

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

RAFAEL TANGANINI BOA SORTE

**INFLUÊNCIA DO FLUIDO DE CORTE NA USINAGEM DE
POLÍMEROS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2020

RAFAEL TANGANINI BOA SORTE

**INFLUÊNCIA DO FLUIDO DE CORTE NA USINAGEM DE
POLÍMEROS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina TCC, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Londrina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dra. Janaína Fracaro de Souza Gonçalves.

Co-orientadora: Profa. Dra. Elizabeth Mie Hashimoto

LONDRINA

2020



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina

Nome da Diretoria
Nome da Coordenação
Nome do Curso



TERMO DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DO FLUIDO DE CORTE NA USINAGEM DE POLÍMEROS

por

RAFAEL TANGANINI BOA SORTE

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) ou foi apresentado em 22 de outubro de 2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Dra. Janaína Fracaro de Souza Gonçalves.
Profa. Orientadora

Prof. Dr. Roger Nabeyama Michels
Membro titular

Prof. Dr. Janksyn Bertozzi
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

AGRADECIMENTOS

Minhas singelas palavras de agradecimentos são direcionadas a todos que fizeram parte dessa minha importante etapa da vida, mesmo que por um breve momento.

Em especial, quero agradecer meus pais, Silvio e Teresinha, meus irmãos, Marcela e Guilherme, e os demais familiares pelo apoio e suporte imensurável, além da total confiança em meu potencial para superar esse enorme desafio.

A minha orientadora, Profa. Dra. Janaína Fracaro de Souza Gonçalves, por todo apoio, ensinamentos e colaboração no decorrer deste trabalho.

A minha co-orientadora, Profa. Dra. Elizabeth Hashimoto, pela consideração e colaboração, de extrema importância, no decorrer deste trabalho.

A todos os professores da UTFPR Campus Londrina, principalmente aos do Departamento de Engenharia Mecânica, por partilharem todo conhecimento e experiências me capacitando para a obtenção do título de engenheiro mecânico.

Aos meus amigos de sala, Gabriel Domingues, Gustavo Freitas, Mayther Freire e Reinaldo Gussi, que desde o início me apoiaram, ajudaram e partilharam das experiências no decorrer da graduação.

Aos demais inúmeros amigos da vida e da instituição que participaram desta caminhada tão importante da minha vida, me dando forças, suporte e diversos momentos de felicidade.

E por fim, e mais importante, agradeço a Deus pela vida que me proporciona, me capacitando com sabedoria para atingir todos meus objetivos de vida.

Quanto mais aumenta nosso conhecimento,
mais evidente fica nossa ignorância.
(KENNEDY, John F., 1962)

RESUMO

BOA SORTE, Rafael Tanganini. **Influência do fluido de corte na usinagem de polímeros**. 2020. 59p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2020.

O uso de fluido de corte é de extrema importância na usinagem, pois eles reduzem o atrito entre ferramenta/peça e ferramenta/cavaco, com isso diminuem a temperatura da peça e da ferramenta, melhorando a usinabilidade e a qualidade final da peça. O objetivo do presente trabalho foi estudar a influência do fluido de corte sobre a rugosidade no processo de usinagem de polímeros. Os ensaios consistiram na realização do fresamento de dois corpos de provas distintos, acrílico e PVC expandido. Os parâmetros de corte analisados foram velocidades de corte, velocidade de avanços e adição de fluido em diferentes concentrações. Segundo a análise estatística, houve efeito de interação entre as velocidades de corte e os materiais nos valores da rugosidade, além dos efeitos individuais dos materiais e, principalmente, das condições de fluido. Quanto a análise dos cavacos, notou-se que houve uma diminuição no tamanho dos mesmos conforme a concentração aumentava. Já o consumo de corrente elétrica indicou que com a adição do fluido de corte ocorreu a diminuição do atrito entre ferramenta/peça, indicado pela diminuição de corrente.

Palavras-chave: CNC. Fresamento de Topo. Parâmetros de corte. Rugosidade.

ABSTRACT

BOA SORTE, Rafael Tanganini. **Influence of the cutting fluid in the machining of polymers**. 2020. 59p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. - Federal Technology University - Paraná. Londrina, 2020.

The use of cutting fluid is extremely important in machining, as they reduce the friction between tool / workpiece and tool / chip, thereby reducing the temperature of the workpiece and tool, improving machinability and the final quality of the workpiece. The aim of this work was to study the influence of the cutting fluid on the roughness in the polymer machining process. The tests consisted of milling two different specimens, acrylic and expanded PVC. The cutting parameters analyzed were cutting speeds, feed rate and fluid addition in different concentrations. According to the statistical analysis, there was an interaction effect between the cutting speeds and the materials on the roughness values, in addition to the individual effects of the materials and, mainly, of the fluid conditions. As for the analysis of the chips, it was noted that there was a decrease in their size as the concentration increased. The consumption of electric current indicated that with the addition of the cutting fluid, there was a decrease in friction between tool / part, indicated by the decrease in current.

Keywords: CNC. End Milling. Cutting parameters. Roughness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. (a) fresamento tangencial; (b) fresamento frontal.....	11
Figura 2. Representação de uma operação de fresamento concordante e de uma de fresamento discordante	11
Figura 3. Classificação da Integridade Superficial.....	21
Figura 4. Elementos do acabamento superficial: a) rugosidade superficial; b) ondulações; c) marcas denotando direções das irregularidades; d) falhas	23
Figura 5. Rugosidade média Ra.....	24
Figura 6. Rugosidade média de acordo com o processo de fabricação.....	26
Figura 7. Fluxograma dos procedimentos experimentais	27
Figura 8. CNC Router spindle TVS.1ZM3.12.	28
Figura 9. Corpos de prova, (a) Acrílico; (b) PVC expandido.	28
Figura 10. Fresa topo Aço Rápido de 2 corte (HSS) utilizada.	29
Figura 11. Fixação do corpo de prova e posicionamento da ferramenta.....	29
Figura 12. Rugosímetro de superfície digital Instrutherm modelo RP-200.	31
Figura 13. Refratômetro analógico Vodex VX090.	31
Figura 14. Ilustração do sistema de monitoramento de corrente.....	32
Figura 15. a) dois ensaios em PVC expandido; b) ilustração da rugosidade.	37
Figura 16. Normalidade <i>RaInício</i>	38
Figura 17. Normalidade <i>Rameio</i>	38
Figura 18. Normalidade <i>Rafim</i>	39
Figura 19. Efeito de interação da velocidade de corte e material.....	40
Figura 20. Efeitos individuais na rugosidade	41
Figura 21. Efeito de interação da velocidade de corte e material.....	43
Figura 22. Efeito do bloco na rugosidade	43
Figura 23. Efeito de interação da velocidade de corte e material.....	46
Figura 24. Efeitos do bloco na rugosidade	46
Figura 25. Matriz de cavaco da usinagem sem fluido.	49
Figura 26. Matriz de cavaco da usinagem com fluido com baixa concentração.....	50
Figura 27. Matriz de cavaco da usinagem com fluido com concentração ideal.....	50
Figura 28. Matriz de cavaco da usinagem com fluido com alta concentração.	51
Figura 29. Comportamento dos parâmetros com efeito sobre a corrente elétrica (Ampere).	52
Figura 30. Desgaste das ferramentas de corte.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Sequência de repetições por bloco	33
Tabela 2. Fatores de controles e níveis adotados.....	34
Tabela 3. Modelo da Análise de variância.....	35
Tabela 4. Matriz de dados da rugosidade média no ponto inicial de usinagem.	36
Tabela 5. Matriz de dados da rugosidade média no ponto médio de usinagem.	36
Tabela 6. Matriz de dados da rugosidade média no ponto final de usinagem.....	37
Tabela 7. Análise de variância dos dados de rugosidade no ponto inicial da usinagem.....	40
Tabela 8. Teste de Tukey (Velocidade de corte x material)	41
Tabela 9. Teste de Tukey (Blocos).....	42
Tabela 10. Análise de variância dos dados de rugosidade no ponto mediano da usinagem.....	42
Tabela 11. Teste de Tukey (Velocidade de corte x material)	44
Tabela 12. Teste de Tukey (Blocos).....	44
Tabela 13. Análise de variância dos dados de rugosidade no ponto final da usinagem.....	45
Tabela 14. Teste de Tukey (Velocidade de corte x material).	47
Tabela 15. Teste de Tukey (Blocos).....	47
Tabela 16. Resumo dos resultados da ANOVA.	48
Tabela 17. Dados de corrente nos ensaios.....	52
Tabela 18. Dados do fluido de corte.....	53

NOMENCLATURA

a_p	Profundidade de corte
d	Diâmetro
f	Avanço
f_z	Avanço por dente
l_m	Percurso de medição
n	Rotação
R_a	Rugosidade média
$R_{a_{fim}}$	Rugosidade média no ponto final de usinagem
$R_{a_{inicio}}$	Rugosidade média no ponto inicial de usinagem
$R_{a_{meio}}$	Rugosidade média no ponto intermediário de usinagem
r_e	Raio da ferramenta
v_c	Velocidade corte
v_f	Velocidade de avanço
Z	Número de dentes

LISTA DE SIGLAS

CNC	Comando Numérico Computadorizado
HSS	High Speed Steel
PVC	Policloreto de Vinila.

LISTA DE ACRÔNIMOS

ANOVA	Análise de Variância
PET	Poli Tereftalato de Etila

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVO GERAL	9
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
1.3 JUSTIFICATIVA.....	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 PROCESSO DE USINAGEM.....	10
2.1.1 Fresamento.....	10
2.1.2 Parâmetros de usinagem	11
2.2 FORMAÇÃO DE CAVACO	13
2.3 FLUIDO DE CORTE	13
2.3.1 Classificação dos fluidos de corte.....	14
2.3.1.1 Óleos.....	15
2.3.1.2 Emulsões	16
2.3.1.3 Soluções	16
2.4 POLÍMEROS.....	16
2.4.1 Propriedades mecânica dos polímeros.....	18
2.4.2 Usinabilidade dos polímeros	19
2.5 INTEGRIDADE SUPERFICIAL	20
2.5.1 Rugosidade.....	22
2.5.1.1 Parâmetros de rugosidade.....	24
3 METODOLOGIA.....	27
3.1 MATERIAS EXPERIMENTAIS.....	27
3.1.1 Máquina-Ferramenta	27
3.1.2 Corpos de Prova	28
3.1.3 Ferramenta de corte	28
3.1.4 Fixação do corpo de prova	29
3.1.5 Programação CNC.....	30
3.1.6 Fluido de corte	30
3.1.7 Rugosímetro	30
3.1.8 Refratômetro.....	31
3.1.9 Sistema de monitoramento de corrente	31
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	32
3.2.1 Pré-testes	32
3.2.2 Ensaio de usinabilidade	33
3.2.3 Análise dos dados.....	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA.....	39
4.1.1 Análise de variância da rugosidade no ponto inicial da usinagem	39

4.1.1.1 Teste de Tukey – Interação dupla entre velocidade de corte e material	41
4.1.1.2 Teste de Tukey – Efeito do bloco na rugosidade média	41
4.1.2 Análise de variância da rugosidade no ponto médio da usinagem	42
4.1.2.1 Teste de Tukey – Interação dupla entre velocidade de corte e material	44
4.1.2.2 Teste de Tukey - Efeito do bloco na rugosidade média.....	44
4.1.3 Análise de variância da rugosidade no ponto final da usinagem	45
4.1.3.1 Teste de Tukey - Interação dupla entre velocidade de corte e material	47
4.1.3.2 Teste de Tukey - Efeito do bloco na rugosidade média.....	47
4.1.4 Discussão da análise estatística	48
4.2 ANÁLISE DOS CAVACOS.....	48
4.3 ANÁLISE DO CONSUMO DE CORRENTE.....	51
4.4 ANÁLISE DO FLUIDO DE CORTE.....	53
4.5 ANÁLISE DO DESGASTE DA FERRAMENTA	53
5 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

Durante a retirada do material ocorre uma geração de calor, ocasionado pelo atrito que existente no contato da ferramenta com a peça e o cavaco, podendo interferir em seu desgaste além do normal. Ademais pode aumentar as dimensões da peça, ocasionado pela dilatação térmica. Para evitar esses problemas de desgaste e má qualidade das peças é necessário a diminuição desse calor, por meio do uso de fluidos de cortes (LISBOA; MORAES; HIRASHITA, 2013). Os fluidos de cortes têm como objetivo reduzir os custos totais de fabricação ou aumentar a taxa de produção, além do fluido evitar alterações microestruturais na peça decorrentes de elevadas temperaturas causada pela usinagem (MACHADO *et al.*, 2009). A escolha do fluido de corte ideal é muito importante, pois ele é quem promove a eficiência ao processo de usinagem, melhorando a qualidade final da peça, aumentando a vida útil da ferramenta e das máquinas, além da redução dos custos em todo o processo (VEJA... 2017).

Além da refrigeração e lubrificação do processo de usinagem, o fluido de corte é responsável pelo escoamento do cavaco, promovendo assim, quando aplicado corretamente, uma maximização nos resultados, aumento da segurança do processo, melhoramento do desempenho da ferramenta e da qualidade da peça. Em alguns casos, o uso de fluidos pode até fornecer benefícios ambientais (SANDVIK, 2020).

Por outro lado, os plásticos vêm, cada vez mais tomando o espaço de materiais tradicionais como bronze, aço inoxidável, ferro fundido e cerâmicas por apresentar desempenho superior e fatores de redução de custos. Isto é, os plásticos podem reduzir o peso, eliminar a corrosão, reduz ruídos, eleva a vida útil da peça, etc. (MITSUBISHI CHEMICAL ADVANCED MATERIALS, 2020)

Com isso, nota-se que os materiais poliméricos possuem vasta aplicabilidade, tornando-se necessária para a vida do homem por estarem presentes em todas as áreas.

De acordo com Fernandes *et al.* (2007) não existe muitos estudos a respeito de usinagem em plásticos industriais, fazendo que boa parte do conhecimento é adquirido empiricamente, principalmente no Brasil, país que tem grande destaque nesse processo e que cresce continuamente fornecendo peças usinadas em plástico para o cenário nacional e internacional.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência do uso de fluido de cortes na usinagem de polímeros por meio do estudo da rugosidade média, variando a concentração do mesmo e mudando alguns dos parâmetros de usinagem em dois tipos de materiais poliméricos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O intuito deste trabalho foi:

- Selecionar parâmetros de corte que estressem a ferramenta,
- Análise do efeito do fluido na integridade superficial da peça;
- Analisar a influência do fluido e demais parâmetros no consumo de corrente.
- Análise do fluido durante o processo de usinagem;
- Análise, comparativa, dos cavacos produzido.

1.3 JUSTIFICATIVA

O polímero é um dos materiais mais bem difundidos no mundo, estando presente no cotidiano do homem, devido sua praticidade, disponibilidade no mercado e sua ótima aplicabilidade. Dessa forma, surge a necessidade de encontrar parâmetros adequados para fabricação de peças utilizando esse material, afim de obter melhores acabamentos superficiais.

Este trabalho tem o intuito de estudar a influência dos parâmetros de corte na integridade superficial da peça final, além de analisar quão significativo é o uso de fluido de cortes na usinagem de materiais poliméricos, auxiliando as indústrias de fabricação a adquirirem maiores conhecimentos sobre os processos de usinagem desses materiais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO DE USINAGEM

2.1.1 Fresamento

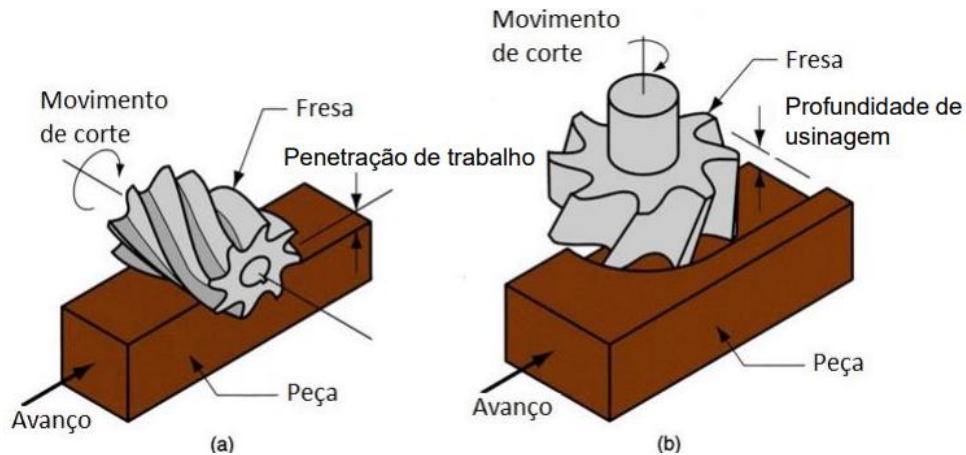
Segundo Souto (2007) o fresamento está entre os mais importantes processos convencionais de usinagem existente. Machado *et al.* (2009) diz que sua importância se dá pela versatilidade na manufatura de peças de geometria diversas, além da alta taxa de remoção de material, ocasionada pelas múltiplas arestas de corte existente na ferramenta (fresa).

Nesse contexto, o fresamento é a operação de usinagem caracterizada por: ter uma ferramenta (fresa) com arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo; ter seu movimento de corte proporcionado pela rotação da fresa ao redor de seu próprio eixo; e, por fim, tem seu movimento de avanço feito pela própria peça, fixada na mesa, obrigando a peça passar na ferramenta em rotação, lhe dando forma e dimensão desejada (DINIZ, 2014).

De acordo com Diniz (2014) e Ferraresi (1977), o fresamento é classificado segundo a posição do eixo-arvore da máquina ferramenta (fresamento horizontal, vertical ou inclinado) e segundo a disposição dos dentes ativos da fresa, classificando a operação em:.

- a) Fresamento tangencial: operação onde os dentes ativos estão presentes na superfície cilíndrica da ferramenta, sendo o eixo da peça paralelo à superfície que está sendo gerada, Figura 1 (a);
- b) Fresamento frontal: operação onde os dentes ativos da fresa estão presentes na superfície frontal da ferramenta, sendo o eixo da fresa perpendicular à superfície da peça gerada, Figura 1 (b).

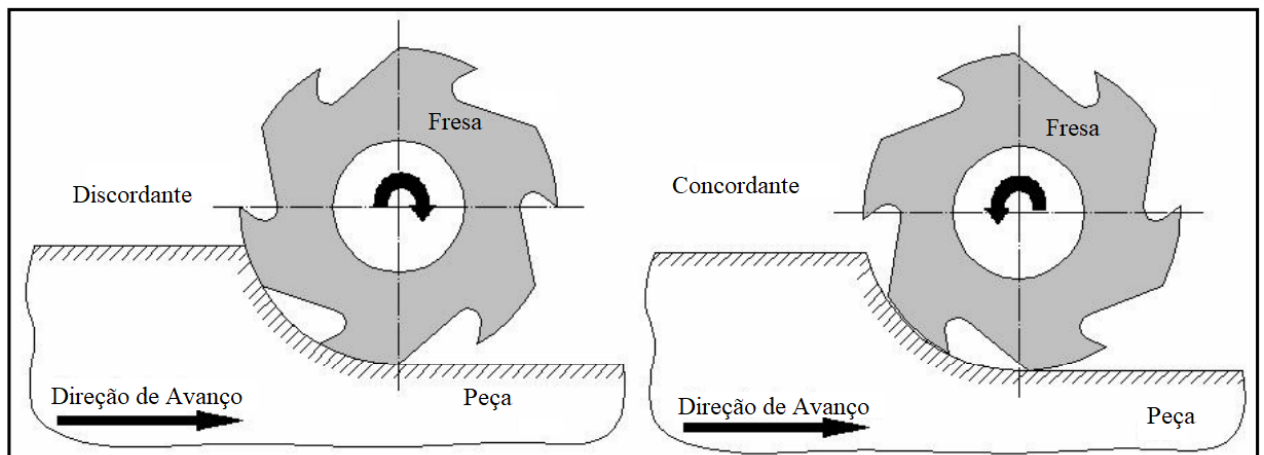
Figura 1. (a) fresamento tangencial; (b) fresamento frontal.



Fonte: Jasinevicius (2020)

Além disso, no fresamento o sentido de rotação da ferramenta e o avanço da peça também possui importância significativa, dividindo a operação em concordante e discordante. No fresamento concordante o avanço e o movimento de corte possuem o mesmo sentido, enquanto no fresamento discordante eles apresentam sentidos contrários, conforme ilustrado na Figura 2 (SOUTO, 2007)

Figura 2. Representação de uma operação de fresamento concordante e de uma de fresamento discordante



Fonte: adaptado de Souto (2007)

2.1.2 Parâmetros de usinagem

Segundo Medeiros (2016), são chamados de parâmetros de usinagem as grandezas numéricas que definem o deslocamento da ferramenta ou da peça,

adequados ao tipo de trabalho a ser usinado, ao material a ser usinado e ao material da ferramenta. Esses parâmetros ajudam a obter uma perfeita usinagem por meio da racionalização dos recursos ofertados pela máquina ferramenta.

Medeiros (2016) ainda diz que os principais parâmetros de corte considerado pelo operador são: velocidade de corte e avanço, devido a sua simplicidade. Os outros parâmetros existentes que possuem uma complexidade um pouco maior são: profundidade de corte, área de corte, pressão específica de corte, força de corte e potência de corte.

Velocidade de corte (v_c): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido do corte (Machado *et al.*, 2009). Nas máquinas-ferramentas em que o movimento de corte é produzido pela rotação da fresa ou da peça, a velocidade de corte é calculada pela equação 1.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \left[\frac{m}{min} \right] \quad (1)$$

em que:

d = diâmetro da fresa ou da peça, em mm;

n = número de rotações por minuto.

Velocidade de avanço (v_f): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de avanço e é dada pela equação 2.

$$v_f = f \cdot n = f_z \cdot Z \cdot n \left[\frac{mm}{min} \right] \quad (2)$$

em que:

f = avanço, em mm/rev;

n = número de rotações por minuto;

f_z = avanço por dente, em mm/dente;

Z = número de dentes da fresa.

Profundidade de corte (a_p): é a quantidade de ferramenta que penetra na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. No fresamento frontal corresponde à profundidade de corte e no fresamento periférico, à largura de corte.

2.2 FORMAÇÃO DE CAVACO

Durante o processo de usinagem, o material retirado da peça é denominado cavaco. Além disso, o tipo de cavaco pode oferecer danos e riscos a ferramenta, a peça e, principalmente ao operador. Sendo assim, é preferível o surgimento de cavacos curtos em formas de lascas, pois seu volume não é tão considerável quando comparado aos cavacos longos em forma de fida (SANTOS; SALES, 2007).

Granado (2006) diz que o mecanismo de formação do cavaco durante os processos de usinagens varia com as condições de corte e propriedades térmicas e mecânicas do material utilizado, devendo ser analisadas previamente, assegurando a precisão e qualidade do produto final.

Enquanto Vanat e Braghini (2014) realizaram estudos da formação do cavaco em poliamidas, no qual concluíram que os cavacos são formados pela influência dos parâmetros de corte aplicados nos processos de usinagem, sendo que em condições de alto valor de avanço, alta velocidade de corte e uma profundidade maior, os cavacos tornam-se mais controláveis, por conta do seu peso ser maior. Além disso, mencionam que quanto maiores as velocidades de corte, mais distante são arremessados os cavacos, evitando que o mesmo se enrole na ferramenta ou nos corpos de prova.

Já Santos e Sales (2007) notaram que o controle do avanço de corte através de programas CNC e a injeção dos fluidos de cortes em alta pressão na superfície de saída da ferramenta proporcionaram resultados satisfatórios para rompimento dos cavacos de fita.

2.3 FLUIDO DE CORTE

A utilização de fluidos de cortes na usinagem teve seu início em 1890, com F.W. Taylor, que inicialmente utilizou água para resfriar a ferramenta, depois uma solução de soda e água, ou água e sabão para evitar a oxidação da ferramenta e da

peça. As desvantagens existentes na utilização da água como fluido de corte é que ocorre promoção da oxidação de metais e possui baixo poder de lubrificação, ao contrário dos óleos, podendo assim diminuir o calor ocasionado pelo atrito entre ferramenta-peça e ferramenta-cavaco (Diniz, 2014).

Segundo Diniz (2014), para a escolha do fluido de corte ideal, o operador deve respeitar os seguintes fatores, principais: material da peça, a condição de usinagem, o material da ferramenta, e a operação da usinagem.

De acordo com Machado *et al.* (2009) e Diniz (2014), os fluidos de cortes têm como principais funções:

- a) Lubrificação a baixas velocidade, prevenindo a soldagem do cavaco na ferramenta;
- b) Refrigeração em altas velocidades;
- c) Redução da dilatação térmica da peça, com a intenção de facilitar a obtenção de tolerâncias complexas;
- d) Remoção de cavacos da zona de corte, e
- e) Proteção estrutural da máquina e da peça da oxidação, sendo as duas primeiras consideradas as mais importantes.

Atuando como lubrificante, além de favorecer a transferência de calor da região de corte, diminuindo a temperatura da ferramenta e da peça, o fluido de corte atua também reduzindo o atrito e a área de contato ferramenta/cavaco. Sua eficiência depende do poder de penetração na interface ferramenta/cavaco no curto intervalo de tempo disponível e de formar um filme com resistência ao cisalhamento menor que a resistência do material da peça (MACHADO *et al.*, 2009).

Segundo Diniz (2014), para possuir um poder de retirada de calor eficiente o fluido de corte deve ter os seguintes requisitos: baixa viscosidade a fim de que flua com facilidade; boa molhabilidade para estabelecer contato térmico significativo; e alto calor específico e condutividade térmica.

2.3.1 Classificação dos fluidos de corte

Conforme Machado *et al.* (2009), os fluidos de cortes são classificados em:

- a) Fluidos de corte gasosos: o mais comum é o ar comprimido, utilizado apenas para a remoção de cavacos, uma vez que, em temperatura

ambiente, o ar não apresenta capacidade de lubrificação e refrigeração significativa. Gases resfriados a temperaturas negativas apresentam aumentos substanciais na vida da ferramenta, entretanto, ainda não apresentam viabilidade econômica;

- b) Fluidos de corte sólidos: são aplicados diretamente na superfície de saída da ferramenta com o objetivo de diminuir o atrito entre ferramenta e cavaco. Devido necessidade de interrupção da operação para a reaplicação, seu uso é restrito.
- c) Fluidos líquidos: Os mais empregados nas operações de usinagem e são agrupados em três categorias seguintes: óleos, emulsões e soluções.

2.3.1.1 Óleos

Os primeiros óleos utilizados de forma integral na usinagem como lubrificante foram os óleos vegetais e animal, entretanto, seu uso se tornou inviável devido ao custo elevado e sua rápida deterioração (MACHADO *et al.* 2009).

Os óleos são divididos em óleos minerais, graxos, compostos e de extrema pressão (DINIZ, 2014). Os óleos minerais são hidrocarbonetos provenientes do refino do petróleo, fazendo com que suas propriedades dependam do comprimento da cadeia, do comprimento molecular e grau de refino, sendo este um dos óleos mais utilizados em usinagem por terem baixo custo e serem sujeitos a oxidação menor (MACHADO *et al.*, 2009).

Os óleos graxos são os óleos vegetal e animal, sendo estes os primeiros óleos utilizados de forma integral na usinagem como lubrificante, entretanto, seu uso se tornou inviável devido ao custo elevado e sua rápida deterioração (MACHADO *et al.*, 2009). Possuem boa capacidade lubrificantes, refrigeração mediana, facilitando a obtenção de peças com bons acabamentos, mas suas propriedades anti-soldantes deixam a desejar (DINIZ, 2014).

Diniz (2014) especifica que os óleos compostos são a mistura de óleos graxos e minerais, com isso as propriedades são bem satisfatórias, pois possuem as vantagens dos óleos graxos, tem maior estabilidade química e sua viscosidade é ajustada pelo óleo mineral.

Já os óleos de extrema pressão são os óleos que tem incorporado em sua composição elementos que suportam altas pressões, sem que evaporem. Este óleo é muito em operações com altas velocidades e que possuam elevadas forças de corte (DINIZ, 2014).

2.3.1.2 Emulsões

Machado *et al.* (2009) diz que os fluidos emulsionáveis são compostos bifásicos de óleos minerais adicionados à água em pequenas proporções e somados aos agentes emulsificantes para garantir a uniformidade da mistura. Esses emulsificantes diminuem a tensão superficial, por serem tensoativos polares, por meio da formação de uma película monomecular relativamente estável na interface óleo/água.

Portanto, não é uma solução de óleo em água, pois essas duas substâncias não se misturam, mas sim água com partículas de óleo dispersas em seu interior, fazendo com que a nomeação de óleo solúvel, normalmente dado a esse produto, seja incorreto (DINIZ, 2014).

2.3.1.3 Soluções

As soluções, também chamadas de “fluidos sintéticos”, são compostos monofásicos de óleos que se dissolvem plenamente na água, nesse caso, não há a adição de emulsificantes, pois os compostos reagem quimicamente, formando uma única fase (MACHADO *et al.*, 2009).

Os fluidos sintéticos mais comuns são bons refrigerantes e possuem proteção anticorrosivo, já os mais complexos são de uso geral, com boas propriedades lubrificante e refrigerantes (MACHADO *et al.*, 2009).

2.4 POLIMEROS

A palavra polímeros vem do grego *poli*, que significa “muitas”, e *meros*, que significa “partes”, ou seja, são macromoléculas formadas pela repetição de moléculas pequenas, denominada de monômeros (PRAZERES, 2020).

Os polímeros podem ser classificados em dois tipos, naturais e sintéticos. Os naturais são derivados de plantas e animais, ou seja, são sintetizados por organismos vivos, como exemplo a madeira, borracha, algodão, lã, couro, etc. (PRAZERES, 2020). Já os polímeros sintéticos surgiram com o avanço das tecnologias, pois só assim foi possível a síntese artificial, por envolver reações de química orgânica (SANTOS, 2014).

Os polímeros sintéticos, mais presentes no cotidiano, são obtidos através do refino do petróleo ou do gás natural, sendo esta a rota mais barata. Entretanto, existe a possibilidade de obtenção através de outras matérias primas ricas em carbono, principal átomo que constitui os materiais poliméricos, por exemplo a madeira, álcool, carvão, etc. Contudo, essas possibilidades ainda possuem um custo elevado (SANTOS, 2014).

Além disso, existe uma variedade muito grande na classificação dos polímeros, como através de sua formação, de acordo como Fogaça (2020) e Prazeres (2020), há três grupos: polímeros de adição, polímeros de condensação e polímeros de rearranjo.

- a) Polímeros de adição: formados pela combinação de monômeros sem que ocorra eliminação de átomos ou pequenas moléculas. Nessa categoria encontra-se o polietileno, PVC, teflon, poliestireno, etc.;
- b) Polímeros de condensação: formados pela combinação de monômeros ocorrendo a eliminação de átomos ou pequenas moléculas. Nesse grupo estão presentes o kevlar, poliéster (PET, dácron), nylon, poliamida, etc.;
- c) Polímeros de rearranjo: semelhante a formação dos polímeros de condensação, mas diferem na reação, nesse caso sendo rearranjos caracterizados pela mudança da posição dos átomos na mesma molécula. Nesse grupo encontra-se o poliuretano.

Segundo Santos (2014), a classificação de acordo com a indústria de transformação é através dos três seguintes grupos: termoplásticos, termofixos e elastômeros.

Os termoplásticos são compostos por moléculas de cadeias longas individuais, sem apresentar ligações cruzadas entre elas (SANTOS, 2014). Além

disso, quando aquecidos sofrem fusão, devido ao fato das cadeias deslizarem uma sobre a outra por conta da individualidade das cadeias (PRAZERES, 2020).

Os termofixos, também conhecidos como termoestáveis ou termorrígidos, possuem cadeias ligadas covalentemente (ligações cruzadas) na forma de uma rede tridimensional infinita, que ao polímero sofrer aquecimento, essas redes impedem o amolecimento e a fundição. Entretanto, o aquecimento excessivo faz com que o ele se decomponha (SANTOS, 2014).

Os elastômeros, conhecidos como borracha, apresentam cadeias ligadas por uma rede tridimensional, assim como os termorrígidos, porém, são mais fracas, isto é, possuem menor densidade de ligações cruzadas, deixando as cadeias mais livres, permitindo a extensão quando submetidas a forças de tração e retornem a sua dimensão inicial quando as forças são extintas. Dessa forma, as ligações cruzadas fornecem uma “memória” do material (SANTOS, 2014).

Por outro lado, os polímeros estão cada vez mais presentes no cotidiano do ser humano, sendo os principais polímeros utilizados o polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e o policloreto de vinila (PVC), sendo empregados nos mais diversos setores das indústrias (ABC DOS POLIMEROS, 2010).

Um exemplo disso é a indústria automobilística, quem vem aderindo cada vez mais o uso desses materiais, com isso, Herais (2003) cita alguns dos polímeros mais utilizados, sendo os principais o Polietileno de alta densidade (HDPE); Polietileno (PP) e suas composições; Poli (óxido de metileno) (POM) e seus copolímeros; Politetrafluoroetileno (PTFE) e suas composições; Poli (teleftalato de butileno) (PBT); Poli (teleftalato de butileno) de alto impacto (PBT-HI); Polímeros de Líquidocristalinos (LCP); Poli (sulfeto de fenileno) (PPS); Policarbonato (PC); dentre outros.

2.4.1 Propriedades mecânica dos polímeros

Há diversas diferenciações na caracterização das propriedades mecânicas dos polímeros, sendo as três principais: rigidez, tenacidade e resistência (SANTOS, 2014).

- a) Rigidez: associada a mobilidade das cadeias poliméricas no estado sólido, sendo os mesmos fatores que influenciam na dilatação térmica.

Com isso, a temperatura passa a ser o fator com maior significância na rigidez;

- b) Tenacidade: propriedade associada a quantidade de energia necessária para produzir uma fratura no material submetido a um esforço externo. Nesse contexto, diz-se que um polímero tenaz é quando o mesmo suportar altas cargas e apresentar grande capacidade de se alongar;
- c) Resistência: conceito mais complexo que a rigidez, pois pode ser medido a longo e curto prazo, a esforços estáticos ou dinâmicos e ao impacto. Seus aumentos se dão na maioria das vezes por conta de suas ligações, aumentando em cada caso específico.

2.4.2 Usinabilidade dos polímeros

Ao usinar polímeros, alguns pontos devem ser levados em questão, como a expansão térmica, que é dez vezes maior quando comparadas aos metais, a dificuldade da perda de calor por conta do seu baixo calor específico, a baixa temperatura de amolecimento e fusão quando comparados aos metais e o fato dos polímeros serem muito mais elásticos que os metais (MITSUBISHI CHEMICAL ADVANCED MATERIALS, 2020).

Segundo Maciel *et al.* (2010), todos os plásticos de engenharia são facilmente fresados, cortados, furados, retificados e polidos, ou seja, podem passar por todas as operações realizadas nos materiais metálicos, sendo realizadas com menor ou maior grau de dificuldade.

Maciel *et al.* (2010) ainda diz que as ferramentas de usinagem empregadas nos processos de fabricação de produtos plásticos possuem geometrias idênticas às ferramentas na usinagem de materiais não ferrosos, como madeira, pois ainda não existem desenvolvimentos tecnológicos específicos para ferramentas de usinagem de materiais plásticos.

Por outro lado, é crescente o número de estudos e pesquisas sobre os processos de usinagem em polímeros, em busca de melhores conhecimento dos parâmetros de corte, por conta de suas excelentes propriedades de vantagens.

Maciel *et al.* (2010) são exemplos disso, pois em seu trabalho avaliou a usinabilidade de três polímeros diferentes, o POM (Poliacetil Homopolímero), NYLON 6 (Poliamida 6) e PP (Polipropileno Homo e Comopolímero), considerando as velocidades de corte e de avanço e dois tipos de refrigeração, com ar gelado e com fluido emulsionável. Os autores concluíram que as refrigerações não afetaram tanto na rugosidade desses materiais, sendo a velocidade de avanço o parâmetro mais significativo, assim como nos materiais metálicos.

Silva *et al.* (2016), também estudou alguns parâmetros de corte no processo de usinagem de poliacetil, concluindo que, para tal material, a rotação, velocidade de corte e velocidade de avanço são parâmetros que afetam a integridade superficial final da peça produzida. Também perceberam que o aumento da rotação provocava uma diminuição da rugosidade superficial e com o aumento significativo da velocidade de avanço, aumentava a rugosidade superficial.

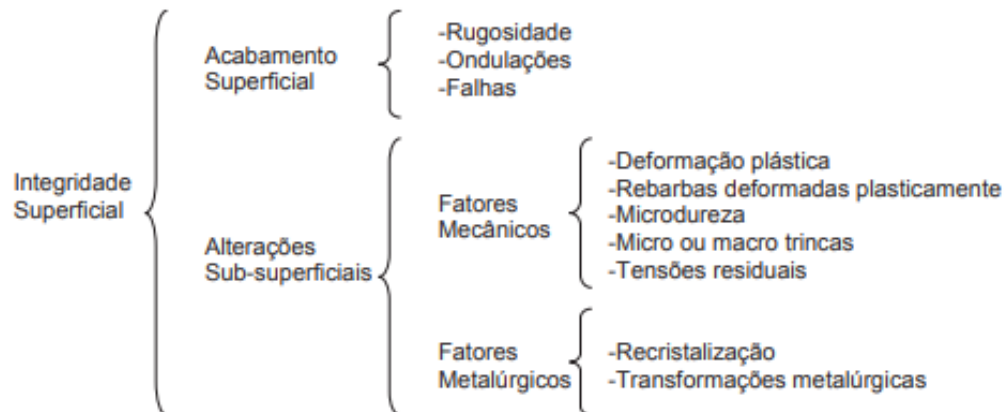
Schneider *et al.* (2008) analisaram a influência do avanço e da velocidade de corte da ferramenta sobre a temperatura e o acabamento de superfícies usinadas dos polímeros termoplásticos poliamida e poliuretano. O trabalho revelou que a deformação viscosa, provocada por temperaturas na zona de corte acima da temperatura de transição vítrea dos polímeros, exerceu um papel decisivo na qualidade do acabamento superficial destes materiais. Além disso, as melhores condições notadas foram para velocidades altas de avanço e baixas velocidades de corte.

2.5 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

O termo integridade superficial é empregado para retratar a qualidade de uma superfície, englobando o grande número de alterações sofridas pela peça após o processo de usinagem. Para atingir a condição final de usinagem, a peça passa por diversos processos que envolvem deformações plásticas, rupturas, recuperação elástica, geração de calor, tensão residual e, em alguns casos, reações químicas. Ou seja, o conceito de integridade superficial não deve ser definido somente em uma dimensão e não abrange somente a textura da superfície ou a sua forma geométrica, mas engloba também outras características da superfície em serviço e de camadas abaixo destas (MACHADO *et al.*, 2009)

O diagrama da Figura 3 ilustra as alterações que podem ocorrer em superfícies usinadas e a classificação destas. São classificadas em alterações na superfície (acabamento superficial) e alterações nas camadas internas da peça (alterações sub-superficiais) e retratam a integridade superficial.

Figura 3. Classificação da Integridade Superficial.



Fonte: Machado *et al.*, 2004.

O acabamento superficial da peça usinada é a associação de vários fatores, que podem ser divididos em rugosidade, ondulações e falhas. Suas exigências de acabamento de uma peça qualquer devem ser previstas em projeto, para que a mesma possa executar as funções desejadas (DEVERAS, 2016). Kalpakjian (2010) relata alguns dos fatores que precisam ser considerados para a determinação do acabamento superficial, sendo:

- a) Grau de acoplamento entre componentes;
- b) Coeficiente de atrito, desgaste e lubrificação;
- c) Resistência à fadiga e à corrosão;
- d) Resistividade elétrica e térmica de contato;
- e) Processamento posterior;
- f) Aparência;
- g) Custo.

As ondulações consistem em irregularidades superficiais ou de erros geométricos cujos espaçamentos são maiores que a irregularidades consideradas rugosidades, sendo causadas por vibrações e flexões da ferramenta/peça, pelas

forças de usinagem, temperatura de corte ou a erros de fixação da peça ou ferramenta (MACHADO *et al.*, 2009).

As falhas são interrupções a topografia típica de uma superfície, não intencionais, inesperadas e indesejáveis. Podem ser causadas por efeitos inerentes, como inclusões, trincas, bolhas ou surgidas durante o processo de corte (MACHADO *et al.*, 2009).

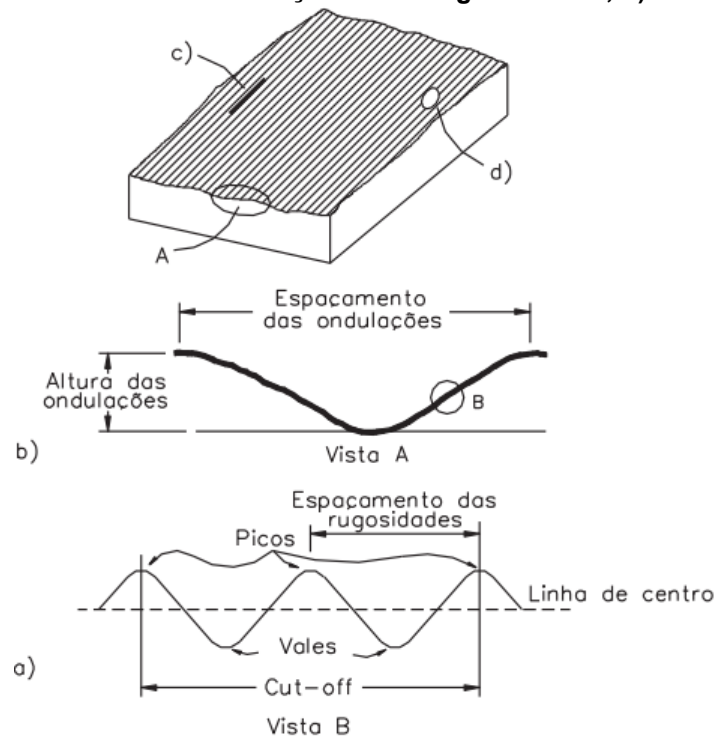
2.5.1 Rugosidade

A rugosidade é o principal fator de especificação para acabamento superficial presente nos projetos, que consiste em um conjunto de irregularidades, com espaçamento regular ou irregular, tendendo formar um padrão ou textura característica na superfície. Tais irregularidades estão presentes em todas superfícies reais, mesmo nas mais perfeitas, e são advindas do método de obtenção da superfície (AMORIM, 2002).

Machado *et al.* (2009) diz que a rugosidade de uma superfície é a composição de irregularidades finas ou de erros microgeométrico resultantes da ação inerente ao processo de corte e decorrentes de vários parâmetros, como máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material ferramenta.

Machado *et al.* (2009) ainda complementa que a rugosidade é um parâmetro especificado de acordo com a aplicação da superfície usinada, ao contrário das ondulações e falhas, que devem ser evitadas no processo de fabricação de uma superfície, por serem erros de fabricação. A Figura 4 ilustra todos os elementos que representam o acabamento superficial.

Figura 4. Elementos do acabamento superficial: a) rugosidade superficial; b) ondulações; c) marcas denotando direções das irregularidades; d) falhas



Fonte: Machado et al., 2004.

Para Amorim (2002), a importância da rugosidade se justifica pela sua relação com outros fatores, como:

- a) Precisão e tolerância: mais importante, principalmente em peças com acoplamentos onde furo e eixo estejam em movimento relativo;
- b) Resistência à corrosão: superfícies com acabamento superficiais mais pobres tendem a reter mais líquido e vapores, tornando-se mais vulneráveis à corrosão;
- c) Resistência à fadiga: superfícies com uma maior rugosidade apresentam maior área efetiva, e geometrias mais propensas a concentração de tensões, que, em peças que trabalham sob cargas dinâmica, oferecem melhores condições para nucleação de trincas de fadiga;
- d) Escoamento de fluidos: quanto melhor o acabamento, melhor a adesão de escoamentos lineares a faixas mais amplas de velocidade, reduzindo as turbulências, além de garantirem uma eficiente vedação, evitando folga do elemento sob pressão;

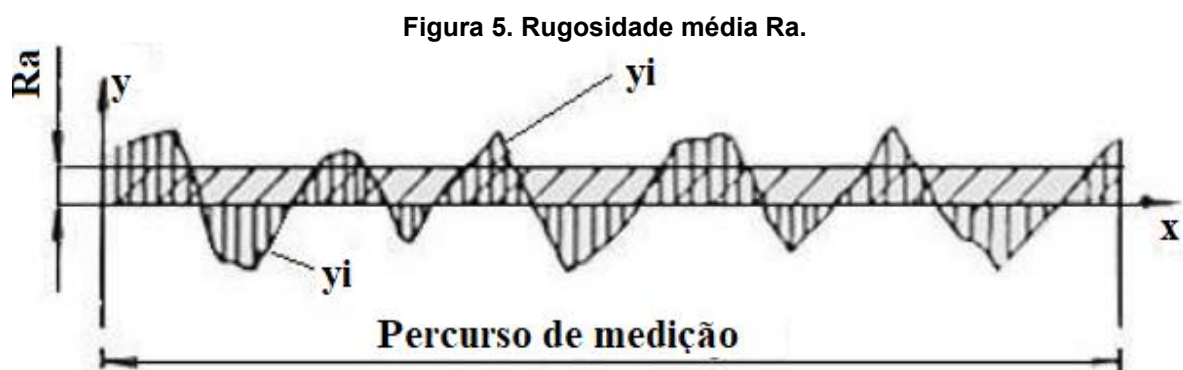
- e) Lubrificação: em casos onde a profundidade da rugosidade entre dois componentes que possua lubrificação seja maior que a espessura do filme de óleo, haverá contato entre as partes, anulando a lubrificação;
- f) Transmissão de calor: quanto menor a rugosidade de um componente, há um aumento na área de contato entre o componente e outra superfície, aumentando o coeficiente de transmissão de calor.

2.5.1.1 Parâmetros de rugosidade

Amorim (2002) relata que os parâmetros de usinagem são procedimentos usados para avaliar o acabamento superficial de um componente, sendo a rugosidade média, R_a , o mais amplamente utilizado. Este parâmetro consiste na média aritmética dos valores absolutos de afastamento, Equação 3, em relação à linha média, apresentado na Figura 5, podendo ser representada como a altura de um retângulo com área igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e linha média, e comprimento igual ao percurso de medição. Seu valor é expresso em μm no sistema métrico ou μin no sistema inglês.

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (3)$$

em que l_m é o percurso de medição.



Fonte: adaptado de Amorim, 2002

De acordo com Machado *et al.* (2009), a rugosidade média é um parâmetro amplamente usado na indústria por conta da simplicidade dos instrumentos

disponíveis, além de ser um parâmetro estável, uma vez que alterações em seus valores representam alterações no processo.

Segundo Amorim (2002), a rugosidade de uma peça manufaturada é afetada por vários fatores, a partir do processo de fabricação ou até a geometria da ferramenta, passando pelos parâmetros de corte.

Diniz (2014) relata que o parâmetro de corte mais importante é o avanço, sendo usado para o cálculo teórico da rugosidade média, juntamente com a o raio da ferramenta, Equação 4. Enquanto a profundidade de corte não apresenta grande influência na rugosidade, exceto para profundidades superiores a 1 mm, onde ocorre um pequeno decréscimo da rugosidade.

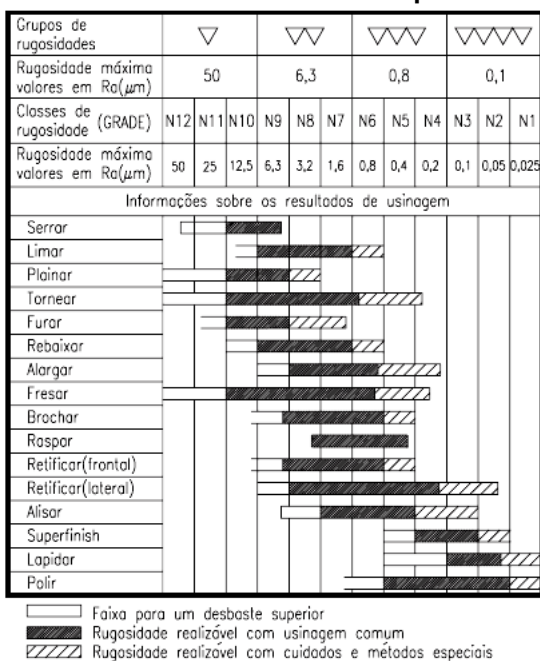
$$R_a = \frac{f^2}{31,2 \cdot r_e} \quad (4)$$

em que f é o avanço, em mm/rot, e r_e é o raio da ferramenta, em mm.

Segundo Ferraresi (1977), velocidade de corte, V_c , tem grande influência na rugosidade média quando estão em baixos valores, devido a aresta postiça de corte. Já em velocidades de corte superiores a 100 m/min a rugosidade torna-se praticamente estável a velocidade de corte.

O processo de fabricação também é um dos parâmetros que mais influenciam na rugosidade de superfície, com isso, a Figura 6 apresenta uma variação da rugosidade para alguns dos processos de fabricação (FERRARESI, 1977).

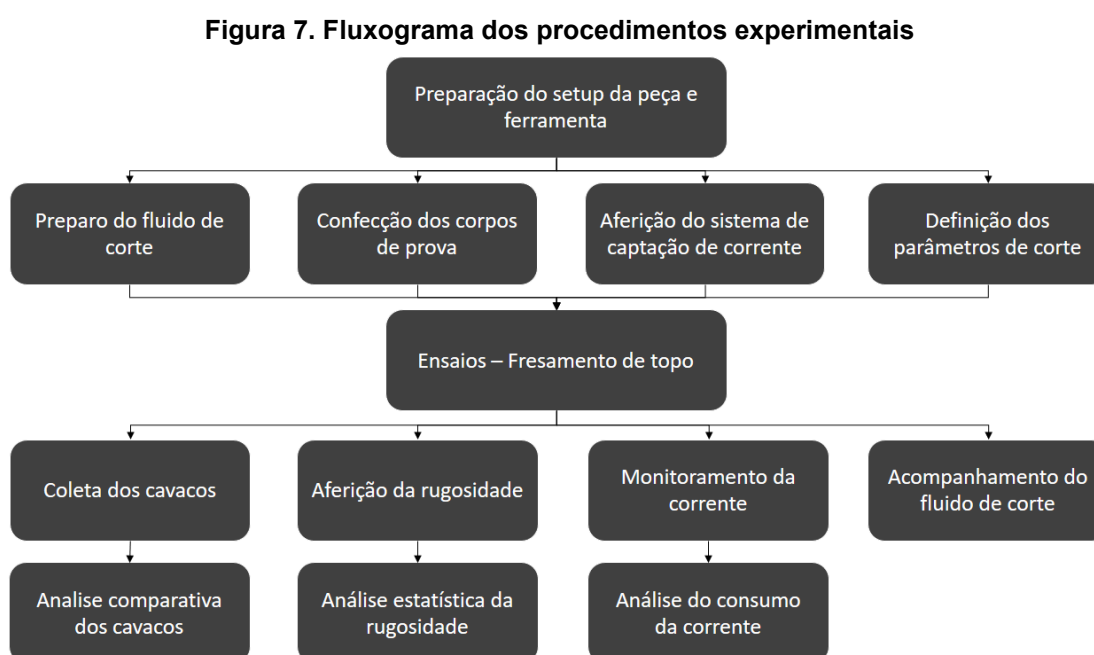
Figura 6. Rugosidade média de acordo com o processo de fabricação.



Fonte: Telecurso, 2000.

3 METODOLOGIA

Este trabalho propõe estudar a influência do fluido de corte na usinagem, por fresamento, de polímeros. Com o intuito de melhor compreensão da metodologia utilizada, a Figura 7 apresenta um fluxograma com todas as etapas seguidas no decorrer do trabalho.



Fonte: Autoria própria.

3.1 MATERIAS EXPERIMENTAIS

3.1.1 Máquina-Ferramenta

Os ensaios foram realizados na fresa CNC Router spindle TVS.1ZM3.12, Figura 8. A máquina possui as seguintes especificações: rotação máxima de 18000 rpm e potência nominal de 1 cv.

Figura 8. CNC Router spindle TVS.1ZM3.12.

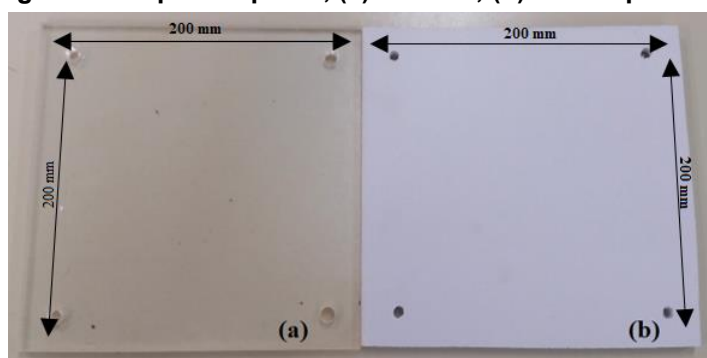


Fonte: Aatoria própria

3.1.2 Corpos de Prova

Os materiais utilizados como corpos de prova foram quatro placas de acrílico e quatro placas de PVC expandido, todas com dimensão de 200 mm x 200 mm x 10 mm, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9. Corpos de prova, (a) Acrílico; (b) PVC expandido.



Fonte: Aatoria própria.

3.1.3 Ferramenta de corte

As 4 ferramentas de corte utilizadas nos ensaios foram as fresas topo reto de aço rápido com duas facas de corte, com 6 mm de diâmetro do fabricante *Rocast*[®], conforme ilustra a Figura 10.

Figura 10. Fresa topo Aço Rápido de 2 corte (HSS) utilizada.



Fonte: encurtador.com.br/glnEN

3.1.4 Fixação do corpo de prova

Visualizando a Figura 9 nota-se a existência de furos em suas extremidades, de 10 mm de diâmetro, que foram realizados visando a fixação do corpo de prova na mesa. A Figura 11 ilustra a fixação dos corpos de prova e da ferramenta.

Figura 11. Fixação do corpo de prova e posicionamento da ferramenta



Fonte: Autoria própria.

3.1.5 Programação CNC

Para a programação CNC do processo foi utilizado a linguagem G, sendo realizado apenas um passe de usinagem de 185 mm de comprimento. O processo de zeramento inicial foi realizado no centro da peça de forma manual, aferindo comprimento e largura, sendo o centro a metade dessas medidas.

Ao final de cada teste, era retirada a peça para aferição da rugosidade, sendo necessário novos zeramentos, para isso fez-se um programa que zerava automaticamente a fresa, sendo possível utilizar apenas após o zeramento inicial, realizado no momento que o computador da fresa era ligado.

3.1.6 Fluido de corte

O fluido de corte utilizado é o MV AQUA 180, um fluido sintético refrigerante, com base aquosa translúcida, não tóxico, biodegradável e composto de matérias primas orgânicas que evitam resíduos sólidos em superfícies tratadas (VCI Brasil, 2020). Segundo o fabricante, a recomendação de uso do MVAqua180 em geral vai de 10 a 15% (concentração real, m/V), tendo um índice de refração é 2,5.

3.1.7 Rugosímetro

O rugosímetro utilizado para a aferição da rugosidade média dos polímeros após a usinagem foi o modelo RP-200, da Instrutherm, Figura 12. O modelo apresenta uma escala de medição de 160 μm , com precisão menor que 10%.

Figura 12. Rugosímetro de superfície digital Instrutherm modelo RP-200.



Fonte. Autoria própria

3.1.8 Refratômetro

O refratômetro utilizado para aferição da concentração do fluido foi o refratômetro analógico da Vixshopping, modelo Vodex VX090, Figura 13, que possui escala de 0 a 90% Brix.

Figura 13. Refratômetro analógico Vodex VX090.

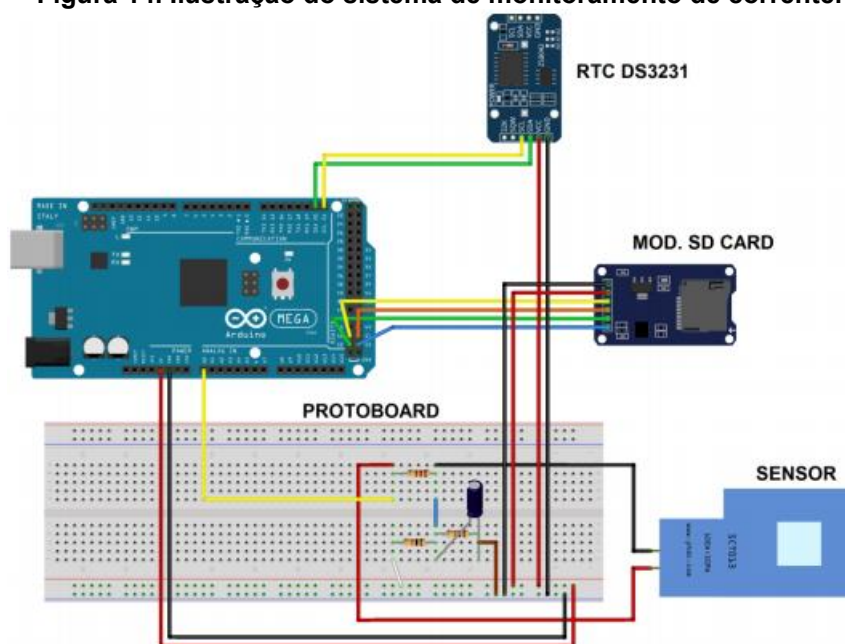


Fonte: Autoria própria.

3.1.9 Sistema de monitoramento de corrente

O sistema de aquisição dos valores de corrente foi elaborada em conjunto de Gimenez (2020), a partir de uma placa de arduino e um sensor de corrente não intrusivo (sensor SCT-013-000). Os dados eram armazenados em no modulo SD Card. A Figura 14 apresenta, de forma esquemática, o sistema de aquisição de dados.

Figura 14. Ilustração do sistema de monitoramento de corrente.



Fonte: Gimenez, (2020).

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.2.1 Pré-testes

No período de pré-testes foram realizadas a escolha dos parâmetros de usinagem dos ensaios, a elaboração dos fluidos de cortes, aferição do sistema de monitoramento de corrente e a ordenação dos experimentos.

Os parâmetros de cortes foram definidos visando o estresse da fresa, afim de apresentar uma variação maior de corrente, de forma a ser detecta pelo sistema de aquisição de corrente.

A calibração do sistema consumo de corrente foi realizado confrontando os dados mensurados pelo sistema elaborado com um alicate amperímetro.

Para cada combinação de parâmetros (fluido, material, velocidade de corte e velocidade de avanço) foi realizado três réplicas, gerando um total de 96 ensaios.

A ordem de efetuação dos ensaios ocorreu de forma aleatorizada em blocos, sendo cada bloco a contendo as oitos combinações possíveis, onde os três primeiros blocos (B1, B2 e B3) representam os ensaios sem fluidos, seguidos dos três blocos com baixa concentração do fluido (B4, B5 e B6), em subsequência, os três blocos com

concentração ideal (B7, B8 e B9) e, por fim, os três blocos de alta concentração do fluido (B10, B11 e B12). A Tabela 1 ilustra a ordenação dos ensaios.

Tabela 1. Sequência de repetições por bloco

Blocos	Usinagem	Sequência
B1	Seco	1º repetição
B2	Seco	2º repetição
B3	Seco	3º repetição
B4	Fluido com baixa concentração	4º repetição
B5	Fluido com baixa concentração	5º repetição
B6	Fluido com baixa concentração	6º repetição
B7	Fluido com concentração ideal	7º repetição
B8	Fluido com concentração ideal	8º repetição
B9	Fluido com concentração ideal	9º repetição
B10	Fluido com alta concentração	10º repetição
B11	Fluido com alta concentração	11º repetição
B12	Fluido com alta concentração	12º repetição

Fonte: Autoria própria

Os fluidos foram preparados de acordo com a realização dos ensaios, sendo acrescido o fluido de corte puro na mistura realizada dentro do reservatório da fresa. Para encontrar a concentração da mistura, usou-se o refratômetro, obtendo o valor em graus brix, multiplicando o valor obtido pelo fator do índice de refração informado pelo fabricante.

3.2.2 Ensaio de usinabilidade

Os ensaios consistiram em um passe de usinagem de fresamento CNC em dois polímeros diferentes, PVC expandido e acrílico, aplicando três concentrações diferentes do fluido de corte MV Aqua 180, conforme apresenta a Tabela 1.

Os parâmetros de corte adotados como variáveis de entrada foram a velocidade de corte, V_f , e a velocidade de avanço, V_f , enquanto a profundidade de corte, a_p , foi mantida constante em 0,5 mm em todos os ensaios.

Os valores de rugosidade média eram coletados no sentido do avanço da ferramenta, por meio do rugosímetro mencionado na seção anterior, sendo necessário a retirada do corpo de prova da mesa para a aferição. No entanto, antes da retirada, era coletado os cavacos obtidos no processo.

Para análise do fluido de corte, foram coletadas amostras, para que, posteriormente, fosse estudado o comportamento de seus pH e condutividade. Já para a análise do cavaco, ao final de cada ensaio, os mesmos era coletados e armazenados para o posterior estudo.

A Tabela 2 apresenta os fatores de controle (ou variáveis de entrada) e as suas respectivas condições (níveis).

Tabela 2. Fatores de controles e níveis adotados.

Fatores de controle	Níveis	Especificações			
Velocidade de corte [m/min]	2	150		250	
Velocidade de avanço [mm/min]	2	200		300	
Material do corpo de prova	2	Acrílico		PVC expandido	
Bloco (Concentração do Fluido)	4	Sem fluido	5%	12%	27,50%

Fonte: Autoria própria.

3.2.3 Análise dos dados

Após a obtenção dos dados experimentais, foi realizado a análise estatística dos dados, que seguiu da seguinte forma: análise de variância (ANOVA), e, caso os efeitos dessem significativos, seria aplicado um teste de Tukey. Com o intuito de auxílio nas análises estatísticas, o *software Minitab*[®] foi utilizado.

Para testar o efeito do bloco e das interações, foram adotadas as seguintes hipóteses:

- H_0 : Não há efeito da concentração do fluido *versus* H_1 : Há efeito de concentração do fluido.
- H_0 : Não há efeito de interação tripla *versus* H_1 : Há efeito de interação tripla.
- H_0 : Não há efeito de interação dupla *versus* H_1 : Há efeito de interação dupla.

Caso a hipótese nula fosse rejeitada em ambos casos, as seguintes hipóteses foram testadas:

- H_0 : Não há efeito de velocidade de corte *versus* H_1 : Há efeito de velocidade de corte.
- H_0 : Não há efeito de velocidade de avanço *versus* H_1 : Há efeito de velocidade de avanço.
- H_0 : Não há efeito de material *versus* H_1 : Há efeito de material.

Para os testes de efeito das causas de variação do experimento, foi utilizada a análise de variância (ANOVA). O critério de rejeição do teste é definido com: rejeitar H_0 se o nível descritivo (p -valor) for menor do que o nível de significância (α). A Tabela 3 apresenta a estrutura da tabela da ANOVA.

Tabela 3. Modelo da Análise de variância.

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma quadrática	Média quadrática	F ₀
Blocos	$a - 1$	SQ_{blocos}	QM_{blocos}	$QM_{\text{blocos}}/QM_{\text{resíduo}}$
v_c	$b - 1$	SQ_{v_c}	QM_{v_c}	$QM_{v_c}/QM_{\text{resíduo}}$
v_f	$c - 1$	SQ_{v_f}	QM_{v_f}	$QM_{v_f}/QM_{\text{resíduo}}$
Material	$d - 1$	SQ_{material}	QM_{material}	$QM_{\text{material}}/QM_{\text{resíduo}}$
$v_c * v_f$	$(b - 1)(c - 1)$	$SQ_{v_c * v_f}$	$QM_{v_c * v_f}$	$QM_{v_c * v_f}/QM_{\text{resíduo}}$
$v_c * \text{Material}$	$(b - 1)(d - 1)$	$SQ_{v_c * \text{material}}$	$QM_{v_c * \text{material}}$	$QM_{v_c * \text{material}}/QM_{\text{resíduo}}$
$v_f * \text{Material}$	$(b - 1)(d - 1)$	$SQ_{v_f * \text{material}}$	$QM_{v_f * \text{material}}$	$QM_{v_f * \text{material}}/QM_{\text{resíduo}}$
$v_c * v_f * \text{Material}$	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	$SQ_{v_c * v_f * \text{material}}$	$QM_{v_c * v_f * \text{material}}$	$QM_{v_c * v_f * \text{material}}/QM_{\text{resíduo}}$
Resíduo	$abcd(r - 1)$	$SQ_{\text{resíduo}}$	$QM_{\text{resíduo}}$	
Total	$abcdr - 1$	SQT		

Fonte: Autoria própria.

Nos casos em que os efeitos da causa de variação foram significativos, um teste de Tukey foi realizado para testar as seguintes hipóteses:

- H_0 : Não há diferença entre as médias.
- H_1 : Há pelo menos um par de médias diferentes entre si

Para todas as etapas, foi realizado uma análise de resíduos, afim de comprovar os resultados obtidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A rugosidade média foi medida em três pontos, início, meio e final da usinagem, e esses dados se encontram nas matrizes de rugosidade, Tabelas 4, 5 e 6. Com isso, fez-se a análise estatística para as três regiões de aferição, respeitando o delineamento experimental, que consistiu na aleatoriedade dos ensaios em blocos. A Figura 15 apresenta os passes de usinagem realizado e a rugosidade de um deles.

Tabela 4. Matriz de dados da rugosidade média no ponto inicial de usinagem.

		$\frac{V_c}{V_f}$	Sem Fluido		Fluido com concentração de 5%		Fluido com concentração de 12,50%		Fluido com concentração de 27,50%	
			150	250	150	250	150	250	150	250
1º RP	Acrílico	200	1,654	2,469	0,719	0,715	0,444	2,826	0,424	1,896
		300	2,209	2,206	0,474	1,745	0,527	3,471	0,444	3,051
	PVC	200	4,994	3,941	6,374	4,209	5,360	4,469	4,145	2,848
		300	5,099	4,412	6,031	3,525	3,830	3,378	2,641	2,816
2º RP	Acrílico	200	3,100	3,755	0,662	2,246	0,774	2,974	0,544	4,038
		300	2,141	3,136	1,027	2,757	0,974	3,454	0,913	1,595
	PVC	200	3,847	4,719	5,891	4,553	6,416	3,337	3,815	2,920
		300	4,143	4,435	6,508	3,925	5,557	3,883	3,871	3,312
3º RP	Acrílico	200	4,600	4,709	1,379	3,974	0,949	2,717	0,668	3,010
		300	3,321	5,135	0,675	3,684	0,794	1,937	1,257	3,863
	PVC	200	4,556	4,626	7,640	6,322	5,974	3,382	4,687	4,191
		300	4,714	5,136	7,524	5,814	6,314	4,756	5,186	4,037

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5. Matriz de dados da rugosidade média no ponto médio de usinagem.

		$\frac{V_c}{V_f}$	Sem Fluido		Fluido com concentração de 5%		Fluido com concentração de 12,50%		Fluido com concentração de 27,50%	
			150	250	150	250	150	250	150	250
1º RP	Acrílico	200	1,556	2,413	0,977	0,417	0,767	1,538	0,365	2,054
		300	2,326	2,269	0,487	1,263	0,686	1,854	0,576	3,171
	PVC	200	4,445	4,418	6,631	3,392	6,355	3,212	3,607	3,276
		300	5,465	4,635	7,778	3,603	6,190	4,359	4,630	3,071
2º RP	Acrílico	200	2,713	4,032	0,618	3,020	0,567	3,666	0,946	3,650
		300	1,848	2,933	1,011	3,550	0,908	3,089	1,065	3,035
	PVC	200	4,209	5,932	7,480	3,501	5,604	2,918	4,717	3,535
		300	4,163	5,103	8,239	3,271	6,311	3,691	4,836	4,206
3º RP	Acrílico	200	4,508	4,342	0,736	2,708	0,711	3,314	0,822	3,926
		300	3,661	4,314	0,618	3,211	1,248	1,733	1,447	4,503
	PVC	200	4,736	5,578	6,570	5,960	7,038	4,938	5,655	4,561
		300	5,448	5,355	5,441	4,649	7,121	4,529	4,836	5,386

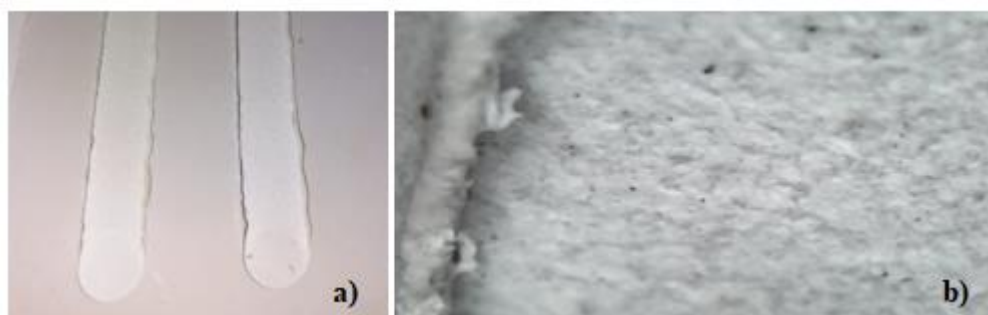
Fonte: Autoria própria.

Tabela 6. Matriz de dados da rugosidade média no ponto final de usinagem

		Vf Vc	Sem Fluido		Fluido com concentração de 5%		Fluido com concentração de 12,50%		Fluido com concentração de 27,50%	
			150	250	150	250	150	250	150	250
1º RP	Acrílico	200	1,681	2,251	0,995	0,445	0,483	1,524	0,568	1,825
		300	2,126	2,360	0,654	1,799	0,639	2,302	0,600	2,466
	PVC	200	3,588	4,219	5,199	3,386	5,923	2,746	4,236	4,221
		300	3,791	3,785	7,246	3,438	4,641	3,642	5,460	2,821
2º RP	Acrílico	200	3,939	4,077	0,350	3,979	0,628	3,063	0,566	3,952
		300	1,623	3,393	0,739	2,741	0,907	3,830	1,028	2,806
	PVC	200	3,127	4,132	6,284	3,979	5,822	2,460	5,473	4,853
		300	4,311	5,241	6,652	4,898	4,774	5,498	5,157	4,838
3º RP	Acrílico	200	3,908	4,287	0,715	3,250	0,617	2,058	0,670	3,947
		300	3,196	5,436	0,599	3,677	0,810	1,996	0,827	4,125
	PVC	200	4,079	6,101	7,157	6,032	7,978	5,937	4,456	3,851
		300	5,436	5,769	5,406	3,293	6,189	6,030	5,516	3,701

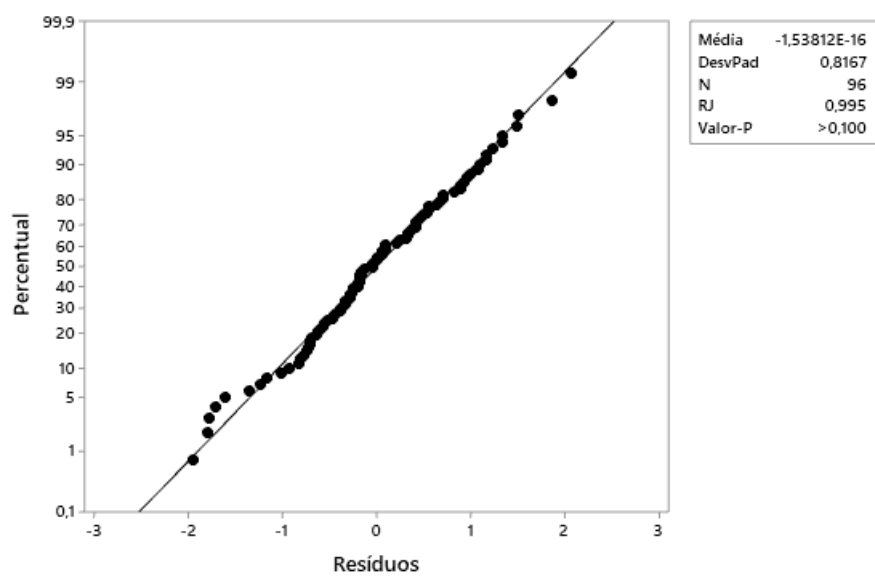
Fonte: Autoria própria.

Figura 15. a) dois ensaios em PVC expandido; b) ilustração da rugosidade.

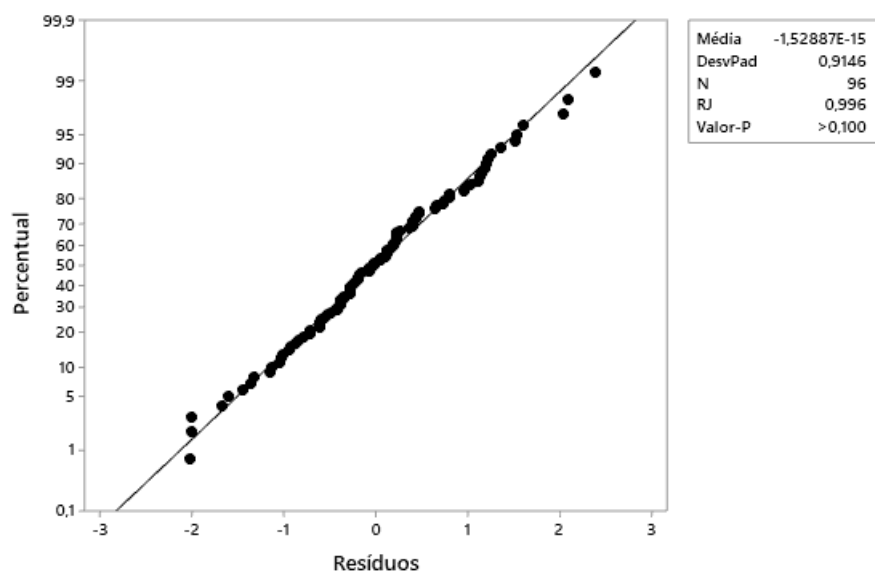


Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, fez-se a análise dos pressupostos de independência e normalidade, para conferir se é possível a aplicação da análise de variância (ANOVA). Como os ensaios foram realizados aleatoriamente em cada bloco, o requisito de independência é atingido, enquanto para a normalidade é necessário realizar o teste de Shapiro-Wilk, para testar a hipótese nula de que os dados seguem uma distribuição normal. As Figuras 16, 17 e 18 ilustram o gráfico QQplot juntamente com o teste de Shapiro-Wilk nos três pontos de medição da rugosidade média. Por meio das figuras, observa-se que a hipótese nula não é rejeitada, uma vez que o p -valor é maior do que 0,100. Logo, tem-se evidências de que os resíduos seguem uma distribuição nos três casos.

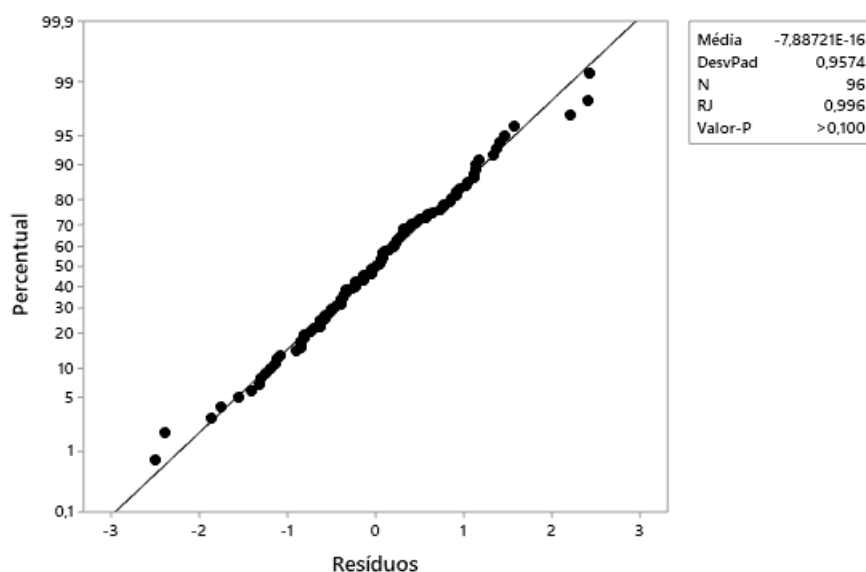
Figura 16. Normalidade $R_{a_{\text{Inicio}}}$.

Fonte: Autoria própria.

Figura 17. Normalidade $R_{a_{\text{meio}}}$.

Fonte: Autoria própria.

Figura 18. Normalidade R_{afim} .



Fonte: Autoria própria.

Portanto, com os pressupostos atendidos, parte-se para a análise de variância dos dados de rugosidade média nos três pontos de coleta.

4.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA

O critério de rejeição para testar o efeito da interação indica que os p -valores das tabelas da ANOVA devem ser menores que o nível de significância (5%).

4.1.1 Análise de variância da rugosidade no ponto inicial da usinagem

A Tabela 7 apresenta a análise de variâncias dos dados em questão, onde nota-se que não houve efeito de interação tripla e das interações entre v_c e v e as interações entre v_f e material (p -valor > 0,05). Seguindo com a análise nota-se o efeito de interação dupla entre o material e a velocidade de corte nos dados da rugosidade média. Prosseguindo com a análise, percebe-se que houve efeito individual nos dados de rugosidade média do bloco (fluidos), porém, não houve efeito de v sobre a rugosidade média.

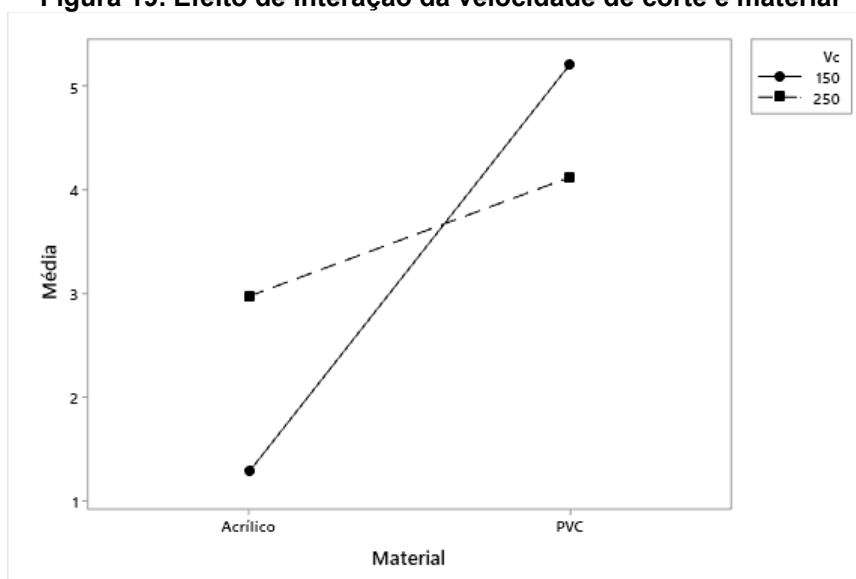
v_f

Tabela 7. Análise de variância dos dados de rugosidade no ponto inicial da usinagem

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma quadrática	Soma quadrática	F0	p-valor
Blocos	11,000	41,412	3,765	4,580	0,000
v_c	1,000	2,196	2,196	2,670	0,106
v_f	1,000	0,083	0,083	0,100	0,751
Material	1,000	155,110	155,110	188,500	0,000
$v_c * v_f$	1,000	0,172	0,172	0,210	0,649
$v_c * \text{Material}$	1,000	46,567	46,567	56,590	0,000
$v_f * \text{Material}$	1,000	0,038	0,038	0,050	0,830
$v_c * v_f * \text{Material}$	1,000	0,001	0,001	0,000	0,971
Resíduo	77,000	63,360	0,823		
Total	95,000	308,938			

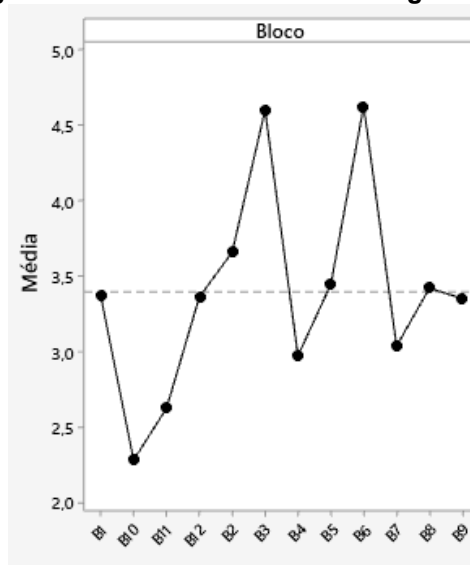
Fonte: Autoria própria.

A Figuras 19 apresenta o efeito de interação entre a velocidade de corte na rugosidade média no ponto inicial da usinagem. Já a Figura 20 ilustra o efeito individual do bloco (fluido).

Figura 19. Efeito de interação da velocidade de corte e material

Fonte: Autoria própria.

Figura 20. Efeitos individuais na rugosidade



Fonte: Autoria própria.

Encontrando os fatores que afetam nos dados de rugosidade parte-se para a realização dos respectivos testes de Tukey: entre a interação dupla e efeito do bloco.

4.1.1.1 Teste de Tukey – Interação dupla entre velocidade de corte e material

A Tabela 8 nos mostra que em PVC a velocidade mais baixa apresentou maior efeito na rugosidade média, já em acrílico, em velocidades maiores, a rugosidade média aumentou.

Tabela 8. Teste de Tukey (Velocidade de corte x material)

Material	Velocidade de corte	Média da rugosidade	Agrupamento
PVC	150	5,21321	A
PVC	250	4,12275	B
Acrílico	250	2,97346	C
Acrílico	150	1,27804	D

Fonte: Autoria própria.

4.1.1.2 Teste de Tukey – Efeito do bloco na rugosidade média

A Tabela 9 nos mostra na ausência de fluido (B2 e B3) e com fluido a baixa concentração (B6 e B5), os valores de rugosidade média foram maior, mostrando que o fluido interfere na usinabilidade dos materiais. Já para altas concentrações (B10 e

B11) e em ocasiões com fluido na concentração ideal (B7 e B9) os valores de rugosidade média foram menores, demonstrando que o atrito de ferramenta/material diminui com o aumento da concentração do fluido.

Tabela 9. Teste de Tukey (Blocos)

Bloco	Média da rugosidade	Agrupamento	
B6	4,6265	A	
B3	4,59962	A	
B2	3,6595	A	B
B5	3,44612	A	B
B8	3,42112	A	B
B1	3,373	A	B
B12	3,36237	A	B
B9	3,35287	A	B
B7	3,03812		B
B4	2,974		B
B11	2,626		B
B10	2,28312		B

Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Análise de variância da rugosidade no ponto médio da usinagem

A Tabela 10 apresenta a análise de variâncias dos dados em questão, onde nota-se que não houve efeito de interação tripla também, assim como da interação dupla entre v_c e v_f e v e material. Seguindo com a análise nota-se o efeito de interação dupla entre o material e a velocidade de corte nos dados da rugosidade média. Prosseguindo com a análise, percebe-se que houve efeito individual nos dados de rugosidade média do bloco (fluidos), porém não houve efeito da v_f .

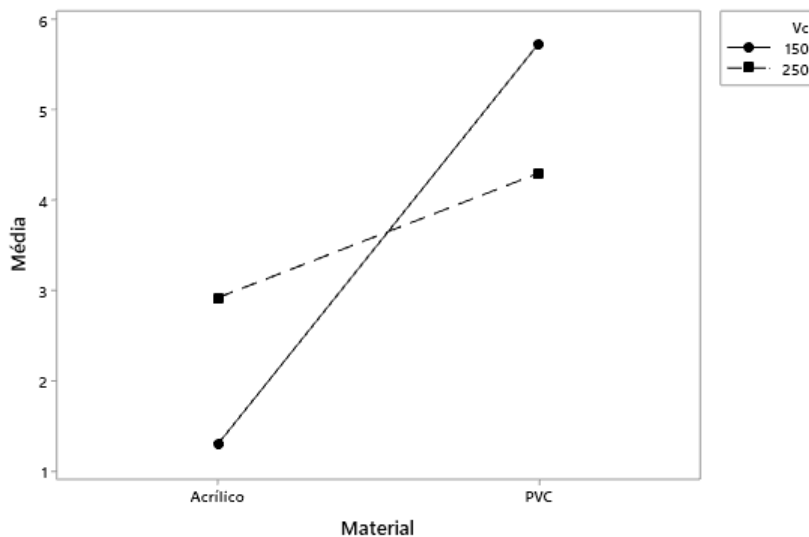
Tabela 10. Análise de variância dos dados de rugosidade no ponto mediano da usinagem

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma quadrática	Soma quadrática	F0	p-valor
Blocos	11,000	26,475	2,407	2,330	0,016
v_c	1,000	0,203	0,203	0,200	0,659
v_f	1,000	0,210	0,210	0,200	0,653
Material	1,000	202,455	202,455	196,160	0,000
$v_c * v_f$	1,000	0,129	0,129	0,130	0,724
$v_c * \text{Material}$	1,000	55,913	55,913	54,170	0,000
$v_f * \text{Material}$	1,000	0,136	0,136	0,130	0,718
$v_c * v_f * \text{Material}$	1,000	0,043	0,043	0,040	0,839
Resíduo	77,000	79,471	1,032		
Total	95,000	365,034			

Fonte: Autoria própria.

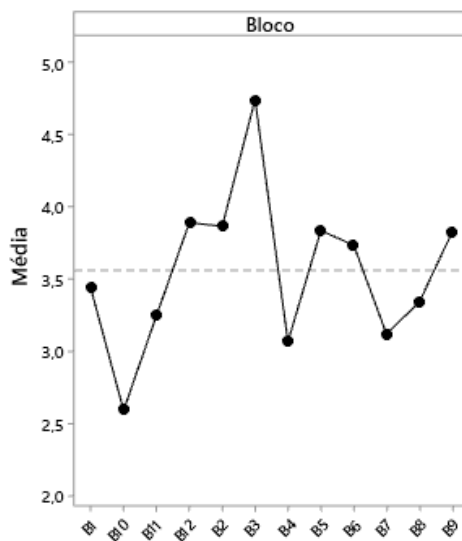
A Figura 21 apresenta o efeito de interação entre a velocidade de corte na rugosidade média no ponto inicial da usinagem. Já a Figura 22 ilustra o efeito individual do bloco (fluido).

Figura 21. Efeito de interação da velocidade de corte e material



Fonte: Autoria própria.

Figura 22. Efeito do bloco na rugosidade



Fonte: Autoria própria.

Encontrando os fatores que afetam nos dados de rugosidade parte-se para a realização dos respectivos testes de Tukey: entre a interação dupla e o efeito do bloco.

4.1.2.1 Teste de Tukey – Interação dupla entre velocidade de corte e material

A Tabela 11 nos mostra que em PVC a velocidade mais baixa apresentou maior efeito na rugosidade média, já em acrílico, em velocidades maiores, a rugosidade média aumentou.

Tabela 11. Teste de Tukey (Velocidade de corte x material)

Material	Velocidade de corte	Média da rugosidade	Agrupamento
PVC	150	5,72938	A
PVC	250	4,29496	B
Acrílico	250	2,91688	C
Acrílico	150	1,29863	D

Fonte: Autoria própria.

4.1.2.2 Teste de Tukey - Efeito do bloco na rugosidade média.

A Tabela 12 nos mostra na ausência de fluido (B2 e B3) e com fluido a baixa concentração (B6 e B5), os valores de rugosidade média foram maior, mostrando que o fluido interfere na usinabilidade dos materiais. Já para altas concentrações (B10 e B11) e em ocasiões com fluido na concentração ideal (B7 e B8) os valores de rugosidade média foram menores, demonstrando que o atrito de ferramenta/material diminui com o aumento da concentração do fluido.

Tabela 12. Teste de Tukey (Blocos)

Bloco	Média da rugosidade	Agrupamento
B3	4,74275	A
B12	3,892	A B
B2	3,86663	A B
B5	3,83625	A B
B9	3,829	A B
B6	3,73663	A B
B1	3,44088	A B
B8	3,34425	A B
B11	3,24875	A B
B7	3,12013	A B
B4	3,0685	A B
B10	2,59375	B

Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Análise de variância da rugosidade no ponto final da usinagem

A Tabela 13 apresenta a análise de variâncias dos dados em questão, onde nota-se que não houve efeito de interação tripla também, assim como da interação dupla entre v_c e v_f e v_f e material. Seguindo com a análise nota-se o efeito de interação dupla entre o material e a velocidade de corte nos dados da rugosidade média. Prosseguindo com a análise, percebe-se que houve efeito do bloco na rugosidade média no ponto final, mas não apresentou efeito da v_f .

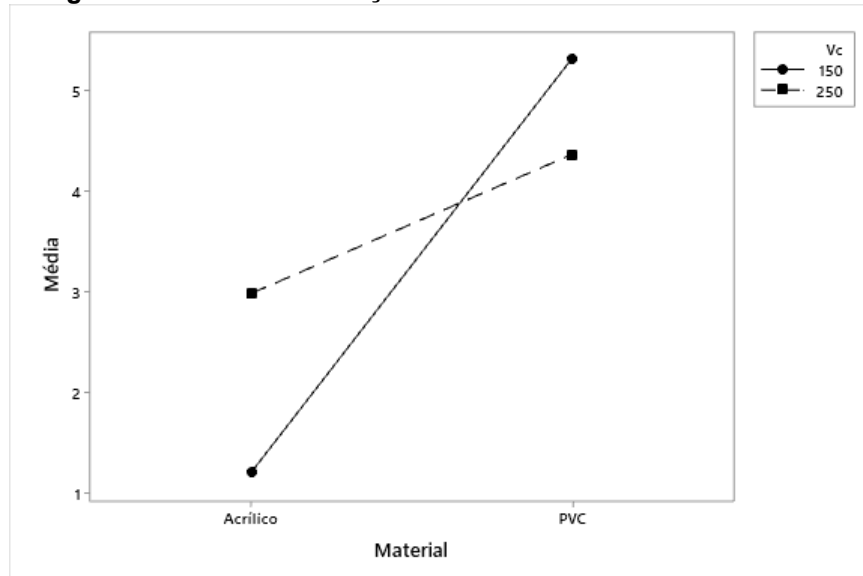
Tabela 13. Análise de variância dos dados de rugosidade no ponto final da usinagem.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma quadrática	Soma quadrática	F0	p-valor
Blocos	11,000	30,189	2,744	2,430	0,012
v_c	1,000	4,039	4,039	3,570	0,063
v_f	1,000	0,106	0,106	0,090	0,760
Material	1,000	182,367	182,367	161,240	0,000
v_c*v_f	1,000	0,122	0,122	0,110	0,743
v_c *Material	1,000	45,033	45,033	39,820	0,000
v_f *Material	1,000	0,020	0,020	0,020	0,894
v_c*v_f *Material	1,000	0,156	0,156	0,140	0,712
Resíduo	77,000	87,087	1,131		
Total	95,000	349,119			

Fonte: Autoria própria.

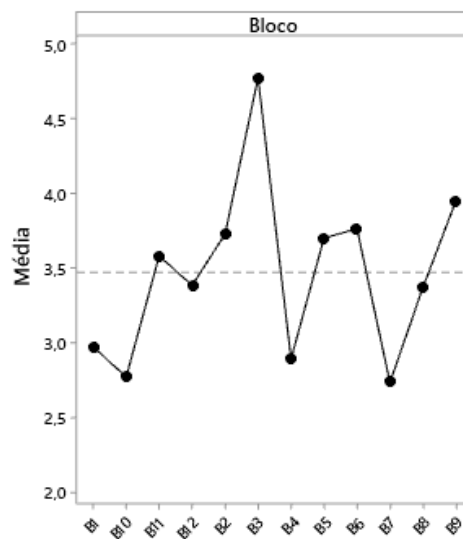
A Figuras 23 apresenta o efeito de interação entre a velocidade de corte na rugosidade média no ponto inicial da usinagem. Já a Figura 24 ilustra o efeito individuais do bloco (fluido).

Figura 23. Efeito de interação da velocidade de corte e material



Fonte: Autoria própria.

Figura 24. Efeitos do bloco na rugosidade



Fonte: Autoria própria.

Encontrando os fatores que afetam nos dados de rugosidade parte-se para a realização dos respectivos testes de Tukey: entre a interação dupla e os efeitos individuais.

4.1.3.1 Teste de Tukey - Interação dupla entre velocidade de corte e material

A Tabela 14 nos mostra que em PVC a velocidade mais baixa apresentou maior efeito na rugosidade média, já em acrílico, em velocidades maiores, a rugosidade média aumentou.

Tabela 14. Teste de Tukey (Velocidade de corte x material).

Material	Velocidade de corte	Média da rugosidade	Agrupamento	
PVC	150	5,32921	A	
PVC	250	4,36963		B
Acrílico	250	2,98287		C
Acrílico	150	1,20283		D

Fonte: Autoria própria.

4.1.3.2 Teste de Tukey - Efeito do bloco na rugosidade média.

A Tabela 15 nos mostra na ausência de fluido (B2 e B3) e com fluido a baixa concentração (B6 e B5), os valores de rugosidade média foram maior, mostrando que o fluido interfere na usinabilidade dos materiais. Já para altas concentrações (B10) e em ocasiões com fluido na concentração ideal (B7 e B8) os valores de rugosidade média foram menores, demonstrando que o atrito de ferramenta/material diminui com o aumento da concentração do fluido.

Tabela 15. Teste de Tukey (Blocos)

Bloco	Média da rugosidade	Agrupamento	
B3	4,7765	A	
B9	3,95188	A	B
B6	3,76613	A	B
B2	3,73037	A	B
B5	3,70275	A	B
B11	3,58413	A	B
B12	3,38663	A	B
B8	3,37275	A	B
B1	2,97513		B
B4	2,89525		B
B10	2,77463		B
B7	2,7375		B

Fonte: Autoria própria.

4.1.4 Discussão da análise estatística

Notou-se a constância no comportamento dos fatores nos três pontos de estudo da rugosidade, ou seja, nos três pontos da usinagem houve influência dos mesmos fatores e interação de fatores.

A Tabela 16 ilustra um breve resumo dos resultados obtidos pela ANOVA, onde é exposto a interação entre a velocidade de corte e o material usinado, a influência do aumento da concentração do fluido, o material com melhor acabamento e o comportamento da velocidade de avanço.

O PVC expandido foi o material com maior rugosidade média, sendo mais crítico em velocidade de corte menores, enquanto o acrílico demonstrou comportamento contrário, ou seja, quanto maior era a velocidade de corte, maior era sua rugosidade média.

Já com o acréscimo do fluido no processo de usinagem, notou-se uma redução nos valores da rugosidade média. Além disso, conforme a concentração aumentava, o acabamento superficial era de melhor qualidade, isto é, os valores da rugosidade média diminuam.

Tabela 16. Resumo dos resultados da ANOVA.

Fator	Comportamento
Material	O acrílico possui melhor acabamento que o PVC (Menor rugosidade média).
V_c	As usinagens a 150 m/min no PVC, apresentaram maiores rugosidades, já no acrílico, usinagens a 250 m/min apresentaram maiores rugosidades.
Concentração do fluido	Conforme a concentração do fluido aumentava, sua rugosidade média diminuía.
V_f	A velocidade de avanço não apresentou efeito significativo para notar influência na rugosidade média.

Fonte: Autoria própria.

4.2 ANÁLISE DOS CAVACOS

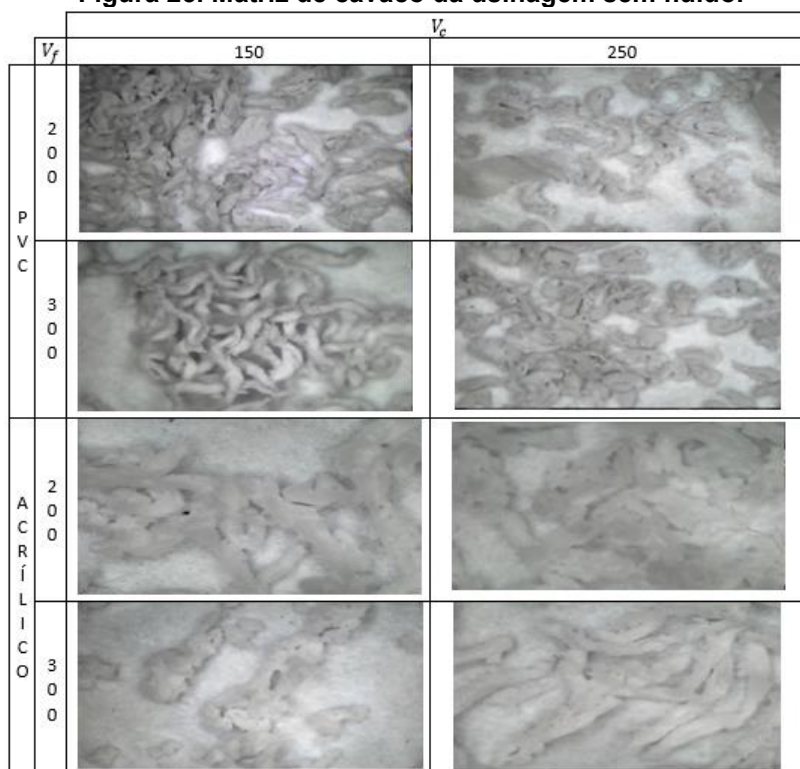
Para efeito de comparação da influência do fluido na usinagem de polímeros, montou-se as matrizes de cavacos para cada concentração diferente utilizada no decorrer do experimento. As Figuras 25, 26, 27 e 28 correspondem, respectivamente, as amostras dos cavacos obtidos nas usinagens referente aos blocos B2 (sem fluido),

B5 (fluido com baixa concentração), B8 (fluido com concentração ideal) e B11 (fluido com concentração alta).

Conforme a usinagem no ocorria, notou-se a formação de cavacos do tipo lascas, em ambos materiais, diferindo apenas os tamanhos. Entretanto, nas usinagens a seco e com concentrações baixa e ideal do PVC ocorria a formação de grande quantidade de rebarbas no passe da usinagem, enquanto na usinagem com alta concentração, ocorreu, além dos pequenos cavacos em lascas, a formação de cavacos helicoidal do tipo arruela curto ao invés das significativas rebarbas. Essas rebarbas do PVC são evidenciadas na Figura 26. Além disso, ocorreu a diminuição do tamanho do cavaco com o aumento da concentração do fluido de corte


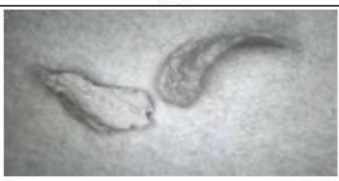






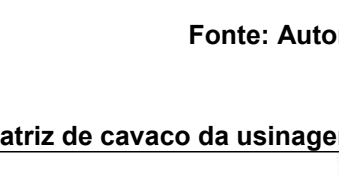
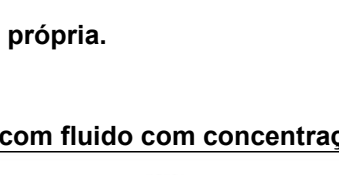
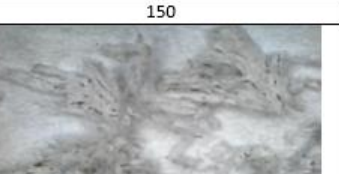
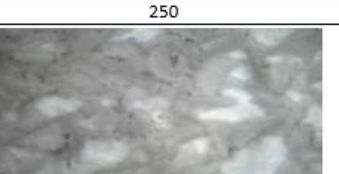
Já no acrílico, em usinagens a seco as lascas eram lascas mais opacas, enquanto nas usinagens com fluido, com o aumento da concentração, menores eram as lascas, como esperado.

Figura 25. Matriz de cavaco da usinagem sem fluido.




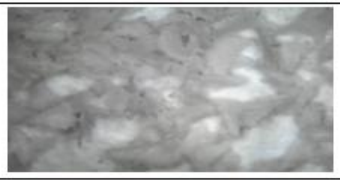



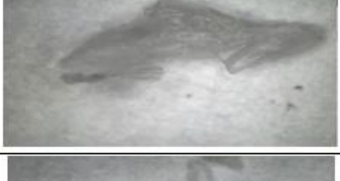


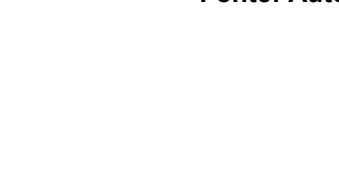
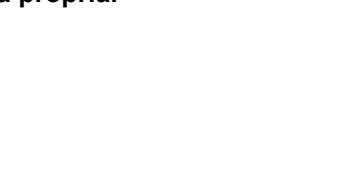


Fonte: Autoria própria.

Figura 26. Matriz de cavaco da usinagem com fluido com baixa concentração.

		V_c	
		150	250
P V C	V_f		
	2000		
3000			
A C R Í L I C O	V_f		
	2000		
3000			

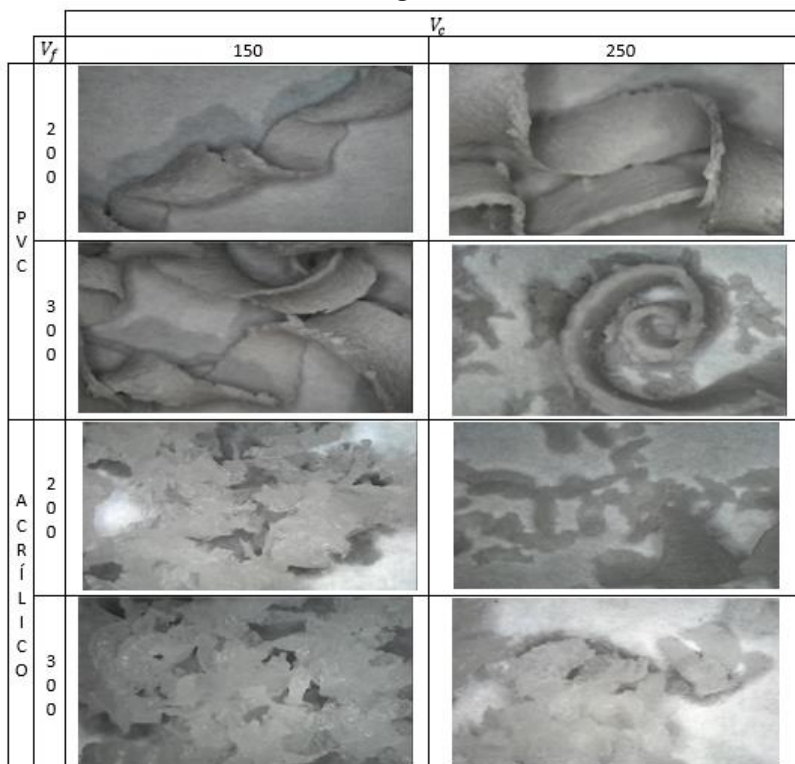
Fonte: Autoria própria.

Figura 27. Matriz de cavaco da usinagem com fluido com concentração ideal.

		V_c	
		150	250
P V C	V_f		
	2000		
3000			
A C R Í L I C O	V_f		
	2000		
3000			

Fonte: Autoria própria.

Figura 28. Matriz de cavaco da usinagem com fluido com alta concentração.



Fonte: Autoria própria.

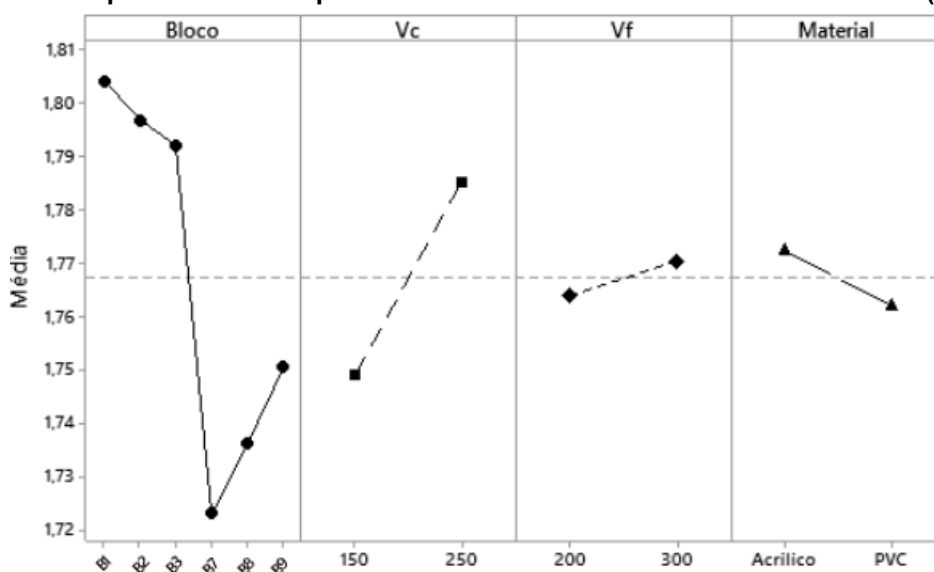
4.3 ANÁLISE DO CONSUMO DE CORRENTE

Como o trabalho foi realizado em parceria com o trabalho de Gimenez (2020), onde o sistema de aquisição de corrente não intrusivo foi elaborado para o monitoramento da corrente elétrica consumida pelo *spindle* da fresa. Com isso, foram monitorados os dados de corrente nos ensaios sem fluido e nos ensaios com fluido na concentração ideal. A Tabela 17 apresenta dos valores médios de corrente em cada ensaio. Com os dados, foi realizado os gráficos de efeito dos fatores, Figura 29.

Tabela 17. Dados de corrente nos ensaios.

Entradas				Saída			
Condição de fluido	Vc	Vf	Material	1º Repetição Corrente [A]	2º Repetição Corrente [A]	3º Repetição Corrente [A]	Valores médios [A]
Sem fluido	150	200	Acrílico	1,7838	1,7809	1,7754	1,780
Sem fluido	250	200	Acrílico	1,8243	1,7729	1,8104	1,803
Sem fluido	150	300	Acrílico	1,8003	1,797	1,7803	1,793
Sem fluido	250	300	Acrílico	1,8152	1,8225	1,8224	1,820
Sem fluido	150	200	PVC	1,7828	1,7619	1,7698	1,772
Sem fluido	250	200	PVC	1,8034	1,8173	1,8125	1,811
Sem fluido	150	300	PVC	1,7913	1,7733	1,7685	1,778
Sem fluido	250	300	PVC	1,8322	1,81	1,7965	1,813
Concentração de 12,50%	150	200	Acrílico	1,7008	1,7155	1,7245	1,714
Concentração de 12,50%	250	200	Acrílico	1,7468	1,7727	1,7749	1,765
Concentração de 12,50%	150	300	Acrílico	1,7188	1,7236	1,747	1,730
Concentração de 12,50%	250	300	Acrílico	1,7557	1,7686	1,7732	1,766
Concentração de 12,50%	150	200	PVC	1,6885	1,7114	1,7321	1,711
Concentração de 12,50%	250	200	PVC	1,7305	1,7363	1,7609	1,743
Concentração de 12,50%	150	300	PVC	1,7016	1,7152	1,7285	1,715
Concentração de 12,50%	250	300	PVC	1,7403	1,7456	1,7619	1,749

Fonte: Autoria própria

Figura 29. Comportamento dos parâmetros com efeito sobre a corrente elétrica (Ampere).

Fonte: Autoria própria.

Com a Figura 29, nota-se que ao acrescentar o fluido de corte no processo de usinagem, ocorre uma diminuição na corrente consumida, que pode ser justificada pela diminuição do atrito entre ferramenta/peça. Tal afirmação pode ser provada por meio da existência de efeito dos materiais na corrente, já que o acrílico apresentou maior corrente consumida quando comparada ao PVC expandido, por apresentar maior resistência. Quanto as velocidades de corte e de avanço, apresentaram consumo maior de corrente quando seus valores de velocidade foram maiores.

4.4 ANÁLISE DO FLUIDO DE CORTE

Durante todos os ensaios que continham o fluido, foram coletados os dados de condutividade e pH, para monitorar seu comportamento. A Tabela 18 apresenta os valores obtidos, sendo eles constante nas três repetições de cada condição de concentração. Nota-se que o pH ficou praticamente inalterado, tendo apenas uma pequena mudança na alta concentração, mas pouco significativo, enquanto a condutividade aumentava conforme a alteração da concentração.

Tabela 18. Dados do fluido de corte.

Concentração	pH	Condutividade [$\mu S/cm$]
Baixa (5%)	9,1	3,61
Ideal (12,50%)	9,1	6,47
Alta (27,5%)	9,2	8,93

Fonte: Autoria própria.

Outro importante fator notado foi que com o aumento da concentração do fluido, mais forte ficava seu odor, sendo necessário o uso de máscaras. Além disso, o fluido ficava cada vez mais viscoso em maiores concentrações.

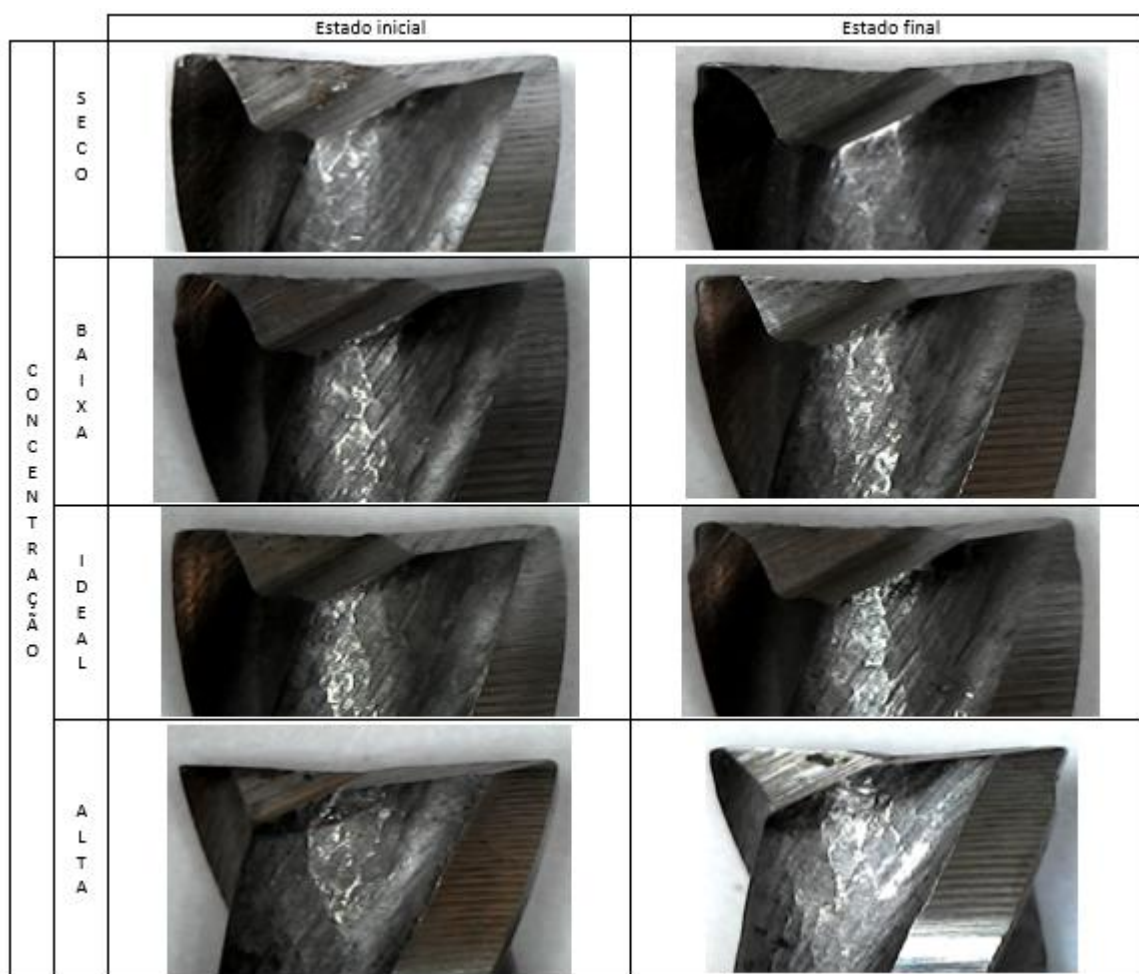
A refrigeração da ferramenta também foi perceptível que com a implementação do fluido de corte no processo de usinagem dos materiais poliméricos.

Em alta concentração, além do forte odor, as peças de PVC expandido apresentaram um leve escurecimento da peça e leves manchas, por conta do fluido, algo não notado nas demais concentrações, mesmo limpando a peça em água após o processo de usinagem.

4.5 ANÁLISE DO DESGASTE DA FERRAMENTA

Durante os ensaios foram realizados a fotografia do estado da ferramenta, sendo ilustrado na Figura 30 o estado inicial, antes dos ensaios, e final, após a realização de todos ensaios para a determinada condição de fluido. Nota-se que em todas condições de fluido houve desgaste significativo da ferramenta, sendo perceptível em seus gumes de corte.

Figura 30. Desgaste das ferramentas de corte.



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÕES

O trabalho em questão tem o intuito de analisar a influência do fluido de corte na usinagem dos polímeros por meio dos dados de rugosidade média pós processo de usinagem. A análise ocorreu por meio de avaliações estatísticas dos dados e comparação dos cavacos obtidos.

Pela análise de variância, nota-se que a interação dos parâmetros velocidade de corte e material possuíram muita influência nos dados de rugosidade média, tendo maiores valores quando usinadas na velocidade de corte de 150 m/min no PVC e quando usinadas na velocidade de corte de 250 m/min no acrílico. Sobre os materiais, o processo de usinagem no acrílico apresentou melhor qualidade superficial quando comparado com o PVC expandido, ou seja, o acrílico teve menores valores de rugosidade média. Quanto a velocidade de avanço, sua variação não apresentou efeito significativo na integridade superficial das peças.

Além disso, pela análise de variância, justificou-se que o fluido possui influência na integridade superficial da peça, ou seja, os valores de rugosidade média diminuíram com o aumento da concentração do fluido MV Aqua 180.

A respeito dos cavacos, em todos os ensaios, eram do tipo lascas e seu tamanho era reduzido conforme a adição do fluido e o aumento da concentração, respeitando os dados informados nas literaturas.

Pela aferição da corrente pode-se notar que ao adiciona o fluido de corte no processo de usinagem, ocorreu a diminuição na corrente consumida, justificada pela diminuição do atrito entre ferramenta/peça.

Quanto ao fluido, notou-se uma constância no pH das concentrações, alterando apenas a condutividade com o aumento da concentração. Outro fato percebido foi o aumento do odor com o aumento da concentração, sendo em que, na alta concentração, as peças de PVC expandido apresentaram leves manchas.

O desgaste da ferramenta também foi algum relevante, pois ao final das repetições, os gumes das ferramentas apresentaram avarias significantes.

REFERÊNCIAS

ABC DOS POLIMEROS. **Alguns Polímeros de Importância Industrial**. 2010. Disponível em: <https://abcdopolimero.wordpress.com/2010/03/26/alguns-polimeros-de-importancia-industrial/>. Acesso em: 16 out. 2020

AMORIM, Heraldo José de. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

DEVERAS, Andressa Mayara. **Estudo da rugosidade superficial no torneamento do aço AISI 8640 com ferramentas alisadora e convencional**. 2016. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da usinagem dos Materiais**. — 9ª Edição — São Paulo: Artliber Editora, 2014

FERNANDES, M. O.; CORRÊA, M. M.; LEITE, W.; WIEBECK, H.; VALENZUELADIAZ, F. R.; TOFFOLI, S. M. **Usinagem de plásticos de engenharia. Uma opção de processamento**. Ln: 9º Congresso Brasileiro de polímeros, São Carlos, 2007.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Ed. Edgard Bluncher Ltda, 1977.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **O que são os polímeros?** Disponível em: <https://www.manualdaquimica.com/quimica-organica/o-que-sao-os-polimeros.htm>. Acesso em: 16 out. 2020.

GRANADO, R.M. **Avaliação da integridade superficial do polimetilmetacrilato (PMMA) no torneamento com ferramenta de diamante**. 114p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

GIMENEZ, Mayther Freire. **Monitoramento do comportamento da corrente elétrica durante o processo de fresamento**. 2020. 57. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do

Paraná. Londrina, 2020.

HEMAIS, Carlos. **Polímeros e a indústria automobilística**. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282003000200008. Acesso em 16 de out. 2020.

JASINEVICIUS, Renato Goulart. **Processos de Usinagem**. São Paulo: Usp, 2020 r. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2036771/mod_resource/content/2/Aula%20Fresamento.pdf. Acesso em: 02 out. 2020.

LISBOA, Fabio Cordeiro de; MORAES, Jessyca Jordanna Barroso de; HIRASHITA, Massako de Almeida. **Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências**. XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção: ENEGEP, Salvador, 2013.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 6 ed. Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1176p., 2010.

MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

MACHADO, Alisson R.; SILVA, Marcio B. da. **Usinagem dos Metais – Apostila Didática**. Uberlândia: Edufu (Editora UFU), 2004.

MACIEL, D.; LAURO, C.H.; BRANDÃO, L.C. **Usinagem de materiais poliméricos utilizando sistema de refrigeração com ar gelado**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, VI., 2010, Campina Grande. Anais. Campina Grande: ABCM, 2010. p.1-6.

MEDEIROS, Gianpaulo A. **Material didático: Parâmetros de corte**. IFSC, 2016.

MITSUBISHI CHEMICAL ADVANCED MATERIALS. **Manual para Usinagem de Plásticos**. Disponível em: <https://www.mcam.com/pt-br/suporte/informacoes-usinagem-de-pecas/manual-para-usinagem-de-plasticos/#c198265>. Acesso em: 16 out. 2020.

PRAZERES, Gabriel. **Polímeros: conceito, classificação, propriedades e reações químicas**. 2020. Disponível em: <https://blog.estrategiavestibulares.com.br/polimeros/>. Acesso em: 16 out. 2020.

RIBEIRO JUNIOR, Elson Heraldo; PENTEADO, Rosangela de Fatima Stankowitz. **Modelo para formatação de trabalhos acadêmicos da UTFPR**. Ponta Grossa, 2011. (Apostila)

SANDVIK. **Como aplicar refrigeração e fluido de corte em torneamento**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/general-turning/pages/how-to-apply-coolant-and-cutting-fluid-in-turning.aspx>. Acesso em: 16 out. 2020.

SANTOS, Zora Ionara Gama dos. **Tecnologia dos materiais não metálicos: classificação, estrutura, propriedades, processos de fabricação e aplicações**. São Paulo: Érica, 2014.

SANTOS, Sandro C.; SALES, Wisley F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo – SC: Artliber Editora, 2007. 246p.

SCHNEIDER, Eduardo Luis; MARQUES, André Canal; FALLER, Roberto R.; KINDLEIN JÚNIOR, Wilson. **Análise dos Parâmetros de Usinagem no Acabamento Superficial de Polímeros**. / Unopar Cient. Exatas Technol, Londrina, v. 7, p. 25-30, nov. 2008.

SILVA, Fernando; JOAQUIM JUNIOR, Celso Fernandes; TARRENTO, Gilson Eduardo. **Relações entre parâmetros de corte e acabamento superficial no poliacetal em operação de fresamento**. 5ª Jornada Científica e Tecnológica da Fatec de Botucatu, Botucatu. out. 2016.

SOUTO, U. B. **Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Fresamento via Emissão Acústica**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

TELECURSO 2000. **Metrologia**. Fundação Roberto Marinho.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000. 446p. ISBN-13: 978-0-7506-7069-2.

VANAT, Karen J.; BRAGHINI Jr., Aldo. Uso de Ferramentas de Metal duro no Torneamento do Nylon. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineiraç o**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 50-57, 2014.

VEJA como escolher corretamente o fluido de corte nos processos produtivos da indústria. 2017. Disponível em: <https://avozdaindustria.com.br/gest-o/veja-como-escolher-corretamente-o-fluido-de-corte-nos-processos-produtivos-da-ind-stria>. Acesso em: 16 out. 2020.

VSI BRASIL. **MV Aqua  180 - Fluido anticorrosivo base água para corte e retífica**. VCI Brasil. 2020. Disponível em <encurtador.com.br/osBG> acesso em 25 de set. 2020.