



INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FRESA DE TOPO ESFÉRICO NO DESGASTE E ACABAMENTO DO AÇO AISI P20.

RODRIGO NECKEL¹
SÁVIO PAULI²
CRISTIANO DA SILVA³

RESUMO

Atualmente, a demanda pela fabricação de moldes e matrizes por processos de usinagem tem aumentado na indústria. Para atingir a eficiência na produção desses complexos componentes, é necessário a obtenção de superfícies com excelente acabamento em estreitas faixas de tolerâncias dimensionais. As fresas de topo esférico surgem como ferramentas essenciais, capazes de usinar superfícies complexas de forma eficaz. Os fabricantes de fresas estão constantemente em busca de maneiras de desenvolver ferramentas de alta performance que também ofereçam um excelente custo-benefício. Isso implica investir em tecnologias avançadas para aprimorar as geometrias das ferramentas, escolher a melhor matéria-prima e aplicar revestimentos de alta qualidade, contribuindo para um melhor rendimento da fresa. Este trabalho tem objetivo de avaliar o acabamento de superfície e o desgaste de flanco (VB_b máx) na usinagem do aço AISI P20 utilizando 4 fresas de topo esférico com diâmetro de 10 mm revestidas com AlCrN e ângulo de ataque de 0° e 5° . As velocidades de corte empregadas foram de 120 m/min e 150 m/min. De forma geral, as condições de $V_c = 120$ m/min e ângulo de ataque de 0° apresentaram o melhor desempenho entre vida útil da ferramenta e qualidade do acabamento superficial, sendo as mais indicadas para o fresamento do aço AISI P20 nas condições analisadas.

Palavras-Chave: Usinagem, Fresamento, Ferramenta de Corte, Rugosidade, Desgaste de Flanco.

¹ Estudante do Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul - Rau. E-mail:

¹rodrigo.d21@aluno.ifsc.edu.br e ²savio.p1@aluno.ifsc.edu.br

³ Orientador e Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul - Rau. E-mail: cristiano.silva@ifsc.edu.br



INFLUENCE OF BALL-END MILL GEOMETRY ON WEAR AND SURFACE FINISH OF AISI P20 STEEL

abstract

Currently, the demand for the manufacturing of molds and dies through machining processes has increased in the industry. To achieve production efficiency in these complex components, it is necessary to obtain surfaces with excellent finish quality and within narrow dimensional tolerance ranges. Ball-end mills have emerged as essential tools, capable of effectively machining complex surfaces. Manufacturers of cutting tools are constantly seeking ways to develop high-performance tools that also offer an excellent cost-benefit ratio. This involves investing in advanced technologies to improve tool geometries, selecting the best raw materials, and applying high-quality coatings, all contributing to better tool performance. The objective of this study is to evaluate the surface finish and flank wear (VBb max) during the machining of AISI P20 steel using four 10 mm diameter ball-end mills coated with AlCrN and having rake angles of 0° and 5°. The cutting speeds employed were 120 m/min and 150 m/min. In general, the conditions with a cutting speed of $V_c = 120$ m/min and a rake angle of 0° showed the best performance in terms of tool life and surface finish quality, making them the most suitable parameters for milling AISI P20 steel under the analyzed conditions.

Keywords: Machining, Milling, Cutting Tool, Roughness, Flank Wear.



1 INTRODUÇÃO

O crescente avanço tecnológico resulta na necessidade de evolução contínua dos processos de usinagem. As indústrias buscam novos materiais para ferramentas de corte, além de otimização dos parâmetros e estratégias, visando maior produtividade e menor custo. Segundo Santos e Sales (2007), o setor é altamente competitivo, exigindo profissionais qualificados e atualizados para se responsabilizar com a complexidade dos processos de corte.

Para Machado *et al.* (2009), o fresamento é um processo de usinagem versátil, capaz de produzir geometrias complexas com alta taxa de remoção de material devido às múltiplas arestas da ferramenta de corte. Sua aplicação na crescente demanda pela fabricação de moldes e matrizes, tem motivado diversos estudos para aumentar a produtividade sem comprometer a qualidade das peças fabricadas.

A geometria da ferramenta de corte e a seleção adequada dos parâmetros de usinagem como velocidade de corte, avanço, profundidade e largura de corte influenciam diretamente o acabamento superficial, o desgaste da ferramenta, a usinabilidade e o tempo de produção. Segundo Daniyan *et al.* (2019), o controle desses parâmetros é essencial para garantir precisão dimensional, qualidade superficial, segurança, sustentabilidade e competitividade no processo de usinagem, contribuindo para a redução de custos e o aumento da produtividade.

Os ângulos de inclinação e o avanço influenciam diretamente na estabilidade e no comportamento do processo de fresamento, impactando nas forças de corte, no torque e nos erros de forma. Esses ângulos, quando ajustados adequadamente, podem reduzir significativamente a ocorrência de marcas na superfície final, aumentar a produtividade e aprimorar a qualidade da peça acabada, uma vez que minimizam os esforços de corte e melhoram a estabilidade do processo (OZTURK *et al.*, 2009).

No fresamento, as ferramentas de corte podem ser compostas por vários dentes, realizando a remoção de material da peça de forma intermitente. Assim, cada cunha de corte da ferramenta sofre flutuações de cargas térmicas e



mecânicas, as quais promovem avarias e desgastes nas ferramentas de corte. O desgaste de flanco é ocasionado pelo atrito entre as superfícies principal e lateral de folga da ferramenta de corte com a superfície usinada do material (LOPES *et al.*, 2022).

Segundo Rathod (2018), durante o processo de usinagem, o desgaste da aresta de corte é um fenômeno inevitável que altera progressivamente sua geometria original. Essa alteração afeta diretamente o acabamento superficial e a precisão dimensional da peça, comprometendo a qualidade do produto final e a eficiência do processo produtivo.

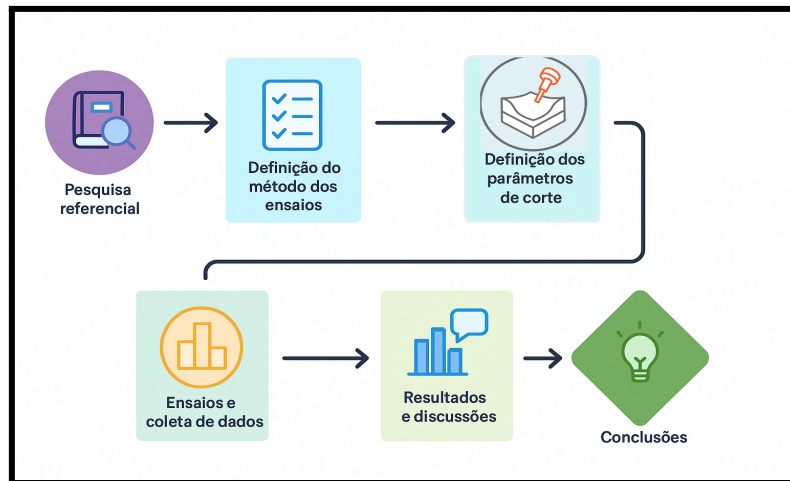
De acordo com Freitas *et al.* (2018), o termo integridade superficial é utilizado para tratar dos aspectos da superfície da peça usinada, onde são incluídos acabamento superficial (como a rugosidade), danos metalúrgicos e tensões residuais. É extremamente importante controlar o estado da superfície das peças após a fabricação por usinagem. Por esta razão, a seleção cuidadosa dos parâmetros de corte corretos de usinagem tem grande influência na obtenção de uma boa integridade superficial.

A qualidade da superfície no fresamento é fundamental, pois influencia diretamente a durabilidade, o desempenho e a precisão das peças, especialmente em moldes para injeção de plástico com geometrias complexas. A rugosidade é um fator determinante tanto no acabamento quanto na eficiência do processo, exigindo ferramentas adequadas para se obter os resultados desejados (Viswanathan *et al.* 2021).

Este trabalho comparou o desempenho de duas fresas de topo esférico com geometrias distintas quanto ao acabamento de superfície e ao desgaste de flanco durante o fresamento de acabamento do aço AISI P20. Além da geometria das ferramentas, variou-se também a velocidade de corte (V_c).

2 METODOLOGIA

Figura 1 – Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Os autores (2025).

Na Figura 1 é possível verificar a metodologia empregada para realização deste trabalho. Este capítulo apresenta os materiais e os métodos utilizados nos ensaios realizados.

2.1 PROCESSO EXPERIMENTAL

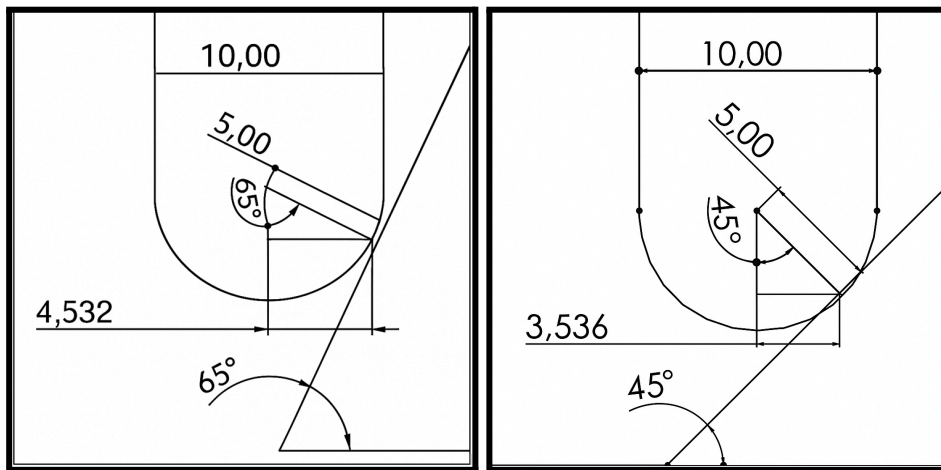
A metodologia deste trabalho foi definida com base em catálogos de fabricantes e nos experimentos realizados por Wojciechowski *et. al.* (2017), onde foram realizados testes com fresa de topo esférica em aço liga 55NiCrMoV6, um aço muito utilizado para fabricação de moldes e matrizes. O objetivo do trabalho foi a otimização dos parâmetros de corte durante a usinagem de acabamento, utilizando fresas esféricas e variando-se a inclinação das superfícies visando diminuir as forças de corte.

Segundo Wojciechowski *et. al.* (2017), a influência do ângulo de inclinação da superfície nas forças resultantes do fresamento são baixas entre 15° e 60°, deste modo definiu-se o ângulo de inclinação da superfície para este experimento de 25° e 45°, e o material do corpo de prova um aço AISI P20 com dureza aproximada de 32 HRC.

A velocidade de avanço (V_f) para os ensaios foi definida através de cálculo específico e o avanço por aresta (mm/dente) foi estabelecido em 0,1 mm/dente, com base no catálogo do fabricante da fresa de topo esférica.

Devido ao processo de usinagem com inclinações de 25° e 45° em relação ao plano de referência, deve-se empregar como parâmetro a velocidade de corte efetiva, sendo esta a velocidade de corte no diâmetro efetivo de contato da ferramenta com a peça, conforme representado na Figura 2.

Figura 2 – Diâmetro efetivo de corte



Fonte: Os autores (2025).

Com base neste parâmetro a Tabela 1 apresenta o diâmetro efetivo de corte.

Tabela 1 – Ângulo de inclinação e diâmetro efetivo de corte.

Ângulo de inclinação da superfície	Diâmetro efetivo
25°	9,064 mm
45°	7,072 mm

Fonte: Os autores (2025).

Deste modo as velocidades de corte foram definidas em 120 e 150 m/min e a definição da rotação por minuto (rpm) foi estipulada com cálculo específico através



do diâmetro efetivo de corte. A partir destas informações pode-se então definir todos os parâmetros necessários para a usinagem desta pesquisa, conforme parametrização expressa na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de corte para ensaios.

Ensaio	Amostra (fresa)	Ângulo de ataque	Ø efetivo de corte (mm)	Ângulo inclinação (peça)	V _c (m/min)	Rotação (rpm)	ap (mm)	ae (mm)	fz (mm/min)	Vf (mm/min)
1	1 2	5°	7,07	45°	150	6 750	0,3	0,3	0,1	1 350
2	1 2		9,06	25°	120	4 214				843
3	3 4	0°	7,07	45°	150	6 750				1 350
4	3 4		9,06	25°	120	4 214				843

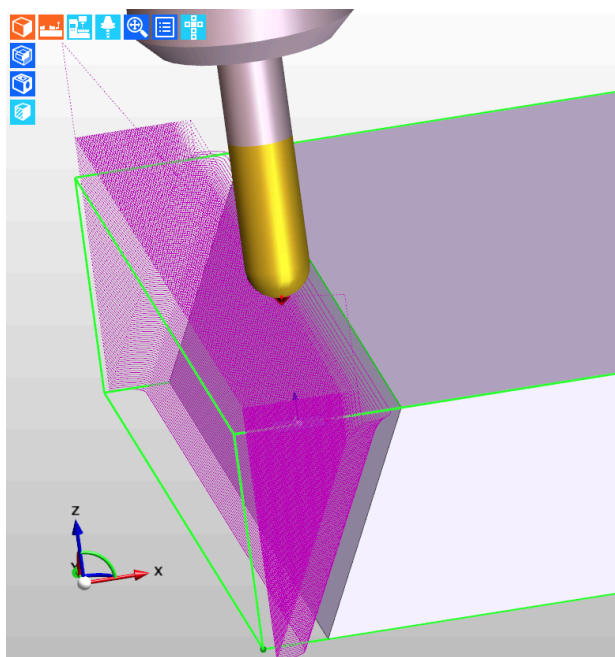
Fonte: Os autores (2025).

Foram realizados 4 ensaios diferentes variando-se o ângulo de inclinação, a velocidade de corte e a geometria da fresa. Cada ensaio foi executado em 2 amostras com 2 fresas diferentes..

O processo de usinagem foi realizado em um centro de usinagem CNC de 3 eixos marca ROMI, modelo D-600, com comando FANUC Oi-MC e rotação máxima do eixo de 7 500 rpm e potência nominal de 30 KVA. A estratégia de usinagem foi programada com auxílio do *software* CAM, Edgecam®. As fresas de topo esféricas foram fixadas através de mandril hidráulico HQT BT40 HC20 - 72,5.

Para os ensaios optou-se pelo emprego da estratégia de fresamento concordante no sentido descendente, onde a ferramenta começa o corte na parte superior da peça e avança na direção inferior copiando o ângulo da face usinada, conforme representado na Figura 3. Os ensaios foram realizados à seco.

Figura 3 – Estratégia desenvolvida pelo software EdgeCAM para usinagem das amostras.



Fonte: Os autores (2025).

2.2 MATERIAIS UTILIZADOS

O corpo de prova a ser usinado (AISI P20) tem formato retangular com as dimensões: 190mm X 150mm X 35mm (comprimento x largura x altura) preparado com duas faces inclinadas de 25° e 45°. O aço AISI P20 é um aço ferramenta de baixa liga com dureza aproximada de 32 HRC, sendo amplamente utilizado na indústria de fabricação de moldes de injeção de plásticos e matrizes de fundição sob pressão. A Tabela 3 apresenta a composição química dos elementos químicos presentes neste aço.

Tabela 3 - Composição química nominal (%p.) do aço AÇO AISI P20.

Material	C(%p.)	Mn(%p.)	Si(%p.)	Cr(%p.)	Mo(%p.)
AISI P20	0,28-0,40	0,60-1,00	0,20-0,80	1,40-2,00	0,30-0,55

Fonte: AÇO ESPECIAL. Aço P20 Composição (2025)

A fixação do material bruto deu-se através do emprego de morsa hidráulica.



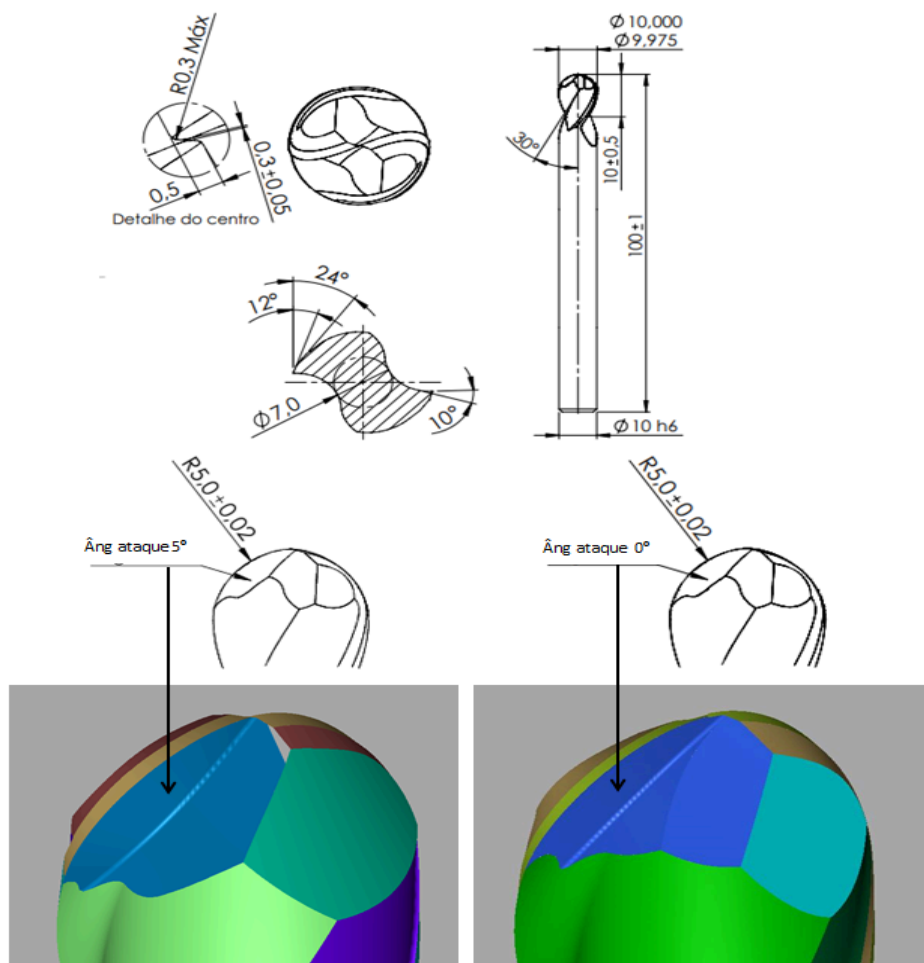
Utilizou-se como ferramenta de corte quatro fresas de topo esférica de metal duro, sendo estas duas com ângulo de ataque 5° e outras duas com ângulo de ataque 0° . Segundo o fabricante, são indicadas para usinar materiais com até 40 HRC.

As ferramentas revestidas pela Oerlikon Balzers, possuem revestimento de AlCrN (nitreto de alumínio e cromo) e são fabricadas com matéria-prima KU20, sendo esta uma liga que apresenta tamanho de grão subfino e bom desempenho geral em condições de usinagem de velocidade média, sendo indicada para ferramentas como brocas e fresas. Mostra-se adequada para o corte de diversos materiais, incluindo aços-liga comuns, ligas de alumínio, ligas resistentes ao calor e ferro fundido, com dureza aproximada de 91,8 HRA. Cada ferramenta conta com duas arestas de corte, diâmetro de 10 mm, comprimento útil de 10 mm e comprimento total de 100 mm.

As fresas foram fabricadas pela empresa VR TOOLS, especializada na produção de ferramentas rotativas de metal duro. Os modelos foram confeccionados conforme as especificações presentes nos desenhos técnicos; contudo, algumas informações foram suprimidas devido ao sigilo industrial da empresa.

A Figura 4 ilustra as ferramentas evidenciando o ângulo de ataque das fresas. Estas geometrias de ferramenta foram utilizadas no conjunto dos ensaios 1 e 2 com ângulo de ataque 5° e para os ensaios 3 e 4 com ângulo de ataque em 0° .

Figura 4 – Geometrias das fresas de topo esférica $\varnothing 10\text{mm}$ e ângulo de ataque de 5° e 0° .



Fonte: Os autores (2025).

As micrografias geradas para realizar a medição de desgaste de flanco das fresas, foram obtidas através do estereoscópio STEMI 2000-C com câmera AxioCam ERc 5s. As medições foram realizadas a cada 20 350 mm de usinagem em cada aresta de corte até o percurso final de cada face inclinada 203 500 mm.

Para avaliação dos resultados nas medições de rugosidade obtida a cada usinagem total da face inclinada (203 500 mm de usinagem) foi utilizado um rugosímetro TIME modelo TR210, com cutoff de 0,8 mm. Foram realizadas 5 medições perpendiculares ao avanço da fresa ao longo da face usinada para determinação da rugosidade total (Rt) e rugosidade média (Ra).

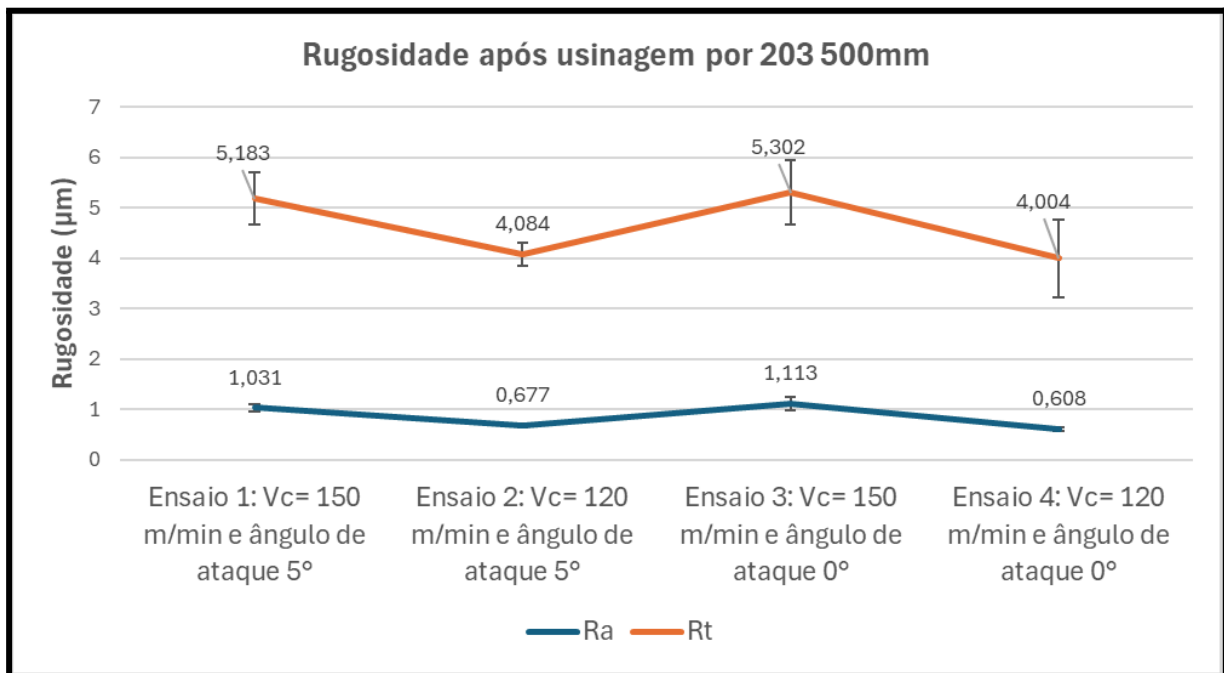
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios foram correlacionados com os parâmetros analisados e discutidos com base nas avaliações realizadas tanto nos corpos de prova quanto nas ferramentas empregadas. Dessa forma, os parâmetros podem ser aplicados em diferentes processos similares, contribuindo para o avanço tecnológico e para eventuais melhorias nos processos de usinagem. As análises foram conduzidas tendo como referência os objetivos propostos nesta pesquisa.

3.1 ACABAMENTO DA SUPERFÍCIE

A análise da superfície usinada consiste na medição das rugosidades formadas em cada área avaliada. Na figura 5, são apresentados os resultados obtidos nas medições de rugosidade para cada um dos ensaios realizados.

Figura 5 - Rugosidade média e total obtida após usinagem por 203 500mm.



Fonte: Os autores (2025).



Os resultados obtidos nos ensaios de usinagem do aço AISI P20 indicam que a velocidade de corte é o principal parâmetro que influencia diretamente a rugosidade superficial, bem como a interação entre velocidade de corte e geometria da ferramenta.

A análise da Figura 5 revela que a menor rugosidade média ($R_a = 0,608 \mu\text{m}$) foi obtida no Ensaio 4 ($V_c = 120 \text{ m/min}$; ângulo de ataque = 0°), enquanto o Ensaio 3 ($V_c = 150 \text{ m/min}$; ângulo de ataque = 0°) apresentou o maior valor de rugosidade ($R_a = 1,113 \mu\text{m}$).

O aumento da V_c e conseqüentemente da rotação e da velocidade de avanço faz com que ocorra o aumento da temperatura gerada na interface ferramenta/cavaco comprometendo o acabamento superficial da peça usinada. Este fator é particularmente crítico na usinagem à seco.

Os resultados indicam que, para uma mesma profundidade de corte (ap) e avanço por dente (mm/dente), o aumento da velocidade de corte gerou um aumento na rugosidade, o que corrobora a afirmação de Trent e Wright (2000), que apontam que a elevação da temperatura da zona de corte pode intensificar o desgaste da ferramenta e piorar o acabamento da peça. Ademais, Shaw (2005), conclui que o desgaste acelerado pela maior temperatura e a possível formação de aresta postiça de corte podem resultar na piora do acabamento superficial.

Os resultados indicam também que a mudança do ângulo de ataque na geometria da ferramenta, tem pouco efeito sobre o acabamento superficial, considerando os mesmos parâmetros, ou seja, para os ensaios com V_c 150 m/min os resultados são semelhantes entre si, ensaio 1 resultou em $R_a = 1,031 \mu\text{m}$, ensaio 3 resultou em $R_a = 1,113 \mu\text{m}$, e com V_c 120 m/min o mesmo se repete, ensaio 2 resultou em $R_a = 0,677 \mu\text{m}$ e ensaio 4 resultou em $R_a = 0,608 \mu\text{m}$.

Analisando o efeito da variação da velocidade de corte (150 m/min e 120 m/min), percebe-se que a diferença entre as rugosidades é ligeiramente maior. Na V_c de 150 m/min, obteve-se uma para o ensaio 1 um R_a de 1,031 μm e ensaio 2 com V_c de 120 m/min um R_a de 0,677 μm , resultando em uma redução da R_a de 34%. Na

V_c de 150 m/min, obteve-se uma R_a para o ensaio 3 de 1,113 μm e ensaio 4 com V_c de 120 m/min um R_a de 0,608 μm , uma redução da R_a de 45%.

Os valores das rugosidades finais estão de acordo com os resultados de Kuczmaszewski *et al.* (2022), que obtiveram rugosidades totais variando entre aproximadamente 4,2 μm e 6,6 μm , no fresamento com fresa de topo esférica. Em escala industrial, valores situados entre 2 μm e 5 μm são bem aceitos e são adotados como valores de referência como padrão de qualidade.

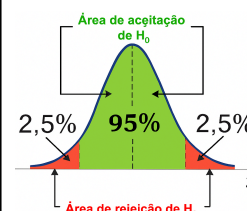
Os resultados obtidos indicam que, em condições típicas de fresamento, o R_t situa-se em uma faixa compatível com a realidade industrial de superfícies acabadas obtidas por fresamento. Embora os ensaios 1 e 3 tenham ficado com R_t superior, ainda assim sua faixa de acabamento final indica que está dentro da realidade industrial de acabamentos.

Arruda *et al.* (2013), concluíram que os parâmetros com maior influência para se obter menor rugosidade média são a velocidade de avanço e a profundidade de corte lateral, ou largura de corte. Os resultados obtidos nos ensaios 2 e 4 corroboram com os resultados encontrados por Arruda *et al.* (2013), pois demonstram que as menores velocidades de avanço geraram superfícies com menor rugosidade média.

Na figura 6 apresenta a análise de variância (ANOVA) para os fatores da velocidade de corte e geometria da ferramenta (ângulo de ataque de 0° e 5°) sobre a variável de resposta: rugosidade média da superfície.

Figura 6 - Análise de variância para a rugosidade média da superfície.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Velocidade de Corte	1,843414225	1	1,843414	312,6196	2,48E-19	4,113165
Geometria da Ferramenta	0,000403225	1	0,000403	0,068382	0,795198	4,113165
Interações	0,057229225	1	0,057229	9,705347	0,003597	4,113165
Dentro	0,2122801	36	0,005897			
Total	2,113326775	39				



Fonte: Os autores (2025).

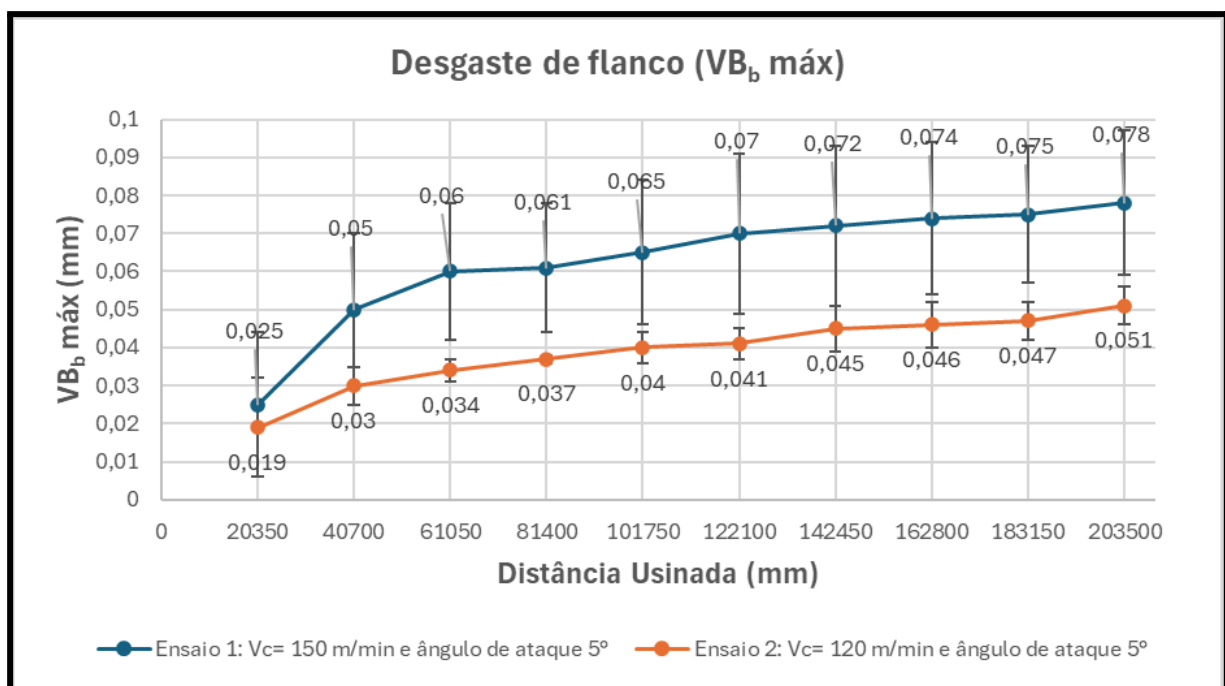
Neste trabalho, para a análise de variância adotou-se o nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$), ou seja, para valores de P menores que 0,05 a hipótese nula deve ser rejeitada, indicando que este fator analisado tem influência sobre a variável de resposta. Caso o valor de P for maior que 0,05 a hipótese nula deve ser considerada, ou seja, os fatores em análise não exercem influência significativa na variável de resposta (Montgomery e Runge, 2018).

Conforme pode ser visualizado na Tabela 4, a diferença na geometria da ferramenta (ângulo de ataque) não tem influência significativa na rugosidade média final das amostras. Por outro lado, a variação da velocidade corte exerce influência significativa na Ra, assim como a interação entre a velocidade de corte e a geometria da ferramenta.

3.2 DESGASTE DE FLANCO (VB_b MÁX)

A Figura 7 apresenta os resultados do desgaste de flanco máximo (VB_b máx) das ferramentas de corte, após a usinagem do aço AISI P20.

Figura 7 - Desgaste de flanco máximo (VB_b máx) para o Ensaio 1 ($V_c=150$ m/min, ângulo de ataque = 5°) e Ensaio 2 ($V_c=120$ m/min, ângulo de ataque = 5°).



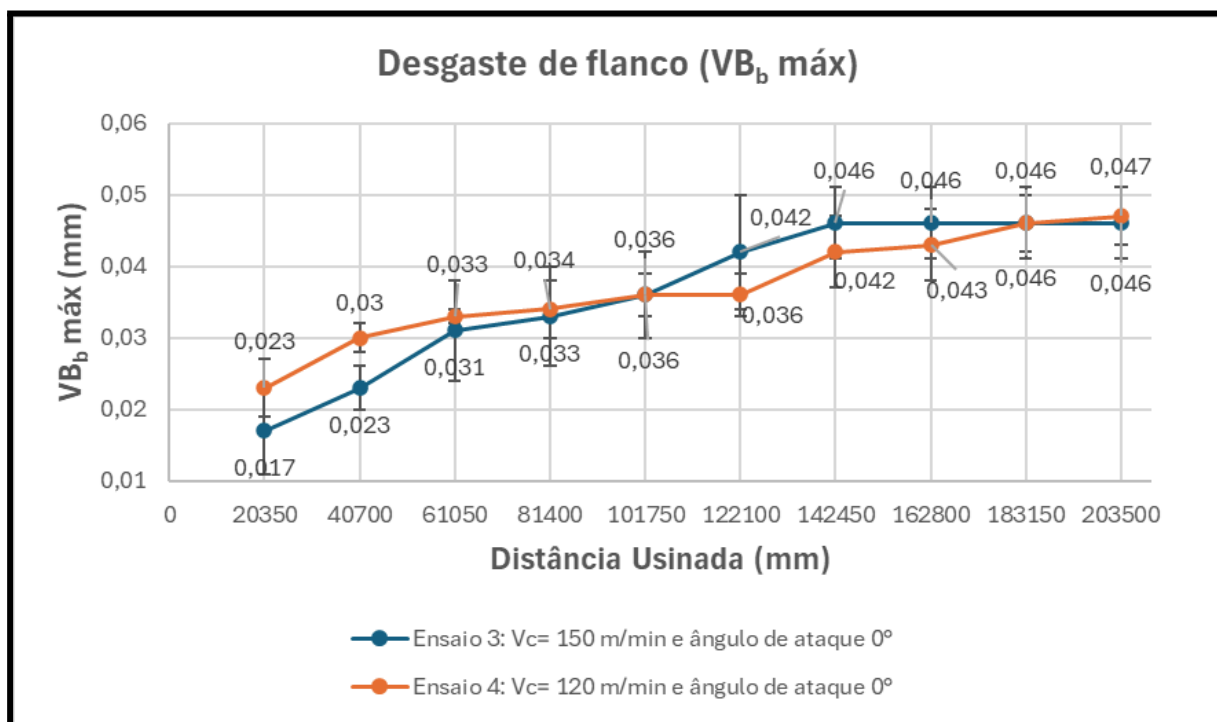
Fonte: Os autores (2025).

As figuras de desgaste de flanco (figuras 7 e 8) mostram que o aumento da velocidade de corte (V_c) resulta em maior desgaste de flanco. No Ensaio 1 ($V_c = 150$ m/min), o desgaste máximo registrado foi $VB_b \text{ máx} = 0,078$ mm, enquanto no Ensaio 2 ($V_c = 120$ m/min), o desgaste foi menor, com $VB_b \text{ máx} = 0,051$ mm. Esse comportamento é esperado, uma vez que o aumento da velocidade de corte gera maiores forças térmicas na zona de corte, acelerando os processos de desgaste por difusão e oxidação (Machado *et al.*, 2011).

No ensaio 1 ($V_c = 150$ m/min), a ferramenta apresentou uma taxa de desgaste mais acentuada, evidenciado pela maior inclinação da curva ao longo da distância usinada. Já no ensaio 2 ($V_c = 120$ m/min) verificou-se uma menor taxa de desgaste, com maior estabilidade do processo.

Esse comportamento indica que a elevação da velocidade de corte aumenta a temperatura na zona de corte e acelera os mecanismos de desgaste, enquanto a redução da velocidade prolonga a vida útil da aresta (Machado *et al.*, 2009).

Figura 8 - Desgaste de flanco máximo ($VB_b \text{ máx}$) para o Ensaio 3 ($V_c=150$ m/min, ângulo de corte= 0°) e Ensaio 4 ($V_c=120$ m/min, ângulo de corte= 0°).



Fonte: Os autores (2025).

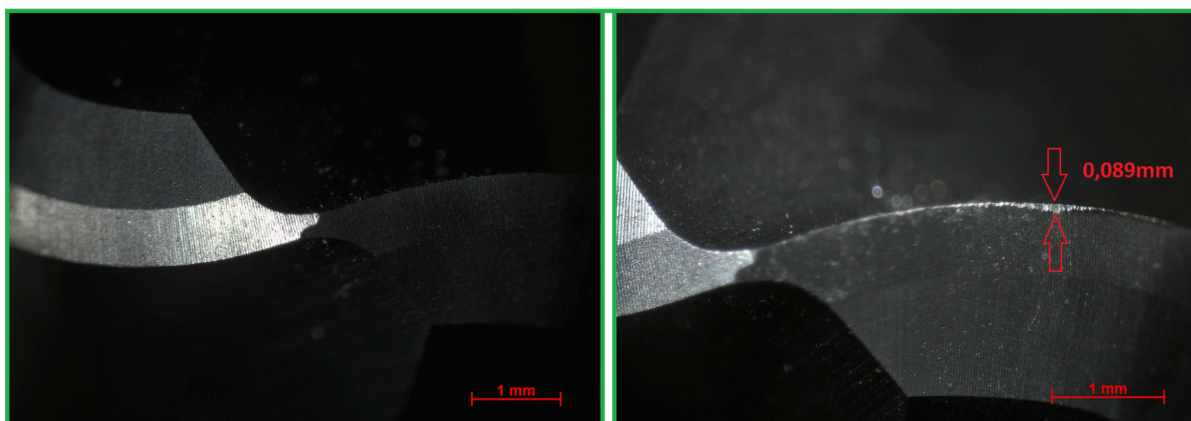
Na comparação entre os dois ensaios realizados em condições semelhantes, ambos sem utilização de fluido de corte e mantendo o ângulo de ataque das ferramentas em 0° , observa-se que os valores de desgaste apresentam comportamento semelhante, seguindo praticamente a mesma tendência em função da velocidade de corte aplicada.

De acordo com Trent & Wright (2000), a curva típica de desgaste de flanco segue um comportamento em “S”, composto pelas fases de adaptação, desgaste estável e desgaste acelerado. Entretanto, apenas as duas primeiras fases são claramente identificáveis. Adaptação até os 61 050 mm de usinagem e desgaste estável até o final do ensaio.

Segundo Recchia (2023), a estratégia de interrupção durante os ensaios acabam diminuindo a temperatura da fresa e a dissipação de calor, o que pode prolongar sua vida útil. Foram 10 intervalos até atingir os 203 500 mm. Se o ensaio fosse realizado de forma contínua, sem interrupções, é possível que a vida útil da fresa fosse reduzida devido ao aumento da temperatura de trabalho.

A Figura 9 apresenta o aspecto inicial e o desgaste de flanco (VB_b máx) gerado após a usinagem final, para a condição do Ensaio 1 ($V_c= 150$ m/min, $f_z= 0,1$ mm/aresta e ângulo de ataque = 5°).

Figura 9 - Desgaste de flanco (VB_b máx) para o Ensaio 1.



Fonte: Os autores (2025).

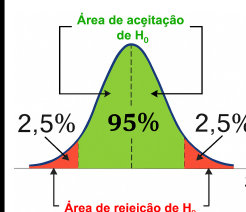
A mudança na geometria da aresta de corte, resultante do desgaste de flanco (VB_b máx) de 0,089 mm compromete a eficiência do corte, gerando maior esforço de usinagem, aquecimento localizado e perda de qualidade superficial da peça usinada.

O acompanhamento do desgaste de flanco é fundamental para garantir a usinagem da peça com as tolerâncias geométricas e dimensionais exigidas pelo projeto, além de avaliar a vida útil da ferramenta e a necessidade de substituição ou reafinamento.

A Figura 10 apresenta a análise de variância (ANOVA) para os fatores: velocidade de corte e geometria da ferramenta (ângulo de ataque de 0° e 5°) sobre a variável de resposta: desgaste máximo de flanco.

Figura 10 - Análise de variância para o desgaste máximo de flanco.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Velocidade de Corte	0,000715563	1	0,000716	6,354672	0,026867	4,747225
Geometria da Ferramenta	0,001242563	1	0,001243	11,03478	0,006089	4,747225
Interações	0,000826563	1	0,000827	7,340426	0,018979	4,747225
Dentro	0,00135125	12	0,000113			
Total	0,004135938	15				



Fonte: Os autores (2025).

Conforme dados apresentados na Tabela 5, tanto a velocidade de corte, a geometria da ferramenta e a interação entre estes dois fatores, exercem influência significativa sobre o desgaste de flanco das ferramentas de corte na usinagem do aço AISI P20, com nível de significância de 5%. Ao analisarmos individualmente, a geometria da ferramenta (ângulo de corte) é a que exerce maior influência, com P-valor de 0,006.

3.3. CORRELAÇÃO ENTRE RUGOSIDADE E DESGASTE DE FLANCO

É importante observar a correlação direta observada entre o desgaste de flanco e a rugosidade superficial. Quanto maior o desgaste de flanco (VB_b máx), maior a rugosidade da superfície usinada. Isso ocorre porque a mudança na



geometria da aresta de corte compromete a eficiência do corte, resultando em superfícies com maior deformação plástica e maior atrito.

Os resultados desta pesquisa estão de acordo com as observações de Shaw (2005), que afirma que o desgaste excessivo da ferramenta afeta consideravelmente o gume de corte, gerando um acabamento mais irregular. Além disso, como indicam Diniz *et al.* (2012), a maior taxa de desgaste pode levar à perda da capacidade de corte da ferramenta, aumentando a rugosidade da peça usinada.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da análise e discussão dos resultados experimentais conclui-se que:

- A velocidade de corte (V_c) é o parâmetro que mais influencia no acabamento superficial da peça.
- A menor velocidade de corte (120 m/min) resulta em menores valores de rugosidade média e total (R_a e R_t).
- A velocidade de corte influencia diretamente o desgaste (VB_b máx), indicando que maiores velocidades tendem a aumentar a taxa de desgaste devido ao aumento da temperatura na zona de corte e à intensificação dos mecanismos de atrito.
- A geometria da ferramenta (ângulo de ataque) é o parâmetro com maior influência para o desgaste de flanco, porém a interação entre velocidade de corte x geometria também é significativa.
- As fresas com ângulo de ataque de 0° apresentaram os menores valores de desgaste de flanco em comparação com de ângulo de ataque 5° .
- De forma geral, as condições de $V_c = 120$ m/min e ângulo de ataque de 0° apresentaram o melhor desempenho entre vida útil da ferramenta e qualidade do acabamento superficial, sendo as mais indicadas para o fresamento do aço AISI P20 nas condições analisadas.

Os resultados obtidos indicam que a escolha adequada da geometria da fresa e dos parâmetros de corte é fundamental para otimizar o processo, equilibrando qualidade superficial e durabilidade da ferramenta.



REFERÊNCIAS

AÇO ESPECIAL. *Aço P20 composição*. [S. l.]: Aço Especial, s.d. Disponível em: <https://www.acoespecial.com.br/aco-p20-composicao>. Acesso em: 26 maio 2025.

ARRUDA, Etory Madrilles et al. Integrated optimization using mixture design to confirm the finishing of AISI P20 using different cutting strategies and ball nose end mills. *Measurement*. São João Del-rei, p. 54-63, ago. 2013

DANIYAN, I. A.; TLHABADIRA, I.; DARAMOLA, O. O.; MPOFU, K. Projeto e otimização de parâmetros de usinagem para obter uma taxa de remoção efetiva de AISI P20. *Procedia CIRP*, v. 84, p. 861-867, 2019.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Felipe C.; COPPINI, Nivaldo Luiz. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2012.

FREITAS, Paulo Cesar et al. Análise das tensões residuais e integridade superficial no fresamento de topo de aço SAE 4340 sob diferentes parâmetros de corte. *Engevista*, v. 20, n. 5, p. 720–731, dez. 2018. ISSN 1415-7314.

KUCZMASZEWSKI, Jarosław; GRADZIK, Artur; PIEŚKO, Piotr; PRUCNAL, Damian. Influence of Ball-End Milling Strategy on the Accuracy and Roughness of Free Form Surfaces. *Applied Sciences*, [s. l.], v. 12, n. 9, p. 4421, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12094421>.

LOPES, Rafael Henrique; BALDIN, Vitor; HOUCK, Celso Ferraz; GELAMO, Rogério Valentim; MACHADO, Álisson Rocha. Vida de ferramentas de metal duro revestidas de TiAlN no fresamento do aço ABNT 1045 com MQL. In: COLÓQUIO DE USINAGEM, 24., 2022, Curitiba. *Anais...* Curitiba: PUCPR – PPGEM, 2022. p. 1–10.

MACHADO, Álisson Rocha et al. *Teoria da usinagem dos materiais*. São Paulo: Blucher, 2009. 371 p.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 2. ed. rev. São Paulo: Edgard Blücher, 2011. 397 p.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. Tradução de Verônica Calado. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 629 p. ISBN 9788521632412.

OZTURK, Erdem; TUNC, L. Taner; BUDAK, Erhan. Investigação dos efeitos dos ângulos de avanço e inclinação em processos de fresagem com topo esférico de 5 eixos. *Revista Internacional de Ferramentas e Fabricação de Máquinas*, v. 49, n. 12, p. 1053–1062, 2009.



RATHOD, K. B.; LALWANI, D. I. Modeling of flank wear progression for coated cubic boron nitride tool during hard turning of AISI H11 steel. *Elsevier*, Surat, p. 6692-6701, 2018.

RECCHIA, Leandro Cesar. Estudo da influência da preparação de aresta aplicada no fresamento de acabamento do aço P20. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/1351233>. Acesso em: 23 jun. 2025.

SANDVIK COROMANT. *Profile milling*. [Internet]. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/profile-milling>. Acesso em: 16 jun. 2025.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. *Aspectos tribológicos da usinagem*. São Paulo: Artliber, 2007. 248 p.

SHAW, Milton. **Metal Cutting Principles**. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2005.

TRENT, Edward M.; WRIGHT, Paul K. **Metal Cutting**. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.

VISWANATHAN, G.; PRAVEEN, R.; PRABHU, L.; PRAKASH, S. Avaliação dos parâmetros de usinagem para o fresamento do aço para moldes P20 HH usando uma fresa de topo específica. *Materials Today: Proceedings*, v. 46, p. 8248-8253, 2021.

WOJCIECHOWSKI, S. et al. Optimisation of machining parameters during ball end milling of hardened steel with various surface inclinations. *Measurement*, Poznan, jul. 2017.