardened 1.6582 steel. **Coatings**, [s. l.], v. 12, n. 7, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-6412/12/7/974>. Acesso em: 30 ago. 2025.
- TAI, B. L. *et al.* Minimum quantity lubrication (MQL) in automotive powertrain machining. *In: Procedia CIRP*. [S. l.]: Elsevier, 2014. p. 523–528. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114001875?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=97cacc7cfd55c55. Acesso em: 20 jul. 2025.

TELES, J. M. **Torneamento de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio utilizando ferramentas de metal-duro**. 2007. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2007. Disponível em:

https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/1799/1/dissertacao_0032817.pdf. Acesso em: 9 mar. 2025.

UPADHYAY, V.; JAIN, P. K.; MEHTA, N. K. Minimum Quantity Lubrication Assisted Turning - An Overview. *In*: DAAAM INTERNATIONAL SCIENTIFIC BOOK, 2012, [S. l.]. **DAAAM International Vienna**, 2012. Disponível em:

<https://scispace.com/pdf/minimum-quantity-lubrication-assisted-turning-an-overview-4z8zq42g95.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2025.

VALIM, D. B. **Usinagem**. Porto Alegre: [s. n.], 2018. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595025110/pageid/1>. Acesso em: 18 jul. 2025.

WRIGHT, P. K.; TRENT, E. **Metal cutting**. 4° ed. [S. l.: s. n.], 2000.

XAVIER, A. F. **Torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN**. 2003. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/84763/195361.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 29 ago. 2025.

ZEILMANN, R. P. **Furação da liga de titânio Ti6Al4V com mínimas quantidades de fluido de corte**. 2003. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003. Disponível em:

<https://core.ac.uk/download/pdf/30367469.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2025.