

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Jonathan Freitas Lisboa Rodrigues

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO QUEBRA-CAVACO
NA USINAGEM DE AÇO 4140 TEMPERADO COM FERRAMENTAS
REVESTIDAS**

Betim
2026

JONATHAN FREITAS LISBOA RODRIGUES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO QUEBRA-CAVACO
NA USINAGEM DE AÇO 4140 TEMPERADO COM FERRAMENTAS
REVESTIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Ismael Nogueira Rabelo de Melo

Betim
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

R696a Rodrigues, Jonathan Freitas Lisboa

Análise da influência da geometria do quebra-cavaco na usinagem de aço 4140 temperado com ferramentas revestidas / Jonathan Freitas Lisboa Rodrigues. – 2026.

50 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Me. Ismael Nogueira Rabelo de Melo

1. Processos de fabricação. 2. Usinagem. 3. Torneamento. 4. Desgaste de ferramenta. 5. Engenharia Mecânica. I. Rodrigues, Jonathan Freitas Lisboa. II. Título

CDU: 621.7

Jonathan Freitas Lisboa Rodrigues

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO QUEBRA-CAVACO
NA USINAGEM DE AÇO 4140 TEMPERADO COM FERRAMENTAS
REVESTIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 02 / 06 / 2026 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 ISMAEL NOGUEIRA RABELO DE MELO
Data: 06/08/2026 13:25:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Ismael Nogueira Rabelo de Melo (Orientador) - IFMG

Documento assinado digitalmente
 EVANILTON JOSE ALVES BARBOSA
Data: 04/08/2026 17:38:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Evanilton José Alves Barbosa - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

Documento assinado digitalmente
 GABRIEL MENDES DE ALMEIDA CARVALHO
Data: 29/07/2026 13:33:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais

Dedico este trabalho aos meus pais, que me ofereceram apoio incansável e foram minha inspiração durante toda esta jornada. À minha querida avó, que com sua sabedoria e carinho, sempre acreditou no meu potencial. E ao meu irmão, cuja presença e apoio tornaram tudo mais leve. Esta conquista é tanto minha quanto de vocês, que me deram força nos momentos difíceis e alegria nos momentos de vitória. Obrigado por tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por serem minha base, pelo suporte inabalável, e por me incentivarem a nunca desistir. À minha querida avó, por acreditar em mim mesmo quando eu duvidava do meu potencial. Ao meu irmão, oferecendo apoio em cada etapa deste caminho. Gostaria também de estender minha gratidão aos meus professores e orientador, cuja dedicação e conhecimento me guiaram durante o processo acadêmico, além de me motivarem a explorar sempre mais. Agradeço ainda aos amigos e colegas, por compartilharem comigo momentos de estudo, dúvidas e conquistas, tornando essa caminhada mais leve e significativa.

"A maior recompensa para o trabalho do homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso."
John Ruskin.

RESUMO

O torneamento de aços endurecidos impõe severas condições termomecânicas às ferramentas de corte, tornando a seleção do inserto um fator crítico para o sucesso da operação. Este trabalho investiga experimentalmente o desempenho de duas estratégias de usinagem para o aço SAE 4140 temperado (48,50 HRC): uma baseada na máxima robustez da aresta, utilizando um inserto com quebra-cavaco para desbaste pesado (RP-MC6035); e outra focada na minimização dos esforços de corte, com um quebra-cavaco para usinagem geral (MA-UE6020). Foram realizados ensaios de torneamento contínuo, avaliando-se o dano na ferramenta por microscopia óptica e a qualidade da peça por meio da rugosidade superficial (R_a e R_t). Os resultados demonstraram que, contrariamente à expectativa, o inserto de máxima robustez sofreu fratura catastrófica da aresta, resultando em um acabamento superficial inferior. Em contrapartida, o inserto de uso geral apresentou desgaste progressivo e controlado, gerando superfícies de melhor qualidade. A análise estatística confirmou uma forte correlação entre a área danificada da ferramenta e o aumento da rugosidade. Conclui-se que, para a condição de corte contínuo e severo, a estratégia de minimizar as forças de usinagem por meio de uma geometria de corte eficiente foi mais determinante para a preservação da ferramenta do que a aplicação de uma aresta robusta com elevada tenacidade.

Palavras-chave: Usinagem, Aço SAE 4140, Torneamento, Desgaste de Ferramentas, Rugosidade Superficial.

ABSTRACT

The turning of hardened steels imposes severe thermomechanical conditions on cutting tools, making insert selection a critical factor for operational success. This study experimentally investigates the performance of two distinct machining strategies for hardened SAE 4140 steel (48.50 HRC): one based on maximum cutting edge robustness, using an insert with a chipbreaker for heavy roughing (RP-MC6035); and another focused on minimizing cutting forces, with a chipbreaker for general machining (MA-UE6020). Continuous turning tests were conducted, evaluating tool damage via optical microscopy and part quality through surface roughness (R_a and R_t). The results showed that, contrary to expectations, the maximum robustness insert suffered catastrophic edge fracture, resulting in an inferior surface finish. Conversely, the general-purpose insert exhibited progressive and controlled wear, producing higher-quality surfaces. Statistical analysis confirmed a strong correlation between the damaged tool area and increased roughness. It is concluded that, for severe continuous cutting conditions, the strategy of minimizing cutting forces through a more efficient cutting geometry was more decisive for tool preservation than applying a robust edge with high toughness.

Keywords: Machining, SAE 4140 Steel, Turning, Tool Wear, Surface Roughness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ângulos de saída e de folga de uma ferramenta de corte genérica.	18
Figura 2 – Arestas de corte e superfícies da parte de corte de uma ferramenta de torneamento.	19
Figura 3 – Ângulos de saída, cunha e folga da ferramenta representados no plano de trabalho.	20
Figura 4 – Força de usinagem e suas diversas componentes na operação de torneamento.	22
Figura 5 – Avanço por dente, avanço de corte e avanço efetivo de corte no fresamento tangencial discordante.	23
Figura 6 – Gradiente de pressão no centro da face de saída, no ponto de interferência.	24
Figura 7 – Deformação de cavaco conforme profundidade de corte.	24
Figura 8 – Desgaste de cratera que romperá a ponta da ferramenta.	25
Figura 9 – Desgaste por aresta postiça.	25
Figura 10 – Microscopias ópticas do aço SAE 4140 laminado e temperado.	34
Figura 11 – Posições de medição de dureza nas amostras como recebida e temperada.	35
Figura 12 – Dureza em função da distância - Amostra sem tratamento.	36
Figura 13 – Dureza em função da distância - Amostra com tratamento.	37
Figura 14 – Gráfico de barras Rugosidade Média Aritmética e Rugosidade Total	38
Figura 15 – Microscopia óptica dos insertos MA-UE6020 e RP-MC6035 antes e após ensaios de usinagem.	40
Figura 16 – Gráficos de dispersão correlacionando a área total danificada com as rugosidades R_a e R_t	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Composição química do aço SAE 4140 conforme SAE J404.	28
Tabela 2	– Condições de passe no torneamento externo.	31
Tabela 3	– Médias e desvios padrão das rugosidades RA e RT usinando com MA-UE6020 e RP-MC6035	38
Tabela 4	– Áreas de fraturas nos planos frontal, superior e transversal	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AP	Profundidade de Passe
CCT	Diagrama de Transformação por Resfriamento Contínuo
CNC	Comando Numérico Computadorizado
COPANT	Comissão Pan-Americana de Normas Técnicas
CVD	Deposição Química de Vapor (do inglês, Chemical Vapor Deposition)
DRX	Difração de Raios X
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X
HRC	Dureza Rockwell C
IC	Intervalo de Confiança
ISO	Organização Internacional para Padronização
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
PVD	Deposição Física de Vapor (do inglês, Physical Vapor Deposition)
TTT	Diagrama de Tempo-Temperatura-Transformação
UNS	Sistema Unificado de Numeração (do inglês, Unified Numbering System)

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Intercepto da reta de regressão
A_{α}	Superfície de folga
A_{γ}	Superfície de saída
b	Coeficiente angular da reta de regressão
f	Avanço
f_c	Avanço de corte
f_e	Avanço efetivo de corte
f_z	Avanço por dente
F_{ap}	Força de apoio (N)
F_c	Força de corte (N)
F_e	Força efetiva de corte (N)
F_f	Força de avanço (N)
F_t	Força ativa (N)
F_u	Força de usinagem (N)
n	Número total de observações
P_f	Plano admitido de trabalho
P_o	Plano ortogonal
P_p	Plano dorsal da ferramenta
P_r	Plano de referência da ferramenta
P_s	Plano de corte
r	Coeficiente de correlação de Pearson
R_a	Rugosidade Média Aritmética (μm)
R_t	Rugosidade Total (μm)
s_y	Erro padrão dos resíduos
t	Valor crítico da distribuição t de Student

$x, \bar{x}$	Variável independente (Área danificada) e sua média amostral
$y, \bar{y}$	Variável dependente (Rugosidade) e sua média amostral
$\hat{y}$	Valor predito pela regressão
Z	Número de dentes da ferramenta
α	Ângulo de folga
β	Ângulo de cunha
γ	Ângulo de saída
ε_r	Ângulo de ponta
λ_s	Ângulo de inclinação da ferramenta
λ_{se}	Ângulo de inclinação efetivo
χ_r	Ângulo de posição da ferramenta
χ'_r	Ângulo de posição da aresta secundária
χ_{re}	Ângulo de posição efetivo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>15</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>15</i>
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	USINAGEM	17
<i>2.1.1</i>	<i>Torneamento</i>	<i>17</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Geometria de corte</i>	<i>18</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Força de corte</i>	<i>21</i>
<i>2.1.4</i>	<i>Grandezas de usinagem</i>	<i>22</i>
<i>2.1.5</i>	<i>Revestimentos</i>	<i>26</i>
<i>2.1.6</i>	<i>Classificação dos aços</i>	<i>27</i>
2.2	O aço SAE4140	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	Materiais utilizados	30
3.2	Preparação das amostras	30
3.3	Tratamento térmico	30
3.4	Usinagem	31
3.5	Análise metalográfica e medições	31
3.6	Medição das áreas danificadas	31
3.7	Análise estatística	31
<i>3.7.1</i>	<i>Coeficiente de Correlação de Pearson</i>	<i>32</i>
<i>3.7.2</i>	<i>Ajuste da Regressão Linear</i>	<i>32</i>
<i>3.7.3</i>	<i>Intervalo de Confiança da Regressão</i>	<i>32</i>
<i>3.7.4</i>	<i>Representação Gráfica</i>	<i>33</i>
<i>3.7.5</i>	<i>Procedimentos complementares</i>	<i>33</i>
4	RESULTADOS	34
4.1	Microscopia óptica	34
4.2	Dureza	35

4.3	Desgaste da Ferramenta e o Acabamento Superficial	38
4.4	Correlação entre o Dano na Ferramenta e a Rugosidade	42
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	45
5.1	Conclusões	45
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Até meados do século XVIII, a madeira era o principal material empregado na fabricação de peças de engenharia, com poucas exceções. Para sua usinagem, utilizavam-se ferramentas de aço-carbono. Com a Revolução Industrial, surgiram novos materiais mais resistentes, o que impulsionou o desenvolvimento dos aços-liga como ferramentas de corte, tornando o processo de manufatura mais eficiente e durável (MACHADO *et al.*, 2015).

Em 1797, Henry Maudslay desenvolveu o primeiro torno com avanço automático, revolucionando a manufatura ao permitir a produção de roscas com passo definido de forma precisa e padronizada. Esse avanço foi fundamental para a mecanização da produção e para o aprimoramento da engenharia industrial (MACHADO *et al.*, 2015).

No século XX, surgiram produtos fabricados com materiais mais duráveis e, consequentemente, mais difíceis de serem usinados. O advento das ferramentas de aço rápido, seguido pelo desenvolvimento das ferramentas de carboneto de tungstênio, possibilitou a usinagem de aços e outros materiais metálicos com produtividade crescente. Esse avanço foi impulsionado pelos progressos tecnológicos no campo das máquinas-ferramentas, incluindo o desenvolvimento de máquinas automáticas e, posteriormente, de máquinas comandadas numericamente (CN), que elevaram a precisão e a eficiência dos processos de manufatura (MACHADO *et al.*, 2015).

Por fim, a partir da década de 1940, os processos não convencionais de usinagem começaram a ganhar destaque devido à sua capacidade de fabricar peças com geometria complexa em materiais de difícil usinabilidade. Esses métodos possibilitaram a obtenção de acabamentos de alta qualidade e tolerâncias dimensionais mais estreitas, atendendo às exigências crescentes da indústria em termos de precisão e desempenho (MACHADO *et al.*, 2015).

A usinagem é um conjunto de processos nos quais um material bruto é cortado e moldado para atingir o formato e o tamanho final desejado, por meio de um controle preciso da remoção de material. O significado do termo "usinagem" evoluiu ao longo dos últimos dois séculos, acompanhando os avanços tecnológicos e as demandas industriais. Os processos de usinagem mais tradicionais incluem torneamento, mandrilamento, furação, fresamento, serramento, brochamento, modelagem, aplainamento, alargamento e rosqueamento. Nos métodos convencionais de usinagem, as máquinas-ferramentas, como tornos, fresadoras, plainas e brochadoras, são utilizadas em conjunto com ferramentas de corte afiadas, permitindo a remoção controlada do material para alcançar uma geometria precisa e eficiente (PRIMO, 2024).

Com o advento de novas tecnologias, como máquinas CNC, usinagem por descarga elétrica, usinagem eletroquímica, usinagem por feixe de elétrons, usinagem fotoquímica e usinagem ultrassônica, a usinagem convencional passou a ser distinta dessas abordagens mais modernas. O termo "usinagem", quando não acompanhado de uma qualificação específica, geralmente se refere aos processos tradicionais do setor. Embora amplamente utilizada na fabricação de produtos metálicos, a usinagem também é empregada na transformação de materiais como madeira,

plástico, cerâmica e compósitos, ampliando sua aplicação em diversas indústrias (PRIMO, 2024).

O torno é uma máquina-ferramenta utilizada para girar a peça em seu eixo, permitindo a realização de diversas operações, como corte, lixamento, recartilhamento, furação, conformação, faceamento e torneamento. Durante o processo, ferramentas de corte são aplicadas à peça para moldá-la, garantindo simetria e precisão na usinagem (PRIMO, 2024).

Diante do desafio de usinar materiais de elevada dureza, como o aço SAE 4140 temperado, a seleção da ferramenta de corte torna-se um fator crítico. Este trabalho se propõe a investigar o impacto de duas filosofias distintas de aplicação de ferramentas, ambas recomendadas pelo mesmo fabricante para o torneamento de aços. Foram selecionados dois insertos com geometria base ISO CNMG: o primeiro, **RP-MC6035**, representa a estratégia de máxima robustez, sendo a principal indicação para desbaste pesado devido à sua aresta reforçada e elevada tenacidade. O segundo, **MA-UE6020**, representa a abordagem de minimização dos esforços de corte, com uma geometria mais afiada, recomendada para a usinagem geral. A presente pesquisa justifica-se, portanto, pela necessidade de avaliar experimentalmente qual dessas estratégias — máxima robustez ou mínimo esforço de corte — se mostra mais eficaz na preservação da integridade da ferramenta e na obtenção de um acabamento superficial adequado sob condições de torneamento contínuo e severo, gerando conhecimento prático para a otimização de processos de usinagem de materiais endurecidos.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

Avaliar a influência da geometria do quebra-cavaco e da classe do metal duro no desempenho de ferramentas de corte ISO CNMG durante o torneamento de aço SAE 4140 temperado, focando na integridade da ferramenta e na qualidade do acabamento superficial.

1.1.2 *Objetivos específicos*

- Caracterizar microestruturalmente e mecanicamente o aço SAE 4140 nas condições "como recebido" e após o tratamento térmico de têmpera, a fim de validar as propriedades do material de trabalho.
- Analisar comparativamente o acabamento superficial (rugosidades R_a e R_t) da peça usinada com um inserto de geometria robusta para desbaste (RP-MC6035) e um de geometria para usinagem geral (MA-UE6020).
- Investigar e quantificar os mecanismos de dano e desgaste que se manifestaram em cada tipo de inserto sob condições de corte severas.

- Estabelecer a correlação entre o nível de dano na aresta de corte da ferramenta e a degradação do acabamento superficial da peça, justificando a escolha da ferramenta mais adequada para a operação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 USINAGEM

As operações de usinagem são processos mecânicos que visam dar forma à peça, ajustar suas dimensões ou melhorar seu acabamento superficial, ou ainda combinar esses três aspectos, por meio da remoção de material. Esse material removido é conhecido como cavaco. O cavaco corresponde à porção do material retirada da peça pela ação da ferramenta de corte. Ele se caracteriza por apresentar uma forma geométrica irregular, resultante das forças envolvidas no processo e da natureza do material trabalhado (FERRARESI, 2018).

2.1.1 Torneamento

A usinagem pode ser considerada um processo complexo, principalmente pelas dificuldades em se determinar, de forma precisa, as condições ideais de corte, que muitas vezes são imprevisíveis. Por outro lado, também é um processo simples, pois, uma vez que essas condições são corretamente estabelecidas, o cavaco se forma de maneira adequada, dispensando qualquer intervenção constante do operador. As condições ideais de corte são aquelas que permitem a produção de peças dentro das especificações de forma, tamanho e acabamento exigidos, com o menor custo possível (MACHADO *et al.*, 2015).

Em um torno mecânico, amplamente utilizado na usinagem de metais, o material é removido da peça por meio de ferramentas de corte. Essas ferramentas são, geralmente, fixadas em uma placa móvel sólida, como um poste de ferramenta ou uma torre porta-ferramenta, que se desloca contra a peça utilizando volantes manuais ou motores controlados por computador, como ocorre nos sistemas CNC (Controle Numérico Computadorizado). As ferramentas de corte apresentam grande variedade de formatos e tamanhos, de acordo com suas aplicações, sendo os modelos redondo, quadrado e triangular alguns dos mais comuns (PRIMO, 2024).

O porta-ferramentas é movimentado por parafusos de avanço, que permitem o posicionamento preciso da ferramenta em diversos planos. Essa movimentação pode ser feita de forma manual ou automática, possibilitando a execução de cortes de desbaste, acabamento, além de operações mais complexas, como a usinagem de roscas. Além disso, o processo envolve recursos auxiliares fundamentais, como resfriamento, lubrificação e remoção das limalhas da peça de trabalho. Em tornos modernos, o controle computacional permite operações contínuas e em larga escala, com alto grau de repetibilidade e precisão (PRIMO, 2024).

Nos tornos manuais, é comum a presença de um trem de engrenagens com relação variável, utilizado para acionar o parafuso de avanço principal, permitindo o corte de diferentes passos de rosca. Em modelos mais antigos, ou em tornos mais acessíveis, as engrenagens são trocadas manualmente, ajustando o número de dentes conforme a necessidade. Já os tornos manuais mais modernos costumam contar com caixas de troca rápida, que oferecem relações de transmissão pré-

definidas para facilitar o trabalho do operador. Por sua vez, os tornos CNC utilizam computadores e servomecanismos para controlar com precisão os movimentos da ferramenta e da peça (PRIMO, 2024).

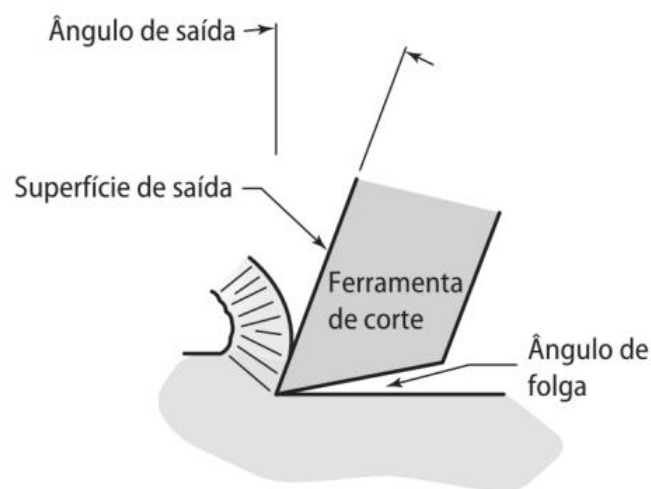
Com o avanço das tecnologias, cada nova geração de processadores torna os sistemas mais rápidos, o que permite a operação das máquinas em velocidades e rotações cada vez mais elevadas. Como consequência, as ferramentas de corte também precisam evoluir, sendo desenvolvidas com novas composições, revestimentos inovadores e até com cristais artificiais aplicados à superfície, sempre buscando maior desempenho e durabilidade (FITZPATRICK, 2013).

Além dos materiais, a geometria das ferramentas de corte também passa por constantes aprimoramentos. Simulações computacionais permitem analisar com maior precisão o comportamento do cavaco ao escoar pela ferramenta em altas velocidades, auxiliando no desenvolvimento de formas mais eficientes. Apesar das melhorias, essas ferramentas ainda enfrentam limites impostos pelas exigências dos modernos sistemas CNC, o que impulsiona a inovação contínua no setor (FITZPATRICK, 2013).

2.1.2 Geometria de corte

Independentemente do tipo ou da aplicação, todas as ferramentas de corte compartilham quatro características geométricas fundamentais: ângulo de saída, ângulo de posição, raio de ponta e ângulo de folga, como ilustrado na Figura 1. Cada uma dessas características deve estar presente em proporções específicas para garantir o bom desempenho da ferramenta, sendo consideradas a base da geometria de corte (FITZPATRICK, 2013).

Figura 1 – Ângulos de saída e de folga de uma ferramenta de corte genérica.



Fonte: Fitzpatrick (2013).

Durante a formação do cavaco, duas ações ocorrem simultaneamente. Primeiramente, ocorre o cisalhamento na região onde a aresta cortante da ferramenta separa o cavaco da matéria-

prima. Em seguida, tem início o recalque do material na face de saída da ferramenta, forçando o cavaco a escoar para cima pela superfície da ferramenta (FITZPATRICK, 2013).

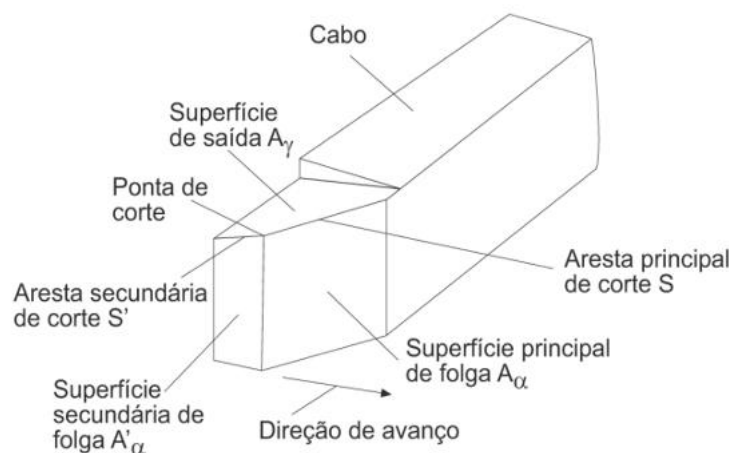
A superfície de saída da ferramenta, que compõe a cunha de corte, tem a função de redirecionar o fluxo do cavaco. Em vez de seguir o caminho natural que tomaria após o cisalhamento, o cavaco é curvado pela presença dessa superfície, sofrendo uma deformação contínua. Esse processo é conhecido como deformação do cavaco e resulta da flexão imposta pela geometria da ferramenta (FITZPATRICK, 2013).

A parte ativa da ferramenta de corte é composta pelas cunhas de corte, que podem ser integradas a um suporte ou fixadas em um corpo maior, facilitando sua montagem, afiação, substituição, controle dimensional e operação durante o processo de usinagem. A fixação da ferramenta pode ocorrer por meio de uma superfície de apoio ou através de seu eixo.

A cunha de corte é definida pela interseção entre duas superfícies fundamentais: a superfície de saída (A_γ), por onde o cavaco se forma e escoar durante o corte; e a superfície de folga (A_α), que contém a aresta principal de corte e está posicionada imediatamente atrás da superfície de trabalho da peça, evitando o atrito direto com ela.

Esses elementos estão representados na Figura 2, ilustrando a geometria básica de uma ferramenta de corte.

Figura 2 – Arestas de corte e superfícies da parte de corte de uma ferramenta de torneamento.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (1999).

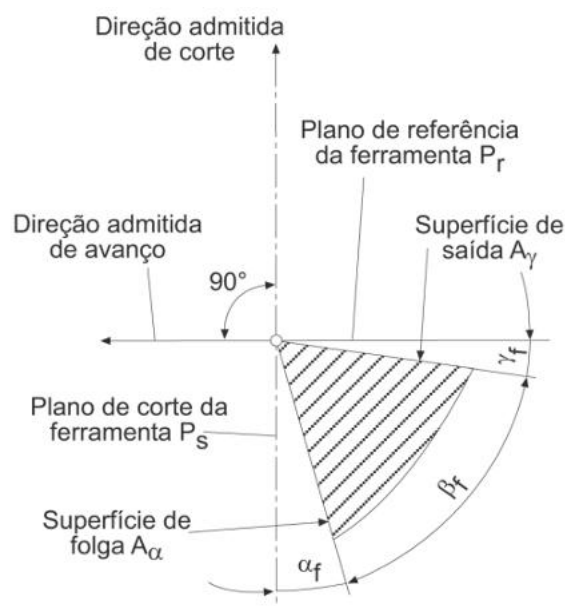
A correta definição da geometria de uma ferramenta de corte é essencial para a usinagem e se baseia em um sistema de planos e ângulos. O ponto de partida para essa definição é o **plano de referência da ferramenta** (P_r), que estabelece a orientação fundamental da cunha de corte. Sua posição varia conforme a aplicação: em ferramentas de barra, como as de torneamento, ele é paralelo ao plano de apoio; já em ferramentas rotativas, como fresas, ele contém o eixo de

rotação da ferramenta. Essa definição garante que a geometria seja analisada de forma consistente, independentemente do tipo de operação (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

A partir do plano de referência, outros três planos auxiliares são estabelecidos para criar um sistema de coordenadas tridimensional que descreve a posição da aresta de corte. O **plano de corte** (P_s) é perpendicular ao plano de referência e tangente à aresta de corte, definindo a direção principal do corte. Ortogonal a ambos, o **plano ortogonal** (P_o) completa a orientação espacial. Finalmente, o **plano admitido de trabalho** (P_f) é definido como paralelo à direção do avanço da ferramenta, sendo crucial para o posicionamento da ferramenta em relação à peça. Em conjunto, estes quatro planos formam a base sobre a qual todos os ângulos da ferramenta são medidos, influenciando diretamente sua eficiência e precisão (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Com o sistema de planos estabelecido, a geometria da parte ativa da ferramenta é precisamente descrita por uma série de ângulos. Dentre os mais importantes estão o **ângulo de posição da ferramenta** (χ_r), que orienta a aresta de corte principal em relação à direção de avanço, e o **ângulo de inclinação** (λ_s), que mede a inclinação da aresta em relação ao plano de referência, influenciando a direção de escoamento do cavaco. O **ângulo de saída** (γ_s), por sua vez, é um dos mais críticos, pois determina a facilidade com que o cavaco é formado e escoado pela face da ferramenta. A combinação desses e de outros ângulos, como o de ponta (ϵ_r) e o de posição da aresta secundária (χ'_r), é fundamental, pois afeta diretamente as forças de usinagem, o acabamento superficial da peça e a vida útil da ferramenta, conforme ilustrado na Figura 3 (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Figura 3 – Ângulos de saída, cunha e folga da ferramenta representados no plano de trabalho.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (1999).

O ângulo de cunha da ferramenta é formado entre as superfícies de saída e de folga, sendo crucial para a geometria da ferramenta. Já o ângulo de folga da ferramenta representa a inclinação

entre a superfície de folga e o plano de corte, garantindo o funcionamento eficiente e evitando atrito excessivo durante a usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Os ângulos do sistema efetivo de referência correspondem aos ângulos do sistema de referência da ferramenta, com definições semelhantes. Os principais ângulos efetivos são: ângulo de posição efetivo (χ_{re}), entre o plano de trabalho e o plano efetivo de corte; ângulo de inclinação efetivo (λ_{se}), entre a aresta principal de corte e o plano efetivo de referência; ângulo de saída efetivo, entre a superfície de saída e o plano efetivo de referência, podendo ser medido sobre diferentes planos (ortogonal, de trabalho ou dorsal); ângulo de cunha efetivo, entre as superfícies de folga e de saída, também medido sobre os mesmos planos; e ângulo de folga efetivo, entre a superfície de folga e o plano efetivo de corte, igualmente definido nos diversos planos mencionados. Esses ângulos são fundamentais para ajustar a geometria e o desempenho da ferramenta em operações de usinagem, garantindo eficiência e precisão no corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (1999), para os ângulos de folga, cunha e saída definidos nos planos **ortogonais da ferramenta** (P_o), **admitido de trabalho** (P_f) e **dorsal da ferramenta** (P_p), aplicam-se as seguintes relações:

$$\alpha_o + \beta_o + \gamma_o = 90^\circ$$

$$\alpha_f + \beta_f + \gamma_f = 90^\circ$$

$$\alpha_p + \beta_p + \gamma_p = 90^\circ$$

Essas equações garantem a consistência geométrica nos ângulos para cada plano referido (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

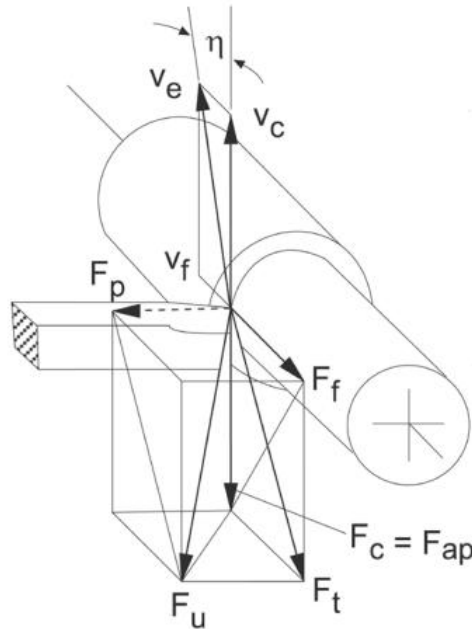
2.1.3 Força de corte

As forças de usinagem são ações exercidas pela peça sobre a ferramenta durante o processo de corte. A força total resultante que atua na cunha cortante é chamada de força de usinagem (F_u). No entanto, tanto a direção quanto o sentido dessa força são inicialmente desconhecidos, o que torna difícil medi-la e compreender as influências de vários parâmetros em seu valor (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Os componentes da força ativa (F_t) são projeções da força de usinagem (F_u) no plano de trabalho e desempenham um papel essencial na potência de usinagem, atuando diretamente nos movimentos do processo. Esses componentes, como pode ser visto na Figura 4, incluem a força de corte (F_c), que representa a projeção de F_u na direção de corte; a força de avanço (F_f), que corresponde à projeção de F_u na direção de avanço, promovendo o movimento da ferramenta; a força de apoio (F_{ap}), que é a projeção de F_u na direção perpendicular ao avanço, garantindo a

estabilidade no plano de trabalho; e a força efetiva de corte (F_e), que se refere à projeção de F_u na direção de corte efetiva, otimizando o processo de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Figura 4 – Força de usinagem e suas diversas componentes na operação de torneamento.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (1999).

2.1.4 Grandezas de usinagem

São grandezas que devem ser ajustadas na máquina de forma direta ou indireta. O avanço (f) é definido como o percurso de avanço em cada volta da ferramenta (mm/rev) ou em cada curso (mm/golpe). Para ferramentas com mais de um dente, como as fresas, distingue-se ainda o avanço por dente (f_z), que representa o percurso de avanço de cada dente, medido na direção de avanço da ferramenta e correspondente à geração de duas superfícies consecutivas em usinagem. Na usinagem, especialmente no processo de fresamento, o avanço discordante (também conhecido como fresamento discordante) é o método onde o sentido de rotação da ferramenta (fresa) é oposto ao sentido de avanço da peça que está sendo usinada (MACHADO *et al.*, 2015). A relação é dada pela equação:

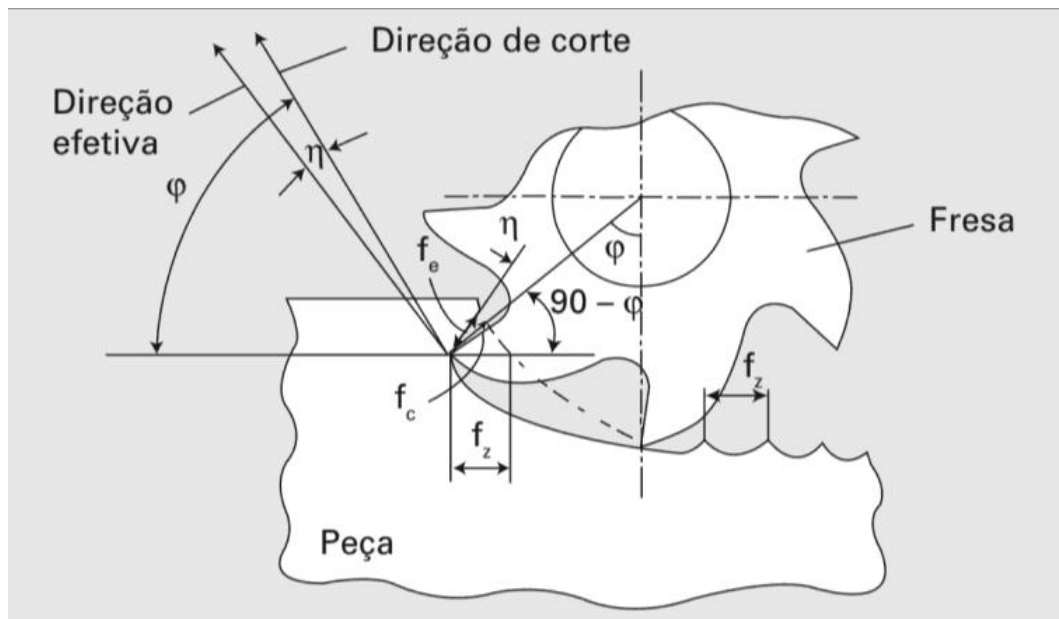
$$f = f_z \cdot Z$$

Onde:

- f é o avanço (mm/rev).
- f_z é o avanço por dente (mm/dente).
- Z é o número de dentes da ferramenta.

O avanço por dente (f_z) pode ser decomposto em avanço de corte (f_c) e avanço efetivo de corte (f_e). O avanço de corte (f_c) é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem, medida na direção perpendicular à direção de corte, no plano de trabalho. Já o avanço efetivo de corte (f_e) corresponde à distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem, como pode ser visto na Figura 5, medida na direção perpendicular à direção efetiva de corte, no plano de trabalho (MACHADO *et al.*, 2015).

Figura 5 – Avanço por dente, avanço de corte e avanço efetivo de corte no fresamento tangencial discordante.



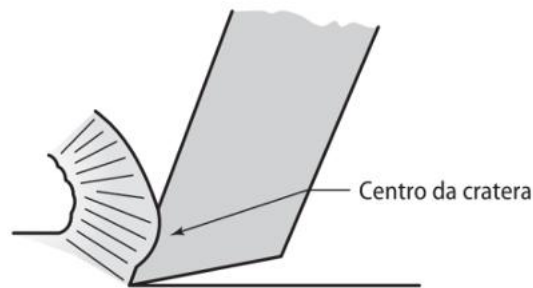
Fonte: Machado *et al.* (2015).

Escolher corretamente as velocidades de corte e o avanço pode estender a durabilidade da ferramenta de corte. O processo de usinagem gera cavacos e distribui a pressão na superfície de saída. Essa pressão aumenta a partir da ponta de corte até a parte posterior da aresta de corte e diminui até o limite de contato entre o cavaco e a ferramenta (FITZPATRICK, 2013).

A evidência dessa pressão gradativa é vista em áreas desgastadas na ferramenta usada sem refrigeração, causadas pelo atrito, como pode ser visto na Figura 6. Essas áreas podem formar crateras que comprometem a ferramenta. O centro da cratera, chamado de ponto de interferência ou de contato, é onde a pressão é mais intensa. Entender e controlar esses fatores é essencial para prevenir danos e maximizar a eficiência da usinagem (FITZPATRICK, 2013).

A pressão no ponto de interferência pode atingir níveis extremos, como 100 mil libras por polegada quadrada, concentrada em pontos microscópicos de contato. Em condições sem refrigeração ou com altas velocidades de corte, o calor pode causar a soldagem do cavaco à ferramenta (aresta postiça de corte), resultando em um ciclo de solda-quebra-solda, onde o material da peça adere à superfície da ferramenta, gerando a aresta postiça de corte. Com a continuidade da usinagem, essa aresta perde a capacidade de corte, aumentando o esforço

Figura 6 – Gradiente de pressão no centro da face de saída, no ponto de interferência.

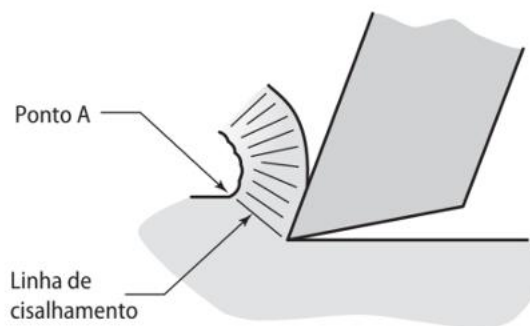


Fonte: Fitzpatrick (2013).

mecânico até que a parte soldada se rompe de forma abrupta. Logo em seguida, o processo se repete com uma nova aderência de material. Esse processo provoca crateração e compromete o acabamento da peça usinada, esse fenômeno é muito comum na usinagem de materiais dúcteis (como aços de baixo carbono ou alumínio) sob certas velocidades de corte (FITZPATRICK, 2013).

O processo de usinagem envolve um "fluxo" contínuo de metal ao longo da linha de cisalhamento, no ângulo de cisalhamento presente no cavaco. O atrito externo empilha o cavaco, tornando-o mais grosso e friccionando os grãos de metal. A maior parte do calor gerado vem do atrito interno, originando-se no cavaco e sendo conduzido para o exterior. Para reduzir o aquecimento e o atrito interno, recomenda-se aumentar o ângulo de cisalhamento, diminuindo a linha de cisalhamento, como pode ser visto na Figura 7. Isso melhora a eficiência da usinagem (FITZPATRICK, 2013).

Figura 7 – Deformação de cavaco conforme profundidade de corte.



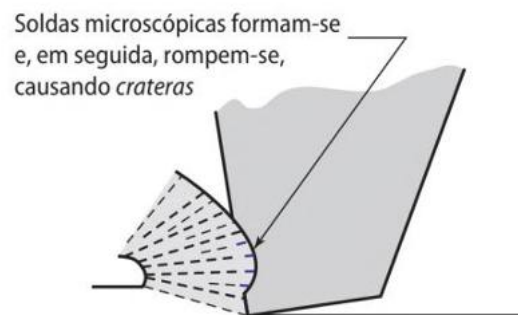
Fonte: Fitzpatrick (2013).

Na usinagem, quando falamos que uma ferramenta (ou um inserto/pastilha) é positiva ou negativa, estamos nos referindo principalmente à sua geometria de corte — especificamente ao ângulo de saída (γ) e ao ângulo de folga (α). Ferramentas com geometria positiva produzem menos calor, exigem menos força de corte e geram cavacos mais frios, mas são frágeis e propensas ao superaquecimento, uma ferramenta é considerada positiva quando o seu gume de corte é

"afiado" e inclinado para trás, afastando-se da peça. Ela possui um ângulo de folga integrado no próprio corpo da pastilha. Já as ferramentas de geometria negativa são mais resistentes, dissipam melhor o calor e consomem menos energia, embora causem maior deformação, aquecimento e pressão devido ao aumento da linha de cisalhamento, uma ferramenta é negativa quando a sua aresta de corte forma um ângulo reto (90°) com a peça ou está inclinada "contra" o avanço. A pastilha possui paredes totalmente verticais (ângulo de folga de 0°). Esse equilíbrio entre desempenho, durabilidade e eficiência energética é fundamental na escolha da ferramenta ideal para usinagem (FITZPATRICK, 2013).

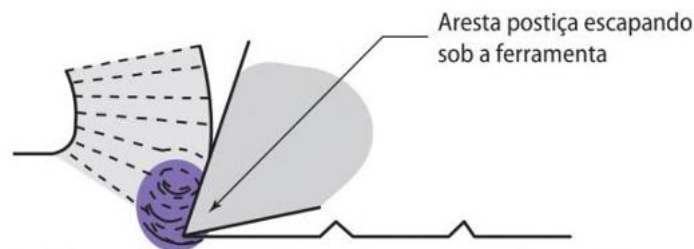
Com o aumento da taxa de remoção ao máximo, como pode ser visto nas Figuras 8 e 9, surgem dois problemas principais devido ao atrito no ponto de interferência: o desgaste da cratera, que pode danificar a ferramenta de corte, e a formação de aresta postiça de corte, que prejudica o acabamento da peça. A aresta postiça é causada por uma soldagem mais firme, na qual o metal recua, criando pressão até que a solda seja rompida. Ambos os problemas estão ligados à alta pressão na área de interferência (FITZPATRICK, 2013).

Figura 8 – Desgaste de cratera que romperá a ponta da ferramenta.



Fonte: Fitzpatrick (2013).

Figura 9 – Desgaste por aresta postiça.



Fonte: Fitzpatrick (2013).

A usinabilidade de um metal está intrinsecamente ligada à sua resistência à deformação plástica. Metais mais dúcteis, como o alumínio, deformam-se com maior facilidade e geram menos aquecimento durante o corte. Já os aços, por sua vez, possuem maior resistência ao cisalhamento, exigindo mais potência da máquina e gerando temperaturas mais elevadas na zona de corte. De forma análoga, a experiência de modelar argila demonstra que o material quente é

mais maleável que o frio, ilustrando o princípio fundamental de que o aumento da temperatura reduz a resistência do material à deformação (FITZPATRICK, 2013).

Para além da resistência intrínseca do material da peça, a durabilidade da ferramenta de corte depende de sua capacidade de resistir a múltiplos mecanismos de desgaste, que podem atuar de forma isolada ou combinada (Sandvik Coromant, 2025). O mecanismo mais comum é o **desgaste de flanco**, de natureza predominantemente abrasiva, causado pelo atrito de partículas duras presentes no material da peça. Este tipo de desgaste é geralmente progressivo e permite uma previsão mais segura da vida útil da ferramenta.

Em paralelo, podem ocorrer fenômenos de base adesiva e química. A formação de uma **aresta postiça de corte** ocorre pela soldagem de micropartículas do cavaco sobre a face da ferramenta, especialmente em materiais pastosos e a baixas velocidades, enquanto o **desgaste tipo entalhe** também deriva da adesão em materiais específicos. Em altas velocidades, a interação química entre a ferramenta e o material da peça é intensificada pelo calor, podendo levar à **craterização**, um desgaste que ocorre na superfície de saída e enfraquece a aresta de corte.

As elevadas temperaturas geradas no corte também induzem desgastes de natureza térmica. A **deformação plástica** ocorre quando o calor amolece o substrato da ferramenta, fazendo com que a aresta de corte perca sua geometria original. Já as **trincas térmicas** são resultado de ciclos rápidos de aquecimento e resfriamento, comuns em operações intermitentes como o fresamento. Finalmente, falhas de natureza puramente mecânica, como o **lascamento** ou a **quebra da aresta**, são causadas por solicitações que excedem a tenacidade do material da ferramenta, frequentemente associadas a vibrações, sobrecargas ou à instabilidade do processo.

O entendimento desses diferentes mecanismos de desgaste é, portanto, crucial para a seleção adequada do material e da classe da ferramenta de corte. A escolha ideal deve considerar não apenas as propriedades da ferramenta, como dureza e tenacidade, mas também as características do material da peça, as condições de usinagem e os requisitos de acabamento superficial desejados (Sandvik Coromant, 2025).

2.1.5 Revestimentos

Ferramentas de metal duro com cobertura são amplamente utilizadas e apresentam excelente desempenho, graças à combinação de resistência ao desgaste e tenacidade. Classes de cobertura CVD (Deposição Química de Vapor) são especialmente eficazes, oferecendo resistência ao desgaste por abrasão e a deformações térmicas, além de atuarem como barreira térmica. Coberturas CVD modernas, como MT-Ti(C,N), Al₂O₃ e TiN, continuam sendo otimizadas para melhorar a adesão, resistência e durabilidade. Essas ferramentas são ideais para aplicações como torneamento e fresamento em diversos materiais (ISO P, M, K) e para furação, onde são usadas nas pastilhas periféricas (Sandvik Coromant, 2025).

As coberturas PVD (Deposição Física de Vapor) são aplicadas a temperaturas baixas,

entre 400 e 600°C, utilizando um processo que envolve a evaporação de metais que reagem com elementos como o nitrogênio para formar revestimentos duros, como nitretos e carbonitretos. Essas coberturas aumentam a resistência ao desgaste e criam tensões de compressão que melhoram a tenacidade das arestas de corte, prevenindo trincas térmicas. Entre os componentes principais, destacam-se o PVD-TiN, com propriedades gerais e cor dourada; o PVD-Ti(C,N), que oferece maior dureza e resistência ao desgaste de flanco; o PVD-(Ti,Al)N, que combina dureza com resistência à oxidação; e os óxidos PVD, conhecidos por sua resistência à craterização. Modernamente, combinações e estruturas laminadas, compostas por várias camadas ultrafinas, proporcionam ainda mais durabilidade às ferramentas (Sandvik Coromant, 2025).

Essas coberturas são recomendadas para operações que exigem arestas afiadas, tenacidade elevada e resistência à abrasão, como fresas e brocas inteiriças, usinagem de canais, rosqueamento e acabamento de peças. Além disso, são amplamente empregadas em pastilhas centrais para furação e em ferramentas destinadas a enfrentar condições de desgaste elevado, demonstrando excelente desempenho em uma variedade de aplicações (Sandvik Coromant, 2025).

2.1.6 Classificação dos aços

Dentre os diversos tipos de aços, os de baixo teor de carbono são os mais amplamente produzidos. Esses aços geralmente contêm menos de 0,25% em massa de carbono e não respondem a tratamentos térmicos para a formação de martensita; sua resistência mecânica é aumentada principalmente por meio de encruamento (trabalho a frio). Suas microestruturas são compostas predominantemente por ferrita e perlita, resultando em ligas com baixa dureza e resistência, porém com elevada ductilidade e tenacidade. Além disso, esses materiais são facilmente usináveis, soldáveis e apresentam o menor custo de produção entre os tipos de aço (CALLISTER; SOARES, 2008).

Os aços de médio teor de carbono (0,25% a 0,60% C) podem ser tratados termicamente por austenitização, têmpera e revenido, resultando em uma microestrutura de martensita revenida. Devido à baixa temperabilidade, são adequados apenas para peças finas e com resfriamento rápido; no entanto, a adição de elementos como cromo, níquel e molibdênio melhora essa capacidade. Esses aços apresentam maior resistência mecânica em comparação aos de baixo carbono, embora com menor ductilidade e tenacidade. São utilizados em componentes como rodas de trem, trilhos, engrenagens e virabrequins (CALLISTER; SOARES, 2008).

Os aços com alto teor de carbono (0,60% a 1,4%) são os mais duros e resistentes entre os aços-carbono, embora apresentem baixa ductilidade. Geralmente utilizados na condição temperada e revenida, destacam-se pela excelente resistência ao desgaste e pela manutenção de arestas de corte afiadas. Os aços-ferramenta e para matrizes fazem parte dessa categoria e contêm elementos de liga como cromo, vanádio, tungstênio e molibdênio, que formam carbonetos extremamente duros. São amplamente empregados na fabricação de ferramentas de corte, matrizes, facas, serras, molas e arames de alta resistência (CALLISTER; SOARES, 2008).

A nomenclatura dos aços, conforme sua composição química, adota a norma COPANT (Comissão Pan-Americana de Normas Técnicas) — associação civil sem fins lucrativos que reúne os organismos nacionais de normalização das Américas, representada no Brasil pela ABNT. Essa classificação utiliza um código numérico de quatro dígitos para aços-carbono e aços-liga, ou de cinco dígitos para casos específicos de aços-liga. Nos dois primeiros dígitos, identifica-se o tipo de aço; nos demais, expressos em centésimos de porcentagem, informa-se o teor médio aproximado de carbono — dois dígitos finais no código de quatro algarismos e três dígitos finais no de cinco. Letras B, L ou S inseridas imediatamente após os dois primeiros dígitos indicam, respectivamente, a adição de boro, chumbo ou enxofre (Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2000).

2.2 O aço SAE4140

Os aços são ligas ferro-carbono que, além de carbono, podem conter outros elementos de liga em concentrações variadas, resultando em milhares de composições possíveis com diferentes propriedades mecânicas e tratamentos térmicos. Eles são comumente classificados de acordo com o teor de carbono em aços de baixo, médio ou alto carbono, além de poderem ser subdivididos conforme a presença de outros elementos de liga. Enquanto os aços-carbono possuem, basicamente, apenas impurezas residuais e pequenas quantidades de manganês, os aços-liga incorporam intencionalmente elementos adicionais em proporções específicas, visando à modificação de suas características mecânicas e estruturais (CALLISTER; SOARES, 2008).

O aço da série 4140, também denominado aço cromo-molibdênio, é classificado como aço de médio teor de carbono ligado, destinado ao beneficiamento. Sua composição apresenta concentrações de carbono entre 0,30% e 0,50%, o que justifica sua categorização como aço de médio carbono. Esse material pode atingir temperaturas de até 480°C durante processos térmicos; no entanto, exposições acima desse limite tendem a reduzir significativamente sua resistência mecânica (RASMA, 2015).

O aço SAE 4140, também conhecido como aço cromo-molibdênio, é um material de médio carbono com alta temperabilidade, cuja composição química é mostrada na Tabela 1, dureza entre 54 e 59 HRC na condição temperada, baixa soldabilidade e usinabilidade moderada. Destaca-se pela resistência à torção e à fadiga, sendo amplamente utilizado em aplicações que exigem elevada resistência mecânica e tenacidade, como peças automotivas e aeronáuticas, engrenagens, eixos, armamentos e equipamentos para o setor petrolífero (RASMA, 2015).

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 4140 conforme SAE J404.

Aço (UNS)	C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)	P máx. (%)	S máx. (%)
4140 (G41400)	0,38–0,43	0,75–1,00	0,15–0,35	0,80–1,10	0,15–0,25	≤ 0,030	≤ 0,040

Obs.: Ni e V não especificados; valores referem-se à *ladle analysis* (análise de cadinho).
Fonte: SAE J404 (JUN2000).

O diagrama TTT do aço SAE 4140 representa a transformação isotérmica da austenita em martensita a uma temperatura constante após um resfriamento rápido, com as linhas M_i e M_f indicando os limites dessa transformação. Na prática, os tratamentos térmicos ocorrem por resfriamento contínuo, sendo mais bem descritos pelos diagramas CCT, que mostram os pontos de início e término das transformações conforme diferentes taxas de resfriamento. Como essas taxas influenciam a nucleação e o crescimento das fases difusionais, a temperatura de transformação define diretamente a microestrutura final do material (RASMA, 2015).

A temperabilidade mede a variação de dureza de um aço, da superfície ao núcleo; as curvas das ligas com o mesmo teor de carbono mostram que, enquanto o aço carbono comum perde dureza drasticamente em profundidade, os aços-liga mantêm um declive mais suave, embora todos apresentem dureza superficial igual. A escolha do meio de resfriamento — água, óleo ou ar — afeta a microestrutura final: em aços de alto carbono, o óleo é preferível para evitar trincas, e o resfriamento ao ar em aços carbono gera estruturas quase totalmente perlíticas (RASMA, 2015).

A temperatura de austenitização do aço SAE 4140 situa-se entre 870 °C e 930 °C, com tempo de encharque de aproximadamente 1 hora para cada 25 mm de espessura da peça. Exposições acima de 950 °C provocam o crescimento excessivo dos grãos de austenita, reduzindo a tenacidade do material. A têmpera pode ser feita em água ou óleo, conforme a geometria e a espessura do componente: em água, pode-se atingir dureza próxima a 54 HRC; em óleo, até 50 HRC, a depender da espessura (RASMA, 2015).

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais utilizados

O material de base empregado nos ensaios foi um aço SAE 4140, fornecido em barras cilíndricas laminadas com diâmetro nominal de 2 polegadas.

Para as operações de usinagem, utilizaram-se pastilhas CNMG 120408 com revestimentos RPMC6035 e MAUE6020, montadas em suporte PCLNR 2020. A letra 'N' na nomenclatura indica que o inserto é negativo (ângulo de folga de 0°), o que exige sua montagem inclinada no suporte para criar o ângulo de folga necessário. Já o final '08' representa o raio de ponta de 0,8 mm, que foi utilizado igualmente em ambas as ferramentas. As usinagens foram conduzidas em torno convencional Nardini Nodus 220 Gold do IFMG Campus Betim. A obtenção inicial das seções dos corpos de prova com 300 mm de comprimento foi realizada em serra-fita Manrod MR-122.

3.2 Preparação das amostras

A caracterização inicial incluiu o ensaio de dureza Rockwell C Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (1981). Um corpo de prova com 20 mm de comprimento foi seccionado a partir da barra original na serra-fita Manrod MR-122 e, em seguida, a face foi regularizada (faceamento) no torno Nardini Nodus 220 Gold.

O ensaio de dureza foi executado no durômetro Insize ISH-R150 do IFMG Campus Betim, com 10 medições distribuídas ao longo de uma linha radial do centro à borda da face do corpo de prova.

Após a dureza, procedeu-se à preparação metalográfica, conforme a ABNT NBR 16086. O lixamento foi realizado na politriz metalográfica Teclago PL02E, com lixas d'água nas granulometrias 100, 150, 400, 600, 800 e 1000. O polimento foi executado com suspensão de alumina sobre pano apropriado.

A revelação microestrutural empregou ataque químico com Nital a 2%. As análises metalográficas foram conduzidas em Microscópio Metalográfico Platina Invertida – Fortel IM100i.

3.3 Tratamento térmico

As amostras foram submetidas à têmpera. O aquecimento ocorreu em forno mufla do IFMG Campus Betim a 950 °C por 2 h, seguido de resfriamento por imersão em água à temperatura ambiente.

Concluído o tratamento, novas amostras foram retiradas e reavaliadas em dureza pelo mesmo procedimento descrito anteriormente. Para comparação, efetuaram-se também medições na face bruta (não lixada).

3.4 Usinagem

A preparação geométrica das amostras no torno Nardini Nodus 220 Gold consistiu em faceamento, execução do furo de centro e padronização do diâmetro para 41 mm, com a definição do comprimento útil de corte mediante o uso de contraponto das tres barras de SAE 4140.

As condições de passe aplicadas na operação de torneamento externo estão sintetizadas na Tabela 2. Em resumo, a aresta 1 foi submetida a quatro passes de 1,0 mm; as arestas 2 e 3 receberam um passe de 1,0 mm cada; e a aresta 4 foi avaliada com um passe de 0,5 mm. Após cada passe, a pastilha era removida para avaliação do desgaste. Após cada passe, a pastilha era removida para a inspeção de desgaste. A rotação utilizada foi de 1000 RPM e avanço de 0,30 mm/v.

Tabela 2 – Condições de passe no torneamento externo.

Aresta	Número de passes	Profundidade de passe (mm)
1	4	1,0
2	1	1,0
3	1	1,0
4	1	0,5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

3.5 Análise metalográfica e medições

O desgaste das arestas de corte foi examinado em um microscópio óptico acoplado ao suporte portátil impresso em 3D. As imagens foram registradas e processadas em um computador do laboratório de usinagem.

A rugosidade das superfícies usinadas foi medida com o rugosímetro Insize ISR-C300. As leituras foram realizadas após cada passe, antes da continuidade do ensaio.

3.6 Medição das áreas danificadas

As áreas danificadas foram quantificadas utilizando o software FIJI ImageJ com o plug-in Trainable Weka Segmentation, com o algoritmo Fast Random Forest.

3.7 Análise estatística

A análise estatística da relação entre a área total danificada na ferramenta e os parâmetros de rugosidade (R_a e R_t) foi conduzida com base em métodos clássicos de correlação e regressão linear. Todos os cálculos foram realizados utilizando o software *Python* (versão 3.11), com as bibliotecas *NumPy*, *SciPy* e *Seaborn*, aplicando as expressões matemáticas descritas a seguir.

3.7.1 Coeficiente de Correlação de Pearson

A medida de associação linear entre as variáveis foi obtida pelo coeficiente de correlação de Pearson (r), definido por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

onde x_i e y_i representam, respectivamente, os valores individuais da área danificada e da rugosidade medida; $\bar{x}$ e $\bar{y}$ são as médias amostrais correspondentes; e n é o número total de observações. Os valores de r variam entre -1 e $+1$, indicando correlação negativa perfeita ($r = -1$), ausência de correlação ($r = 0$) ou correlação positiva perfeita ($r = +1$).

3.7.2 Ajuste da Regressão Linear

A tendência estatística geral entre as variáveis foi obtida pelo ajuste de uma reta de regressão linear simples, definida pela equação:

$$y = a + bx \quad (3.2)$$

em que a é o intercepto e b o coeficiente angular (ou inclinação) da reta. Esses parâmetros foram estimados pelo método dos mínimos quadrados, de modo a minimizar a soma dos quadrados dos resíduos:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (3.3)$$

A reta resultante representa o comportamento médio da rugosidade em função do aumento da área danificada, sendo plotada como uma linha tracejada preta na Figura 16.

3.7.3 Intervalo de Confiança da Regressão

A incerteza associada à predição da regressão foi representada pela faixa cinza ao redor da linha de tendência, correspondente ao **intervalo de confiança** (IC) de 95%. Esse intervalo foi calculado com base na variância residual e no erro padrão da estimativa, segundo a expressão:

$$IC(x_0) = \hat{y}_0 \pm t_{(n-2, 0.975)} \cdot s_y \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (3.4)$$

onde:

- $\hat{y}_0$ é o valor predito pela regressão para um dado ponto x_0 ;
- $t_{(n-2, 0.975)}$ é o valor crítico da distribuição t de Student para um nível de confiança de 95%;

- s_y é o erro padrão dos resíduos, dado por:

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 2}}$$

Esse procedimento garante que, para cada valor de área danificada considerado, 95% das previsões de rugosidade estimadas pela regressão estarão contidas dentro da região sombreada exibida no gráfico.

3.7.4 Representação Gráfica

Os gráficos foram construídos com base nas médias experimentais de cada condição de corte, sendo a área danificada representada no eixo x e os parâmetros de rugosidade R_a e R_t no eixo y . A linha de regressão e o intervalo de confiança foram calculados automaticamente pela função `regplot()` da biblioteca *Seaborn*, garantindo reprodutibilidade e padronização na visualização estatística dos resultados.

3.7.5 Procedimentos complementares

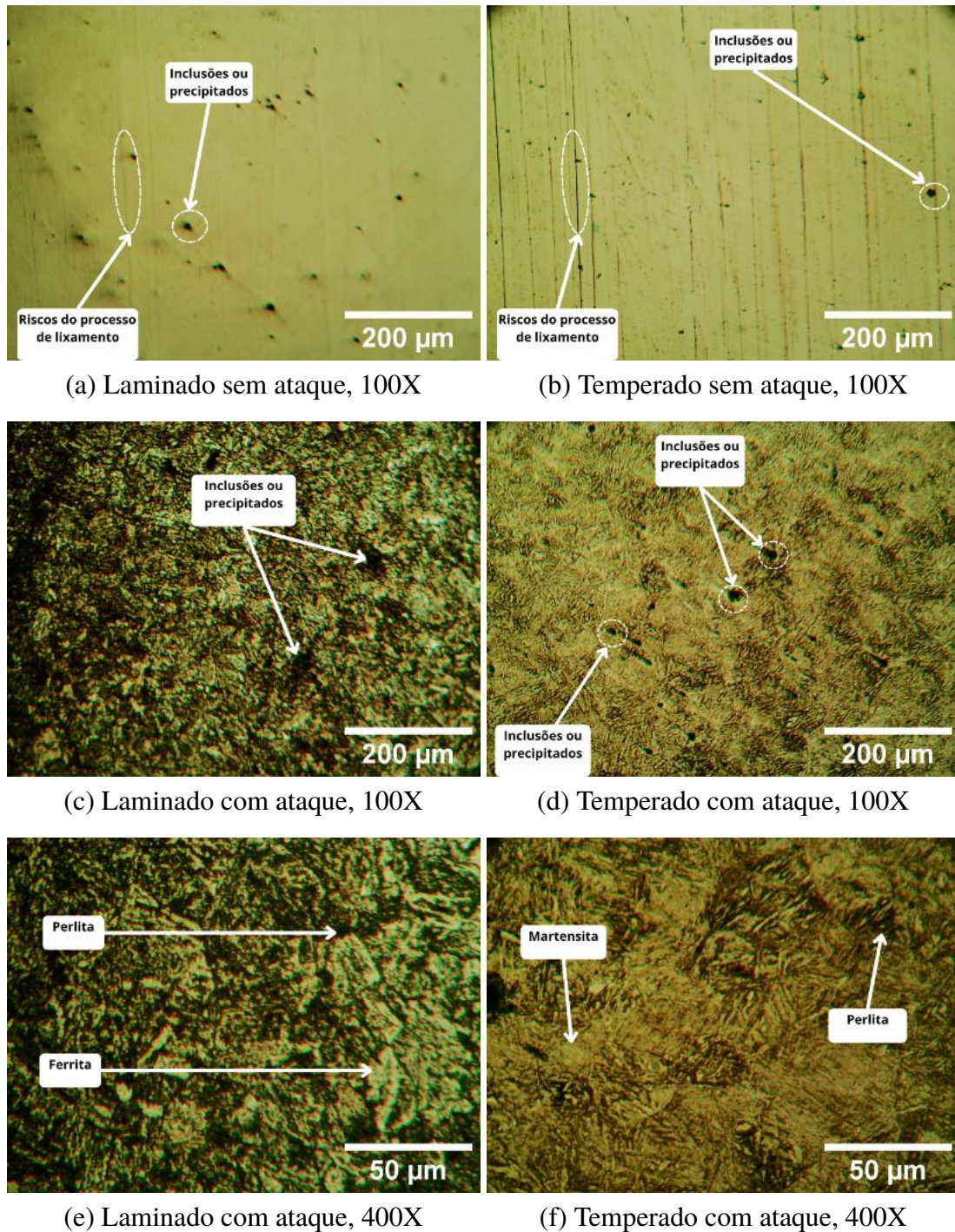
Os dados experimentais e as imagens foram organizados e armazenados em meio digital para análises comparativas subsequentes. O suporte portátil para o microscópio foi modelado no Solid Edge e fabricado na impressora 3D XYZ Printing Pro, viabilizando análises em campo com repetibilidade e precisão compatíveis com os recursos disponíveis no laboratório.

4 RESULTADOS

4.1 Microscopia óptica

Na Figura 10 são apresentadas as microscopias ópticas do aço SAE 4140 nas condições laminada (como recebida) — Figuras 10 (a), (c) e (e) — e temperada — Figuras 10 (b), (d) e (f).

Figura 10 – Microscopias ópticas do aço SAE 4140 laminado e temperado.



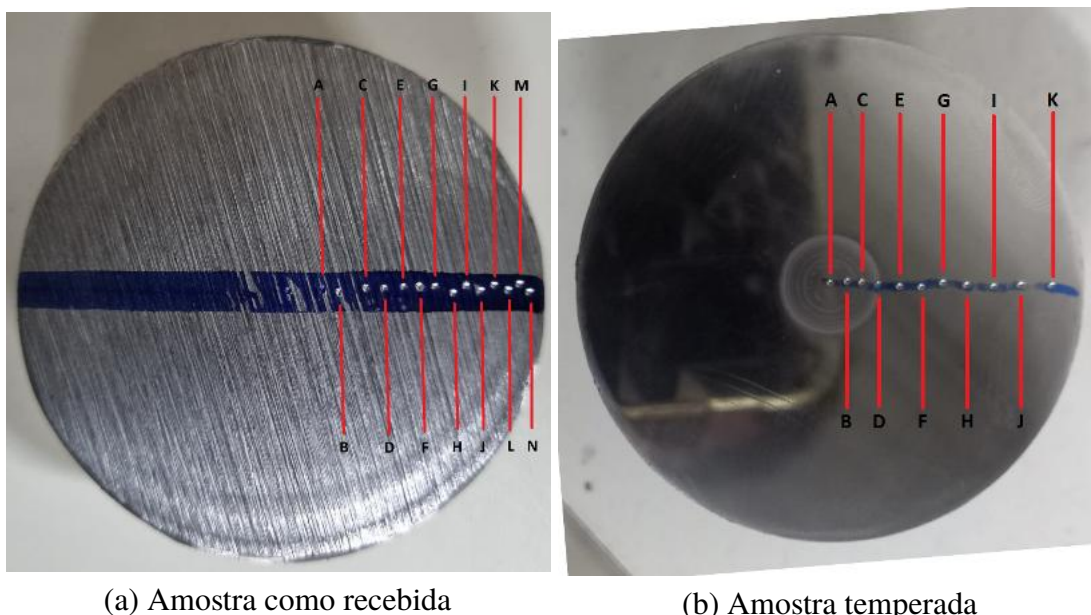
Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2026.

A partir das micrografias, observa-se a presença de inclusões em ambas as condições analisadas, tanto no material como recebido (Figuras 10 (a) e (c)) quanto no temperado (Figuras 10 (b) e (d)). Moraes (2013) encontrou inclusões semelhantes e, com a análise por Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), a autora mostra a presença representativa de enxofre, silício, alumínio e oxigênio nessas inclusões. Na Figura 10 (a), nota-se um sombreamento ao redor desses precipitados ou inclusões, o que indica que essas regiões apresentaram maior resistência ao desgaste mecânico durante o processo de preparação metalográfica. Na Figura 10 (e), é possível identificar a presença de ferrita (regiões claras) e perlita (regiões escuras), típicas de aços-carbono atacados com Nital. Por outro lado, na Figura 10 (f), observa-se a formação predominante de martensita, caracterizada por regiões claras de perfil agulhado, além de pequenas áreas mais escuras que sugerem a presença de perlita residual. Analisando a influência de têmpera convencional e tratamentos térmicos criogênicos, Moraes (2013) indica a presença de martensita com frações de austenita dispersas em todas as condições de têmpera analisadas. Vale destacar que a confirmação precisa desses constituintes microestruturais, bem como a caracterização detalhada das inclusões, requer análises complementares, como difração de raios X, que poderão ser realizadas em trabalhos futuros.

4.2 Dureza

Nas Figuras 11 (a) e (b), mostram-se as posições das medições ao longo do raio na amostra laminada e temperada, respectivamente.

Figura 11 – Posições de medição de dureza nas amostras como recebida e temperada.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2026.

Para a amostra sem tratamento térmico ("como recebida"), os valores de dureza Rockwell

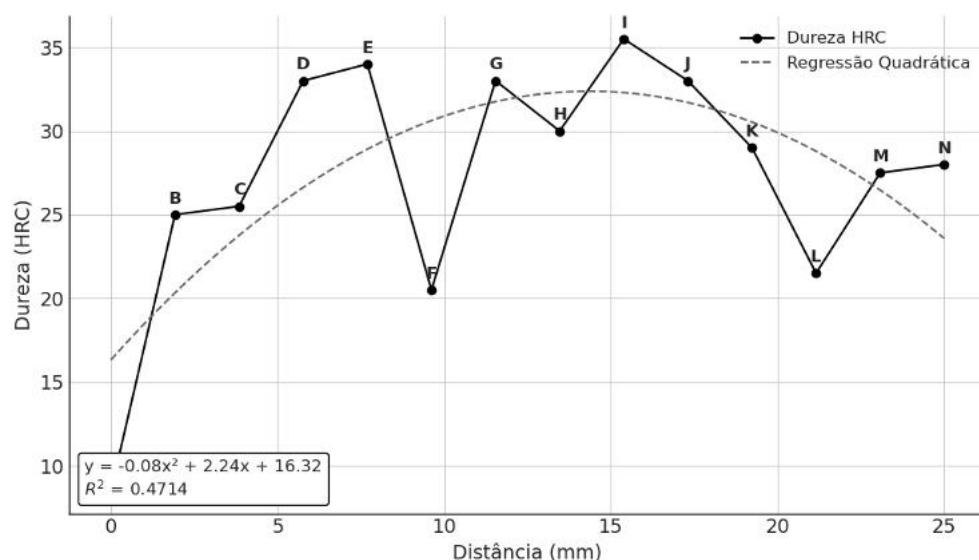
variaram entre 8,5 e 35,5 HRC. com média de 27,43 HRC e desvio padrão de 7,18 HRC. O gráfico de regressão quadrática, apresentado na Figura 12, evidencia um perfil de dureza não uniforme ao longo da seção transversal. Observa-se uma tendência de redução da dureza, tanto no centro quanto nas extremidades, perfil que se torna ainda mais nítido ao desconsiderar a medição do ponto F como um valor atípico (*outlier*).

Este comportamento pode ser justificado por uma combinação de fatores: um menor grau de encruamento na região central e uma recristalização mais efetiva nas camadas periféricas durante a laminação a quente, que anula parte do endurecimento por deformação próximo à superfície.

O elevado desvio padrão registrado na condição "como recebida" é um indicativo do efeito de "bandamento", comum em produtos laminados. Neste fenômeno, microconstituintes orientam-se em bandas alinhadas com a direção de laminação, criando faixas alternadas de perlita e ferrita. Essa microestrutura heterogênea pode levar a propriedades mecânicas anisotrópicas e, inclusive, afetar a homogeneidade da austenitização em tratamentos térmicos subsequentes (HEBERLE, 2019).

Apesar da dispersão nos resultados, a faixa de dureza obtida é coerente com a microestrutura ferrítico-perlítica observada. Os valores também estão de acordo com a literatura, como Ventura (2006) e Winck *et al.* (2020), que relatam durezas inferiores a 35 HRC para barras de aço similares laminadas a quente.

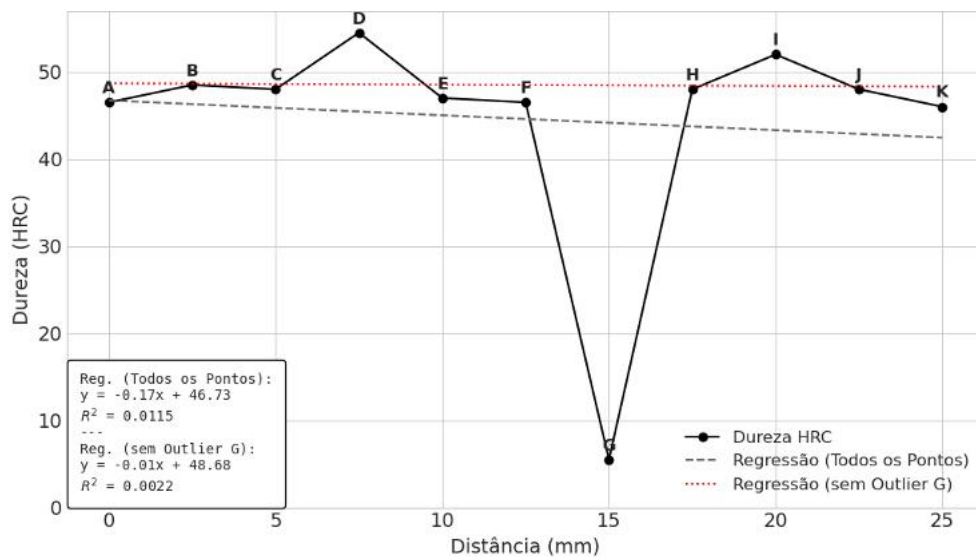
Figura 12 – Dureza em função da distância - Amostra sem tratamento.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2026.

As amostras submetidas à têmpera em água apresentaram um aumento expressivo de dureza, com valores entre 46,0 e 54,5 HRC (Figura 13) e média de 48,50 HRC (desconsiderando um valor atípico de 5,5 HRC).

Figura 13 – Dureza em função da distância - Amostra com tratamento.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2026.

A análise inicial, por meio de uma regressão linear que considera todos os pontos medidos, sugere uma leve tendência de queda na dureza do centro para a superfície. Contudo, este perfil é fortemente influenciado pelo ponto G (5,5 HRC), cuja medição destoa drasticamente dos demais e distorce a linha de tendência. Ao realizar uma nova regressão tratando o ponto G como um valor atípico (*outlier*), a reta resultante demonstra uma dureza praticamente constante ao longo de todo o eixo radial. Este comportamento, com um perfil de dureza estável, indica que o processo de têmpera atingiu alta eficiência, promovendo um endurecimento homogêneo na seção analisada.

Os valores medidos são compatíveis com os obtidos por Silva (2012), que identificou durezas na faixa de 49 a 50 HRC após tratamentos térmicos, reforçando que o patamar alcançado está relacionado à transformação martensítica. Os resultados são, entretanto, inferiores aos registrados por Winck *et al.* (2020), que encontraram uma dureza média de 60,01 HRC. Essa diferença não indica uma falha no tratamento, mas sim ilustra o conceito de temperabilidade. Os valores mais elevados (próximos a 60 HRC) representam a dureza máxima potencial do aço, alcançável apenas em seções muito finas ou na superfície imediata, sob resfriamento ideal. Para uma seção transversal de 2 polegadas, a obtenção de uma dureza inferior à máxima potencial é metalurgicamente esperada, devido à menor taxa de resfriamento da peça resultante de sua maior carga térmica.

O comportamento global observado neste estudo valida a eficácia do tratamento de têmpera em promover um endurecimento significativo, elevando a dureza média de 27,43 HRC para 48,50 HRC (considerando os dados sem o *outlier*). Os resultados reforçam a distinção microestrutural e mecânica entre o estado como recebido (ferrítico-perlítico, dúctil) e o estado temperado (predominantemente martensítico, duro e frágil) do material.

4.3 Desgaste da Ferramenta e o Acabamento Superficial

Os dados, compilados na Tabela 3 e visualizados na Figura 14, demonstram o desempenho superior da pastilha MA-UE6020 em todas as quatro condições experimentais avaliadas, tanto para a rugosidade média aritmética (R_a) quanto para a rugosidade total (R_t).

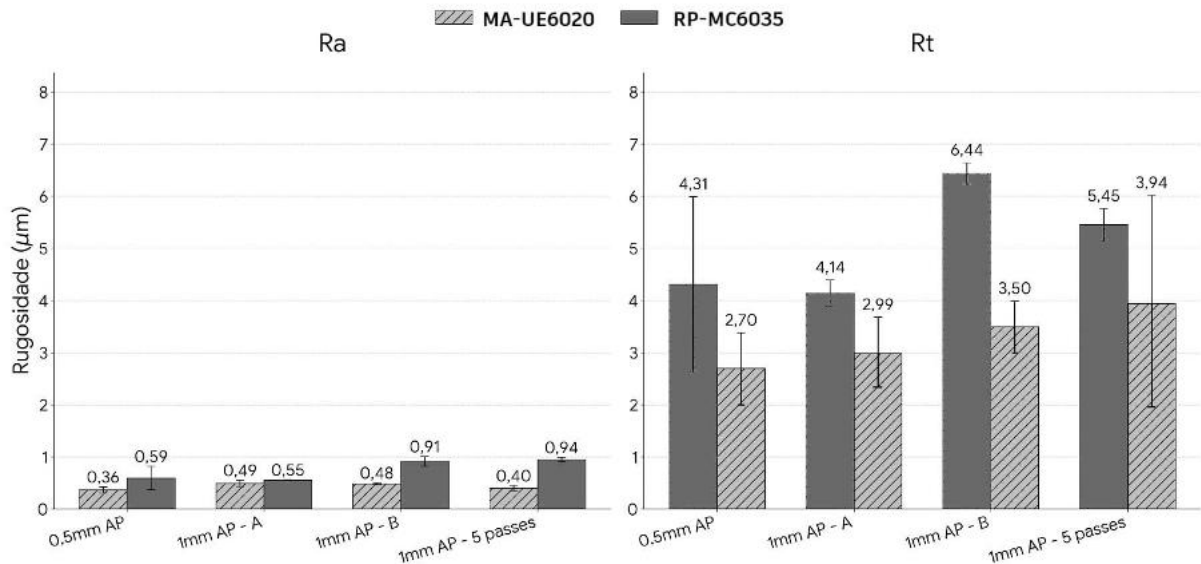
Tabela 3 – Médias e desvios padrão das rugosidades RA e RT usando com MA-UE6020 e RP-MC6035

Condição	MA-UE6020		RP-MC6035	
	Ra (μm)	Rt (μm)	Ra (μm)	Rt (μm)
0,5mm AP	0,364 $\pm$ 0,060	2,700 $\pm$ 0,680	0,593 $\pm$ 0,226	4,309 $\pm$ 1,682
1mm AP - A	0,490 $\pm$ 0,062	2,990 $\pm$ 0,686	0,552 $\pm$ 0,007	4,136 $\pm$ 0,259
1mm AP - B	0,483 $\pm$ 0,019	3,500 $\pm$ 0,488	0,913 $\pm$ 0,094	6,436 $\pm$ 0,206
1mm AP - 5 passes	0,399 $\pm$ 0,049	3,940 $\pm$ 2,074	0,945 $\pm$ 0,045	5,451 $\pm$ 0,311

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2026.

Ao analisar a rugosidade média (R_a), que representa o acabamento geral da superfície, observa-se que os valores obtidos com a pastilha MA-UE6020 são consistentemente inferiores. A Figura 14 ilustra essa disparidade de forma clara, onde as barras correspondentes à MA-UE6020 são visivelmente menores.

Figura 14 – Gráfico de barras Rugosidade Média Aritmética e Rugosidade Total



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2026.

A diferença mais acentuada ocorre na condição de "1 mm AP - 5 passes", na qual a MA-UE6020 registrou um R_a de 0,40 μm , enquanto a RP-MC6035 atingiu 0,95 μm . Isso representa um aumento de 138% na rugosidade, resultando em um acabamento de qualidade significativamente inferior para a pastilha RP-MC6035 sob condição de maior desgaste. De

forma similar, na condição "1 mm AP - B", a pastilha RP-MC6035 apresentou um R_a 90% maior (0,91 μm contra 0,48 μm). Essa tendência sugere que o material ou a geometria da pastilha RP-MC6035 é menos resiliente aos esforços de corte, resultando em maior atrito e vibração, que se traduzem diretamente em uma superfície de pior qualidade.

A análise da rugosidade total (R_t), um parâmetro crítico que indica os picos e vales máximos e pode apontar defeitos isolados, como riscos ou arrancamento de material, reforça a conclusão. Conforme a Tabela 3, a pastilha RP-MC6035 novamente apresenta valores significativamente mais elevados. Na condição "1 mm AP - B", por exemplo, a RP-MC6035 gerou um R_t médio de 6,44 μm , um valor 84% maior que os 3,50 μm da MA-UE6020. Um R_t elevado é particularmente prejudicial em componentes que exigem boa vedação ou que estão sujeitos à fadiga, pois esses picos de rugosidade podem atuar como iniciadores de trincas. A performance superior da MA-UE6020 em manter o R_t sob controle indica uma maior estabilidade da aresta de corte e uma formação de cavaco mais controlada.

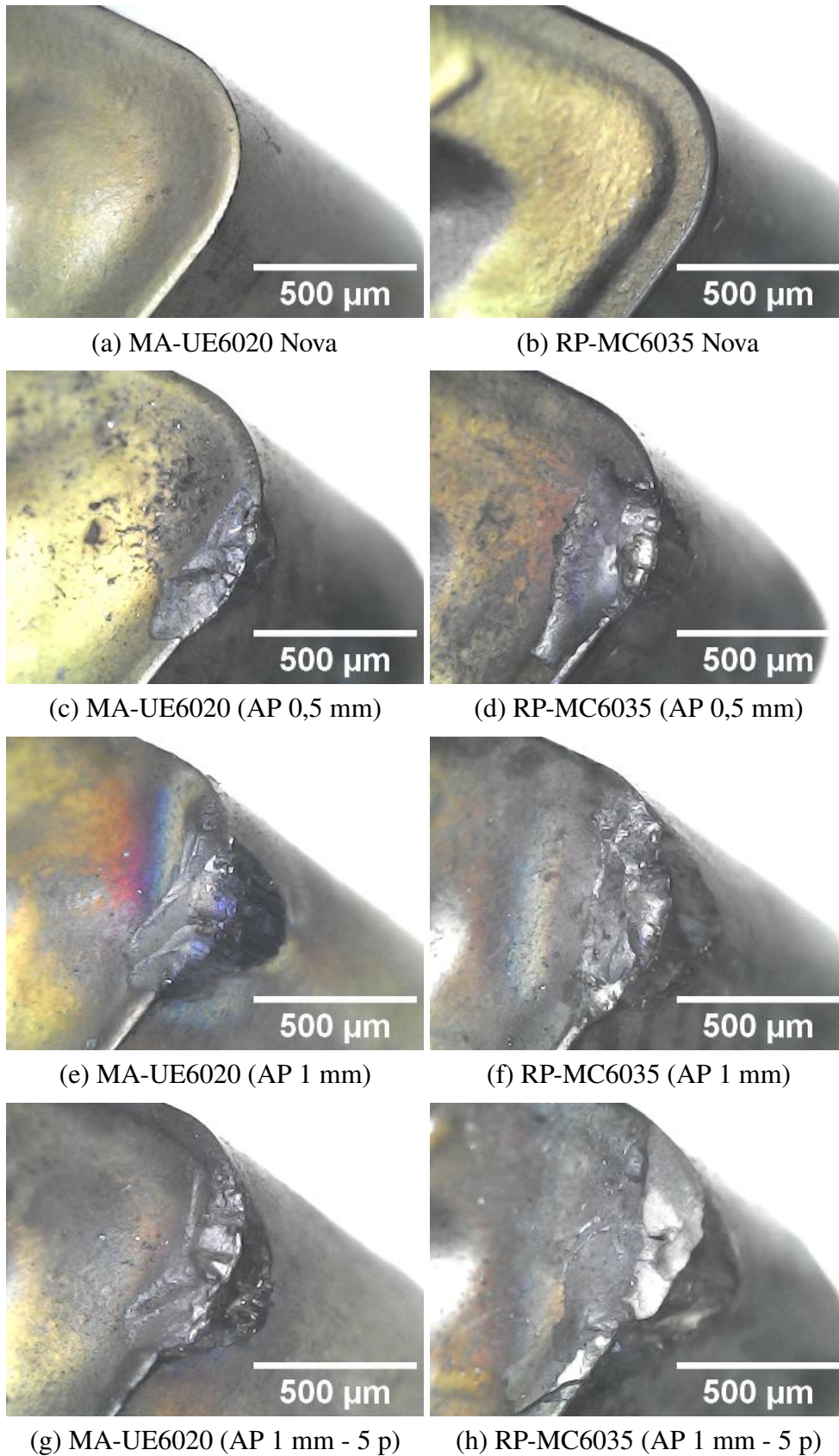
Um ponto de análise fundamental reside na estabilidade e previsibilidade de cada pastilha, inferida a partir dos desvios padrão. A pastilha MA-UE6020 demonstra um comportamento notavelmente estável para a rugosidade média R_a , com desvios padrão baixos (entre 0,019 μm e 0,062 μm), indicando um processo de desgaste uniforme e um acabamento consistente entre as amostras.

A disparidade acentuada no acabamento superficial pode ser atribuída, fundamentalmente, à integridade da aresta de corte da ferramenta. Na Figura 15 mostra-se o estado das arestas de corte dos insertos MA-UE6020 e RP-MC6035, comparando suas condições iniciais, como novas (a) e (b), com o resultado após cada ensaio de usinagem.

A análise visual permite uma comparação qualitativa direta da evolução do desgaste. Observa-se que, enquanto o inserto **MA-UE6020** apresenta um desgaste mais progressivo e uniforme ao longo dos ensaios (c), (e), (g), o inserto **RP-MC6035** exibe danos mais severos, caracterizados por lascamentos e fraturas na aresta de corte. Essa degradação é particularmente evidente nas condições de maior profundidade de corte (f) e de múltiplos passes (h), onde a perda de material da quina da ferramenta é visivelmente maior.

As imagens corroboram diretamente os dados quantitativos de área de desgaste apresentados na Tabela 4 e justificam os elevados valores de rugosidade, principalmente de R_t , obtidos com o inserto RP-MC6035. A integridade superior da aresta do MA-UE6020 foi o fator determinante para a obtenção de um melhor acabamento superficial.

Figura 15 – Microscopia óptica dos insertos MA-UE6020 e RP-MC6035 antes e após ensaios de usinagem.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2026.

Para análise quantitativa foram mensuradas as áreas avariadas no plano frontal (flanco), superior (superfície de saída) e transversal (plano inclinado entre flanco e superfície de saída). Os valores são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Áreas de fraturas nos planos frontal, superior e transversal

Condição	MA-UE6020		RP-MC6035	
	Região	Área (μm^2)	Região	Área (μm^2)
0,5 mm AP	Frontal	34328	Frontal	43336
	Superior	76016	Superior	137388
	Transversal	2856	Transversal	6884
1 mm AP - Teste 1	Frontal	90584	Frontal	86756
	Superior	90268	Superior	134540
	Transversal	28024	Transversal	11592
1 mm AP - Teste 2	Frontal	67680	Frontal	64456
	Superior	118924	Superior	174764
	Transversal	16996	Transversal	32124
1 mm AP - 5 Passes	Frontal	61128	Frontal	74292
	Superior	109988	Superior	122928
	Transversal	23040	Transversal	18848

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2026.

A análise dos resultados experimentais torna-se mais clara à luz das especificações de cada ferramenta, conforme o catálogo (Mitsubishi Materials, 2023). O inserto **RP-MC6035** é projetado para máxima robustez. O quebra-cavaco **RP** é a primeira recomendação do fabricante para desbaste pesado de aços, incluindo cortes interrompidos e remoção de casca de laminação. Sua geometria visa fortalecer a aresta de corte para suportar impactos severos. Complementarmente, a classe **MC6035** é desenvolvida com foco na tenacidade, sendo indicada para usinagem pesada e instável, onde a resistência à fratura é o requisito primordial. Este conjunto, portanto, privilegia a resistência mecânica da aresta em detrimento da eficiência de corte, sendo otimizado para suportar altas cargas de impacto.

Por outro lado, o inserto **MA-UE6020** representa uma solução mais versátil. O quebra-cavaco **MA** é classificado para usinagem geral, com uma geometria de fase positiva que confere maior agudeza à aresta, resultando em menores esforços de corte. A classe **UE6020** é recomendada para o torneamento de aços de baixo carbono em condições de acabamento e usinagem leve, mesmo sob instabilidade. Embora não tenha sido projetada para o desbaste pesado de um aço duro, sua combinação com a geometria MA favorece um corte mais suave.

A interpretação dos resultados, à luz dessas especificações, revela uma aparente contradição. A ferramenta projetada para as condições mais severas (**RP-MC6035**) falhou catastroficamente, enquanto a ferramenta de aplicação geral (**MA-UE6020**) demonstrou estabilidade superior. A explicação reside na natureza da carga aplicada durante o ensaio: um passe único e

severo em aço duro.

O colapso do inserto **RP-MC6035** não ocorreu por falta de robustez, mas sim porque os elevados esforços de corte, induzidos por sua geometria de aresta preparada para impacto (menos afiada), geraram uma sobrecarga mecânica e térmica que levou à fratura frágil da aresta. Em outras palavras, a ferramenta projetada para resistir a *impactos* intermitentes falhou sob uma condição de *carga contínua e severa*, que excedeu a resistência do conjunto. As altas forças de usinagem também induziram vibrações, degradando o acabamento superficial, como evidenciado pelos altos valores de R_a e R_t .

O inserto **MA-UE6020**, inversamente, demonstrou um desempenho superior por uma razão sinérgica: sua geometria de baixo esforço (quebra-cavaco MA) gerou uma força de corte resultante menor. Essa redução na carga protegeu a aresta de corte, mantendo-a abaixo de seu limiar de fratura. Com a integridade da aresta preservada, a ferramenta pôde manter um corte estável, resultando em dano controlado (menores áreas de desgaste) e, conseqüentemente, em um acabamento superficial de qualidade muito superior.

Diante do exposto, conclui-se que a performance superior do inserto **MA-UE6020** não é um atributo isolado de seu material, mas sim o resultado da combinação eficaz entre uma geometria de quebra-cavacos de baixo esforço e uma classe de metal duro adequada para um corte estável. Para a condição de usinagem contínua e severa avaliada, a estratégia de *minimizar as forças de corte* por meio de uma geometria mais eficiente mostrou-se mais crítica para a preservação da ferramenta e para a obtenção de uma baixa rugosidade do que a estratégia de empregar uma aresta robusta com um material de alta tenacidade.

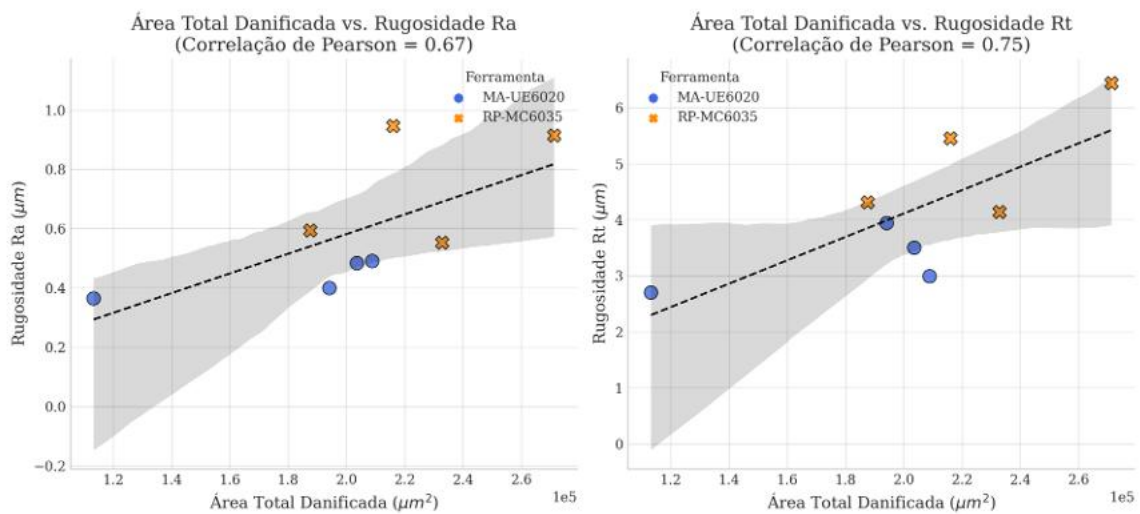
4.4 Correlação entre o Dano na Ferramenta e a Rugosidade

A análise quantitativa dos dados de desgaste e rugosidade permite ir além da observação qualitativa, estabelecendo uma correlação estatística direta entre a integridade da aresta de corte e a qualidade da superfície usinada. Ao calcular a área total danificada para cada ensaio e correlacioná-la com os parâmetros de rugosidade, obtiveram-se coeficientes de correlação de Pearson de **0,67** para a rugosidade média (R_a) e **0,75** para a rugosidade total (R_t).

Esses coeficientes indicam uma correlação positiva de moderada a forte, confirmando que um aumento na área danificada da ferramenta está diretamente associado a um acabamento superficial de pior qualidade. A correlação notavelmente mais forte com o parâmetro R_t é particularmente reveladora. A rugosidade total é sensível aos picos e vales mais extremos da superfície, que são frequentemente causados por eventos discretos e severos, como o lascamento ou a fratura da aresta de corte. A falha catastrófica observada no inserto **RP-MC6035**, especialmente na condição "1 mm AP - B", gerou sulcos profundos na peça, elevando drasticamente o valor de R_t e fortalecendo essa correlação. O R_a , por ser uma média aritmética dos desvios, tende a suavizar o efeito desses defeitos isolados, explicando sua correlação ligeiramente mais fraca.

A Figura 16 ilustra essa relação de forma visual. Cada ponto representa uma condição de usinagem distinta, sendo o eixo horizontal correspondente à **área total danificada** na ferramenta e o eixo vertical aos parâmetros de **rugosidade** da superfície resultante (R_a e R_t). As cores e marcadores distinguem as duas classes de ferramentas — **MA-UE6020** (em azul) e **RP-MC6035** (em laranja) — permitindo observar claramente o agrupamento e o comportamento característico de cada uma.

Figura 16 – Gráficos de dispersão correlacionando a área total danificada com as rugosidades R_a e R_t .



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2026.

A **linha tracejada preta** representa a **reta de regressão linear**, que traduz a tendência estatística geral de crescimento da rugosidade em função do aumento da área danificada. Essa tendência é calculada a partir do método dos mínimos quadrados e reflete o comportamento médio dos dados experimentais. Em outras palavras, ela mostra o caminho que melhor descreve a associação entre as duas variáveis analisadas.

Já a **região cinza ao redor da linha de tendência** corresponde ao **intervalo de confiança** dessa regressão. Essa faixa indica a incerteza estatística associada ao modelo: quanto mais estreita ela é, maior é a confiabilidade de que novos pontos experimentais seguirão a mesma tendência observada. No presente caso, a região cinza apresenta-se relativamente estreita, o que reforça a consistência da correlação entre desgaste e rugosidade. Pequenas variações dentro dessa faixa podem ser atribuídas a flutuações experimentais naturais — como variações microscópicas na microestrutura do material, na lubrificação ou na trajetória de corte — que não alteram o comportamento geral identificado.

Observa-se ainda que os dados relativos ao inserto **RP-MC6035** situam-se predominantemente na extremidade superior direita dos gráficos, caracterizando cenários de elevado desgaste e altos valores de rugosidade. Essa concentração acima da linha de tendência, em alguns casos, indica a ocorrência de falhas localizadas severas, como lascamentos abruptos. Por outro lado, os

pontos referentes ao inserto **MA-UE6020** permanecem na região inferior esquerda, com variação mais contida e alinhada à faixa de confiança, refletindo uma resposta de desgaste progressivo e controlado.

Essa análise estatística e gráfica solidifica a interpretação dos fenômenos de usinagem. O desgaste acentuado não é apenas um indicativo do fim da vida útil da ferramenta, mas também a causa direta da degradação do acabamento superficial. A elevada área de fratura do inserto **RP-MC6035** não é uma variável independente, mas sim a consequência de sua geometria de alto atrito, que, sob a carga contínua e severa do ensaio, gera forças de corte excessivas. Essas forças levaram à fratura da aresta, e essa fratura, por sua vez, manifestou-se na peça como elevados valores de rugosidade medidos. A correlação quantifica, portanto, a cadeia de causa e efeito: a inadequação da geometria para a condição de corte levou à fratura (alta área danificada), que produziu diretamente uma superfície de baixa qualidade (alta rugosidade). Assim, a região cinza atua como um indicador visual da confiabilidade do modelo e da reprodutibilidade dos fenômenos observados, reforçando a **robustez e a previsibilidade** da relação entre desgaste e rugosidade dentro das condições experimentais.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Este trabalho avaliou o impacto da geometria e da classe de insertos no torneamento do aço SAE 4140 temperado. Concluiu-se que, para a condição de corte contínuo e severo, a estratégia de minimização dos esforços de corte, representada pelo inserto **MA-UE6020**, foi superior à de máxima robustez, representada pelo inserto **RP-MC6035**.

A caracterização do material validou a microestrutura predominantemente martensítica e a dureza média de 48,50 HRC após a têmpera, confirmando as condições adequadas para o estudo. Nos ensaios, o inserto **MA-UE6020** apresentou desgaste controlado e gerou um acabamento superficial de melhor qualidade. Em contrapartida, o inserto **RP-MC6035**, embora projetado para desbaste pesado, sofreu fratura catastrófica da aresta de corte, atribuída aos elevados esforços de usinagem gerados por sua geometria robusta sob carga contínua, o que resultou em um acabamento superficial inferior.

A análise estatística comprovou a forte correlação entre a área de dano na ferramenta e o aumento da rugosidade superficial (R_a e R_t), solidificando a conclusão de que a integridade da aresta é um fator determinante para a qualidade da peça. Assim, a principal contribuição deste estudo é a demonstração de que a escolha de uma geometria de corte eficiente pode ser mais crítica para o sucesso da operação do que a seleção de uma classe de metal duro de máxima tenacidade em usinagem contínua de materiais endurecidos.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, recomenda-se a medição direta das forças de usinagem para validar a causa da falha do inserto robusto. Sugere-se também a avaliação do desempenho das mesmas ferramentas em condições de corte interrompido, cenário para o qual o inserto **RP-MC6035** foi projetado e onde seu comportamento pode ser superior. Por fim, uma análise de viabilidade econômica, comparando o custo por peça e a vida útil de cada ferramenta, agregaria um valor prático e industrial aos achados técnicos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Norma Brasileira, **Materiais metálicos — Determinação da dureza Rockwell**. Rio de Janeiro, 1981. Inclui também a determinação da dureza Rockwell superficial. Citado na página 30.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Aço carbono e ligados para construção mecânica: designação e composição química**. [S.l.], 2000. Cancela e substitui a NBR NM 87:1996. Citado na página 28.

CALLISTER, W.; SOARES, S. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Livros Técnicos e Científicos, 2008. ISBN 9788521615958. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=R3BwPgAACAAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

DINIZ, A.; MARCONDES, F.; COPPINI, N. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. M M editora, 1999. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=fMjVtwAACAAJ>>. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 21 e 22.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Blucher, 2018. ISBN 9788521214199. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=IjjWDwAAQBAJ>>. Citado na página 17.

FITZPATRICK, M. **Introdução aos processos de usinagem: Série Tekne**. Bookman Editora, 2013. (Tekne). ISBN 9788580552294. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=VWU3AgAAQBAJ>>. Citado 6 vezes nas páginas 18, 19, 23, 24, 25 e 26.

HEBERLE, M. d. A. **Avaliação da Influência do Sentido de Laminação e do Tratamento Térmico de Normalização no Desgaste de Aços 1020 Laminados a Quente**. Porto Alegre, 2019. Citado na página 36.

MACHADO, Á.; ABRÃO, A.; COELHO, R.; SILVA, M. da. **Teoria da usinagem dos materiais**. Editora Blucher, 2015. ISBN 9788521208440. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=9na1DwAAQBAJ>>. Citado 4 vezes nas páginas 14, 17, 22 e 23.

Mitsubishi Materials. **General Catalogue C010Z-F: Turning Tools**. Tóquio, Japão, 2023. Catálogo técnico de ferramentas de torneamento. A data de publicação é uma estimativa baseada no conteúdo do catálogo. Disponível em: <<https://www.mitsubishicarbide.com/pt/product/catalog>>. Citado na página 41.

MORAES, E. A. d. **Estudo da influência da temperatura de revenimento nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço AISI 4140**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ, jul 2013. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais. Disponível em: <<https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/DISSERTA%C3%87%C3%83O-FINAL-ELINE.pdf>>. Citado na página 35.

PRIMO, E. **Usinagem Convencional**. Clube de Autores, 2024. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=_fYCEQAAQBAJ>. Citado 4 vezes nas páginas 14, 15, 17 e 18.

RASMA, E. T. Dissertação de Mestrado, **Caracterização estrutural e mecânica do aço AISI/SAE 4140 tratado sob diferentes tratamentos térmicos**. Campos dos Goytacazes – RJ: [s.n.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

Sandvik Coromant. **Site Oficial da Sandvik Coromant**. 2025. Acesso em: 29 de abril de 2025. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/en-us>>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

SILVA, S. E. T. P. da. **Análise das propriedades mecânicas e estruturais do aço SAE 4140 submetido a tratamento criogênico**. Dissertação de Mestrado, Campos dos Goytacazes – RJ, julho 2012. Citado na página 37.

VENTURA, J. M. **Desenvolvimento de aços para conformação a frio de elemento de fixação do feixe de molas**. Dissertação de Mestrado, São Carlos, 2006. Orientador: Prof. Dr. Waldek Wladimir Bose Filho. Citado na página 36.

WINCK, L. B.; BRANDÃO, S. M.; RAMOS, L. G.; MONTEIRO, S. Q.; GALVÃO, G. R. Análise dos efeitos da têmpera e revenimento em diferentes temperaturas e avaliação nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço sae 4140. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, Paranaguá, PR, v. 5, n. 5, p. 269–01–269–22, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.21575/25254782rmetg2020vol5n51183>>. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.