

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA – CEFET/RJ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

**SÉRGIO ROBERTO CAVALCANTI DE OLIVEIRA JÚNIOR
HENRIQUE PORTES DE OLIVEIRA**

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO
DE TOPO DA LIGA DE ALUMÍNIO 6061-T651 UTILIZANDO
PASTILHAS *WIPER***

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RIO DE JANEIRO

2023

SÉRGIO ROBERTO CAVALCANTI DE OLIVEIRA JÚNIOR
HENRIQUE PORTES DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL NO FRESAMENTO
DE TOPO DA LIGA DE ALUMÍNIO 6061-T651 UTILIZANDO
PASTILHAS *WIPER***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientadora: Prof. Tatiane de Campos Chuvas

RIO DE JANEIRO

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

- O48 Oliveira Júnior, Sérgio Roberto Cavalcanti de
Avaliação da integridade superficial no fresamento de topo da
liga de alumínio 6061-t651 utilizando pastilhas wiper / Sérgio
Roberto Cavalcanti de Oliveira Júnior [e] Henrique Portes de
Oliveira. — 2023.
xii, 58f. : il.(algumas color). ; enc.
- Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.
Bibliografia : f. 55-58
Orientadora: Tatiane de Campos Chuvás
1. Engenharia mecânica. 2. Fresagem (trabalhos em metal).
3. Usinagem. 4. Alumínio. I. Oliveira, Henrique Portes de II.
Chuvás, Tatiane de Campos. (Orient.). III. Título.

CDD 621

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

AGRADECIMENTOS

Às nossas famílias, em especial aos nossos pais, Eduardo Mendes de Oliveira e Beatriz Franco Portes de Oliveira, pais de Henrique Portes de Oliveira, e Sérgio Roberto Cavalcanti de Oliveira e Zilmaide Fratane Maciel, pais de Sérgio Roberto Cavalcanti de Oliveira Júnior, por todo o amor, suporte, orientação e que formaram o nosso caráter, em ser quem somos. Em todas as etapas da nossa vida, do ensino básico ao fim desse ciclo de graduação, tivemos um apoio fundamental. Além de sempre tornarem possível atingir os nossos objetivos.

À nossa professora e orientadora Tatiane de Campos Chuvas, por toda a dedicação e fazer com que esse projeto fosse possível. Nossa imensa gratidão a uma das melhores profissionais que tivemos contato durante a faculdade. Além dos técnicos de laboratório do LABUS e do LAMAT e todos os demais professores e colaboradores do CEFET/RJ que de alguma forma estiveram presentes.

Aos amigos e colegas de colégio e de faculdade que sempre nos proporcionaram momentos maravilhosos e que foram fundamentais nessa caminhada. Com eles, a trajetória tornou-se mais prazerosa e mais leve ao longo desses anos.

RESUMO

OLIVEIRA JÚNIOR, Sérgio Roberto Cavalcanti de. OLIVEIRA, Henrique Portes de. **Avaliação da integridade superficial no fresamento de topo da liga de alumínio 6061-T651 utilizando pastilhas *wiper***. 2023. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

Com o avanço tecnológico na indústria metalmeccânica novas soluções foram desenvolvidas com a finalidade de aumentar a produtividade na fabricação de peças por meio do processo de usinagem, bem como garantir que a qualidade superficial do componente usinado possa atender às especificações de projeto. Inúmeros fatores influenciam a qualidade da superfície de uma peça usinada, tais como, parâmetros de corte, geometria da ferramenta utilizada, além das condições das máquinas operatrizes. Diante disso, pastilhas com geometria alisadora (*wiper*) vem sendo muito utilizadas em substituição às pastilhas convencionais em operações de acabamento. Por possuir uma extensa fase plana como aresta secundária, as pastilhas *wiper* permitem produzir peças com melhor acabamento superficial. Além disso, essa ferramenta possibilita o emprego de maiores valores de velocidade de avanço, mantendo os parâmetros de rugosidade em níveis satisfatórios, resultando em um aumento de produtividade sem perda de qualidade. Contudo, a influência da pastilha alisadora na integridade superficial de peças de alumínio usinadas ainda é pouco explorada. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo verificar a influência da geometria da ferramenta de corte na integridade superficial após o fresamento de topo do alumínio 6061-T651, utilizando diferentes parâmetros de corte e comparando os resultados obtidos por pastilhas convencionais e *wiper*. Os resultados mostraram que as amostras usinadas por pastilha *wiper* apresentaram melhor qualidade superficial, ou seja, menores valores de rugosidade (R_a e R_t), em relação aos canais fresados por ferramentas com geometria convencional. Ao mesmo tempo, ao usinar com uma pastilha *wiper*, tornou-se possível trabalhar com maiores valores de avanço por dente, sem elevar os níveis de rugosidade.

Palavras-chave: Fresamento. Integridade superficial. Pastilhas *wiper*. Alumínio 6061-T651.

ABSTRACT

OLIVEIRA JÚNIOR, Sérgio Roberto Cavalcanti de. OLIVEIRA, Henrique Portes de. **Analysis of surface integrity in face milling of 6061-T651 aluminum alloy using wiper inserts.** 2023. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

Since the technology has been modernized in the metalworking industry, new solutions were developed in order to increase the machining processes productivity for manufacturing of parts, as well as ensuring that the machined components surface quality can meet the design specifications. Several parameters influence the surface quality of machined components, such as cutting parameters, cutting tool geometry and machine tool conditions. Therefore, wiper inserts have been used in place of conventional inserts in finishing operations. As wiper inserts have an extensive flat cutting edge, they can improve the surface finish of machined components. Furthermore, this tool allows machined components to be submitted to higher feed rates without negatively affecting the surface roughness, resulting in productivity increasing without quality loss. However, the influence of wiper insert on surface integrity of machined aluminum parts is still not widely studied. The current work is aimed to verify the influence of cutting tool geometry on surface integrity of 6061-T651 aluminum alloy after face milling, under different cutting parameters and comparing conventional and wiper inserts. The results showed that surfaces machined by wiper inserts presented better surface quality, in other words, lower surface roughness parameters (R_a and R_t) were obtained than those machined by conventional tools. In addition, wiper inserts improved the surface finish at higher feed rates.

Keywords: Milling. Surface integrity. *Wiper* inserts. 6061-T651 aluminum alloy.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Tipos fundamentais de fresamento: a) Fresamento tangencial; b) Fresamento frontal. | 4 |
| Figura 2 – Tipos de fresamento tangencial: a) Fresamento concordante; b) Fresamento discordante..... | 5 |
| Figura 3 – Profundidade de corte (a_p), penetração de trabalho (a_e), rotação da fresa (n), velocidade de corte (v_c), velocidade de avanço (v_f) e avanço por dente (f_z) no fresamento frontal. | 7 |
| Figura 4 – Exemplos de fresas inteiriças. | 8 |
| Figura 5 – Exemplos de fresas com insertos ou pastilhas. | 9 |
| Figura 6 – Elementos da cunha de corte de uma fresa frontal..... | 10 |
| Figura 7 – Representação do perfil de medição da rugosidade R_a | 12 |
| Figura 8 – Esquema ilustrativo de superfícies com diferentes geometrias e o mesmo valor de R_a | 13 |
| Figura 9 – Representação do procedimento de medição das rugosidades R_z e R_t . Sendo l_t , o comprimento total, l_v , a distância para o início da medição e l_n , a distância para a parada do apalpador. | 15 |
| Figura 10 – Perfil teórico de uma superfície usinada por fresamento frontal. | 15 |
| Figura 11 – Descrição dos fatores que influenciam a rugosidade. | 16 |
| Figura 12 – Aplicação do método de dureza Vickers: a) Penetrador piramidal de diamante; b) Impressão produzida na superfície da peça. | 19 |
| Figura 13 – Perfil de microdureza a partir da superfície usinada..... | 21 |
| Figura 14 – Gráfico da variação da microdureza Vickers do cavaco em função da velocidade de corte. | 22 |
| Figura 15 – Modelos de pastilhas para fresamento: a) Raio de canto (r_e); b) Fase paralela ou plana (b_s). | 23 |
| Figura 16 – Plano mais saliente das pastilhas <i>wiper</i> em relação às convencionais..... | 24 |
| Figura 17 – Influência do raio de canto (r_e) nos parâmetros de rugosidade R_a e R_z | 25 |
| Figura 18 – Influência da variação dos parâmetros de usinagem na rugosidade R_a | 26 |
| Figura 19 – Comparação dos efeitos dos parâmetros de usinagem na rugosidade R_a | 27 |

| | |
|---|----|
| Figura 20 – Influência do avanço na rugosidade R_a para diferentes velocidades de corte e geometrias das pastilhas utilizadas no torneamento do alumínio A356..... | 28 |
| Figura 21 – Influência do avanço na rugosidade R_z para diferentes velocidades de corte e geometrias das pastilhas utilizadas no torneamento do alumínio A356..... | 28 |
| Figura 22 – Gráfico da rugosidade R_a em função do avanço para todas as profundidades de corte empregadas. | 32 |
| Figura 23 – Gráfico da rugosidade R_a em função da velocidade de avanço (v_f) para as três profundidades de corte (a_p) utilizadas. | 33 |
| Figura 24 – Superfícies de resposta da rugosidade média ($R_a \times f_z \times a_p$) para diferentes velocidades de corte: a) $v_c = 1000$ m/min; b) $v_c = 800$ m/min. | 34 |
| Figura 25 – Representação da peça de alumínio 6061-T651 utilizada no fresamento | 35 |
| Figura 26 – Fresadora ferramenteira Diplomat 3001, modelo FVF-2000..... | 36 |
| Figura 27 – Representação da pastilha convencional utilizada, modelo 345R-1305E-KL H13A. | 37 |
| Figura 28 – Representação da pastilha <i>wiper</i> utilizada, modelo 345N-1305E-KW8 H13A.... | 37 |
| Figura 29 – Durômetro Instron Wolpert GmbH, modelo Dia Testor 7551..... | 39 |
| Figura 30 – Microdurômetro Wilson Instruments, modelo 422MVD. | 40 |
| Figura 31 – Rugosímetro portátil Mitutoyo, modelo SJ-210. | 41 |
| Figura 32 – Relação da rugosidade R_a com o avanço por dente (f_z) para a profundidade de corte (a_p) de 0,5 mm. | 43 |
| Figura 33 – Relação da rugosidade R_a com o avanço por dente (f_z) para a profundidade de corte (a_p) de 1,0 mm. | 43 |
| Figura 34 – Relação da rugosidade R_t com o avanço por dente (f_z) para a profundidade de corte (a_p) de 0,5 mm. | 46 |
| Figura 35 – Relação da rugosidade R_t com o avanço por dente (f_z) para a profundidade de corte (a_p) de 1,0 mm. | 46 |
| Figura 36 – Variação da dureza Rockwell B em cada condição de corte e tipo de pastilha utilizada. | 48 |
| Figura 37 – Relação da microdureza Vickers com o avanço por dente (f_z) para a profundidade de corte (a_p) de 0,5 mm..... | 50 |

| | |
|---|----|
| Figura 38 – Relação da microdureza Vickers com o avanço por dente (f_z) para a profundidade de corte (a_p) de 1,0 mm..... | 51 |
|---|----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Efeito dos parâmetros de usinagem nas rugosidades R_a e R_z | 17 |
| Tabela 2 – Efeito da profundidade de corte e da ferramenta na rugosidade e na produtividade. | 18 |
| Tabela 3 – Parâmetros de usinagem empregados no fresamento de topo do alumínio 2A97. . | 20 |
| Tabela 4 – Parâmetros de usinagem empregados no fresamento do alumínio 7075-T6. | 25 |
| Tabela 5 – Composição química do alumínio 6061. | 31 |
| Tabela 6 – Propriedades mecânicas do alumínio 6061..... | 31 |
| Tabela 7 – Parâmetros de corte empregados na usinagem HSM em alumínio 6061-T6..... | 34 |
| Tabela 8 – Composição química do alumínio 6061-T651 (% em massa)..... | 35 |
| Tabela 9 – Condições de corte das amostras usinadas. | 38 |
| Tabela 10 – Resultados das medições de rugosidade (R_a e R_t). | 42 |
| Tabela 11 – Resultados das medições de dureza Rockwell B. | 48 |
| Tabela 12 – Resultados das medições de microdureza Vickers. | 50 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|------------|--|
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| HSM | <i>High Speed Machining</i> |
| AA | <i>Aluminum Association</i> |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| T6 | Material solubilizado e envelhecido artificialmente |
| T8 | Material solubilizado, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente |
| v_c | Velocidade de corte |
| d | Diâmetro da fresa |
| n | Rotação da ferramenta |
| v_f | Velocidade de avanço |
| f | Avanço |
| f_z | Avanço por dente |
| z | Número de dentes da ferramenta |
| a_p | Profundidade de corte |
| a_e | Penetração de trabalho |
| A_γ | Superfície de saída |
| A_α | Superfície principal de folga |
| R_a | Rugosidade média |
| R_z | Rugosidade média parcial |
| R_t | Altura total do perfil |
| HV | Dureza Vickers |
| HRB | Dureza Rockwell B |
| Q | Carregamento aplicado no ensaio de dureza Vickers |
| D | Diagonal da marca de impressão no ensaio de dureza Vickers |
| b_s | Comprimento da fase plana como aresta secundária |
| r_e | Raio de canto |
| l_m | Comprimento do percurso de medição |
| l_e | Comprimento de amostragem |
| l_v | Distância para o início da medição |
| l_n | Distância para a parada do apalpador |
| l_t | Comprimento total |
| iC | Diâmetro do círculo inscrito da pastilha de corte |

| | |
|-------|--|
| l_a | Comprimento efetivo da aresta de corte |
| S | Espessura da pastilha de corte |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| 2.1 USINAGEM..... | 3 |
| 2.1.1 Fresamento | 3 |
| 2.1.1.1 Parâmetros de corte..... | 6 |
| 2.1.1.2 Ferramenta de corte | 7 |
| 2.2 INTEGRIDADE SUPERFICIAL..... | 10 |
| 2.2.1 Rugosidade Superficial | 11 |
| 2.2.2 Microdureza | 18 |
| 2.3 PASTILHAS ALISADORAS (<i>WIPER</i>)..... | 22 |
| 2.4 ALUMÍNIO..... | 29 |
| 2.4.1 Alumínio 6061 | 30 |
| 2.4.2 Usinagem do Alumínio 6061 | 31 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 35 |
| 3.1 MATERIAL | 35 |
| 3.2 DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS..... | 35 |
| 3.3 FRESAMENTO | 36 |
| 3.4 MEDIÇÃO DE DUREZA..... | 38 |
| 3.5 MEDIÇÃO DE MICRODUREZA..... | 39 |
| 3.6 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE..... | 40 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 42 |
| 4.1 RUGOSIDADE | 42 |
| 4.2 DUREZA..... | 47 |
| 4.3 MICRODUREZA..... | 49 |
| 5 CONCLUSÕES..... | 53 |
| SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 54 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 55 |

1 INTRODUÇÃO

Dentre os processos de fabricação utilizados na indústria, a usinagem destaca-se como um dos mais aplicados, devido à sua grande versatilidade. Nesse processo, com a utilização de uma ferramenta de corte, busca-se remover material de uma peça, de modo a atender às suas especificações de tamanho, forma e acabamento. Em virtude de aspectos inerentes ao processo de corte, como: deformações plásticas, ruptura e geração de calor, a usinagem afeta diretamente a integridade superficial da peça, isto é, promove alterações na superfície do material em serviço, bem como nas camadas subsuperficiais do mesmo (MACHADO *et al.*, 2009). Como a integridade superficial de um componente usinado influencia sua vida útil, torna-se necessário que fatores como rugosidade, microdureza e tensões residuais sejam monitorados, a fim de garantir a qualidade final da peça obtida.

Com o avanço da tecnologia na área de usinagem, a indústria tem buscado alternativas que permitam produzir peças com baixo custo e elevada produtividade, sobretudo, no processo de fresamento, cuja operação possibilita atingir altas taxas de remoção de material, além de proporcionar a fabricação de peças com geometrias complexas (TOLEDO, 2015). Contudo, essas novas soluções desenvolvidas precisam atender às especificações de qualidade superficial da peça, de acordo com os requisitos de projeto (OLIVEIRA, 2015).

Portanto, tendo em vista que a qualidade da superfície de um componente usinado depende diretamente não só dos parâmetros de corte empregados no processo, mas também da geometria da ferramenta utilizada, pastilhas alisadoras (*wiper*) foram desenvolvidas com o intuito de produzir peças com melhor acabamento superficial, em comparação com as pastilhas convencionais. Tal melhoria se justifica devido à geometria distinta da ponta da pastilha *wiper*, cujo elevado valor de comprimento da fase plana (b_s) permite alisar a superfície usinada pelos demais insertos montados na fresa, normalmente convencionais, reduzindo os níveis de rugosidade. Essa nova pastilha possibilita o emprego de maiores valores de avanço por dente, mantendo um acabamento superficial satisfatório, o que aumenta a produtividade (DINIZ *et al.*, 2013; TOLEDO, 2015). Todavia, a influência da pastilha *wiper* na integridade superficial de peças de alumínio usinadas ainda não é amplamente estudada.

Diante do exposto, este trabalho tem por objetivo analisar a influência das pastilhas com geometria alisadora (*wiper*), em comparação com insertos convencionais, na integridade superficial durante o fresamento de topo do alumínio 6061-T651, sob diferentes níveis de avanço por dente e profundidade de corte.

Sendo assim, foram realizados ensaios de dureza Rockwell B e de microdureza Vickers antes da usinagem das amostras, a fim de avaliar tal propriedade do material na condição como recebido. Em seguida, foi executado um fresamento de topo, utilizando uma emulsão como fluido lubri-refrigerante. Por fim, efetuaram-se medições de rugosidade (R_a e R_t), de dureza Rockwell B e de microdureza Vickers, com o intuito de verificar a integridade superficial das peças após usiná-las. Desse modo, foi possível identificar que a utilização de uma pastilha *wiper* no fresamento de topo do alumínio 6061-T651, permitiu não só obter superfícies com melhor acabamento, mas também utilizar maiores velocidades de avanço, sem resultar em prejuízo à qualidade superficial das amostras, conforme indicam os fabricantes da pastilha.

Para a elaboração do presente trabalho, foi realizada uma revisão da bibliografia disponível para pesquisa acerca dos tópicos mais relevantes ao tema desenvolvido. Diante disso, o estudo fundamenta-se na análise de livros, artigos nacionais e internacionais de revistas especializadas, artigos de congressos, trabalhos de conclusão de curso de graduação, dissertações de mestrado, além de consultas à internet. Após o referido estudo prévio e a obtenção das amostras a serem usinadas, elaborou-se um planejamento estratégico para a realização de experimentos sequenciais em laboratórios do CEFET/RJ. Posteriormente, realizou-se o tratamento dos dados obtidos nos testes para posterior discussão e conclusão dos resultados.

O trabalho está estruturado em 5 capítulos, da seguinte forma: Capítulo 1 – Introdução, onde o tema principal deste trabalho é apresentado e definido; Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica; Capítulo 3 – Materiais e Métodos, com a descrição tanto do planejamento experimental adotado, quanto das ferramentas de corte e equipamentos utilizados nos ensaios; Capítulo 4 – Resultados e Discussão, em que os dados provenientes das medições realizadas são expostos e interpretados; Capítulo 5 – Conclusão. Por fim, foram demonstradas não só algumas sugestões para trabalhos futuros, mas também as referências bibliográficas adotadas neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 USINAGEM

A usinagem consiste em um processo de fabricação que visa alterar a forma e a geometria da peça, pela remoção de material por parte de uma ferramenta de corte. Tal procedimento difere-se dos processos de conformação volumétrica, visto que seu emprego não promove a conservação da massa e volume da peça fabricada, ou seja, há retirada de material excedente. Essa porção de material removida pela ferramenta é chamada de cavaco e caracteriza-se por apresentar forma e geometria irregular (MACHADO *et al.*, 2009).

As operações de usinagem podem ser classificadas em relação à forma da ferramenta de corte empregada, que podem ser com geometria definida ou não definida. Nesse sentido, torneamento, fresamento e furação destacam-se como importantes processos que utilizam ferramentas com geometria definida. Por outro lado, na usinagem por abrasão, utilizam-se ferramentas com geometria não definida, como no processo de retificação, cujo instrumento responsável pela remoção de cavaco (rebolo), é formado por um conjunto de grãos abrasivos, que fraturam após perderem sua capacidade de corte e geram novas arestas cortantes afiadas durante a usinagem (MACHADO *et al.*, 2009).

Para a execução de um processo adequado de usinagem em uma peça pode ser necessária a realização das operações em distintas etapas subsequentes, ou seja, em fases de desbaste, seguidas de acabamento. Nos primeiros estágios, a finalidade principal é promover a máxima retirada de cavaco, isto é, com alta taxa de remoção de material, a fim de alcançar uma elevada produtividade. No caso das etapas de acabamento, busca-se garantir a qualidade final da superfície usinada, de acordo com os requisitos de projeto. Para atingir esses resultados, o controle dos parâmetros de usinagem como, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte é essencial para produzir peças que atendam às especificações de tamanho, forma e acabamento, com o menor custo possível.

2.1.1 Fresamento

Dentre os processos de usinagem o fresamento destaca-se como um dos mais versáteis, visto que permite não só que altas taxas de remoção de material sejam alcançadas, em razão da ferramenta (fresa) apresentar múltiplas arestas de corte, mas também promove a formação de

superfícies com geometrias diversas. Nesse processo, a ferramenta, responsável pelo movimento de corte, rotaciona em torno do seu eixo e possibilita a remoção de material. Ao mesmo tempo, o movimento de avanço normalmente é realizado pela própria peça, que encontra-se fixada à mesa da fresadora (MACHADO *et al.*, 2009).

A superfície gerada pelo fresamento em uma peça pode ser paralela ao eixo de rotação da fresa, denominando-se fresamento tangencial (Figura 1a). Já o fresamento frontal ou de topo (Figura 1b), caracteriza-se pela perpendicularidade entre superfície usinada e eixo de rotação da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2013).

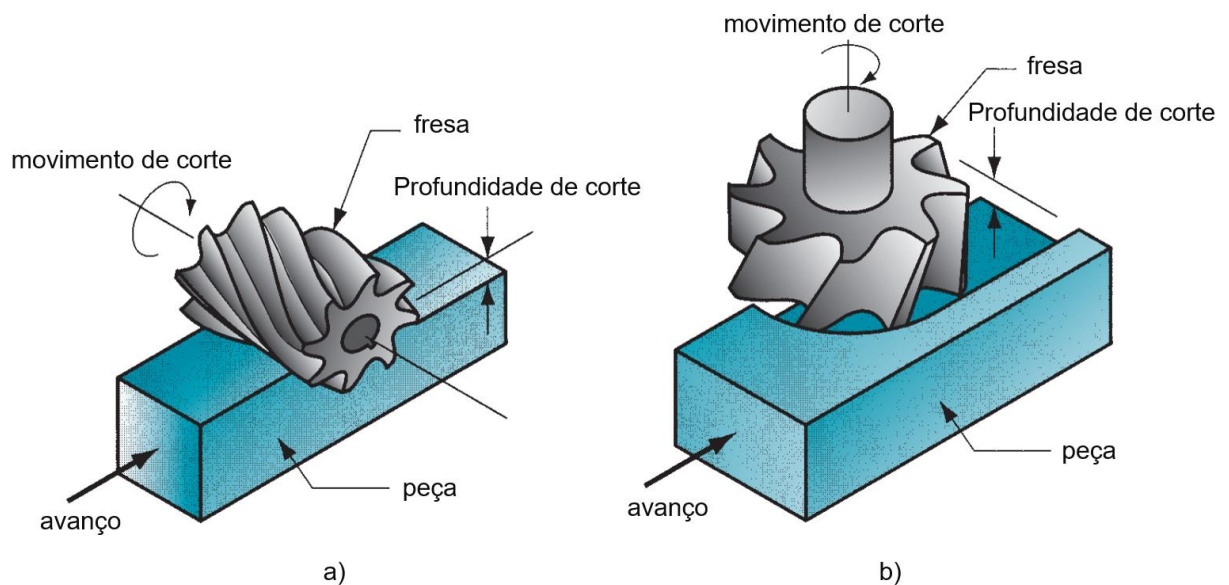


Figura 1 – Tipos fundamentais de fresamento: a) Fresamento tangencial; b) Fresamento frontal. Fonte: Groover (2010) modificado.

Em relação ao fresamento tangencial, vale salientar que pode ser classificado em concordante ou discordante. No fresamento concordante (Figura 2a), a ferramenta rotaciona no mesmo sentido do movimento de avanço da peça. Neste processo, a espessura de corte diminui progressivamente desde o início do contato da aresta cortante na peça até o final do corte. Já no fresamento discordante (Figura 2b), além do movimento de avanço ser contrário ao rotatório da fresa, a espessura do cavaco a ser retirado é nula quando a aresta de corte toca a peça, o que tende a provocar não só um desgaste excessivo da ferramenta, mas também vibrações indesejáveis, em virtude dos dentes da fresa serem forçados para o interior do material usinado, elevando o atrito e a geração de calor na operação (DINIZ *et al.*, 2013).

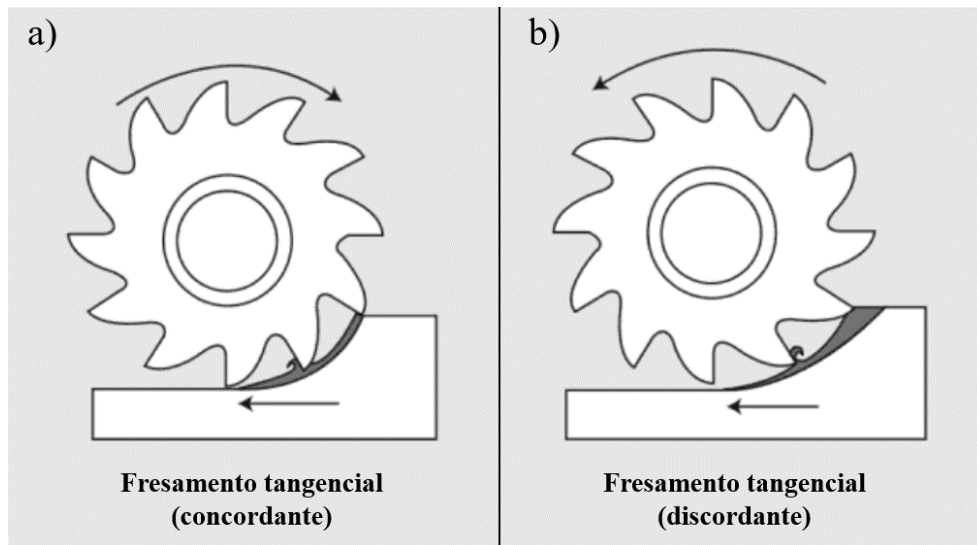


Figura 2 – Tipos de fresamento tangencial: a) Fresamento concordante; b) Fresamento discordante.

Fonte: Machado *et al.* (2009) modificado.

O fresamento frontal, por sua vez, pode ser identificado como simétrico ou assimétrico. No fresamento simétrico, o deslocamento do eixo da ferramenta ocorre sobre o eixo de simetria da peça usinada. Por outro lado, no fresamento assimétrico, não há coincidência entre os eixos da fresa e de simetria da peça em usinagem. No que tange ao sentido de corte, cabe destacar que o movimento concordante ocorre em concomitância com o discordante no fresamento frontal simétrico (comum ou de abertura de canais), uma vez que a espessura de corte aumenta até um valor máximo no centro da peça (fresamento discordante), e diminui progressivamente, retornando ao valor inicial no fim do corte (fresamento concordante) (DINIZ *et al.*, 2013).

O processo de fresamento é responsável pela produção de peças que exigem precisão dimensional e que são aplicadas em diferentes setores, como o aeronáutico e automotivo. Sendo assim, o procedimento de abertura de canais para formação de engrenagens e a fabricação de roscas nas superfícies externas de parafusos e pinos de fixação, são exemplos comuns de métodos empregados para produzir componentes no fresamento. Peças de alumínio fresadas, por sua vez, estão cada vez mais presentes em sistemas que demandam leveza e boa resistência, uma vez que trata-se de um material que pode ser facilmente usinado. Sendo assim, blocos de motores e pistões de cilindros destacam-se como possíveis aplicações.

2.1.1.1 Parâmetros de corte

A variação dos parâmetros de corte tem grande influência na qualidade superficial das peças usinadas. Sob esse ponto de vista, nos processos de acabamento, os parâmetros de usinagem são definidos de modo a atender as exigências de projeto quanto ao nível de rugosidade e à precisão dimensional e geométrica (POLLI, 2005).

Dentre os parâmetros de corte a serem controlados durante uma operação de usinagem, a velocidade de corte (v_c) destaca-se como um dos principais. Tal grandeza representa a velocidade tangencial instantânea oriunda da rotação da ferramenta, segundo a direção e sentido de corte (DINIZ *et al.*, 2013). A equação 2.1 descreve a forma utilizada para calculá-la.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

Onde:

d = diâmetro da ferramenta (mm);

n = rotação da ferramenta (rpm).

No que tange às grandezas que caracterizam o movimento de avanço, cabe distinguir os conceitos de avanço e avanço por dente. O avanço (f) representa o percurso efetuado pela ferramenta ou pela própria peça em cada volta da ferramenta. No caso de processos que utilizam ferramentas com múltiplas arestas cortantes, torna-se necessária a definição do avanço por dente (f_z), que constitui o percurso de cada dente por volta da ferramenta, medido na direção de avanço (DINIZ *et al.*, 2013). Desse modo, o avanço por dente pode ser calculado pela equação 2.2.

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (2.2)$$

Onde:

f = avanço (mm/volta);

z = número de dentes da ferramenta.

Já a velocidade de avanço (v_f) descreve a velocidade instantânea da ferramenta, segundo a direção e sentido de avanço (DINIZ *et al.*, 2013). A equação 2.3 representa a velocidade de avanço matematicamente.

$$v_f = f \cdot n \quad (2.3)$$

Onde:

f = avanço (mm/volta);

n = rotação da ferramenta (rpm).

A profundidade de corte (a_p), por sua vez, é a profundidade de penetração da ferramenta na peça, medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho, isto é, o plano que passa pelo ponto de referência da aresta cortante e que contém as direções de corte e avanço (DINIZ *et al.*, 2013). As representações da profundidade de corte e dos demais parâmetros de usinagem no fresamento frontal podem ser observadas na Figura 3.

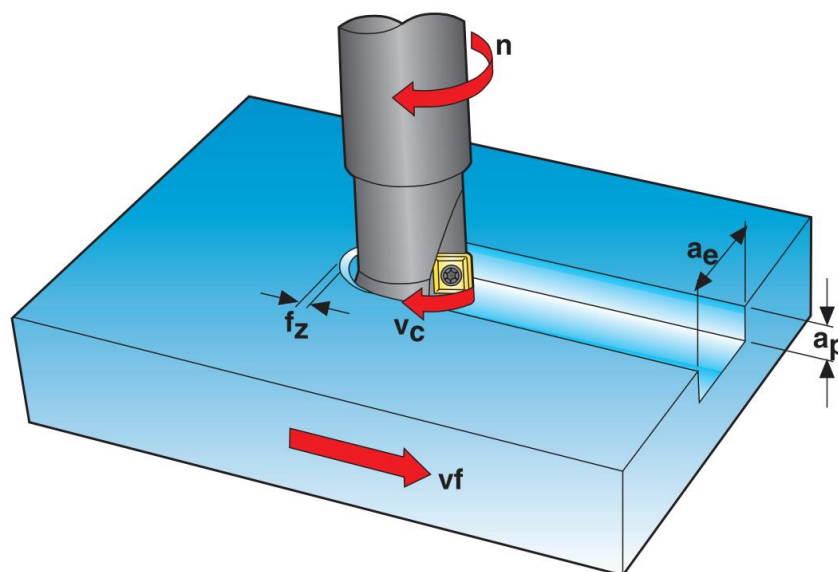


Figura 3 – Profundidade de corte (a_p), penetração de trabalho (a_e), rotação da fresa (n), velocidade de corte (v_c), velocidade de avanço (v_f) e avanço por dente (f_z) no fresamento frontal. Fonte: Seco Tools (2020).

2.1.1.2 Ferramenta de corte

Em todos os processos de usinagem, a ferramenta de corte representa um dos fatores essenciais, uma vez que a mesma é desenvolvida para produzir a peça. No fresamento, por exemplo, por meio da rotação em torno do seu próprio eixo, a ferramenta remove material da peça e produz a geometria pretendida (LOUREIRO, 2020). Essas ferramentas podem ser aplicadas para a produção de superfícies planas, rasgos, contornos, ranhuras, roscas, cavidades, entre outras (POLLI, 2005).

As fresas podem seguir diferentes classificações. Uma delas refere-se à sua geometria, que abrange diversos tipos e formas. As mais comuns são: fresas frontais de facear, fresas

frontais de topo e fresas cilíndricas de disco. O primeiro tipo é aplicado para a obtenção de superfícies planas, já a escolha entre fresa frontal de topo ou cilíndrica é dependente da máquina, além da largura do rasgo e profundidade. Para uma relação entre largura e profundidade do rasgo grande, é preferível uma fresa de disco (DINIZ *et al.*, 2013).

A fresa de topo é muito utilizada, uma vez que além de possuir gumes cortantes na face e na periferia, apresenta vantagens em processos que exigem superfícies de forma livre, como rasgos e cortes de tamanhos e tipos variados. Podem ser fabricadas com topo simples ou duplo, e serem retas, semiesféricas ou toroidais. Já a haste e corpo podem ser cônicos ou cilíndricos, com múltiplos canais, que em sua maioria são helicoidais, embora existam modelos retos (POLLI, 2005).

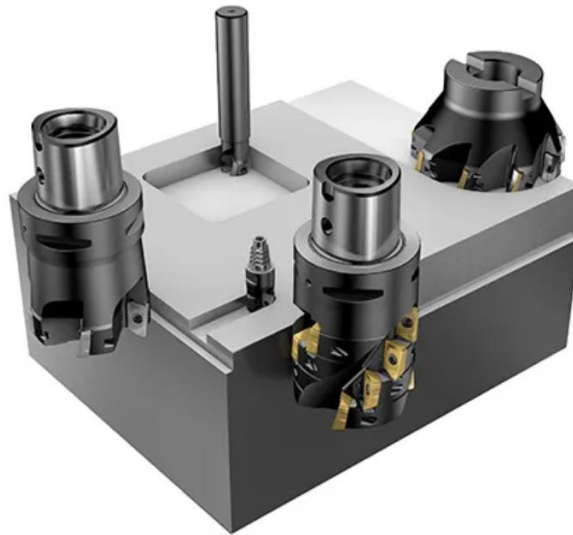
Outro tipo de classificação possível é referente à solução construtiva da ferramenta de corte, que pode ser inteiriça ou com insertos intercambiáveis. A fresa inteiriça (Figura 4) caracteriza-se pela haste e as arestas cortantes formarem uma única peça, de tal modo que a ferramenta possui a mesma constituição. Além disso, para uma melhoria do processo de usinagem, pode ser realizado um revestimento na zona de corte. As fresas podem ser construídas em aço rápido (HSS) ou metal duro (carbeto de tungstênio), além de serem afiáveis (LOUREIRO, 2020).



Figura 4 – Exemplos de fresas inteiriças.
Fonte: Sandvik Coromant (2020).

As fresas com insertos ou pastilhas (Figura 5), por sua vez, caracterizam-se pela presença de componentes montados diretamente no corpo da ferramenta. Com isso, é possível obter fresas de grande dimensão, sem a necessidade de custo de produção do seu corpo, visto que este é reutilizável. Nesse sentido, as fresas com insertos intercambiáveis foram desenvolvidas com o intuito de gerar economia aos custos atrelados ao desgaste da ferramenta.

As pastilhas geralmente são produzidas com materiais especializados para corte como, por exemplo, o metal duro (material de maior custo), ao passo que o suporte pode ser fabricado em aço liga (LOUREIRO, 2020).



**Figura 5 – Exemplos de fresas com insertos ou pastilhas.
Fonte: Sandvik Coromant (2022).**

Segundo Costa *et al.* (2006), a integridade superficial de uma peça usinada sofre influência direta não só dos parâmetros de usinagem, mas também da geometria e do material da ferramenta de corte empregada. Sendo assim, torna-se fundamental o conhecimento da geometria e das partes construtivas das ferramentas de usinagem, a fim de verificar de que modo estas influenciam a qualidade final da peça obtida.

Dentre as partes construtivas das ferramentas de usinagem, destacam-se: a cunha de corte, a superfície de saída, a superfície principal de folga, a aresta principal de corte e a ponta de corte. A cunha de corte é composta pelas superfícies de saída e de folga da ferramenta. Já a superfície de saída (A_{γ}) representa a área sobre a qual o cavaco se move para fora da região de corte. Por outro lado, a superfície principal de folga (A_{α}) é aquela que defronta com as superfícies de corte. A aresta principal de corte, por sua vez, é formada pelo encontro entre as superfícies de folga e saída. Por fim, a ponta de corte representa a intersecção das arestas principal e secundária de corte (MACHADO *et al.*, 2009). Tais aspectos da ferramenta são demonstrados na Figura 6.

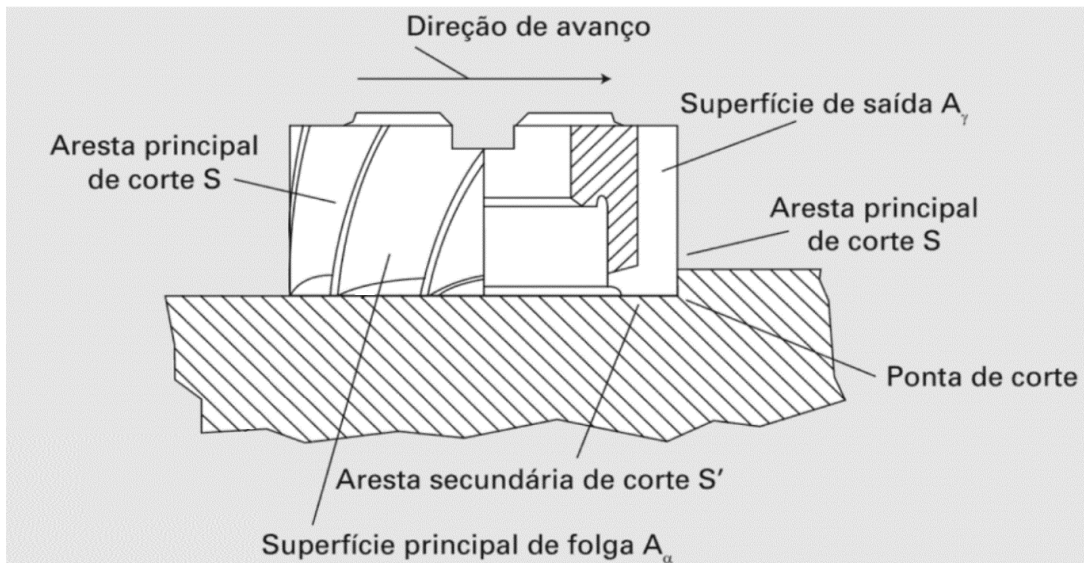


Figura 6 – Elementos da cunha de corte de uma fresa frontal.
Fonte: Machado *et al.* (2009).

2.2 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

O estudo da integridade superficial de uma peça tem por objetivo descrever a qualidade da superfície, por meio da interpretação das alterações sofridas na mesma em decorrência do processo de usinagem. Além disso, cabe ressaltar que a integridade superficial destina-se não só à análise da superfície do material usinado, mas também à avaliação das camadas internas da peça, ou seja, considera os fatores subsuperficiais. Assim, torna-se possível prever o comportamento dos materiais em serviço, a fim de evitar, por exemplo, a ocorrência de falhas por fadiga, visto que as trincas tendem a nuclear-se em regiões próximas ou na superfície do componente (MACHADO *et al.*, 2009; PAULO, 2008).

Diante do exposto, Machado *et al.* (2009) define que as alterações na superfície da peça, isto é, o acabamento, são resultados da combinação do efeito gerado por ondulações, rugosidade e falhas. As ondulações representam erros geométricos cujos espaçamentos são maiores do que as irregularidades superficiais que definem os parâmetros de rugosidade. As falhas, por sua vez, são interrupções na continuidade de uma superfície, que ocorrem devido à presença de defeitos na peça, tais como: inclusões, trincas ou bolhas. Por fim, a rugosidade pode ser entendida como pequenas irregularidades superficiais, que surgem por meio de aspectos inerentes ao processo de corte.

No que tange aos fatores subsuperficiais, esses podem ser divididos em: mecânicos (deformação plástica, microdureza, trincas e tensões residuais) ou metalúrgicos (recristalização e transformações de fase). A microdureza, por exemplo, pode ser facilmente alterada durante a

operação de usinagem, em virtude do encruamento gerado pelo processo de deformação plástica acentuado abaixo da temperatura de recristalização do material (PAULO, 2008). A deformação plástica ocorre após o regime elástico do material e caracteriza-se por ser uma deformação permanente, isto é, não recuperável (CALLISTER e RETHWISCH, 2012). Outro parâmetro muito investigado para avaliação da integridade superficial é o nível de tensões residuais, que podem ser trativas ou compressivas. A tensão de compressão contribui para aumentar a vida em fadiga, uma vez que tende a minimizar e/ou anular possíveis esforços trativos externos aplicados à superfície da peça, reduzindo a probabilidade de formação de uma trinca.

Desse modo, nota-se a importância do estudo das variáveis que caracterizam a integridade superficial dos componentes mecânicos, a fim de melhorar suas condições operacionais, aumentando sua vida útil.

2.2.1 Rugosidade Superficial

A rugosidade representa um dos fatores mais importantes na avaliação da qualidade superficial de um componente usinado, sendo comumente utilizada como parâmetro de saída para monitorar o processo de usinagem. Em relação aos fatores que definem o acabamento superficial de uma peça usinada, as ondulações e falhas devem ser evitadas, na medida em que correspondem a erros provenientes da fabricação. Por outro lado, a especificação do nível de rugosidade requerido está relacionada à aplicação do componente usinado, ou seja, uma baixa rugosidade é essencial, por exemplo, em aplicações cujas superfícies serão destinadas ao escoamento de fluidos, a fim de reduzir as perdas por atrito (MACHADO *et al.*, 2009; TOLEDO, 2015).

Em contrapartida, o grau de rugosidade necessário para o emprego de um componente mecânico pode ser mais elevado. Esse é o caso, por exemplo, dos cilindros de laminação utilizados em operações de desbaste, visto que maiores diferenças entre as espessuras inicial e final da chapa conformada exigem um maior atrito na interface peça-ferramenta, a fim de permitir que o material seja forçado a passar entre os rolos de laminação, provocando sua deformação (HELMAN e CETLIN, 2010).

Dentre os métodos possíveis para determinar a rugosidade de modo quantitativo, os parâmetros de amplitude destacam-se como os principais. Tais valores são obtidos em função das alturas dos picos das irregularidades superficiais e/ou das profundidades dos vales, sem considerar a distância entre as imperfeições ao longo da superfície usinada (MACHADO *et al.*,

2009). Sendo assim, os valores de rugosidade R_a , R_z e R_t representam os parâmetros de saída mais empregados para controlar os processos de usinagem em relação à integridade superficial da peça produzida.

O padrão *Roughness Average* (R_a) – Rugosidade Média – destaca-se como um dos parâmetros de medição de rugosidade mais importantes e utilizados para avaliação da qualidade superficial na indústria metalmeccânica. Tal parâmetro corresponde à média aritmética entre os valores absolutos obtidos pelos desvios dos picos e vales em relação a uma linha de centro, como demonstrado na Figura 7. Essa linha de referência, por sua vez, separa as áreas superiores e inferiores de forma igual, no tocante ao traço do perfil (AGOSTINHO *et al.*, 1977; COSTA *et al.*, 2006). Para definir essa grandeza, torna-se necessária a identificação do comprimento do percurso de medição (l_m), que possui um valor superior, normalmente de três a sete vezes o comprimento de amostragem (*cut-off*).

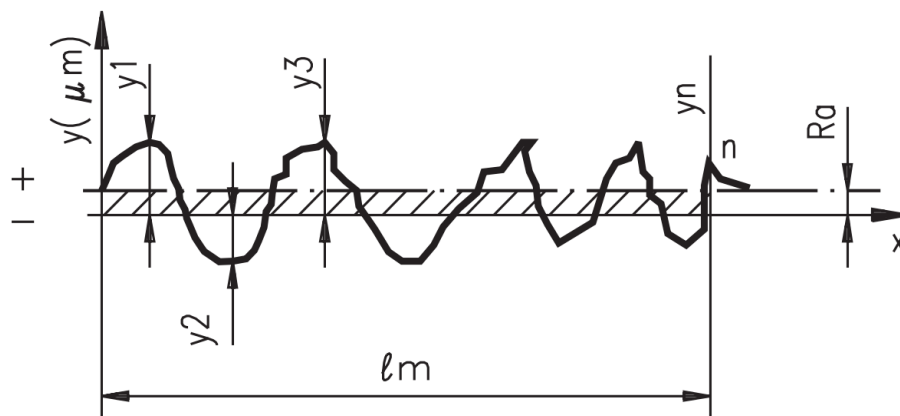
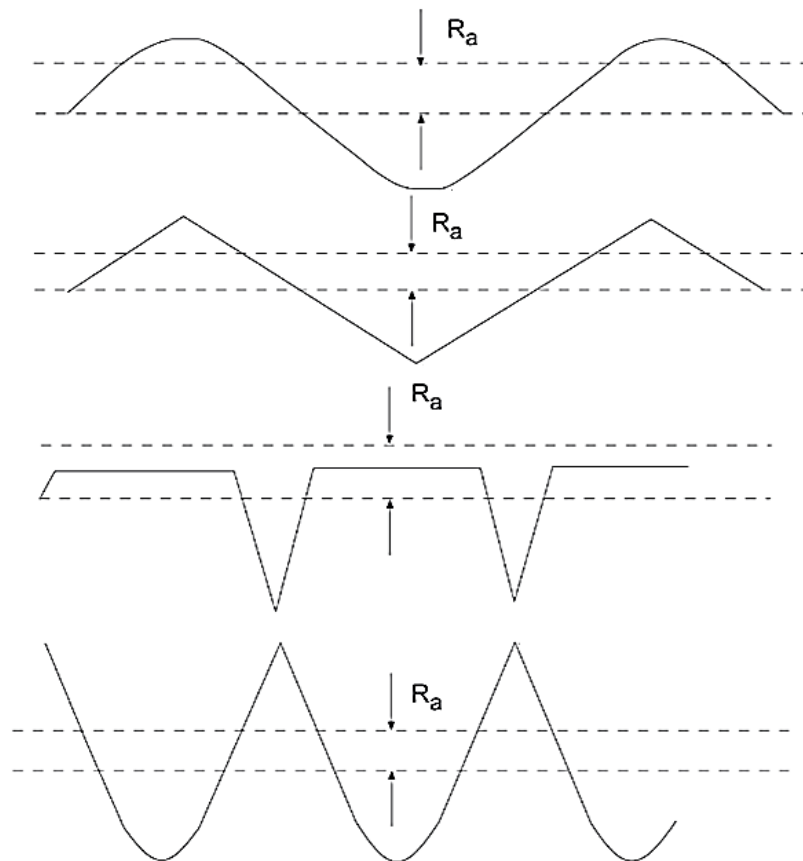


Figura 7 – Representação do perfil de medição da rugosidade R_a .
Fonte: Costa *et al.* (2006) modificado.

Mesmo sendo amplamente aplicada, a rugosidade R_a não é um parâmetro muito preciso. Como pode ser observado na Figura 8, superfícies geometricamente distintas podem apresentar valores de R_a próximos, em razão da estabilidade deste parâmetro, uma vez que representa um valor médio para as irregularidades superficiais de uma peça (MACHADO *et al.*, 2009).



**Figura 8 – Esquema ilustrativo de superfícies com diferentes geometrias e o mesmo valor de R_a .
Fonte: Santos e Sales (2007) modificado.**

De acordo com Agostinho *et al.* (1977), a rugosidade R_a pode ser calculada pela equação 2.4.

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2.4)$$

Onde:

y_i = distância dos picos e vales em relação à linha média;

n = número total de distâncias avaliadas.

Para uma operação de fresamento frontal, a rugosidade R_a pode ser estimada teoricamente por meio da equação 2.5 (MACHADO *et al.*, 2009).

$$R_a = \frac{r_e - \sqrt{r_e^2 - \left(\frac{f_z}{2}\right)^2}}{2} \quad (2.5)$$

Onde:

f_z = avanço por dente (mm/dente);

r_e = raio de canto (mm).

Segundo Costa *et al.* (2006), a rugosidade média parcial R_z também representa um parâmetro fundamental, na medida em que é calculado pela média entre as rugosidades máximas, isto é, a distância entre o maior pico e o vale mais profundo, medidas dentro de cada *cut-off* (l_e) ao longo de l_m . Desse modo, como demonstrado na Figura 9, o parâmetro R_z corresponde à média dos cinco valores de rugosidade parcial (Z_i). A rugosidade R_z pode ser calculada pela equação 2.6.

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 |Z_i| \quad (2.6)$$

Onde:

Z_i = rugosidades parciais medidas em cada *cut-off*.

Por outro lado, o parâmetro R_t é definido como a distância vertical entre o pico mais pronunciado e o vale mais profundo, medida ao longo do percurso de medição (l_m). Na Figura 9, por exemplo, é possível observar que o pico mais alto encontra-se no primeiro *cut-off*, ao passo que o vale mais profundo localiza-se no terceiro *cut-off*, de tal modo que o afastamento entre ambos corresponde ao valor de R_t . Esse parâmetro deve ser analisado em conjunto com outras medições, pois de forma isolada, ele não é capaz de definir o formato da superfície avaliada (NUNES, 2011; ROCHA, 2013).

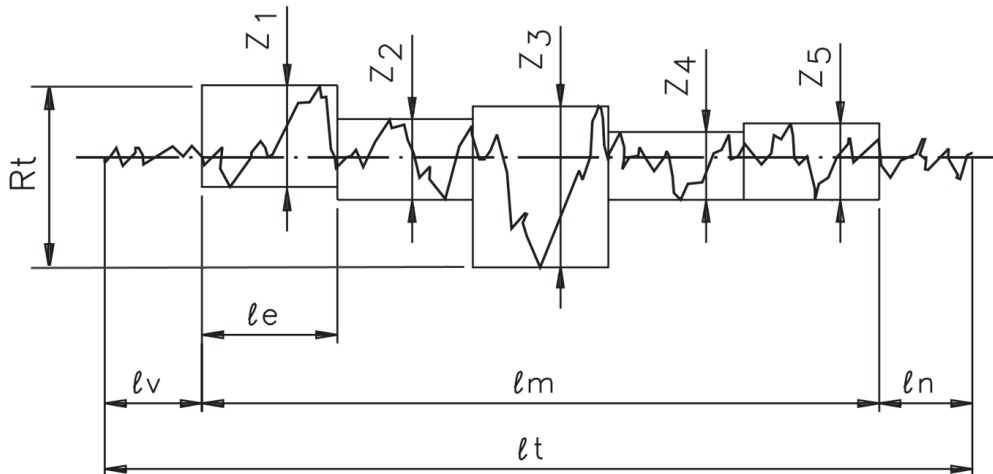


Figura 9 – Representação do procedimento de medição das rugosidades R_z e R_t . Sendo l_t , o comprimento total, l_v , a distância para o início da medição e l_n , a distância para a parada do apalpador.

Fonte: Costa *et al.* (2006) modificado.

De acordo com Machado *et al.* (2009), a equação 2.7 pode ser utilizada para calcular a rugosidade R_t de forma teórica em uma operação de fresamento frontal, com base na geometria da ferramenta de corte empregada (Figura 10).

$$R_t = \frac{f_z}{\tan C + \cot D} \quad (2.7)$$

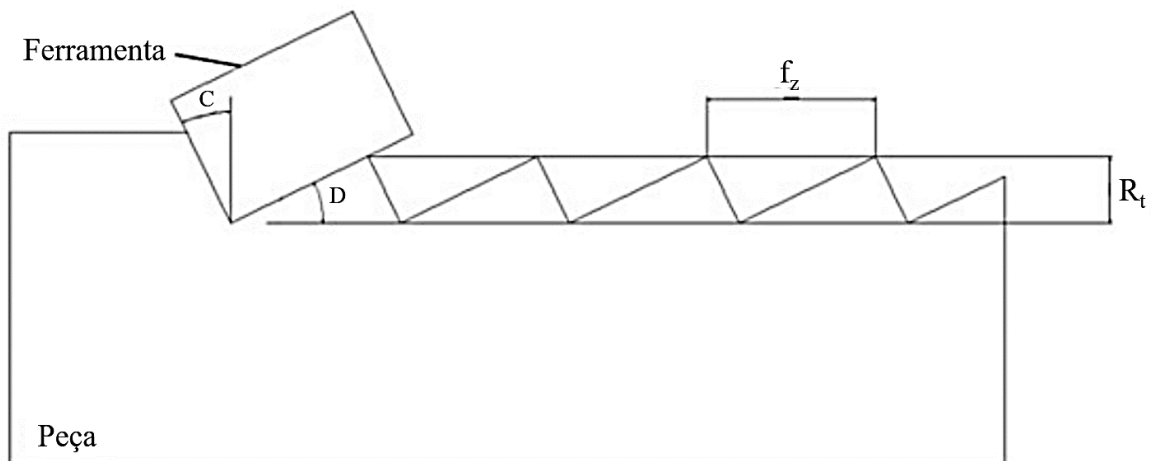


Figura 10 – Perfil teórico de uma superfície usinada por fresamento frontal.

Fonte: Machado *et al.* (2009).

Apesar de existir diversos outros parâmetros, cuja finalidade é avaliar o nível de rugosidade de uma peça, a aplicação do componente usinado representa o principal fator responsável pela determinação de quais parâmetros serão utilizados em cada análise específica (MACHADO *et al.*, 2009).

Segundo Bajic *et al.* (2012), o nível de rugosidade do produto usinado sofre influência direta dos parâmetros de usinagem, propriedades da ferramenta, fenômenos de corte e propriedades do material, conforme representado na Figura 11. Sendo assim, diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de avaliar os parâmetros empregados para execução do processo de fresamento, a fim de garantir a qualidade final da peça acabada.

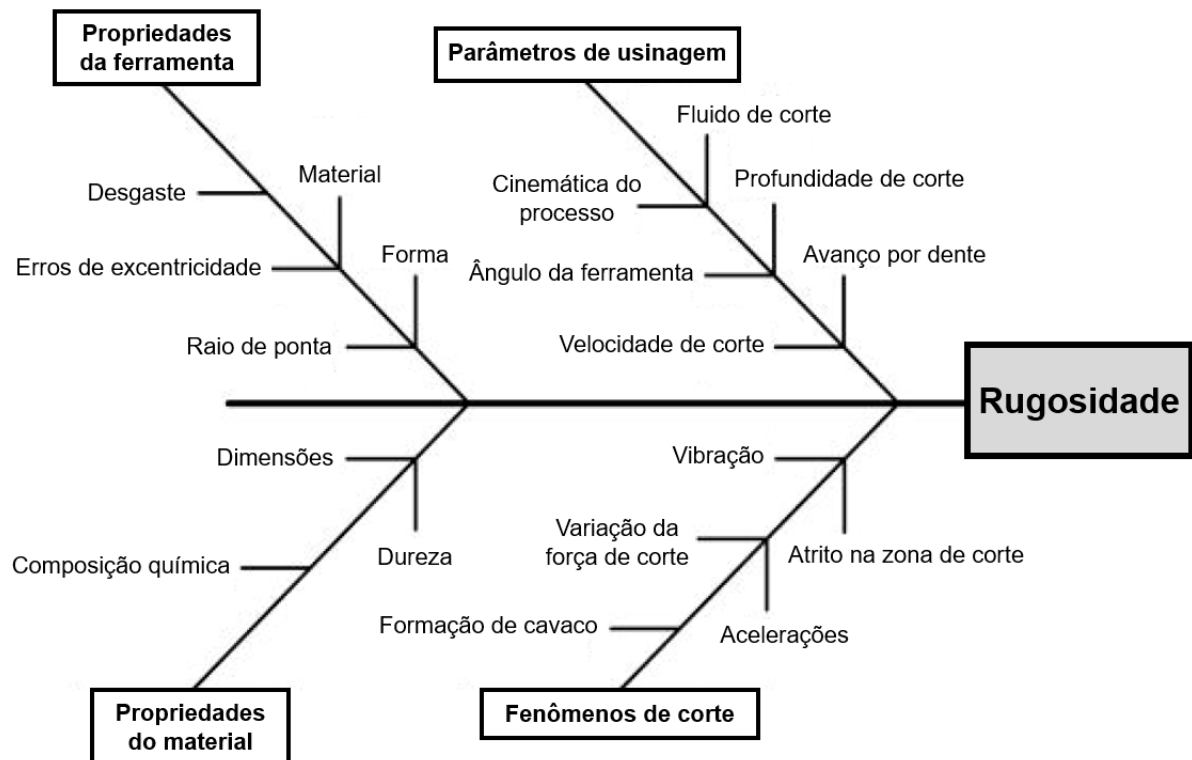


Figura 11 – Descrição dos fatores que influenciam a rugosidade.
Fonte: Bajic *et al.* (2012) modificado.

Costa *et al.* (2006) realizaram experimentos com a liga de alumínio ASTM 6351-T6, a fim de analisar o nível de influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade em canais fresados por fresas de topo de metal duro (carbeto de tungstênio). Para a elaboração do estudo foram realizados testes nos quais verificaram-se as variações dos seguintes parâmetros: velocidade de corte (50 e 100 m/min), avanço por dente (0,02 e 0,04 mm/dente), profundidade de corte (0,5 e 1,0 mm) e número de dentes da fresa (dois e quatro). Assim, como demonstrado na Tabela 1, o avanço por dente representou a variável mais influente no acabamento superficial, uma vez que aumentando-o de 0,02 mm/dente para 0,04 mm/dente, as rugosidades R_a e R_z aumentaram em 0,31 μm e 1,9 μm , isto é, houve um acréscimo em 45% e 43%, respectivamente, em relação às rugosidades médias dos testes executados ($R_a = 0,69 \mu\text{m}$ e $R_z = 4,4 \mu\text{m}$). Segundo Suarez *et al.* (2007), com o aumento do avanço, as marcas deixadas pela ferramenta na peça geram picos mais altos e vales mais profundos, além de aumentar as forças

de usinagem, o que prejudica a qualidade superficial. Por outro lado, a profundidade de corte foi o parâmetro de usinagem menos influente no estudo.

No que tange à influência da ferramenta empregada, Costa *et al.* (2006) concluíram que o aumento do número de dentes da fresa de dois para quatro, promoveu uma redução nos valores de R_a e R_z em 14% e 27%, respectivamente. De acordo com os autores, tal resultado se justifica na medida em que o acréscimo no número de arestas cortantes da fresa torna o corte mais contínuo, diminui as vibrações do sistema e melhora o acabamento superficial. Além disso, a redução do volume de cavaco removido por dente diminui as forças de usinagem e as vibrações durante o corte o que, conseqüentemente, pode melhorar o acabamento superficial.

Tabela 1 – Efeito dos parâmetros de usinagem nas rugosidades R_a e R_z .

| Rugosidade – R_a/R_z [μm] | | | | | | | | | |
|--|-------|---|-------|----------------------------------|--------|---|-------|--------------------------------|--------|
| Rugosidade média dos testes | | Velocidade de corte [m/min] 50 → 100 | | Avanço [mm/dente] 0,02 → 0,04 | | Profundidade de corte [mm] 0,02 → 0,04 | | Nº de dentes da fresa 2 → 4 | |
| R_a | R_z | R_a | R_z | R_a | R_z | R_a | R_z | R_a | R_z |
| 0,69 | 4,4 | +0,06 | -0,2 | +0,31 | +1,9 | 0,00 | +0,1 | -0,10 | -1,2 |
| Efeito gerado | | (↑9%) | (↓5%) | (↑45%) | (↑43%) | | (↑2%) | (↓14%) | (↓27%) |

Fonte: Costa *et al.* (2006) modificado.

Em um outro trabalho, Cruz e Daneluz (2019) analisaram a influência dos parâmetros de corte e da ferramenta no custo da produção de canais fresados de alumínio, com base nos seus efeitos na qualidade superficial e na produtividade da operação. Para a realização do estudo, foram utilizadas as ferramentas H1 e H2, ambas de metal duro (carbeto de tungstênio) e compostas por dois e quatro dentes respectivamente. Os experimentos foram conduzidos mantendo-se os valores constantes tanto de velocidade de avanço (1000 mm/min), quanto de velocidade de corte (125,6 m/min). Por outro lado, as profundidades de corte foram definidas em: $a_p = 0,05, 0,15$ e $0,25$ mm. Desse modo, como representado na Tabela 2, a redução da profundidade de corte contribuiu para diminuir os valores de R_a . Já o aumento do número de dentes da fresa, apesar de não interferir no tempo de operação, contribuiu para diminuir a rugosidade R_a , exceto para a condição de menor profundidade de corte (0,05 mm). Observa-se, portanto, que o efeito proporcionado pela ferramenta no acabamento superficial da peça fresada é compatível com os resultados obtidos por Costa *et al.* (2006).

Tabela 2 – Efeito da profundidade de corte e da ferramenta na rugosidade e na produtividade.

| Dados de teste | | | | |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------------|------------------------|--|
| Amostra | Fresa | Profundidade de corte (mm) | Tempo (min) | Rugosidade (μm) |
| A11 | WIDIA 5873510 Ferramenta H1 | 0,05 | 21,98 | $R_a = 0,473$ |
| A12 | | 0,15 | 8,00 | $R_a = 1,324$ |
| A13 | | 0,25 | 4,73 | $R_a = 1,516$ |
| A21 | WIDIA 5826040 Ferramenta H2 | 0,05 | 21,93 | $R_a = 0,709$ |
| A22 | | 0,15 | 8,00 | $R_a = 0,982$ |
| A23 | | 0,25 | 4,72 | $R_a = 1,199$ |

Fonte: Cruz e Daneluz (2019) modificado.

2.2.2 Microdureza

A dureza é a propriedade mecânica que descreve a capacidade de um material resistir à deformação plástica, usualmente por penetração. Essa grandeza desempenha um papel fundamental na avaliação da integridade superficial de uma peça usinada, devido à possibilidade de formação do encruamento superficial. De acordo com Groover (2010), tal fenômeno indica um aumento significativo da dureza superficial do material, em razão do intenso processo de deformação plástica sofrido pela peça durante a usinagem.

O conhecimento da dureza dos diversos tipos de materiais empregados na indústria é de fundamental importância, sobretudo, para os setores metalúrgico e mecânico. Nesse sentido, foram desenvolvidos ensaios não destrutivos por penetração, dentre os quais os métodos Brinell, Rockwell, Vickers e Knoop destacam-se como os mais aplicados.

A seleção do tipo de ensaio a ser executado é influenciada diretamente pela profundidade de medição e pelas características intrínsecas ao próprio material. Sendo assim, para obtenção de durezas superficiais, o método Vickers é recomendado, uma vez que pode ser aplicado em qualquer espessura do componente ensaiado, devido à sua grande precisão. Esse ensaio, como demonstrado na Figura 12, caracteriza-se pela resistência oferecida pelo material à pressão exercida por um penetrador piramidal de diamante de base quadrada (Figura 12a), que possui um ângulo de 136° entre as suas faces opostas. Em decorrência do processo de penetração, uma impressão na forma de losango é produzida na superfície da peça (Figura 12b), cuja área é inversamente proporcional ao valor de dureza calculado. Para esse tipo de dureza, a carga aplicada ao material varia de 1 até 100 kgf (SOUZA, 1982).

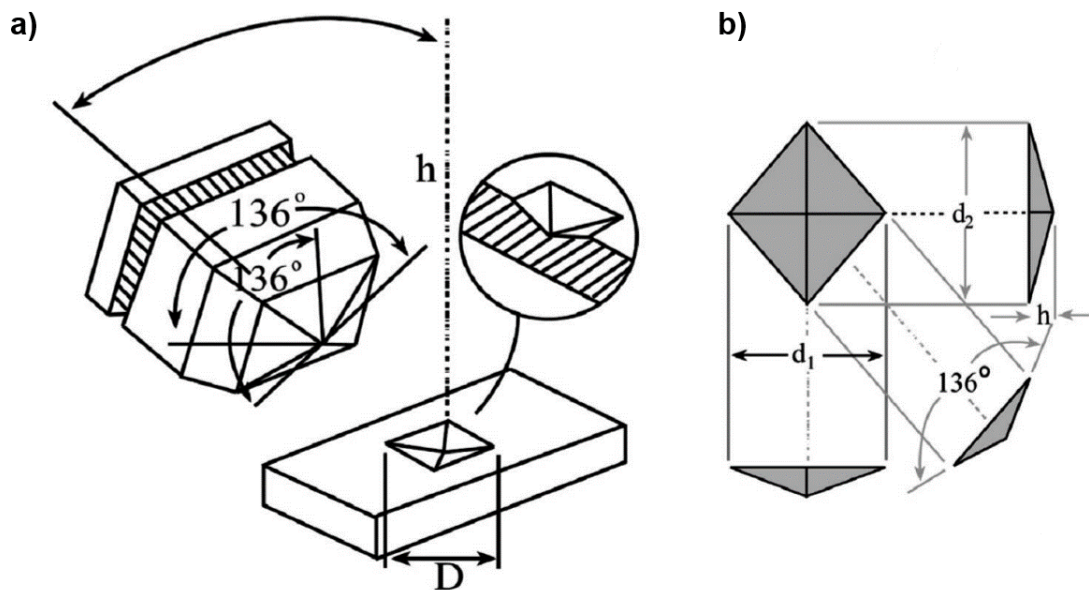


Figura 12 – Aplicação do método de dureza Vickers (HV): a) Penetrador piramidal de diamante; b) Impressão produzida na superfície da peça.
Fonte: Guder *et al.* (2011) modificado.

Após a finalização do ensaio, o resultado da dureza é obtido por meio da razão entre a carga aplicada e a área impressa na superfície. A equação 2.8 demonstra o procedimento utilizado para o cálculo da dureza Vickers (SOUZA, 1982).

$$HV = \frac{1,8544 \cdot Q}{D^2} \quad (2.8)$$

Onde:

Q = carregamento aplicado (kgf);

D = média das diagonais (d_1 e d_2) da marca de impressão (mm).

Por outro lado, o ensaio de microdureza Vickers foi desenvolvido com a finalidade de verificar a dureza dos componentes em condições especiais. Sendo assim, peças que passaram por tratamentos térmicos de endurecimento superficial, materiais que exigem a avaliação dos constituintes microestruturais e peças extremamente finas são exemplos de situações que requerem ensaios de dureza que não se enquadram no procedimento habitual, como é o caso de superfícies usinadas. Tendo em vista que as camadas atingidas pelo processo de deformação plástica durante o processo de usinagem são muito pequenas, ensaios de dureza convencionais não conseguiriam medir com precisão os valores de dureza (SOUZA, 1982).

O ensaio para obtenção da microdureza Vickers envolve o mesmo método descrito para o processo convencional, contudo a impressão produzida passa a ser microscópica e a carga aplicada no ensaio é limitada a 1 kgf (SOUZA, 1982).

Muitos trabalhos têm sido realizados com a finalidade de avaliar a microdureza superficial da peça usinada, mediante variação dos parâmetros de corte. Diante disso, Niu *et al.* (2019) verificaram as alterações na microdureza obtida no fresamento de topo a seco da liga de alumínio 2A97, com a utilização de insertos de metal duro (carbeto de tungstênio). Para a execução do estudo, foram analisadas duas condições de corte distintas (Testes 1 e 2), cujos principais parâmetros de usinagem modificaram-se, conforme apresentado na Tabela 3. A microdureza foi obtida por meio do método Vickers, com a aplicação de um carregamento de 25 g efetuado durante 15 s.

Tabela 3 – Parâmetros de usinagem empregados no fresamento de topo do alumínio 2A97.

| Parâmetros de corte | | | | |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Teste | Velocidade de corte (m/min) | Avanço por dente (mm/dente) | Profundidade de corte (mm) | Penetração de trabalho (mm) |
| 1 | 1000 | 0,10 | 1,00 | 25 |
| 2 | 1300 | 0,15 | 1,50 | 15 |

Fonte: Niu *et al.* (2019) modificado.

Sendo assim, conforme exposto na Figura 13, os resultados comprovam que nas duas condições analisadas (Testes 1 e 2), houve uma diminuição da microdureza ao afastar-se da superfície usinada, como esperado (GROOVER, 2010). Segundo os autores, tal efeito pode ser explicado em razão do encruamento superficial do material usinado, resultante da deformação plástica acentuada da peça na região próxima à sua superfície, cuja intensidade diminui gradativamente em direção ao núcleo do material. Ainda de acordo com os autores, a profundidade da camada afetada pela deformação plástica durante o fresamento foi de 20 μm , visto que a partir deste ponto, os valores de microdureza mantiveram-se estáveis.

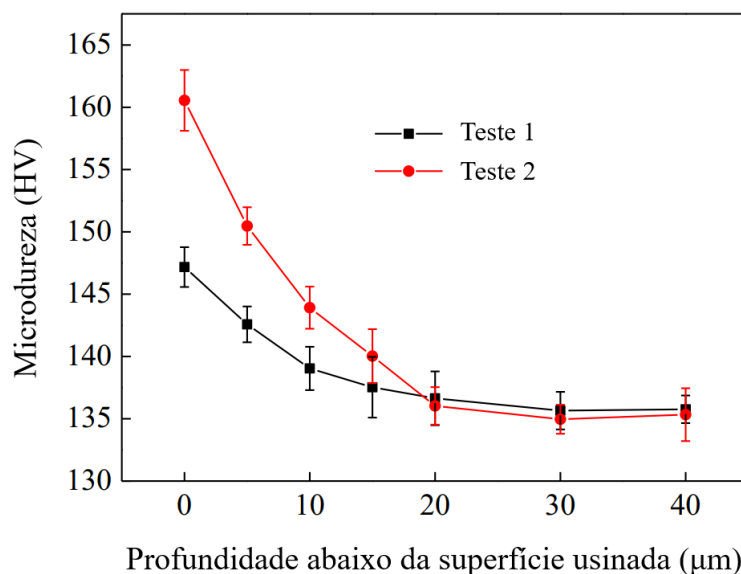


Figura 13 – Perfil de microdureza a partir da superfície usinada.
Fonte: Niu *et al.* (2019) modificado.

Sob outra perspectiva, Ribeiro e Cunha (2007) realizaram experimentos com o objetivo de verificar a influência da velocidade de corte e da utilização de fluido de corte na microdureza Vickers das regiões deformadas dos cavacos produzidos no torneamento da liga de alumínio ASTM 7050-T7451. Alguns parâmetros foram mantidos constantes, como profundidade de corte (1,5 mm) e avanço (0,2 mm/rotação). Por outro lado, foi observada a variação da velocidade de corte (100, 250, 500 e 800 m/min), com o uso de fluido de corte e na condição a seco. O fluido empregado foi uma microemulsão de concentração de 10% em água.

Em um primeiro momento, como representado na Figura 14, é possível notar que o aumento da velocidade de corte contribuiu para elevar a microdureza do cavaco. De acordo com os autores, a taxa de deformação imposta ao cavaco aumenta com o acréscimo da velocidade de corte, proporcionando um maior encruamento. Por outro lado, na usinagem com uso de fluido de corte, menores valores de microdureza foram identificados em comparação aos obtidos no processo a seco. Os autores concluíram que em razão da maior severidade da usinagem na condição a seco, a taxa de deformação sofrida pelo cavaco é maior o que, conseqüentemente, contribui para elevar os valores de microdureza.

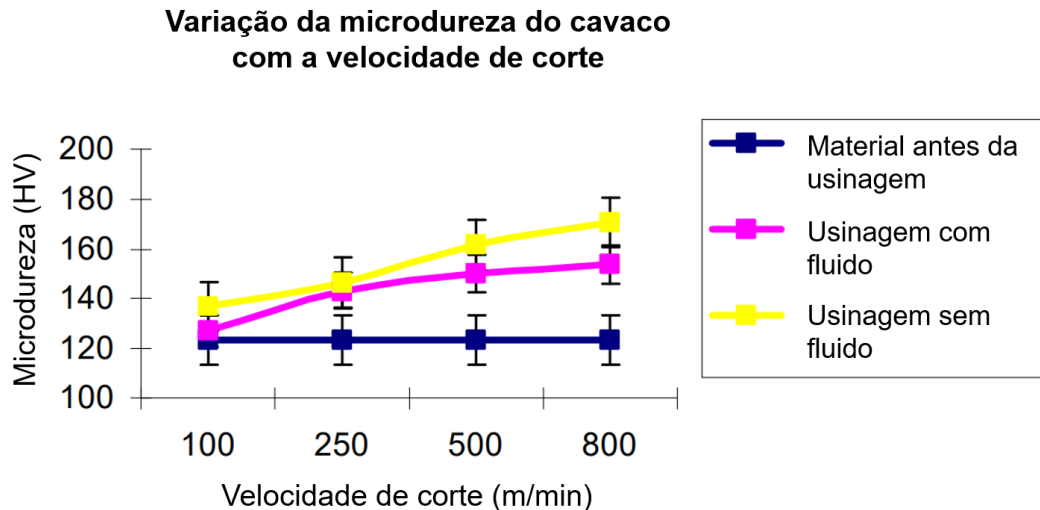


Figura 14 – Gráfico da variação da microdureza Vickers do cavaco em função da velocidade de corte.

Fonte: Ribeiro e Cunha (2007) modificado.

2.3 PASTILHAS ALISADORAS (*WIPER*)

Os produtos oriundos dos processos de usinagem podem exigir diferentes níveis de qualidade em relação ao acabamento superficial. Nesse sentido, há diversas classificações de pastilhas para fresas que atendem a essas condições requeridas. Segundo Sandvik Coromant (2022), o modelo mais simples (Figura 15a) é a pastilha com raio de canto (r_c), em que o avanço e o raio determinam a altura das irregularidades que são geradas na superfície da peça.

De acordo com Diniz *et al.* (2013), inúmeras pastilhas utilizadas em fresas de facear possuem uma fase plana ou paralela (b_s) (Figura 15b) como aresta secundária. Com a finalidade de garantir que a área usinada anteriormente possa ser alisada pelo dente posterior àquele que gerou o corte, o comprimento da fase plana (b_s) deve ser de 3 a 10 vezes maior do que o avanço por dente. Nesse sentido, para obter uma peça com maior qualidade superficial, as pastilhas com geometria alisadora (*wiper*) podem ser utilizadas em substituição aos insertos convencionais, uma vez que o seu maior valor de b_s permite alisar a superfície já usinada, reduzindo o nível de rugosidade da peça.

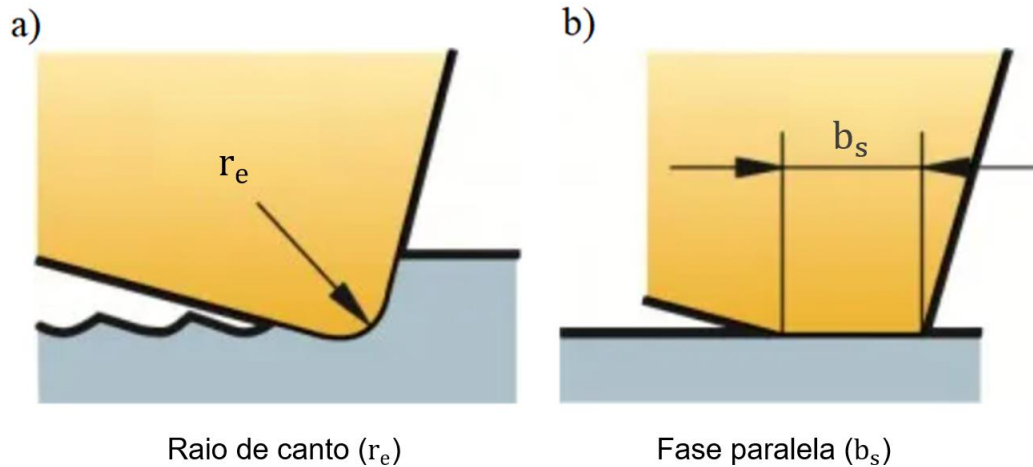


Figura 15 – Modelos de pastilhas para fresamento: a) Raio de canto (r_e); b) Fase paralela ou plana (b_s).

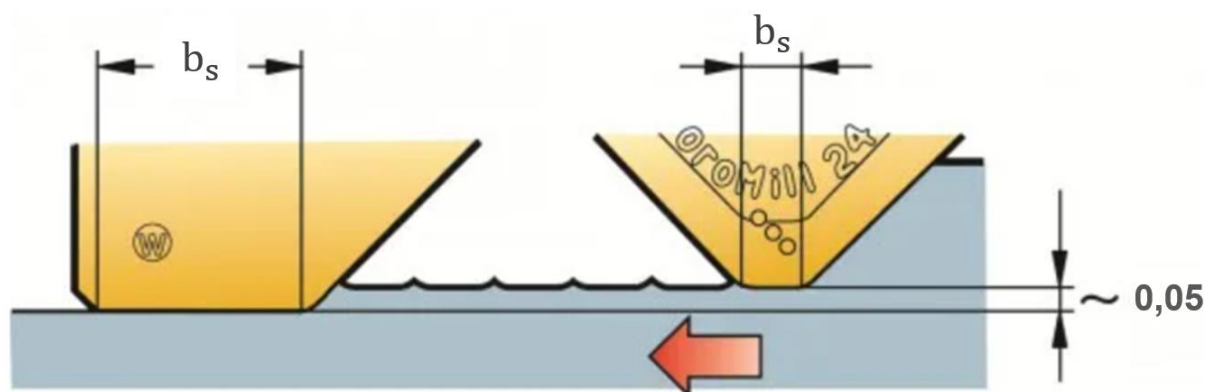
Fonte: Sandvik Coromant (2022) modificado.

Para a usinagem em operações de acabamento com pastilhas convencionais, torna-se necessário limitar o avanço por dente empregado, devido à influência significativa de tal parâmetro no nível de rugosidade atingido. Nesse sentido, a exigência de alta qualidade superficial na peça usinada restringe a produtividade do processo. Sob esse ponto de vista, as pastilhas alisadoras (*wiper*) foram desenvolvidas para amenizar essa limitação operacional, visto que o seu elevado valor de comprimento da fase plana (b_s) permite o emprego de maiores valores de avanço, sem prejuízo significativo ao acabamento superficial da peça. A pastilha *wiper* normalmente é utilizada em conjunto com outros insertos convencionais montados na fresa.

As pastilhas *wiper* possuem um valor típico de b_s igual a 10 mm. Em pastilhas convencionais, por sua vez, tal valor varia de 1 a 2,5 mm, e em alguns casos pode chegar a 4 mm. Desse modo, quando o diâmetro da ferramenta aumenta, o número de dentes da fresa e o avanço também elevam-se, exigindo um maior valor de b_s para obter-se um melhor acabamento superficial. Todavia, vale ressaltar que é preciso restringir o valor do comprimento da fase plana, na medida em que o seu aumento tende a ampliar a área de contato entre a ferramenta e a peça, elevando a tendência à vibração durante o corte, o que prejudica a qualidade da superfície usinada (DINIZ *et al.*, 2013; SANDVIK COROMANT, 2022).

No que tange ao posicionamento na fresa, as pastilhas *wiper* são inseridas de tal modo que sua profundidade de corte é maior, ou seja, são posicionadas em um plano mais saliente do que os insertos com uma fase plana menor (pastilhas *standard*). Dessa forma, as pastilhas alisadoras conseguem executar sua função principal, isto é, reduzir a altura do perfil de rugosidade da peça. A saliência das pastilhas alisadoras pode variar de 0,02 a 0,1 mm em relação

às convencionais, sendo 0,05 mm um valor comumente empregado, como representado na Figura 16 (DINIZ *et al.*, 2013).



**Figura 16 – Plano mais saliente das pastilhas *wiper* em relação às convencionais.
Fonte: Sandvik Coromant (2022).**

Schuitek (1997) verificou a influência do raio de canto ou de quina (r_e) da ferramenta de corte no acabamento superficial obtido no torneamento da liga de alumínio 6262-T8 (USINAL 201), por meio da medição dos parâmetros de rugosidade R_a e R_z . Durante o processo de usinagem das amostras, utilizou-se como fluido de corte, uma emulsão de óleo em concentração de 3%. Os experimentos foram realizados mantendo-se alguns parâmetros constantes, como velocidade de corte (160 m/min) e profundidade de corte (2,5 mm). Em contrapartida, verificaram-se as variações dos parâmetros f (0,064, 0,128, 0,256 e 0,512 mm/volta) e r_e (0,2, 0,8 e 2,0 mm).

Dessa forma, como apresentado na Figura 17, percebe-se que um acréscimo do raio de canto da ferramenta melhorou o acabamento superficial da peça usinada, na medida em que diminuiu os níveis de rugosidade R_a e R_z . Tal contribuição de r_e na qualidade superficial mostrou-se mais visível com a utilização do maior avanço (0,512 mm/volta). Segundo Diniz *et al.* (2013), um aumento do raio de canto contribui não só para diminuir o efeito das marcas de avanço na peça, mas também para elevar a tendência à vibração da ferramenta, em virtude do maior atrito gerado pelo aumento da área de contato entre a ferramenta e a peça. Todavia, considerando a soma dos resultados produzidos simultaneamente pelo raio de canto no acabamento superficial da peça, é possível concluir que o aumento do raio de canto (r_e) favorece a diminuição da rugosidade.

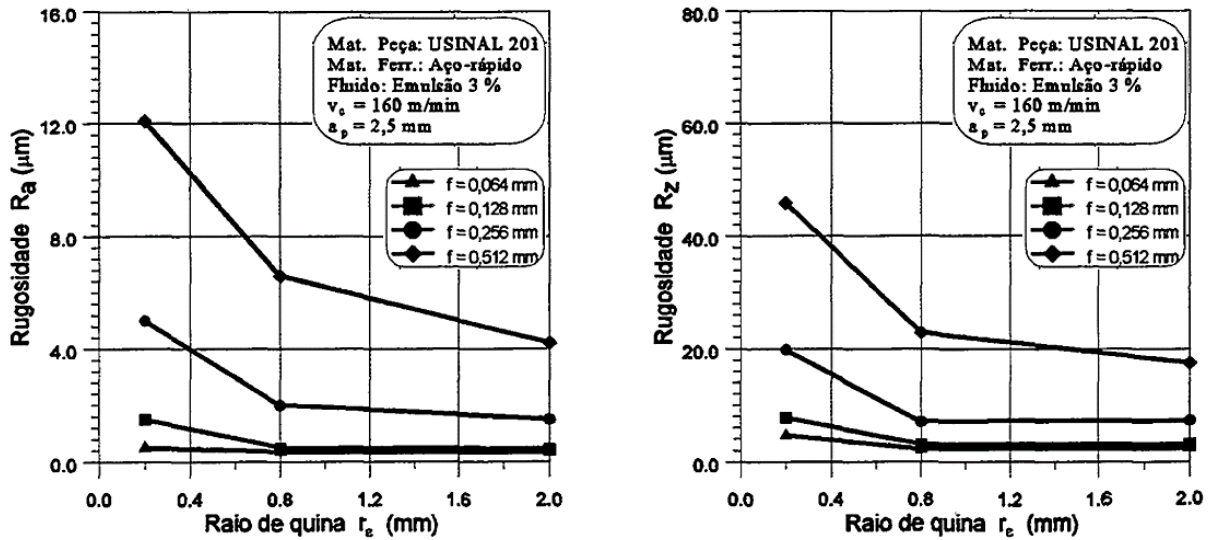


Figura 17 – Influência do raio de canto (r_e) nos parâmetros de rugosidade R_a e R_z .
Fonte: Schuitek (1997) modificado.

Por outro lado, Oliveira (2015) realizou experimentos a fim de verificar de que modo os parâmetros de corte e a geometria das pastilhas utilizadas influenciam a rugosidade gerada pelo processo de fresamento frontal da liga de alumínio 7075-T6. Para a elaboração do estudo, foi utilizado o sistema de lubri-refrigeração por jorro, isto é, o uso de fluido de corte emulsionável em água de forma abundante. O procedimento experimental foi conduzido para a análise inicial de 16 condições distintas, seguido de outro ensaio que constituiu uma réplica, ou seja, com as mesmas condições avaliadas no primeiro ensaio, totalizando 32 experimentos. Como demonstrado na Tabela 4, o estudo considerou a variação dos seguintes parâmetros: velocidade de corte, avanço por dente, sentido de corte e geometria das pastilhas utilizadas. A profundidade de corte, por sua vez, foi mantida constante em 1 mm.

Tabela 4 – Parâmetros de usinagem empregados no fresamento do alumínio 7075-T6.

| Parâmetros de usinagem | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|------------------|----------------------------|
| Velocidade de corte (m/min) | Avanço por dente (mm/dente) | Sentido de corte | Geometria das pastilhas |
| 400 | 0,10 | Concordante (C) | Normal (N) |
| 600 | 0,30 | Discordante (D) | Normal/ <i>Wiper</i> (N/W) |

Fonte: Oliveira (2015) modificado.

Para a avaliação da qualidade superficial da peça, foram coletados os valores de rugosidade R_a , cujos resultados estão representados no gráfico da Figura 18. Observa-se, portanto, que a utilização de duas pastilhas com geometria normal e uma pastilha *wiper* (N/W)

proporcionou uma maior uniformidade dos valores de rugosidade obtidos nas mesmas condições utilizadas no primeiro ensaio e na réplica. Por outro lado, quando se utilizou apenas insertos com geometria normal (N), é possível notar níveis de rugosidade mais elevados na réplica em relação ao primeiro ensaio. Além disso, vale destacar que por meio da análise do aspecto visual da superfície usinada, o autor concluiu que com o avanço por dente de 0,3 mm/dente, as marcas deixadas pela ferramenta não foram uniformes, o que caracteriza a existência de vibrações excessivas, independente da velocidade de corte, sentido de corte e geometria das pastilhas utilizadas. Portanto, para esse nível de avanço, notou-se não só um prejuízo significativo à aparência da superfície usinada, mas também uma dispersão considerável nos valores de rugosidade obtidos.

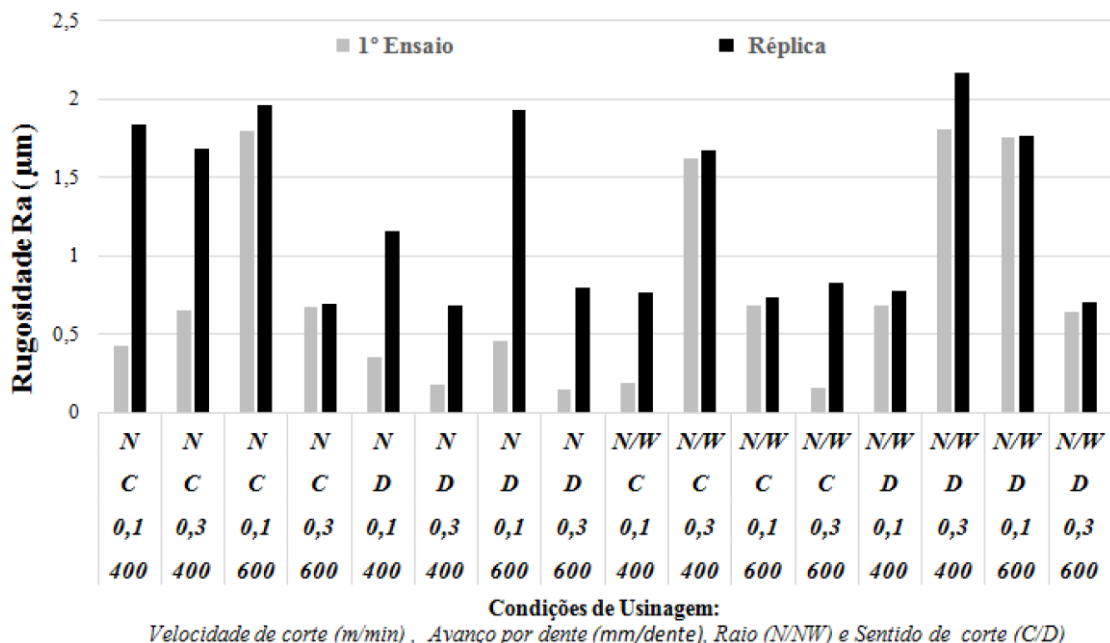


Figura 18 – Influência da variação dos parâmetros de usinagem na rugosidade R_a .
 Fonte: Oliveira (2015).

Diante do exposto, Oliveira (2015) realizou uma nova análise estatística, eliminando o efeito gerado pela variação do avanço por dente, uma vez que considerou-se inaceitável o elevado nível de vibração alcançado no processo para $f_z = 0,3$ mm/dente. Nesse sentido, a partir dos gráficos apresentados na Figura 19, percebe-se que o acréscimo da velocidade de corte elevou os níveis de rugosidade. Ao mesmo tempo, a combinação de dois insertos com geometria normal e a pastilha *wiper* (N/W) possibilitou a obtenção de menores valores de rugosidade R_a , conforme esperado (DINIZ *et al.*, 2013). Por fim, o sentido de corte não influenciou significativamente a qualidade superficial da peça usinada.

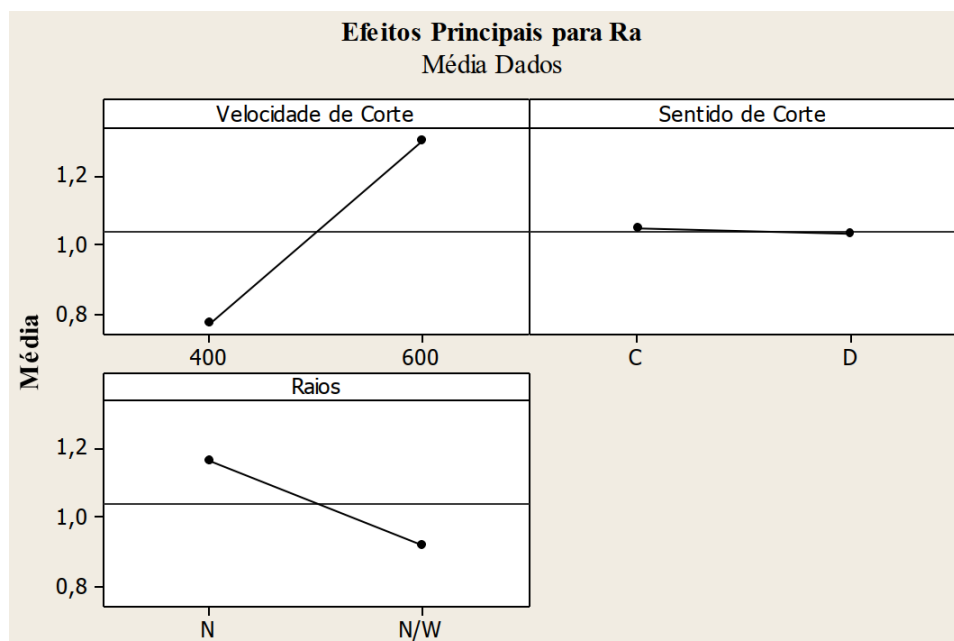


Figura 19 – Comparação dos efeitos dos parâmetros de usinagem na rugosidade R_a .
Fonte: Oliveira (2015).

Com o intuito de verificar a influência da utilização de insertos com geometria alisadora (*wiper*) no processo de usinagem, Szablewski *et al.* (2022) analisaram o acabamento superficial obtido pelo torneamento da liga de alumínio A356, por meio da medição dos parâmetros R_a e R_z , bem como a comparação dos mesmos nos procedimentos utilizando pastilha convencional (*standard*) ou *wiper*. Os experimentos foram conduzidos mantendo-se a profundidade de corte constante em 1 mm. Ao mesmo tempo, verificou-se a variação tanto da velocidade de corte (120 e 200 m/min), quanto do avanço (0,04, 0,12, 0,20 e 0,28 mm/rotação). Ademais, foi utilizada uma emulsão de óleo mineral em concentração de 8% como fluido de corte.

Ao analisar os resultados, conforme exposto nos gráficos das Figuras 20 e 21, nota-se que na usinagem com o menor avanço (0,04 mm/rotação), os parâmetros R_a e R_z alcançaram valores bastante próximos para ambas as geometrias das pastilhas utilizadas (*standard* e *wiper*). Todavia, o efeito benéfico da pastilha *wiper* no acabamento superficial da peça usinada é notório para valores de avanço a partir de 0,12 mm/rotação, visto que as rugosidades R_a e R_z foram menores nas amostras usinadas com pastilha *wiper*, independente da velocidade de corte empregada. No que tange à influência dos parâmetros de corte na qualidade superficial, além da prevista relação diretamente proporcional entre o avanço e os parâmetros de rugosidade avaliados, também é possível observar que ao utilizar pastilha *standard*, maiores valores de R_a e R_z foram obtidos com o emprego da maior velocidade de corte (200 m/min). Por outro lado,

quando se utilizou a pastilha *wiper*, os parâmetros R_a e R_z atingiram níveis superiores na usinagem com a velocidade de corte de 200 m/min, apenas até o avanço de 0,2 mm/rotação.

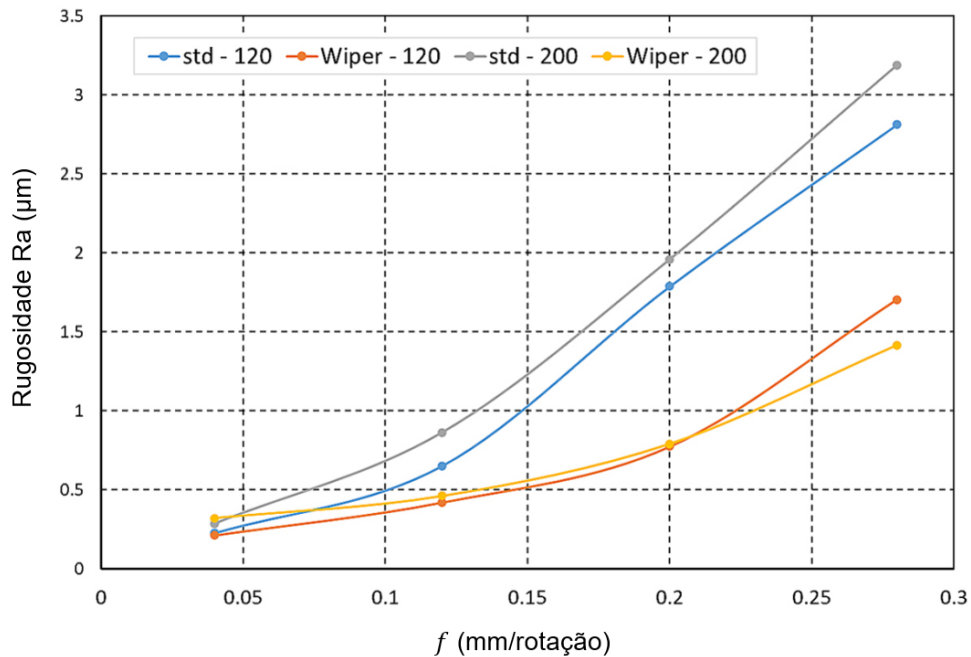


Figura 20 – Influência do avanço na rugosidade R_a para diferentes velocidades de corte e geometrias das pastilhas utilizadas no torneamento do alumínio A356.

Fonte: Szablewski *et al.* (2022) modificado.

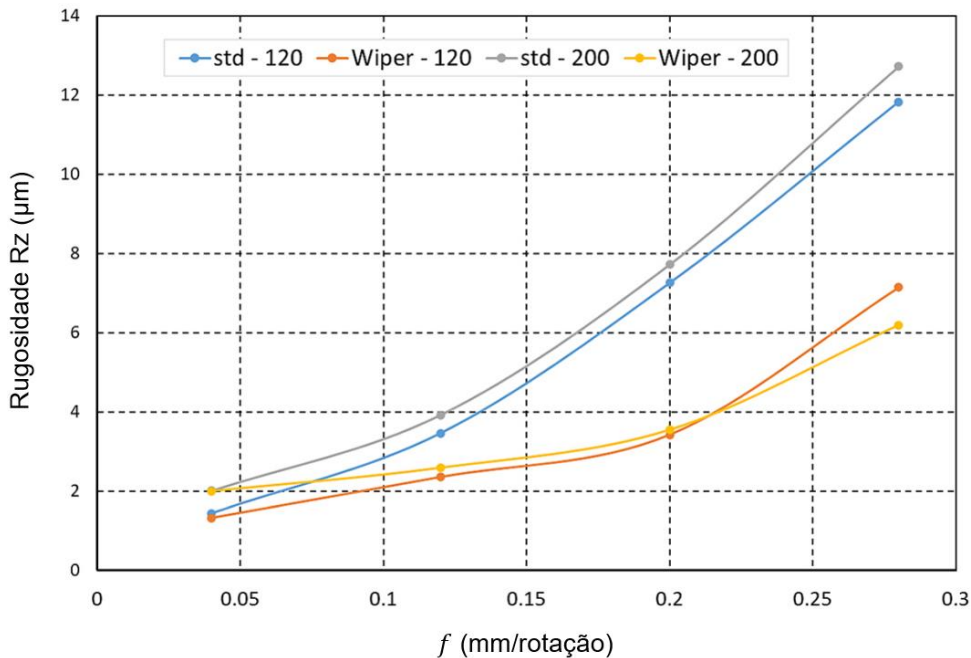


Figura 21 – Influência do avanço na rugosidade R_z para diferentes velocidades de corte e geometrias das pastilhas utilizadas no torneamento do alumínio A356.

Fonte: Szablewski *et al.* (2022) modificado.

2.4 ALUMÍNIO

O alumínio é um elemento metálico que teve sua utilização industrial amplamente difundida ao longo do século XX, de tal modo que a partir da segunda metade, ultrapassou o cobre em relação ao volume de produção global, tornando-se o metal não ferroso mais utilizado na indústria. O alumínio possui uma grande vantagem sobre outros elementos, em virtude da sua alta possibilidade de reciclagem (BARBOSA, 2014).

As ligas de alumínio são classificadas em relação à presença de determinados elementos componentes, que formam a liga. Segundo a classificação da *Aluminum Association* (AA) e seguido pela ABNT, a série 1XXX define o alumínio comercialmente puro com diversos níveis de pureza variando de 99,00% (com designação 1000) a 99,99% (1099). Essa série possui propriedades como elevada condutividade elétrica e térmica, além de baixa resistência mecânica. As ligas de alumínio podem ser subdivididas em dois grupos no que tange ao seu sistema de classificação, isto é, as ligas que serão empregadas em trabalho mecânico, como a usinagem e as ligas destinadas à produção de peças fundidas (BARBOSA, 2014; OLIVEIRA, 2015).

De acordo com Barbosa (2014), têm-se as seguintes classificações em relação à composição química e às principais aplicações para as ligas submetidas a trabalho mecânico:

1. 1XXX: Al comercialmente puro. Utilizados para cabos de alumínio, utensílios domésticos e trocadores de calor;
2. 2XXX: Al-Cu e Al-Cu-Mg. Amplamente usados na indústria aeronáutica;
3. 3XXX: Al-Mn e Al-Mn-Mg. Empregados em panelas e latas de bebidas;
4. 4XXX: Al-Si. Escolhidos para metal de adição para soldas e pistões forjados de motores;
5. 5XXX: Al-Mg. Para aplicações náuticas como, por exemplo, navios e barcos, além de tanques para transporte de combustíveis e produtos especiais;
6. 6XXX: Al-Mg-Si. Utilizados em perfis arquitetônicos e componentes automotivos;
7. 7XXX: Al-Zn e Al-Zn-Mg. Principais aplicações na indústria aeronáutica;
8. 8XXX: Outras ligas como Al-Li, Al-Fe. Usados em laminados finos (folhas) e para embalagens descartáveis.

De maneira geral, o alumínio pode ser facilmente usinado. Em virtude da sua baixa resistência mecânica, a energia consumida por unidade de volume de material removido é

extremamente reduzida. Nesses processos, o desgaste da ferramenta é pequeno, com exceção das ligas Al-Si, cuja abrasividade das partículas de silício constitui um fator importante. O trabalho pode ser executado com altas velocidades de corte, uma vez que a alta condutividade térmica do alumínio permite uma rápida dissipação de calor durante o processo de usinagem. Por ser um material extremamente dúctil, o cavaco formado em decorrência da usinagem do alumínio é longo, o que tende a produzir níveis de rugosidade insatisfatórios, caso não seja utilizada uma ferramenta com geometria adequada (BARBOSA, 2014; DINIZ *et al.*, 2013).

O módulo de elasticidade do alumínio é cerca de três vezes menor do que o do aço. Dessa forma, quando submetidos à mesma força de corte, o alumínio é deformado três vezes mais em relação ao aço. Essa característica contribui para a ocorrência de deformações excessivas, que dificultam a obtenção de superfícies com excelente acabamento, caracterizando uma das principais dificuldades da usinagem de alumínio (DINIZ *et al.*, 2013).

Como são necessários menores esforços inerciais, as mudanças de velocidade e de avanço, durante o processo, podem ser executadas rapidamente, sem ocasionar grandes vibrações no conjunto, o que proporciona superfícies usinadas de maior qualidade. As ligas de alumínio possuem temperatura de fusão situada entre 650 e 700°C. Portanto, como esse valor é considerado baixo em relação a outros materiais, ele pode ser facilmente alcançado na interface de contato entre a peça e a ferramenta, resultando em soldagem por fusão do cavaco na zona de corte. Com isso, a peça deve ser refrigerada e lubrificada durante a usinagem, a fim de diminuir o atrito e evitar que o ponto de fusão seja alcançado (BARBOSA, 2014).

2.4.1 Alumínio 6061

O alumínio 6061 compõe o grupo das ligas Al-Mg-Si (série 6XXX), isto é, integra a classe em que o magnésio e o silício representam os principais elementos de liga. Tal material destaca-se em relação às demais classes de alumínio, em virtude não só da sua capacidade de endurecer por precipitação, ou seja, ser tratável termicamente, mas também pela sua alta ductilidade, que permite o seu emprego em processos que exigem alta capacidade de deformação plástica, como a extrusão. As ligas Al-Mg-Si apresentam boa resistência à corrosão, sobretudo, em atmosferas marinhas, sendo portanto apropriadas para utilização em estruturas de embarcações. Dessa forma, o alumínio 6061 é muito utilizado comercialmente, destacando-se sua ampla aplicação na indústria automobilística (BARBOSA, 2014). Sua composição química e propriedades mecânicas são apresentadas nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Composição química do alumínio 6061.

| Composição química (% em massa) | | | | | |
|---------------------------------|-----|-----|------|-----|--------------|
| Mg | Si | Cu | Mn | Cr | Al |
| 1,0 | 0,6 | 0,2 | 0,28 | 0,2 | (% restante) |

Fonte: Barbosa (2014) modificado.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do alumínio 6061.

| Propriedades mecânicas | | | | |
|------------------------|--------------------------------------|---|-----------------|----------------|
| Têmpera | Limite de resistência à tração (MPa) | Limite de resistência ao escoamento (MPa) | Alongamento (%) | Dureza Brinell |
| T6 | 310 | 275 | 12 | 95 |

Fonte: Barbosa (2014) modificado.

As ligas que possuem o sufixo T na sua designação representam materiais que passaram por tratamentos térmicos, com a finalidade de promover um aumento da sua resistência, com ou sem deformação suplementar (trabalho a frio). As especificações são sempre seguidas de um ou mais dígitos, que caracterizam as sequências de tratamento. Diante disso, a nomenclatura T6 refere-se às ligas solubilizadas e envelhecidas artificialmente (OLIVEIRA, 2015; SCHUITEK, 1997).

A capacidade que o alumínio 6061 possui de ser endurecido por precipitação deve-se à combinação dos elementos silício e magnésio, responsáveis pela formação do composto intermetálico (Mg_2Si), que proporciona o endurecimento dessas ligas (BARBOSA, 2014).

A presença do magnésio nas ligas Al-Mg-Si melhora a resistência à corrosão e a usinabilidade do material. Tal alteração se justifica na medida em que os elevados teores de Si nas ligas Al-Si (série 4XXX) tendem a dificultar o processo de usinagem, uma vez que a superfície da peça torna-se mais abrasiva, diminuindo a vida da ferramenta (BARBOSA, 2014; DINIZ *et al.*, 2013).

2.4.2 Usinagem do Alumínio 6061

Alguns estudos têm sido realizados com a finalidade de avaliar o comportamento do alumínio 6061 durante o processo de usinagem, bem como a influência dos parâmetros de corte no nível de rugosidade da peça acabada. Nesse sentido, Mendoza Oliva e Terrones Vásquez

(2017) analisaram o efeito do avanço e da profundidade de corte na rugosidade R_a obtida no torneamento do alumínio 6061-T6. Para esse trabalho, foram observadas as variações dos parâmetros a_p (0,2, 0,3 e 0,5 mm) e f (0,05, 0,063 e 0,075 mm/volta). Foram realizados um total de 36 passes, sendo 4 réplicas em cada uma das 9 condições distintas analisadas, isto é, com diferentes combinações de a_p e f .

Como demonstrado na Figura 22, o aumento tanto do avanço, quanto da profundidade de corte impactaram negativamente no acabamento superficial da peça, uma vez que elevaram os níveis de rugosidade R_a , como esperado (MACHADO *et al.*, 2009). Segundo Costa *et al.* (2006), a profundidade de corte não exerce uma influência significativa na rugosidade em comparação ao efeito gerado pelo avanço. Todavia, os autores concluíram que ao aumentar o avanço e a profundidade de corte, as forças de usinagem elevaram-se, em virtude do aumento da área da seção de corte, proporcionando uma maior tendência à vibração da ferramenta, o que pode ter contribuído para aumentar a rugosidade da peça usinada.

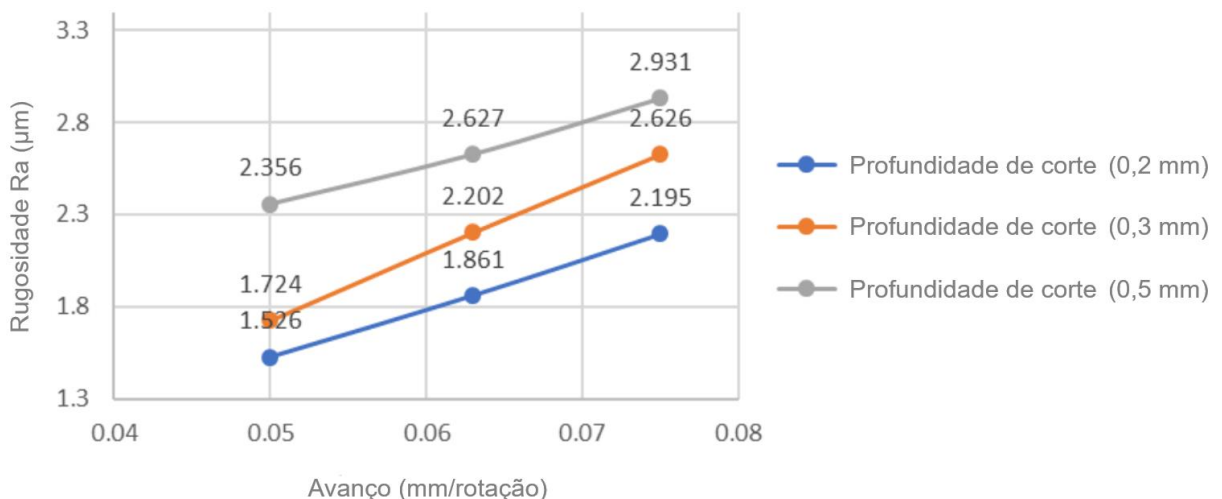


Figura 22 – Gráfico da rugosidade R_a em função do avanço para todas as profundidades de corte empregadas.

Fonte: Mendoza Oliva e Terrones Vásquez (2017) modificado.

Por outro lado, Maia (2017) analisou o efeito dos parâmetros de corte no acabamento superficial obtido no fresamento tangencial do alumínio 6061, por meio da medição da rugosidade R_a . Alguns parâmetros foram mantidos constantes, como $n = 3056$ rpm e $a_e = 1$ mm. O movimento de corte, por sua vez, foi do tipo concordante, a fim de reduzir o efeito vibratório na operação. Para a elaboração do estudo, efetuaram-se um total de 12 passes, observando a variação da velocidade de avanço (30, 145, 365 e 550 mm/min) e da profundidade corte (7, 14 e 21 mm). Além disso, foi utilizada uma fresa inteiraça com 14 mm de diâmetro e composta por 4 dentes.

Após a consolidação dos resultados, como demonstrado na Figura 23, verifica-se que o aumento da velocidade de avanço e da profundidade de corte contribuíram para elevar a rugosidade média R_a , exceto para a condição em que a menor profundidade de corte foi utilizada (7 mm). De acordo com o autor, apesar das forças de corte aumentarem com o acréscimo de v_f , o pequeno valor atribuído ao parâmetro a_p (7 mm) não foi suficiente para causar maiores amplitudes de vibrações na ferramenta, de modo a aumentar os níveis de rugosidade da peça usinada. Já para as profundidades de corte de 14 mm e 21 mm, o comportamento do material no que se refere à variação da velocidade de avanço mostrou-se compatível com os resultados obtidos por Mendoza Oliva e Terrones Vásquez (2017).

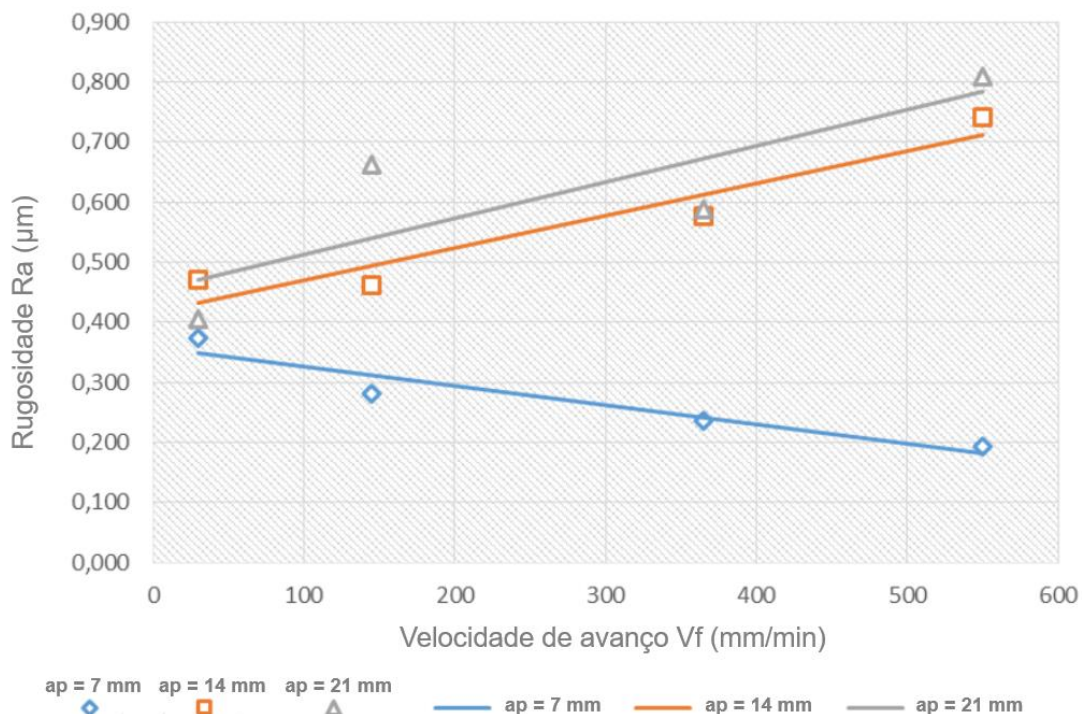


Figura 23 – Gráfico da rugosidade R_a em função da velocidade de avanço (v_f) para as três profundidades de corte (a_p) utilizadas.

Fonte: Maia (2017) modificado.

Em um trabalho realizado por Oliveira *et al.* (2012), foi analisada a influência dos parâmetros de corte no fresamento HSM (*High Speed Machining* – usinagem de altíssimas velocidades) sobre a qualidade superficial do alumínio 6061-T6, por meio da obtenção da rugosidade R_a . Para a realização dos experimentos foram usinados 3 canais em cada uma das 6 amostras, totalizando 18 superfícies fresadas. Foi utilizada uma fresa frontal de 50 mm de diâmetro e composta por 5 pastilhas de corte intercambiáveis de metal duro (carbeto de tungstênio). Os parâmetros de usinagem utilizados no estudo são demonstrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros de corte empregados na usinagem HSM em alumínio 6061-T6.

| Parâmetros de corte | | |
|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Velocidade de corte (m/min) | Avanço por dente (mm/dente) | Profundidade de corte (mm) |
| 1000 | 0,050 | 0,20 |
| 800 | 0,065 | 0,30 |
| - | 0,080 | 0,40 |

Fonte: Oliveira *et al.* (2012) modificado.

Após o fresamento foram analisados os resultados obtidos nas medições de rugosidade R_a nas amostras. Sendo assim, conforme indicado na Figura 24, os autores concluíram que quanto menor a profundidade de corte utilizada, menor valor de rugosidade foi obtido. A redução do avanço por dente, por sua vez, proporcionou um melhor acabamento superficial, conforme mencionado por Machado *et al.* (2009). Por outro lado, o aumento da velocidade de corte gerou menores valores de rugosidade. Dessa forma, percebe-se que o acabamento superficial da peça é diretamente dependente da interação dos parâmetros v_c , f_z e a_p .

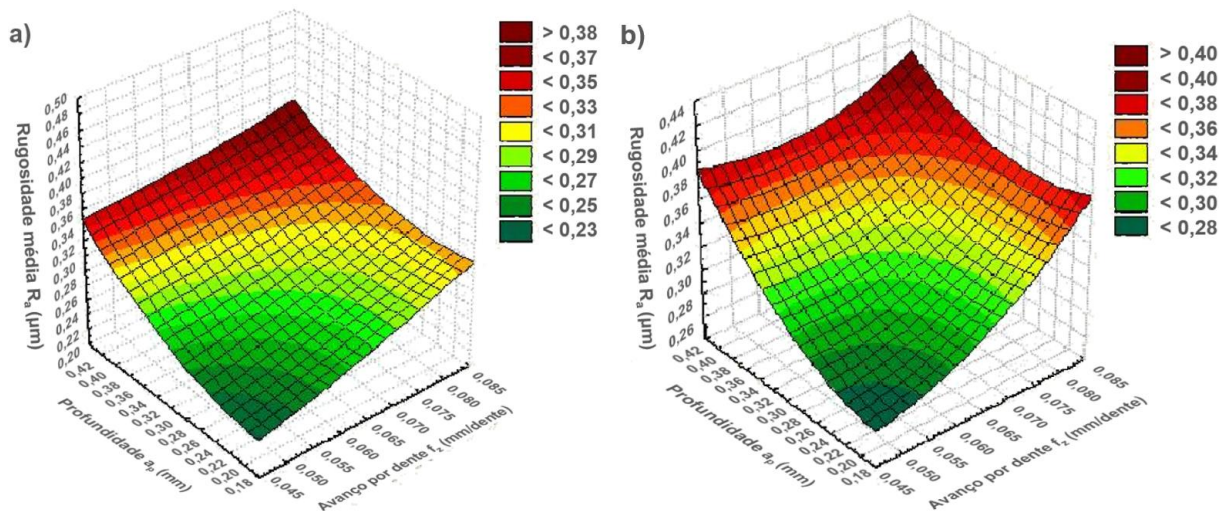


Figura 24 – Superfícies de resposta da rugosidade média (R_a x f_z x a_p) para diferentes velocidades de corte: a) $v_c = 1000$ m/min; b) $v_c = 800$ m/min.

Fonte: Oliveira *et al.* (2012) modificado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

O material utilizado neste trabalho foi o alumínio 6061-T651, fornecido na condição bruta de laminação e submetido aos tratamentos de solubilização e envelhecimento artificial, incluindo uma etapa complementar de alívio de tensões por estiramento. Sua composição química, de acordo com o fabricante, é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Composição química do alumínio 6061-T651 (% em massa).

| Composição química (% em massa) | | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|
| Mn | Si | Cr | Ti | Fe | Mg | Cu | Zn | Al |
| 0,13 | 0,66 | 0,32 | 0,03 | 0,40 | 1,10 | 0,24 | 0,01 | (% restante) |

3.2 DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a elaboração do estudo, foram adquiridas duas peças de alumínio 6061-T651, fornecidas nas seguintes dimensões: 13 x 100 x 100 mm, conforme representado na Figura 25. Em seguida, os ensaios experimentais foram planejados com base na utilização do processo de fresamento de topo, com a abertura de 2 canais em cada uma das faces de maior área dos corpos de prova, totalizando 8 testes efetuados em condições distintas. A largura dos canais usados correspondeu ao diâmetro da fresa (40 mm).

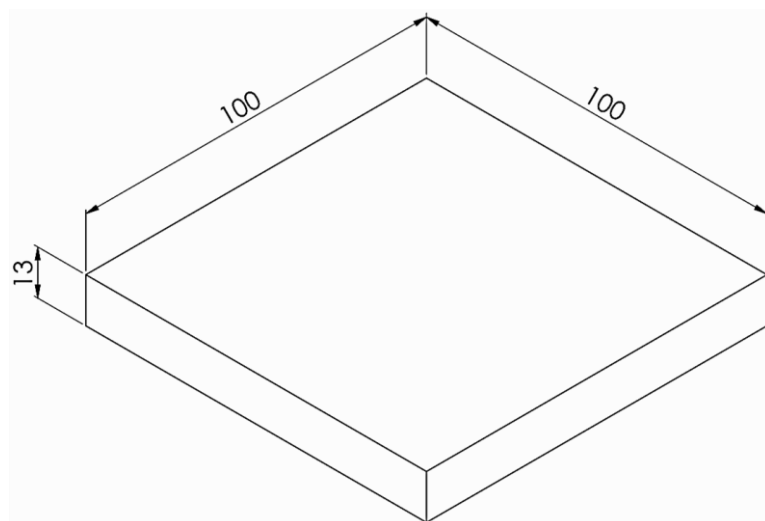


Figura 25 – Representação da peça de alumínio 6061-T651 utilizada no fresamento (unidades em mm).

3.3 FRESAMENTO

A usinagem das amostras foi realizada em uma fresadora ferramenteira da marca Diplomat 3001, modelo FVF-2000, no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), conforme ilustrado na Figura 26. O fluido de corte utilizado no decorrer do processo de fresamento foi o óleo solúvel ME-2 da Quimatic Tapmatic, emulsionado em uma proporção de 1/20 e bombeado a uma vazão de aproximadamente 3,0 L/min.



Figura 26 – Fresadora ferramenteira Diplomat 3001, modelo FVF-2000.

Para a elaboração do estudo foi utilizada uma fresa de topo com insertos intercambiáveis, modelo 345-040Q22-13L da Sandvik Coromant, com 40 mm de diâmetro e composta por três pastilhas de corte. Foram verificadas duas condições de montagem distintas da fresa em relação à geometria dos insertos utilizados: com o emprego de três pastilhas convencionais (*standard*) – C; e com o uso de uma pastilha *wiper* e duas convencionais – W.

A pastilha convencional utilizada no fresamento foi a 345R-1305E-KL H13A da Sandvik Coromant, conforme apresentada na Figura 27, que possui as seguintes dimensões: diâmetro do círculo inscrito (iC) = 13,0 mm; comprimento efetivo da aresta de corte (l_a) = 8,8 mm; comprimento da aresta alisadora (b_s) = 2,0 mm; espessura da pastilha (S) = 5,05 mm e raio de canto (r_e) = 0,8 mm.

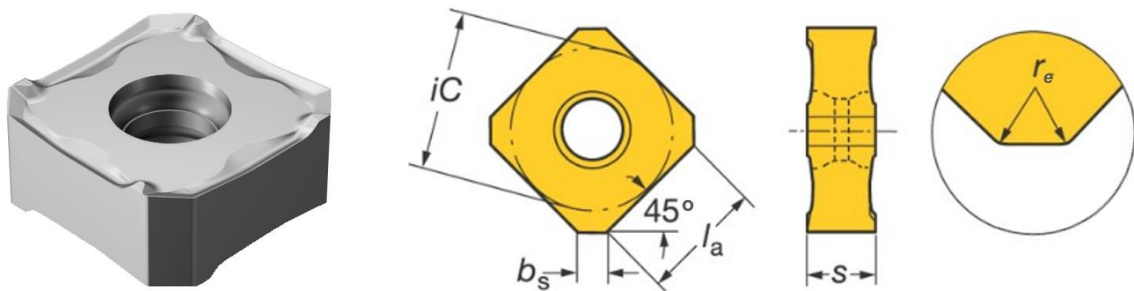


Figura 27 – Representação da pastilha convencional utilizada, modelo 345R-1305E-KL H13A.
Fonte: Sandvik Coromant (2022) modificado.

A pastilha com geometria alisadora (*wiper*) utilizada também é um modelo produzido pela Sandvik Coromant, 345N-1305E-KW8 H13A, representada na Figura 28, com as dimensões: diâmetro do círculo inscrito (iC) = 13,0 mm; comprimento efetivo da aresta de corte (l_a) = 8,8 mm; comprimento da aresta alisadora (b_s) = 8,0 mm; espessura da pastilha (S) = 5,05 mm e raio de canto (r_e) = 1,0 mm. Os insertos utilizados no estudo são de metal duro (carbeto de tungstênio) sem cobertura, visto que o revestimento das ferramentas normalmente contém titânio que reage com o alumínio, devido à afinidade química entre ambos, o que tende a provocar desgaste por difusão e diminuir a vida útil das pastilhas (DINIZ *et al.*, 2013; SCHUITEK, 1997).

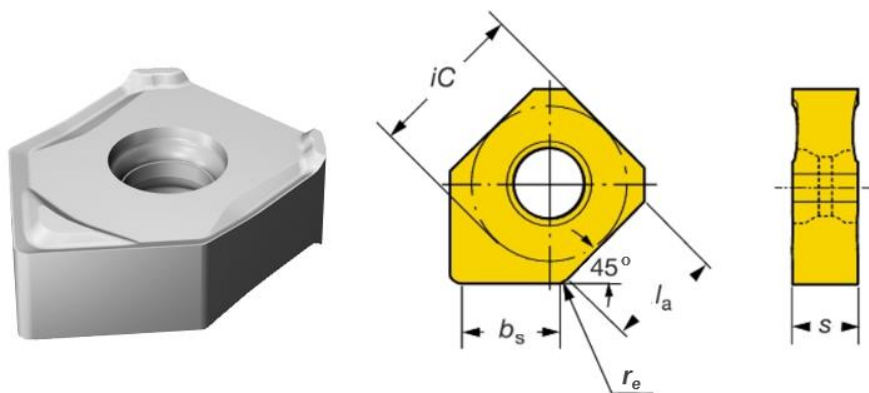


Figura 28 – Representação da pastilha *wiper* utilizada, modelo 345N-1305E-KW8 H13A.
Fonte: Sandvik Coromant (2022) modificado.

As arestas de corte das pastilhas utilizadas foram substituídas após cada condição de corte, a fim de minimizar a influência de um possível desgaste das ferramentas na integridade superficial das amostras.

O objetivo do presente estudo é verificar de que modo os parâmetros de corte e a geometria dos insertos utilizados influenciam a dureza, microdureza e rugosidade final das amostras usinadas. O procedimento experimental foi conduzido com a variação do avanço por dente e da profundidade de corte. Em contrapartida, a velocidade de corte foi mantida constante em 200 m/min. Sendo assim, para cada combinação dos parâmetros estudados foi usinada uma amostra com três pastilhas convencionais (C) e uma amostra com uma pastilha *wiper* e duas convencionais (W), totalizando 4 condições de corte para cada tipo de ferramenta, conforme representado na Tabela 9.

Tabela 9 – Condições de corte das amostras usinadas.

| Condições de corte | | | |
|--------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Condição | Avanço por dente (mm/dente) | Profundidade de corte (mm) | Geometria das pastilhas |
| 1 | 0,10 | 0,5 | C1 |
| | | | W1 |
| 2 | 0,20 | 0,5 | C2 |
| | | | W2 |
| 3 | 0,10 | 1,0 | C3 |
| | | | W3 |
| 4 | 0,20 | 1,0 | C4 |
| | | | W4 |

3.4 MEDIÇÃO DE DUREZA

Para verificar possíveis alterações nas propriedades mecânicas do material em decorrência do processo de fresamento, foram realizados ensaios de dureza Rockwell B nas amostras antes e após usiná-las, de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6508-1 (2019). Os ensaios foram efetuados no Laboratório de Materiais (LAMAT) do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ) no Durômetro Rockwell / Brinell da marca Instron Wolpert GmbH, modelo Dia Testor 7551 (Figura 29). Foi utilizada uma pré-carga de 10 kgf, seguida de uma carga maior de 100 kgf, aplicadas por 5 e 15 segundos, respectivamente.

Para a execução dos testes antes do fresamento, foram feitas 5 indentações em posições aleatórias nas duas faces de maior área de cada peça, totalizando 20 medições e, a partir desses valores, foram calculadas a média e o desvio padrão. Após a usinagem, por sua vez, foram realizadas 5 indentações em cada canal fresado. Em seguida, também foi obtida a média e o desvio padrão das medições efetuadas em cada condição de corte.



Figura 29 – Durômetro Instron Wolpert GmbH, modelo Dia Testor 7551.

3.5 MEDIÇÃO DE MICRODUREZA

Sabendo que a camada atingida durante o processo de usinagem pode ser pouco profunda (por vezes da ordem de microns) foram realizados ensaios de microdureza Vickers para comparar com os dados obtidos nos ensaios de dureza Rockwell B. As medições de microdureza Vickers foram efetuadas antes e após o fresamento de abertura de canais com um Microdurômetro Vickers / Knoop da marca Wilson Instruments, modelo 422MVD (Figura 30), no Laboratório de Materiais (LAMAT) do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ), de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6507-1 (2019). Para a execução dos ensaios, foi utilizada uma carga de 1 kgf aplicada por 15 segundos.

Inicialmente, com o intuito de avaliar a microdureza do material na condição como recebido, foram realizadas 3 indentações em pontos arbitrários ao longo das faces de maior área das peças. Em seguida, foram calculadas a média e o desvio padrão das medições. Por outro lado, após o fresamento, foram feitas 5 medições em cada superfície usinada e, posteriormente, também foram calculadas a média e o desvio padrão dos resultados obtidos em cada canal fresado.



Figura 30 – Microdurômetro Wilson Instruments, modelo 422MVD.

3.6 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

O objetivo principal do presente trabalho é avaliar se as pastilhas *wiper* proporcionam menores valores de rugosidade, comparadas às pastilhas convencionais. Para isso foram realizadas medições de rugosidade nas amostras com o rugosímetro portátil Mitutoyo, modelo SJ-210 (Figura 31), no Laboratório de Pesquisa em Usinagem (LABUS) do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ). O raio da ponta do apalpador é de $0,5\ \mu\text{m}$ e a resolução do instrumento é de $0,002\ \mu\text{m}$. Os comprimentos de amostragem (*cut-off*) e do percurso de medição (l_m) utilizados no ensaio foram de $0,80\ \text{mm}$ e $4\ \text{mm}$, respectivamente. Foram efetuadas 10 medições de rugosidade (R_a e R_t) em cada canal fresado.

Por fim, foram calculadas a média e o desvio padrão dos valores de rugosidade R_a em cada condição de corte. Já para a avaliação da rugosidade R_t , foi considerado apenas o maior valor dentre as 10 medições efetuadas em cada superfície usinada.

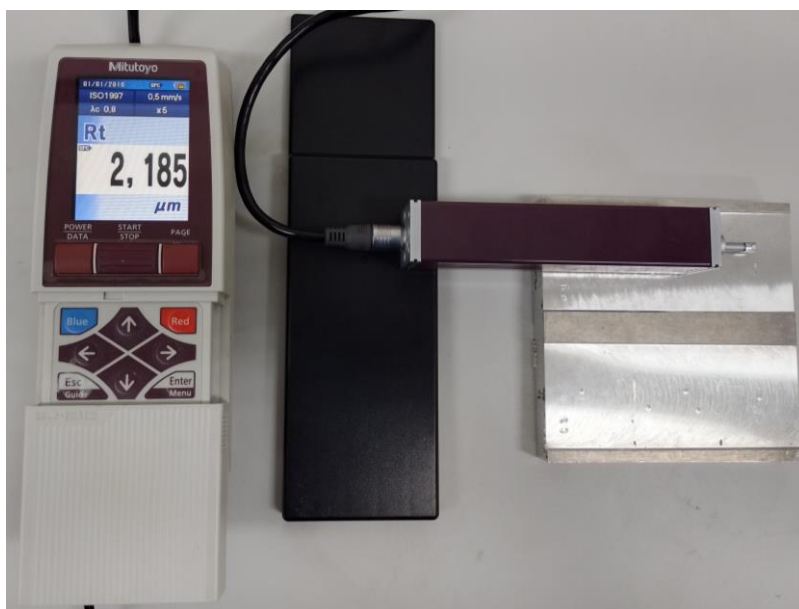


Figura 31 – Rugosímetro portátil Mitutoyo, modelo SJ-210.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RUGOSIDADE

Com o intuito de identificar a magnitude dos resultados obtidos após a usinagem das amostras, foram estimados teoricamente os parâmetros de rugosidade (R_a e R_t), de acordo com as equações 2.5 e 2.7. Como a literatura não fornece meios capazes de determinar a rugosidade de forma teórica no fresamento com pastilhas *wiper*, os cálculos foram efetuados com base na geometria das pastilhas convencionais utilizadas.

Os resultados das medições de rugosidade (R_a e R_t) obtidos após o fresamento de abertura de canais, bem como os seus respectivos valores teóricos são apresentados na Tabela 10. Os gráficos das Figuras 32 e 33, por sua vez, relacionam o avanço por dente com a rugosidade R_a para cada tipo de inserto utilizado (convencional ou *wiper*), sendo que na Figura 32, a profundidade de corte foi fixada em 0,5 mm, ao passo que na Figura 33, a profundidade de corte foi mantida em 1,0 mm.

Tabela 10 – Resultados das medições de rugosidade (R_a e R_t).

| Rugosidade (R_a e R_t) | | | | |
|------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Amostra | R_a (μm) | R_a teórico (μm) | R_t (μm) | R_t teórico (μm) |
| C1 | $0,239 \pm 0,018$ | 0,782 | 2,834 | 50,0 |
| W1 | $0,156 \pm 0,013$ | | 2,336 | |
| C2 | $0,342 \pm 0,039$ | 3,137 | 3,270 | 100,0 |
| W2 | $0,145 \pm 0,013$ | | 2,275 | |
| C3 | $0,263 \pm 0,031$ | 0,782 | 3,632 | 50,0 |
| W3 | $0,164 \pm 0,012$ | | 2,740 | |
| C4 | $0,253 \pm 0,026$ | 3,137 | 2,962 | 100,0 |
| W4 | $0,162 \pm 0,017$ | | 2,321 | |

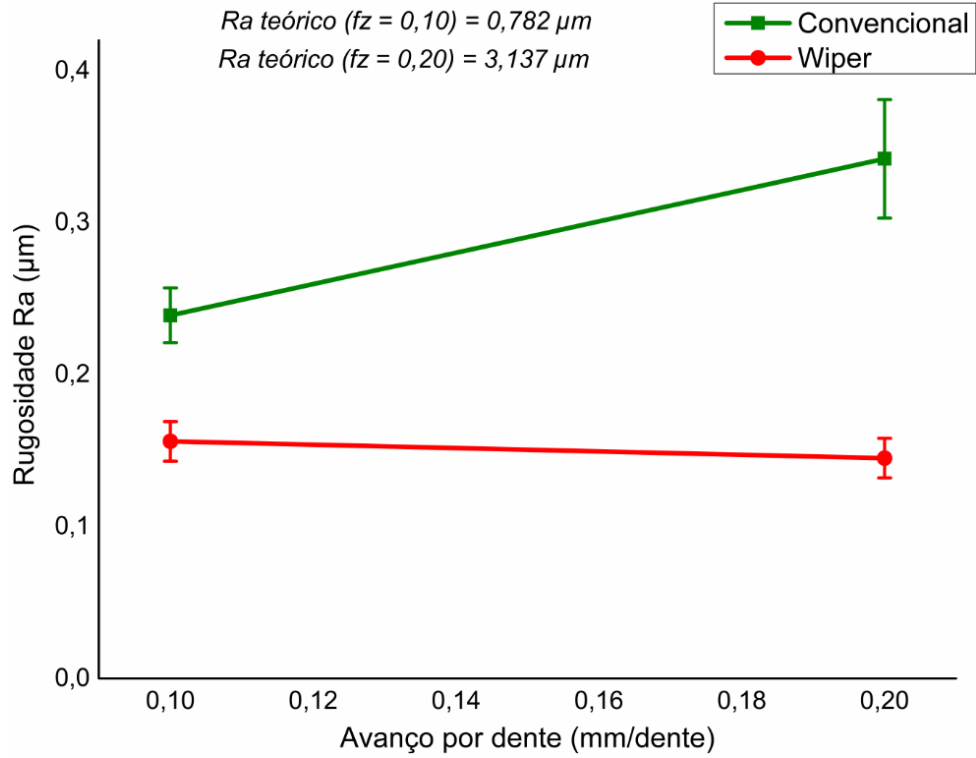


Figura 32 – Relação da rugosidade R_a com o avanço por dente (f_z) para a profundidade de corte (a_p) de 0,5 mm.

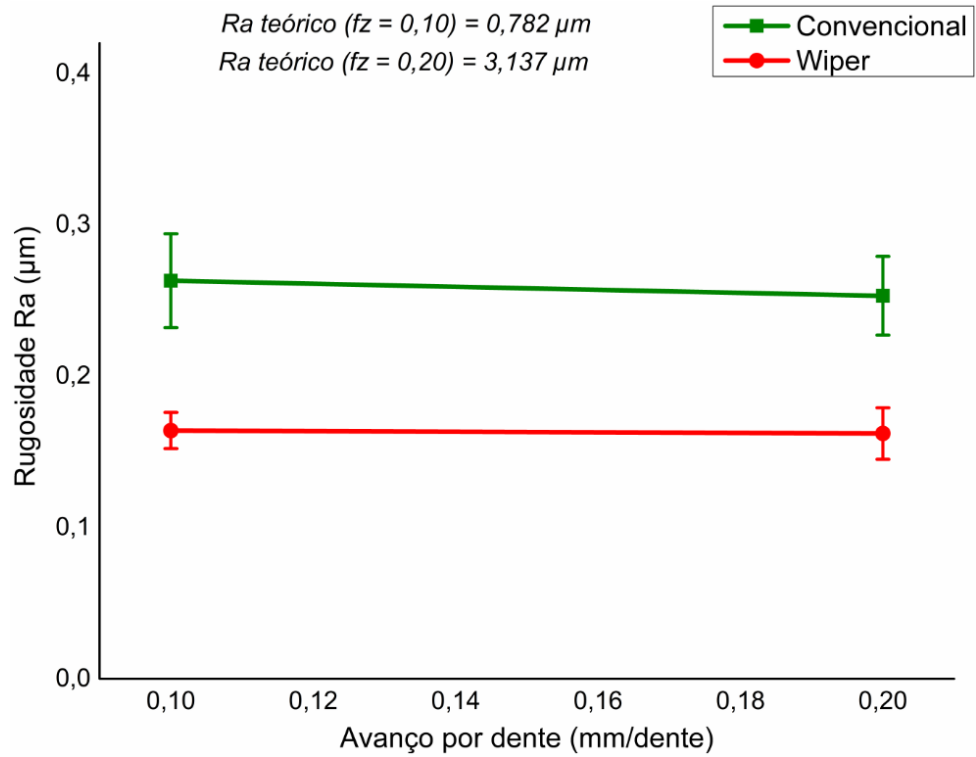


Figura 33 – Relação da rugosidade R_a com o avanço por dente (f_z) para a profundidade de corte (a_p) de 1,0 mm.

Observando os dados apresentados na Tabela 10 e nas Figuras 32 e 33, é possível notar que em todas as condições de corte, as medições de rugosidade R_a encontram-se abaixo dos valores teóricos calculados, isto é, de $0,782 \mu\text{m}$ e $3,137 \mu\text{m}$ para os avanços de $0,1$ e $0,2$ mm/dente, respectivamente. Isso se dá uma vez que o cálculo teórico da rugosidade não pressupõe a ocorrência de fatores, como vibrações e desgaste das ferramentas de corte (MACHADO *et al.*, 2009).

Além disso, observa-se que as superfícies usinadas com pastilha *wiper* apresentaram um melhor acabamento superficial, ou seja, menores valores de rugosidade R_a , em comparação aos resultados obtidos no fresamento com pastilhas convencionais, em todas as condições de usinagem empregadas, comportamento esse que confirma o que foi analisado por diversos autores (DINIZ *et al.*, 2013; OLIVEIRA, 2015).

Conforme foi verificado por Szablewski *et al.* (2022) para o processo de torneamento, cujos resultados foram descritos nos gráficos das Figuras 20 e 21, ao utilizar pastilha *wiper* torna-se possível usinar com maiores valores de velocidade de avanço, sem causar um prejuízo considerável ao acabamento superficial da peça. Analisando as Figuras 32 e 33, percebe-se que essa tendência foi confirmada no fresamento executado no presente trabalho, uma vez que as superfícies usinadas com pastilha *wiper* mantiveram níveis de rugosidade R_a estáveis, ou seja, sem variações significativas, mesmo com o aumento do avanço por dente.

A qualidade da superfície de uma peça usinada depende diretamente dos parâmetros de corte utilizados na operação. Nesse sentido, o avanço por dente representa o parâmetro mais influente no acabamento de superfícies fresadas, na medida em que o seu aumento tende a resultar em maiores valores de rugosidade, sobretudo, na usinagem com pastilhas convencionais, como descrito por inúmeros autores (COSTA *et al.*, 2006; MACHADO *et al.*, 2009; SUAREZ *et al.*, 2007). Contudo, ao aumentar o avanço por dente tem-se um ganho de produtividade pela diminuição do tempo de usinagem de determinada peça/componente.

Ao comparar as amostras C1 e C2, usinadas com a menor profundidade de corte ($0,5$ mm), percebe-se que o aumento do avanço por dente elevou os níveis de rugosidade R_a , o que era esperado. Por outro lado, comparando os canais fresados por pastilhas convencionais com a profundidade de corte de $1,0$ mm (C3 e C4), é notório que não houve uma diferença significativa nos valores de rugosidade R_a com o acréscimo do avanço por dente.

Por apresentar níveis de rugosidade R_a bem superiores às demais condições, a amostra C2 foi usinada novamente, a fim de confirmar as medições obtidas na primeira operação. Desse modo, inicialmente, obteve-se um valor médio de $0,401 \mu\text{m}$ para o parâmetro R_a , enquanto que no segundo procedimento, atingiu-se um resultado de $0,342 \mu\text{m}$, ou seja, houve uma diferença

de apenas 14,7% o que, por consequência, valida as medições iniciais. Diante disso, é provável que a profundidade de corte de 1,0 mm e o avanço por dente de 0,2 mm/dente representem valores próximos à condição ideal de corte das pastilhas utilizadas para o fresamento do alumínio 6061-T651. Sendo assim, somente nas condições 3 e 4, o aumento do avanço por dente não elevou os níveis de rugosidade R_a na usinagem com insertos convencionais.

Segundo a literatura (CRUZ e DANELUZ, 2019; MENDOZA OLIVA e TERRONES VÁSQUEZ, 2017), o aumento da profundidade de corte tende a piorar o acabamento da superfície usinada. Observando a Tabela 10 e as Figuras 32 e 33, é possível perceber que nas superfícies usinadas com o maior avanço (0,2 mm/dente) e utilizando pastilhas convencionais (C2 e C4), houve uma tendência à diminuição da rugosidade R_a com o aumento da profundidade de corte, o que confirma a hipótese de que a amostra C4 aproxima-se da condição ideal de corte das ferramentas. Em contrapartida, nas demais condições, houve um aumento dos valores médios de rugosidade R_a com o acréscimo do parâmetro a_p , todavia os valores de desvio padrão não permitem que se confirme uma tendência.

Os gráficos das Figuras 34 e 35 representam a variação da rugosidade R_t com o avanço por dente, sendo que na Figura 34, a profundidade de corte foi mantida em 0,5 mm, enquanto que na Figura 35, o parâmetro a_p está fixado em 1,0 mm. De maneira geral, os valores de rugosidade R_t são compatíveis com os resultados obtidos nas medições do parâmetro R_a (Figuras 32 e 33). Sendo assim, observa-se que as medições de rugosidade R_t também encontram-se abaixo dos valores calculados teoricamente, ou seja, 50 μm e 100 μm .

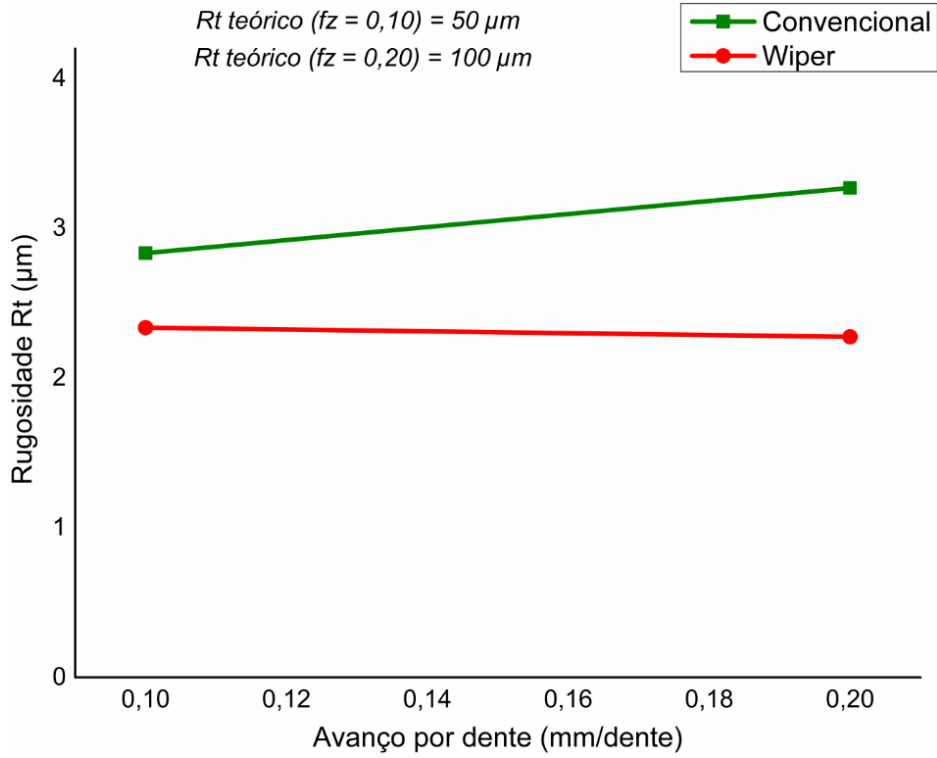


Figura 34 – Relação da rugosidade R_t com o avanço por dente (f_z) para a profundidade de corte (a_p) de 0,5 mm.

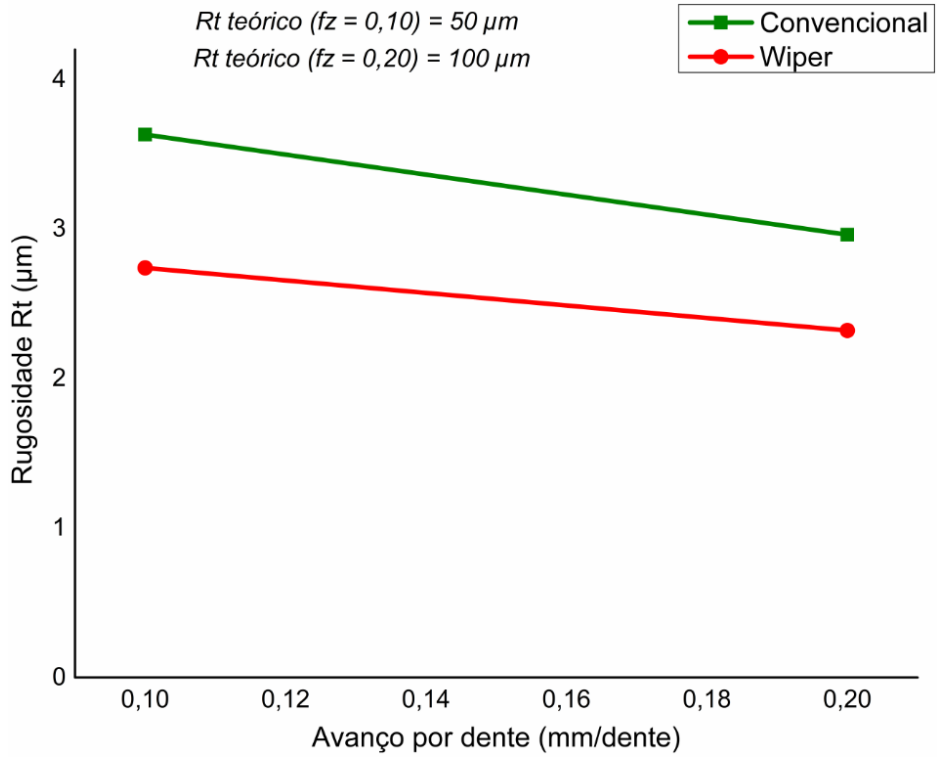


Figura 35 – Relação da rugosidade R_t com o avanço por dente (f_z) para a profundidade de corte (a_p) de 1,0 mm.

Ao analisar as Figuras 34 e 35, torna-se evidente que o fresamento com pastilha *wiper* gerou superfícies com melhor qualidade superficial, isto é, menores valores de rugosidade R_t , quando comparadas às amostras fresadas apenas com insertos convencionais. Além disso, nos canais usinados com o emprego de uma pastilha com geometria alisadora, é perceptível que houve somente uma pequena variação do parâmetro R_t com o aumento do avanço por dente, incluindo uma queda mais significativa no valor de R_t na profundidade de corte de 1,0 mm, ou seja, de W3 (2,74 μm) para W4 (2,32 μm).

Ainda em conformidade com os resultados obtidos nas medições de rugosidade R_a , nota-se que nas superfícies fresadas por insertos convencionais com a profundidade de corte de 0,5 mm (C1 e C2), houve um aumento no valor de R_t com o acréscimo do avanço por dente. Todavia, ao comparar as amostras C3 e C4, usinadas com a maior profundidade de corte (1,0 mm), percebe-se que esse comportamento foi inverso, isto é, o aumento do avanço por dente diminuiu a rugosidade R_t . Em paralelo à redução dos níveis de rugosidade R_t de W3 para W4, esse resultado torna mais evidente a possibilidade das amostras C4 e W4 terem sido usinadas em condições próximas à ideal de corte das ferramentas utilizadas no estudo.

Ademais, é possível identificar que a amostra C3, usinada com um avanço de 0,1 mm/dente e profundidade de corte de 1,0 mm, atingiu o maior valor de rugosidade R_t , isto é, de 3,632 μm . Essa irregularidade não foi constatada através das medições de rugosidade R_a , pois conforme mencionado por Machado *et al.* (2009), por tratar-se de um valor médio, o parâmetro R_a é estável e não é capaz de identificar irregularidades pontuais.

No que tange à influência da profundidade de corte no acabamento superficial da peça, as medições de rugosidade R_t também confirmaram o que foi verificado na análise do parâmetro R_a . Dessa forma, com exceção das amostras usinadas por insertos convencionais com o maior avanço por dente (0,2 mm/dente), é possível observar que o aumento da profundidade de corte tende a elevar os valores de R_t nas operações de fresamento.

4.2 DUREZA

Para verificar a influência dos parâmetros de usinagem e da geometria da ferramenta de corte na dureza do alumínio 6061-T651, foram realizados ensaios de dureza Rockwell B, sendo comparados os valores obtidos após a usinagem das amostras, com a dureza do material na condição como recebido. Nesse sentido, a peça de alumínio 6061-T651 apresentou uma

dureza de 52,0 HRB antes do fresamento. A Tabela 11 e a Figura 36 descrevem os resultados das medições de dureza Rockwell B efetuadas em cada canal fresado.

Tabela 11 – Resultados das medições de dureza Rockwell B.

| Dureza Rockwell B | |
|-------------------|-------------------------|
| Amostra | Dureza Rockwell B (HRB) |
| C1 | 54,0 ± 0,7 |
| W1 | 53,9 ± 0,3 |
| C2 | 54,7 ± 0,8 |
| W2 | 54,2 ± 0,4 |
| C3 | 53,3 ± 0,6 |
| W3 | 54,1 ± 0,3 |
| C4 | 54,4 ± 1,3 |
| W4 | 54,8 ± 0,3 |

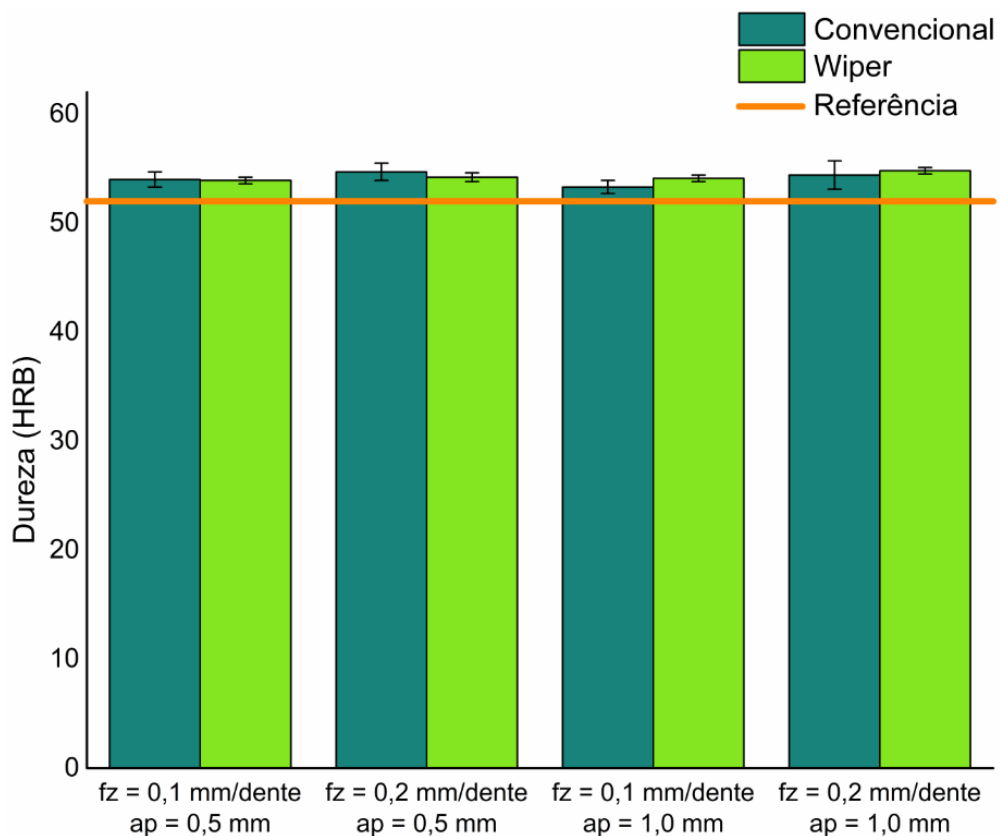


Figura 36 – Variação da dureza Rockwell B em cada condição de corte e tipo de pastilha utilizada.

Ao analisar a Tabela 11 e o gráfico da Figura 36, é possível notar que a operação de fresamento proporcionou um aumento na dureza do material, em virtude do encruamento

causado pelo processo de deformação plástica, confirmando o que foi verificado por alguns autores (NIU *et al.*, 2019; RIBEIRO e CUNHA, 2007). Além disso, observa-se que em todas as condições de corte, ocorreu apenas um pequeno acréscimo nos valores de dureza, em comparação ao valor de referência obtido antes da usinagem, sendo que na amostra W4, foi verificado o maior aumento percentual (5,4%). Esse comportamento se justifica uma vez que o ensaio de dureza Rockwell B não é capaz de identificar possíveis alterações em regiões muito próximas à superfície da peça usinada, pois a indentação pode ser mais profunda do que a camada atingida pelo processo de usinagem (SOUZA, 1982).

Ainda de acordo com a Figura 36, é perceptível que a profundidade de corte e o tipo de pastilha utilizada tiveram pouca influência nos resultados de dureza. Por outro lado, apesar dos valores de desvio padrão não permitirem que se confirme uma tendência, os valores médios de dureza apresentaram um leve aumento com o acréscimo do avanço por dente. Segundo Hassanpour *et al.* (2016), ao usinar com maiores velocidades de avanço, a taxa de deformação imposta ao material eleva-se, o que tende a aumentar a profundidade da camada afetada pelo efeito do encruamento gerado pela deformação plástica durante o fresamento. Sendo assim, a realização de uma análise microestrutural nas amostras seria ideal para verificar as camadas atingidas pela usinagem o que, portanto, permitiria confirmar esse comportamento.

4.3 MICRODUREZA

A microdureza superficial dos canais fresados foi avaliada por meio de ensaios de microdureza Vickers. Conforme demonstrado na Tabela 12, as medições efetuadas em cada condição de corte foram comparadas ao valor de referência obtido antes do fresamento, isto é, de 110,5 HV. Os gráficos das Figuras 37 e 38 representam a variação da microdureza Vickers com o avanço por dente, fixando a profundidade de corte em 0,5 mm (Figura 37) e 1,0 mm (Figura 38).

Tabela 12 – Resultados das medições de microdureza Vickers.

| Microdureza Vickers | |
|---------------------|--------------------------|
| Amostra | Microdureza Vickers (HV) |
| C1 | 119,6 ± 1,1 |
| W1 | 120,0 ± 1,6 |
| C2 | 115,8 ± 2,2 |
| W2 | 116,6 ± 1,6 |
| C3 | 120,3 ± 2,5 |
| W3 | 117,6 ± 1,4 |
| C4 | 116,8 ± 2,6 |
| W4 | 118,2 ± 2,6 |

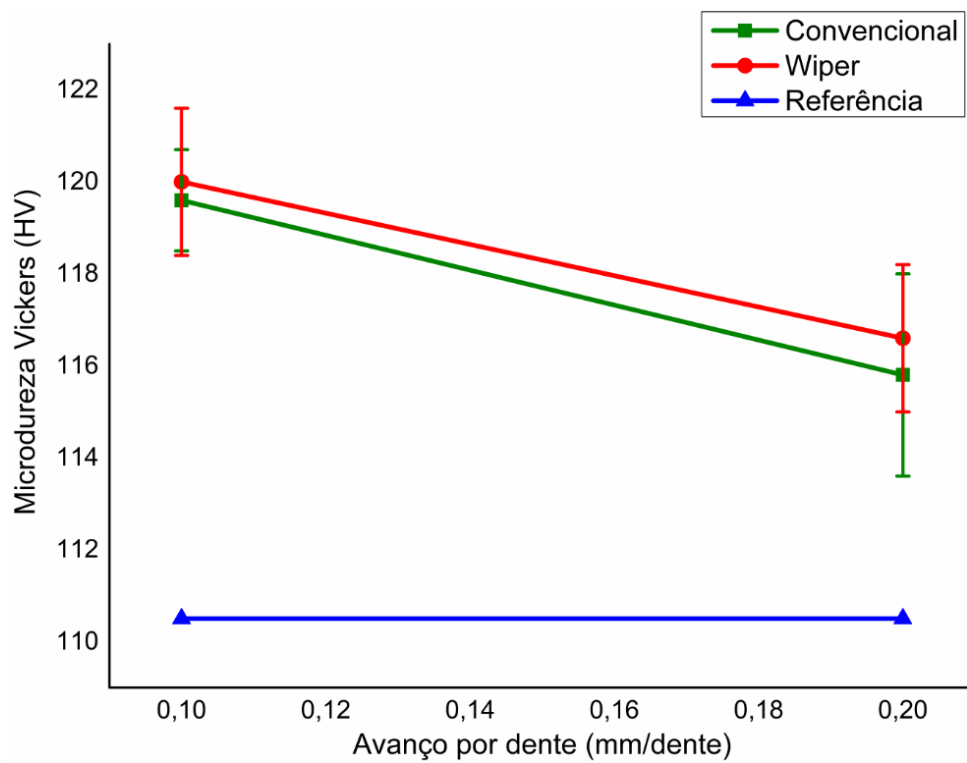


Figura 37 – Relação da microdureza Vickers com o avanço por dente (f_z) para a profundidade de corte (a_p) de 0,5 mm.

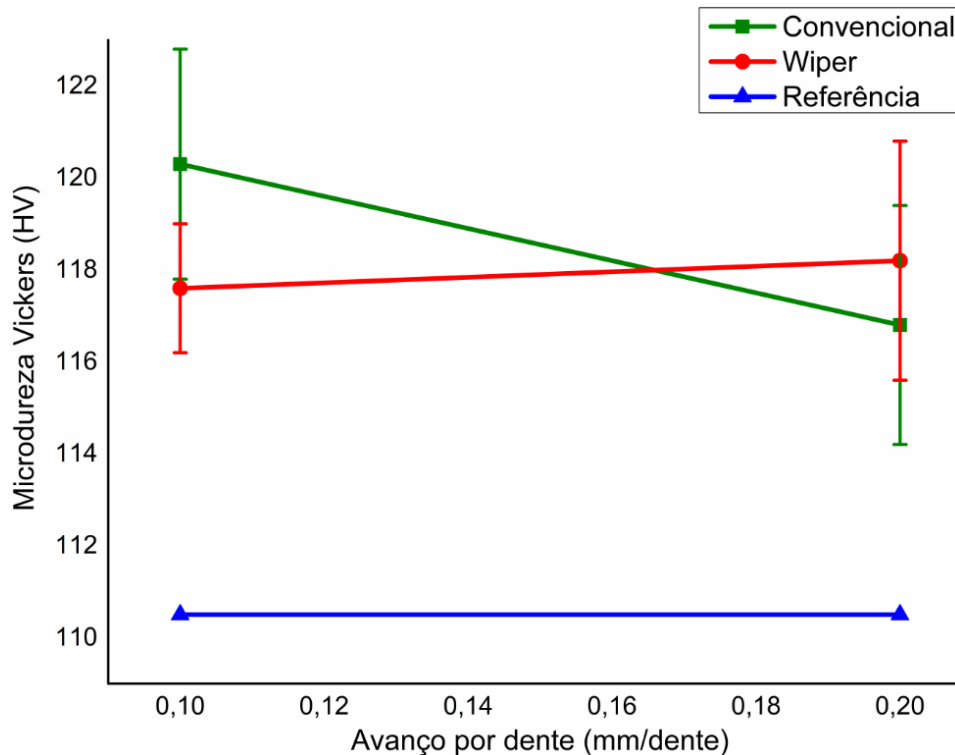


Figura 38 – Relação da microdureza Vickers com o avanço por dente (f_z) para a profundidade de corte (a_p) de 1,0 mm.

Ao observar a Tabela 12 e os gráficos das Figuras 37 e 38, nota-se que os resultados de microdureza obtidos após o fresamento das amostras identificaram diferenças mais significativas em relação ao valor de referência medido antes da usinagem, quando comparadas às medições de dureza apresentadas na Figura 36, o que já era previsto (SOUZA, 1982). Nesse sentido, constatou-se que a amostra C3 (maior profundidade e menor avanço) apresentou o maior aumento percentual no valor médio de microdureza, isto é, de 8,9%.

De acordo com Hoffmann *et al.* (2020), a utilização de insertos com maiores raios de canto, isto é, que aumentam a área de contato entre a ferramenta e a peça (caso da pastilha *wiper*), tende a elevar a microdureza do material, uma vez que essa geometria induz maiores deformações na peça o que, conseqüentemente, pode gerar um maior encruamento, elevando os níveis de dureza. No presente trabalho, é possível perceber que as superfícies usinadas com pastilha *wiper* apresentaram maiores valores médios de microdureza em comparação aos resultados obtidos por insertos convencionais, com exceção das amostras fresadas com o menor avanço (0,1 mm/dente) e a maior profundidade de corte (1,0 mm), cujo comportamento foi inverso. Contudo, os resultados de desvio padrão impedem que essa tendência seja confirmada.

Além disso, ao analisar as Figuras 37 e 38, é notório que o aumento do avanço por dente promoveu um decréscimo nos valores de microdureza, exceto nos canais usinados por

pastilha *wiper*, com uma profundidade de corte de 1,0 mm (W3 e W4). Essa tendência pode ser explicada na medida em que, ao diminuir o avanço, o tempo de contato entre a ferramenta e a peça eleva-se, o que proporciona uma condição mais severa de deformação plástica, aumentando assim, o nível de encruamento do material e, por consequência, a sua dureza. Em contrapartida, o comportamento inverso observado nas amostras W3 e W4 se justifica visto que a superfície W4 foi usinada com os maiores valores de avanço por dente e profundidade de corte que, em paralelo à utilização de uma pastilha *wiper*, proporcionaram um aumento significativo na área da seção de corte o que, conseqüentemente, elevou as forças de usinagem, induzindo maiores deformações e, portanto, um acréscimo no grau de encruamento da peça.

Cabe ressaltar ainda o grande desvio padrão encontrado nas condições de usinagem com 1,0 mm de profundidade de corte. Conforme descrito no Capítulo 3, todas as usinagens foram realizadas com a adição de fluido de corte. Ao aumentar a profundidade de corte pode ter ocorrido uma irregularidade no processo de lubri-refrigeração, o que pode resultar em uma heterogeneidade de camada atingida por gradiente térmico e deformação plástica, explicando os maiores valores de desvio padrão.

Por fim, percebe-se que, novamente, não houve uma influência significativa da profundidade de corte nas medições de microdureza. Embora o valor médio de microdureza tenha diminuído de forma considerável entre as condições 1 e 3, de menor avanço por dente na usinagem com pastilha *wiper*, esse comportamento não pode ser confirmado em virtude dos valores de desvio padrão.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho, que teve como objetivo analisar a influência da geometria da ferramenta de corte na integridade superficial do alumínio 6061-T651 após o fresamento de topo, utilizando diferentes parâmetros de corte, permite as seguintes conclusões:

1. O fresamento com pastilha *wiper* gerou superfícies com melhor qualidade superficial, na medida em que apresentou menores valores de rugosidade (R_a e R_t) em comparação às amostras fresadas por insertos convencionais.
2. A usinagem com pastilha *wiper* permitiu que maiores valores de avanço por dente pudessem ser utilizados, sem resultar em prejuízo ao acabamento superficial da peça, independente da profundidade de corte o que, portanto, proporciona um ganho de produtividade na operação.
3. Ao analisar as medições de rugosidade R_t , foi possível identificar irregularidades pontuais, que não foram constatadas pelo parâmetro R_a , permitindo assim, avaliar o acabamento da superfície usinada de forma mais assertiva.
4. A usinagem promoveu um aumento da dureza do material em todas as condições de corte. Além disso, verificou-se que há uma tendência de diminuição dos valores de microdureza com o acréscimo do avanço por dente.
5. Os resultados mostraram que, independente da condição de corte estudada, o fresamento com pastilha *wiper* melhorou a integridade superficial da peça usinada, visto que não só obteve menores valores de rugosidade (R_a e R_t), mas também teve pouca influência nas medições de microdureza.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Usinar amostras com as profundidades de corte de 1,5, 2,0 e 2,5 mm e os mesmos valores de avanço por dente (0,1 e 0,2 mm/dente), a fim de identificar as condições ideais de usinagem das ferramentas de corte utilizadas no presente estudo.
2. Realizar uma análise técnico-econômica para verificar a viabilidade do uso de pastilhas *wiper* para fabricação de peças no cenário industrial, sabendo que as mesmas possuem maior custo e tendem a desgastar mais rapidamente (menor vida útil).
3. Avaliar o efeito da velocidade de corte na integridade superficial do alumínio 6061-T651.
4. Produzir uma micrografia das amostras com o intuito de analisar as camadas atingidas durante o fresamento.
5. Comparar os diferentes tipos de cavaco produzidos durante a usinagem com pastilhas convencionais e *wiper*.
6. Analisar o desgaste das ferramentas com geometria convencional e *wiper*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOSTINHO, Oswaldo Luiz; RODRIGUES, Antônio Carlos dos Santos; LIRANI, João. *Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões*. 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1977.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6507-1: Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers - Parte 1: Método de ensaio. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6508-1: Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell - Parte 1: Método de ensaio. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BAJIC, Drazen; CELENT, Luka; JOZIC, Sonja. *Modeling of the influence of cutting parameters on the surface roughness, tool wear and the cutting force in face milling in off-line process control*. Journal of Mechanical Engineering, Split, v. 58, n. 11, p. 673-682, 2012.
- BARBOSA, Cássio. *Metais não ferrosos e suas ligas: Microestrutura, propriedades e aplicações*. 1. ed. Rio de Janeiro: E-Papers, 2014.
- CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G.. *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- COSTA, Eder Silva; GONÇALVES, Carlos Henrique Saldanha; MACHADO, Álisson Rocha. *Análise da rugosidade em canais fresados na liga de alumínio ASTM 6351-T6 em função dos parâmetros de corte e do número de dentes da fresa*. XI Colóquio de Usinagem, Goiânia, 2006.
- CRUZ, Marina Marques de Almeida Rosa da; DANELUZ, Renata. *Influência no custo do processo devido a variação dos parâmetros de usinagem no fresamento de alumínio*. 2019. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2019.
- DINIZ, Anselmo Eduardo; MERCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 8. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2013.
- GROOVER, Mikell P. *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems*. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

GUDER, H.S.; SAHIN, E.; SAHIN, O.; GOÇMEZ, H.; DURAN, C.; ÇETINKARA, H. Ali. *Vickers and Knoop indentation microhardness study of β -SiAlON Ceramic*. Acta Physica Polonica A, Varsóvia, v. 120, n. 6, p. 1026-1033, 2011.

HASSANPOUR, Hamed; SADEGHI, Mohammad H.; RASTI, Amir; SHAJARI Shaghayegh. *Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication*. Journal of Cleaner Production, v. 120, p. 124-134, 2016.

HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. *Fundamentos da conformação: Mecânica dos metais*. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2010.

HOFFMANN, Paulo Roberto; MARQUES, Fernando Michelin; ROCHA, Alexandre da Silva; TEIXEIRA, Ariel. *Influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade superficial e no perfil de dureza do aço AISI 316L submetido a processo de torneamento*. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 12, n. 4, 2020.

LOUREIRO, Pedro Arlindo Marinho. *Otimização da utilização de ferramentas de corte em fresagem CNC*. 2020. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2020.

MACHADO, Álisson Rocha; ABRÃO, Alexandre Mendes; COELHO, Reginaldo Teixeira; SILVA, Márcio Bacci da. *Teoria da usinagem dos materiais*. 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 2009.

MAIA, Mateus Monteiro. *Influência dos parâmetros de fresagem na qualidade superficial de peças*. 2017. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

MENDOZA OLIVA, Carlos Eduardo; TERRONES VÁSQUEZ, Víctor Anderson. *Efecto de la velocidad de avance y la profundidad de corte sobre la rugosidad, fuerza de corte y potencia específica de corte para el mecanizado del aluminio 6061-T6*. 2017. 90 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, 2017.

NIU, Jintao; LIU, Zhanqiang; AI, Xing; HUANG, Weimin; WANG, Guijie; DUAN, Ran. *Characteristics of machined surface integrity in face milling Al-Li alloy 2A97 with carbide inserts*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 101, n. 1, p. 839-848, 2019.

NUNES, Luciano Tadeu. *Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5*. 2011. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

OLIVEIRA, José Francisco de. *Estudo do fresamento de acabamento da liga de alumínio aeronáutico 7075-T6*. 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

OLIVEIRA, Marina Anunciação Brito de; PINO, Gilberto García del; OLIVEIRA, Carlos Alberto Mendes. *Estudo dos parâmetros de corte do fresamento HSM sobre o acabamento superficial do alumínio 6061-T6*. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Luís, 2012.

PAULO, Rafael Gustavo da Rocha. *Avaliação da integridade superficial e usinabilidade de engrenagens forjadas utilizando fresamento com alta velocidade de corte*. 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

POLLI, Milton Luiz. *Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte*. 2005. 214 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

RIBEIRO, Marcos Valério; CUNHA, Elias Alves da. *Usinagem da liga de alumínio ASTM AA 7050 por torneamento*. UNESP. Guaratinguetá, São Paulo, 2007.

ROCHA, Ribamar da. *Análise da rugosidade superficial usinando ligas de alumínio SAE 305 e SAE 323 com fresa de metal duro*. 2013. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2013.

SANDVIK COROMANT. *345R-1305E-KL H13A: Pastilha CoroMill® 345 para fresamento*. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=345R-1305E-KL%20H13A>>. Acesso em: 8 ago. 2022.

SANDVIK COROMANT. *345N-1305E-KW8 H13A: Pastilha CoroMill® 345 insert for milling*. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/productdetails.aspx?c=345n-1305e-kw8%20h13a>>. Acesso em: 8 ago. 2022.

SANDVIK COROMANT. *Fresas para cantos a 90 graus versáteis com capacidade para usinagem em rampa na produção mista: CoroMill® 390*. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/coromill_390/pages/default.aspx>.

Acesso em: 17 jun. 2022.

SANDVIK COROMANT. *Ferramentas sólidas rotativas*. Catálogo de produtos. São Paulo, 2020, 529 p.

SANDVIK COROMANT. *Geração de superfície em fresamento*. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/surface-generation.aspx>>. Acesso em: 30 jun. 2022.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. *Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais*. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2007.

SECO TOOLS. *Fresamento*. Catálogo de produtos e guia técnico 2020.1. São Paulo, 2020, 730 p.

SCHUITEK, Aloisio José. *Usinabilidade de ligas de alumínio tratáveis termicamente*. 1997. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SOUZA, Sérgio Augusto de. *Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos*. 5. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1982.

SUAREZ, Mauro Paipa; MACHADO, Álisson Rocha; COSTA, Éder Silva. *Precisão dimensional e acabamento na superfície do alumínio aeronáutico 7075-T7 no processo de fresamento de topo*. 17º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2007.

SZABLEWSKI, Piotr; SMAK, Krzysztof; KRAWCZYK, Bartłomiej. *Analysis of the impact of wiper geometry insert on surface roughness and chips in machining materials used in the aviation industry*. Advances in Science and Technology. Research Journal, v. 16, n. 1, p. 203-212, 2022.

TOLEDO, José Veríssimo Ribeiro de. *Estudo do acabamento superficial no fresamento de faceamento do aço ABNT 1045 utilizando pastilha com geometria alisadora*. 2015. 100 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.