INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CAMPUS ARACRUZ
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUANA NIEIRO DOS SANTOS

INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO E DOS PARÂMETROS DE CORTE NO ACABAMENTO SUPERFICIAL NO FRESAMENTO DO AÇO SAE 1020

ARACRUZ-ES
2022

LUANA NIEIRO DOS SANTOS

INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO E DOS PARÂMETROS DE CORTE NO ACABAMENTO SUPERFICIAL NO FRESAMENTO DO AÇO SAE 1020

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Aracruz, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. M.e Jairo de Almeida Montalvão.
Coorientador: Prof. Dr. Armando Marques.

ARACRUZ-ES

2022

(Biblioteca do Campus Aracruz)

S237 Santos, Luana Nieiro dos .

Influência da condição de lubri-refrigeração e dos parâmetros de corte no acabamento superficial no fresamento do aço SAE / Luana Nieiro dos Santos. - 2022.
60 f. : il. ; 30 cm .

Orientador: Jairo de Almeida Montalvão
Coorientador: Armando Marques

TCC (Graduação) Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Aracruz, Engenharia Mecânica, 2022.

1. Usinagem . 2. Aço . 3. Lubrificante . I. Montalvão , Jairo de Almeida . II. Marques , Armando . III.Título IV. Instituto Federal do Espírito Santo.

CDD: 671.35

Bibliotecário/a: Elieser Moreira Santos Junior CRB6-ES nº 771

LUANA NIEIRO DOS SANTOS

INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO E DOS PARÂMETROS DE CORTE NO ACABAMENTO SUPERFICIAL NO FRESAMENTO DO AÇO SAE 1020

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Aracruz, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Aprovado em 17 de março de 2022

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. M.Sc. Jairo de Almeida Montalvão
Instituto Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Armando Marques
Instituto Federal do Espírito
Santo Coorientador

Prof. M.Sc. Miguel Dias Júnior
Instituto Federal do Espírito Santo

Prof. M.Sc. Artur Saturnino Rodrigues
Instituto Federal do Espírito Santo

Documento Digitalizado Público

Folha de Aprovação

Assunto: Folha de Aprovação
Assinado por: Miguel Junior
Tipo do Documento: Relatório Pessoal
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Público
Tipo do Conferência: Cópia Simples
Responsável pelo documento: Miguel Dias Junior

Documento assinado eletronicamente por:

- **Miguel Dias Junior**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, **COORDENAÇÃO DO CURSO TÉCNICO EM MECÂNICA**, em 19/09/2022 09:28:31.

Este documento foi armazenado no SUAP em 19/09/2022. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse https://suap.iff.edu.br/verificar-documento-externo/ e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 518041

Código de Autenticação: 56abe3b336

Emitido em 20/09/2022

FOLHA DE APROVAÇÃO-TCC Nº 10/2022 - ARA-CCEM (11.02.16.01.03.02.08)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 21/09/2022 08:31)
ARMANDO MARQUES
PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLOGICO VIT-CCEMEC (11.02.35.01.09.02.27)
Matrícula: 1195753

(Assinado digitalmente em 21/09/2022 08:13)
ARTUR SATURNINO RODRIGUES
PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLOGICO- SUBSTITUTO
ARA-CCEM (11.02.16.01.03.02.08)
Matrícula: 3270184

(Assinado digitalmente em 21/09/2022 10:42)
JAIRO DE ALMEIDA MONTALVÃO
*ASSINANTE EXTERNO CPF: ***.603.322-***

Visualize o documento original em https://sipac.ifes.edu.br/documentos/ informando seu número: **10**, ano: **2022**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO-TCC**, data de emissão: **20/09/2022** e o código de verificação: **65a4ee66b0**

Aos meus amados avós, Paulino Nieiro e Floripes Sant’Anna Nieiro

AGRADECIMENTOS

- À Deus por toda sabedoria concedida.
- Aos meus avós, Paulino Nieiro e Floripes Sant'Anna Nieiro por todo o apoio e incentivo em todas as etapas de minha vida.
- Ao meu noivo, Bruno Quirino dos Santos, por toda compreensão e companheirismo.
- Ao Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Aracruz, pelos conhecimentos obtidos nesse curso.
- A todos os servidores do Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Aracruz, em especial, aos técnicos de laboratório Jackson Ricardo Marcelino Braz e Allan Loureiro Rosalino.
- Ao professor Antonio Ricardo Grippa Satiro pelas dicas, esclarecimentos e conhecimentos ministrados nas aulas de preparação para este trabalho.
- Ao professor Ernandes Marcos Scopel pela ajuda no laboratório.
- Ao meu orientador, Prof. M.e Jairo de Almeida Montalvão, que mesmo a distância, não mediu esforços para me orientar neste trabalho.
- Ao meu coorientador, Prof. Dr. Armando Marques por ter disponibilizado o seu tempo e ter me dado todo o suporte nas realizações dos ensaios.
- Ao Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Vitória, por disponibilizar seus laboratórios, equipamentos e servidores.
- Ao técnico de laboratório do Ifes Campus Vitória, Claudio Patrocínio Júnior, pela disponibilidade e apoio técnico.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

RESUMO

A usinagem é um processo de fabricação amplamente empregado na produção e/ou recuperação de peças e componentes de máquinas e equipamentos. Dentre os vários processos de usinagem podemos destacar o fresamento que, como todos os demais processos, tem como objetivo dar forma a peça com a remoção do cavaco. Entretanto, o processo de usinagem pode induzir danos nas peças usinadas prejudicando o acabamento superficial. Outro problema dos processos de usinagem está relacionado as altas temperaturas na zona de corte, reduzindo a vida das ferramentas. A aplicação de fluido de corte no processo de usinagem proporciona uma redução do atrito na interface cavaco-ferramenta-peça e menores temperaturas na zona de corte. Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo da influência da velocidade de corte (v_c), avanço (*f*) e do fluido de corte aplicado pela técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), comparado com a usinagem a seco do aço SAE 1020 no fresamento de topo com uma fresa de aço rápido, no acabamento superficial da peça usinada. Com os valores de rugosidades obtidos foi possível concluir que a influência da velocidade de corte foi mais evidente nos passes a seco. A influência do avanço foi mais evidente nos passes com MQL. A aplicação da Mínima Quantidade de Lubrificante mostrou-se eficaz no processo, pois o acabamento teve uma melhora significativa em todos os passes.

Palavras-chave: avanço, velocidade de corte, aço rápido, mínima quantidade de lubrificante.

ABSTRACT

Machining is a manufacturing process widely used in the production and or recovery of parts and components of machinery and equipment. Among the various machining processes we can highlight milling, which like all other processes aims to shape the part with chip removal. However, the machining process can induce damage in the machined parts, jeopardizing the surface finish. Another problem of the machining processes is related to the high temperatures in the cutting zone, reducing tool life. The application of cutting fluid in the machining process provides a reduction of friction at the chip-tool-tool interface and lower temperatures in the cutting zone. In this context, this paper presents a study of the influence of cutting speed (v_c), feed (*f*) and cutting fluid applied by the Minimum Quantity of Lubricant (MQL) technique, compared with dry machining of SAE 1020 steel in end milling with a high speed steel cutter, on the surface finish of the machined part. With the roughness values obtained it was possible to conclude that the influence of the cutting speed was more evident in the dry passes. The influence of the feed rate was more evident in the passes with MQL. The application of the Minimum Quantity of Lubricant showed to be effective in the process, because the finishing had a significant improvement in all passes.

Keywords: feed rate, cutting speed, high-speed steel, minimum quantity of lubricant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fresagem: a) periférica. b) frontal. 20
Figura 2 – Fresamento: a) concordante. b) discordante.....21
Figura 3 - Fuso de esferas recirculantes. 21
Figura 4 - Esquemático da profundidade de corte (a_p) e espessura de penetração (a_e) no fresamento frontal. 23
Figura 5 - Representação da fase ativa e inativa no fresamento. 24
Figura 6 - Oscilações térmicas no fresamento. 24
Figura 7 - Relação dureza x tenacidade de materiais para ferramentas de corte. 25
Figura 8 - Aresta postiça de corte. 29
Figura 9 - Influência da velocidade de corte na formação da APC.....30
Figura 10 – Representação de Rz. 32
Figura 11 - Direções de aplicação do fluido de corte: 1. na superfície de folga; 2. na superfície de saída; 3. sobrecabeça e 4. via canal.....34
Figura 12 - Aplicações de MQL. (a) aplicação externa. (b) aplicação interna. 35
Figura 14 - Métodos de aplicação externa. (a) por bomba. (b) por tanque. 35
Figura 14 - Barras utilizadas na obtenção do corpo de prova. 37
Figura 16 - Ensaio de dureza. (a) durômetro. (b) amostra. 38
Figura 16- Corpos de prova preparados. 39
Figura 17 - Dimensões dos corpos de prova.....39
Figura 18 - Centro de Usinagem utilizado. 40
Figura 19 - Ferramenta de corte utilizada nos testes. 40
Figura 21 - Aplicação externa por dispositivo com bombas dosadoras.....41
Figura 21 - Rugosímetro portátil SJ-210. 42
Figura 22 - Calibração do rugosímetro. 42
Figura 23 – Primeiras trajetórias da ferramenta. 43
Figura 24 - Últimas trajetórias da ferramenta. 43
Figura 25 - Trajetórias no corpo de prova. 44
Figura 26 – Influência da v_c nas rugosidades a seco e com MQL. 46
Figura 27 - Influência do avanço nas rugosidades Ra, Rq e Rz a seco e com MQL.48
Figura 28 - Influência da v_c nas rugosidades Ra, Rq e Rz a seco e com MQL. 50
Figura 29 - Aspecto visual dos passes. a) a seco. b) com MQL.....51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de aço bruto da América Latina. 26
Tabela 2 - Produção mundial de aço bruto.....27
Tabela 3 - Comprimentos de amostragem recomendados. 31
Tabela 4 – Composição em peso do aço SAE 1020 utilizado. 37
Tabela 5 - Velocidades de corte e avanços utilizados.....44

LISTA DE ABREVIAÇÕES

et al. - Et alii (e outros)

etc. - Etecetera

a_e - Espessura de penetração

a_p - Profundidade de corte

D - Diâmetro da fresa

f - Avanço

l_m - linha média

l_n - comprimento de avaliação

l_v - comprimento inicial

n - Rotação

Ra - Rugosidade média

Rq - Desvio médio quadrático

Rz - Rugosidade máxima do perfil

v_c - Velocidade de corte

v_f - Velocidade de avanço

Z - Número de dentes

Zp - Altura de pico

Zv - Profundidade de vale

v. - Volume

p. - Página

LISTA DE SIGLAS

FIRJAN - Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro

ISO - International Organization for Standardization

NBR – Norma Brasileira

SAE - Society of Automotive Engineers International

MQL – Mínima quantidade de lubrificante.

APC – Aresta Postiça de Corte

CBCA - Centro Brasileiro da Construção em Aço

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

HSS – High Speed Steel

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14

2. JUSTIFICATIVA 17

3. OBJETIVOS 18

3.1 OBJETIVO GERAL 18

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 18

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19

4.1 USINAGEM 19

4.2 FRESAMENTO 19

4.2.1 Principais variáveis do processo de fresamento 22

4.3 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE 23

4.3.1 Aço rápido 25

4.4 AÇOS 26

4.4.1 Classificação dos aços 27

4.5 ARESTA POSTIÇA DE CORTE 28

4.6 RUGOSIDADE 30

4.7 FLUIDO DE CORTE 32

4.7.1 Métodos de aplicação 34

4.7.2 Funcionamento do MQL 34

5. MATERIAIS E MÉTODOS 37

5.1 MATERIAL 37

5.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA 38

5.3 EQUIPAMENTOS 39

5.3.1 Centro de usinagem 39

5.3.2 Ferramenta 40

5.3.3 Sistema de aplicação do fluido de corte 40

5.3.4 Rugosímetro 41

5.4 ENSAIOS 43

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES 46

6.1 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE NO ACABAMENTO 46

6.2 INFLUÊNCIA DO AVANÇO NO ACABAMENTO 47

6.3 INFLUÊNCIA DA TÉCNICA MQL NO ACABAMENTO 49

7. CONCLUSÃO 53

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 54

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....53

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de fabricação fundamental em nosso dia a dia. Ela está presente tanto em componentes básicos como chaves e corrimãos, quanto em guindastes, veículos, componentes eletrônicos complexos entre outros.

A chegada da Quarta Revolução Industrial, conhecida também como Indústria 4.0, trouxe consigo tecnologias revolucionárias que alteraram as linhas de produção e permitiram uma produção em massa personalizada (AIRES; MOREIRA; FREIRE, 2017). Para Pereira e Simonetto (2018), as próprias fábricas e suas máquinas terão capacidade de armazenar dados sobre si em tempo real e utilizá-los posteriormente nas tomadas de decisões.

A Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (FIRJAN) diz que o cenário industrial brasileiro enfrenta desafios quanto aos impactos da Indústria 4.0, pois ainda está entre a Segunda e Terceira Revolução Industrial. A FIRJAN relata ainda que, o primeiro passo para a implementação da Indústria 4.0 é investir em serviços de automação de maquinários.

Diante dos fatos acima, os processos de usinagem estão sofrendo alterações constantes, pois devem corresponder às expectativas de produtividade, velocidade, flexibilidade e qualidade.

“A usinabilidade é uma propriedade que depende da interação entre o processo de fabricação e as características do material da peça” (BAPTISTA, 2002, p. 1). Dessa forma, conhecer as características do material da peça de trabalho é essencial para reduzir custos, aumentar produtividade e melhorar a qualidade e acabamento do item desejado, o que leva ao contínuo desenvolvimento e aperfeiçoamento de aços já existentes.

Aços são ligas ferro-carbono muito importantes como materiais de construção em engenharia. Sua matéria-prima principal, o minério de ferro, é abundante na crosta terrestre e suas propriedades físicas e mecânicas são sensíveis aos teores de carbono, possibilitando assim, uma grande diversidade de aços e aplicações (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Além disso, segundo o Centro Brasileiro da

Construção em Aço (CBCA), os aços são compatíveis com o conceito de desenvolvimento sustentável, pois são 100% recicláveis.

No Brasil, a produção de aço bruto no primeiro semestre de 2021 alcançou 18,1 milhões de toneladas, isso demonstra um crescimento de 24% em comparação ao mesmo período do ano anterior (AGÊNCIA BRASIL, 2021).

O aço 1020 é um aço com baixo teor de carbono, muito tenaz e indicado para componentes tratados para aumento de dureza superficial com excelente custo-benefício comparado a outras ligas metálicas. Ele é muito utilizado em eixos, engrenagens e demais componentes sem maiores exigências (AÇOSPORTE, 2022).

Diversos processos de usinagem são utilizados nas indústrias: torneamento, aplainamento, fresamento, furação, retificação, entre outros. De acordo com Stemmer (1995), o fresamento trata-se da remoção intermitente de cavaco, por uma ferramenta multicortante, chamada fresa, que gera as mais variadas superfícies, de acordo com sua geometria.

O atrito presente nos processos de usinagem propicia o surgimento de temperaturas elevadas e altas taxas de deformação, o que pode interferir nas características superficiais e estruturais das peças que resultam em prejuízos de fabricação. Uma das técnicas aplicadas para diminuir esses efeitos é o fluido de corte (ALMEIDA *et al.*, 2011).

Fluidos de corte possuem finalidade de refrigerar e lubrificar as regiões da peça, ferramenta e cavaco, podendo contribuir na expulsão de cavacos e na proteção contra a corrosão e, quando devidamente aplicados, podem aumentar a vida da ferramenta, aumentar produtividade, reduzir custos, etc (DEBNATH; REDDY; YI, 2014; EL BARADIE, 1996), mas, apesar das vantagens acima, seu uso tem sido repensado devido a nocividade à saúde do operador e ao meio-ambiente e novas alternativas tem surgido, como a mínima quantidade de lubrificante (MQL) na qual uma quantidade muito pequena de fluido é utilizada. Dessa forma, reduziram-se os impactos ambientais, os custos e os riscos aos operadores. (FILHO, 2006).

Há muitas variáveis que influenciam diretamente na qualidade de acabamento superficial do produto gerado, tais como: vibrações, material, geometria e fixação da ferramenta e da peça, desgaste da ferramenta, entre outros (MACHADO *et al.*, 2015).

Um dos parâmetros amplamente utilizados para definir a qualidade de superfícies é a rugosidade, pois ela quantifica as irregularidades deixadas pela ponta da ferramenta, por meio de um aparelho como o rugosímetro (HAMMES; ROSA; WALKER, 2017).

Amorim (2002) afirma que, por melhor que seja o acabamento, essas irregularidades sempre estão presentes nas superfícies, e essas podem interferir no escoamento de fluidos, resistência à fadiga e à corrosão e até na transferência de calor. Dessa forma, avaliar a rugosidade é um meio utilizado para acompanhar e garantir que o item fabricado atenderá a função para a qual foi projetado (FERRAZ; RIBEIRO, 2021).

2. JUSTIFICATIVA

O aço 1020 é versátil, tem grande aceitação nas indústrias e é fácil de encontrar. Ele entrega um ótimo custo benefício comparado aos outros aços ligados, pois possui excelente conformabilidade e soldabilidade, responde bem aos tratamentos térmicos, trabalhos à frio e à quente, é fácil de usinar e entrega bons acabamentos superficiais (AÇOS ROMAN, 2021).

Além da aparência, a qualidade de uma superfície pode influenciar na resistência à corrosão, no atrito, vedação, entre outros, o que faz com que a preocupação com o acabamento de componentes mecânicos seja cada vez maior por parte das indústrias (EURICH, 2021).

A utilização adequada de fluidos de corte pode melhorar o acabamento superficial, mas proporciona riscos à saúde e ao meio ambiente, por isso é importante estudar e entender a possibilidade de técnicas mais seguras e que reduzam custos referentes aos sistemas convencionais, como a MQL, por exemplo (ADLER *et al.*, 2006; RIBEIRO, 2017).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência das condições lubri-refrigerantes e dos parâmetros de corte no fresamento de topo do aço SAE 1020 no acabamento superficial.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as rugosidades superficiais no fresamento de topo com ferramenta de aço rápido (HSS);
- Analisar a influência da velocidade de corte na rugosidade a seco e com MQL;
- Analisar a influência do avanço na rugosidade a seco e com MQL;
- Analisar a influência da técnica MQL na rugosidade.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 USINAGEM

A usinagem é um processo de fabricação que, por meio da remoção de material em forma de cavaco, atribui a forma desejada a peça final. Define-se como cavaco, a porção de material geometricamente irregular retirada pela ação da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2015).

Durante a operação, a remoção de material ocorre em duas etapas (SENAI, 1998):

- Desbaste: é a primeira fase da usinagem. Nela ocorre a remoção grosseira do sobremetal e não há muita preocupação com a qualidade da superfície gerada.
- Acabamento: é a etapa final da usinagem. Nela ocorre a remoção fina de sobremetal e há uma grande exigência quanto às dimensões e ao perfil de rugosidade da superfície gerada.

A usinagem é classificada de duas formas: a convencional na qual o material é removido devido ao cisalhamento ocasionado pela ferramenta de corte e a não convencional na qual a extração ocorre por meio de reações químicas, laser, ultrassom, plasma, entre outros. São exemplos de processos convencionais o torneamento, furação, fresamento, retificação, etc e de processos não convencionais a eletroerosão, usinagem química, usinagem a jato d'água, etc (SANTOS; SALES, 2004).

Entretanto, apesar de o processo de usinagem ser composto apenas por duas etapas, é um processo muito complexo devido à dificuldade de definir a combinação ideal dos parâmetros.

4.2 FRESAMENTO

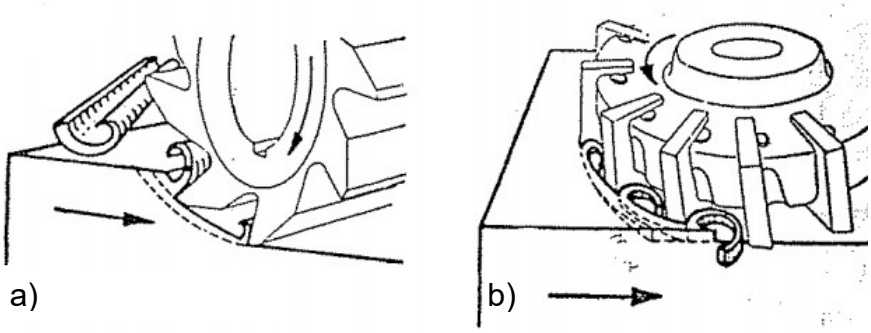
Dentre os processos de usinagem, o fresamento é extremamente versátil, pois permite a obtenção de perfis, rasgos, superfícies planas, ranhuras, etc. Essas superfícies surgem devido à atuação intermitente de ferramentas, geralmente multicortantes, que giram ao mesmo tempo em que a peça se movimenta sob uma trajetória qualquer (FERRARESI, 1969).

As ferramentas de corte mais utilizadas no fresamento são as fresas e a máquina-ferramenta responsável por possibilitar o movimento relativo entre a superfície usinada e as fresas é denominada fresadora (STEMMER, 1995).

Conforme a disposição das arestas ativas da ferramenta de corte, o processo de fresagem pode ser classificado em dois tipos (STEMMER, 1995):

- Fresagem periférica ou tangencial: conforme ilustrado na Figura 1. a), o eixo de rotação da ferramenta é paralelo à superfície usinada e essa é gerada pelas arestas cortantes localizadas no perímetro do corpo da ferramenta.
- Fresagem de topo ou frontal: conforme ilustrado na Figura 1. b), o eixo de rotação da ferramenta é perpendicular à superfície usinada e essa é gerada pela combinação dos movimentos das arestas cortantes localizadas no perímetro e na face frontal da ferramenta.

Figura 1 - Fresagem: a) periférica. b) frontal.

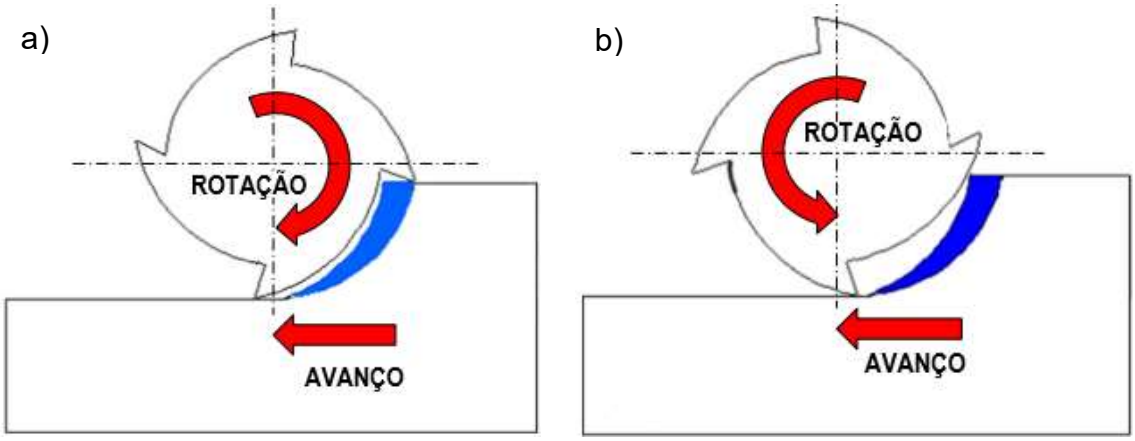


Fonte: Stemmer (1995).

No fresamento, a remoção do sobremetal ocorre por meio da combinação do movimento rotativo da fresa e do movimento linear de avanço da peça a ser trabalhada e, conforme a relação entre ambos, a fresagem também é classificada em (LAAMOURI *et al.*, 2019):

- Concordante: o sentido de rotação da fresa e de avanço da peça são coincidentes (Figura 2. a).
- Discordante: o sentido de rotação da fresa e de avanço da peça são contrários (Figura 2. b).

Figura 2 – Fresamento: a) concordante. b) discordante.



Fonte: Adaptado de Laamouri *et al*. (2019).

Segundo Dib, Benjamin, Jasinevicius (2015) no fresamento concordante, as forças atuantes pressionam a peça contra a mesa e a espessura do cavaco decresce. Em máquinas-ferramentas em que o sistema de avanço é fuso-porca, esse método pode ocasionar vibrações e movimentos irregulares devido às folgas presentes com o passar do tempo, diminuir a vida útil da ferramenta e afetar a qualidade da superfície gerada, mas esse inconveniente é corrigido utilizando-se fusos de elementos rolantes e todo o contato entre fuso e porca é dado por eles. A Figura 3 ilustra um fuso de esferas recirculantes.

Figura 3 - Fuso de esferas recirculantes.

Fonte: Rexroth (2021).

No movimento discordante, a espessura de corte é crescente criando um grande atrito com consequente encruamento e aumento de dureza da superfície e as forças de usinagem tendem a desafixar a peça da mesa, mas como essas forças são contrárias às possíveis folgas, essa configuração acaba sendo a mais indicada em máquinas que operam com o sistema fuso-porca de avanço (ALMEIDA, 2019).

4.2.1 Principais variáveis do processo de fresamento

O processo de fresamento, assim como todos os outros processos de fabricação, depende de variados parâmetros que, corretamente combinados, geram a superfície desejada. De acordo com Ferraresi (1969), alguns desses parâmetros são:

- Velocidade de corte (v_c) [m/min]: é a velocidade instantânea em um dado ponto de referência na aresta cortante da fresa.
- Avanço (*f*) [mm]: é distância percorrida em cada revolução da fresa.
- Número de dentes (Z): quantidade de dentes que a fresa possui.
- Diâmetro (D) [mm]: diâmetro externo da fresa.
- Rotação (n) [rpm]: quantidade de revoluções da fresa por unidade de tempo.

Matematicamente dada pela Equação 1:

$$n = \frac{v_c.10^3}{D.\pi} \qquad 1$$

Em que:

v_c: velocidade de corte [m/min].

D: diâmetro da fresa [mm].

- Avanço por dente (f_z) [mm/volta]: é a distância percorrida por cada dente da fresa em uma volta completa.
- Velocidade de avanço (v_f) [mm/min]: é a distância percorrida em cada revolução da fresa por unidade de tempo. Matematicamente, é dada pela Equação 2:

$$v_f = f_z.z.n \qquad 2$$

Em que:

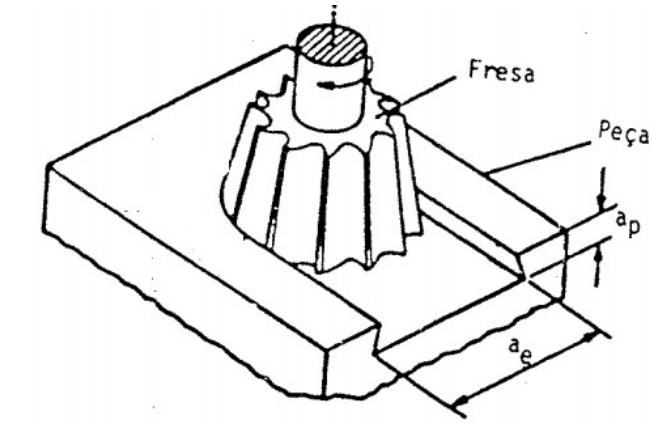
f_z: avanço por dente [mm].

Z: número de dentes da fresa.

n: rotação [rpm].

- Profundidade de corte (a_p) [mm]: é a profundidade ou largura de penetração da aresta principal de corte.
- Penetração de trabalho (a_e) [mm]: é a espessura de corte em cada volta da fresa.

Figura 4 - Esquemático da profundidade de corte (a_p) e espessura de penetração (a_e) no fresamento frontal.



Fonte: Adaptado de Stemmer (1995).

4.3 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE

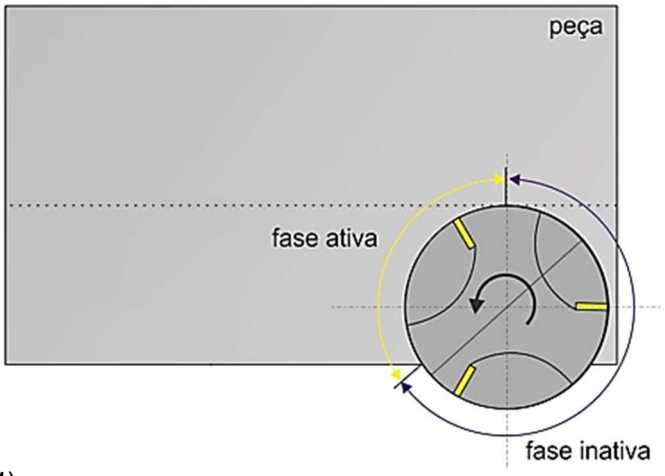
O material da ferramenta de corte influencia muito no desempenho durante a usinagem. Manter a resistência ao desgaste à altas temperaturas e altas taxas de compressões e ter longa vida são características desejáveis a todas as ferramentas, independente da aplicação (REIS, 2015).

De maneira resumida, Machado *et al.* (2015) afirma que, para a remoção do material da peça, a ferramenta deve possuir maior dureza e resistência mecânica que a mesma, mas devido aos diversos esforços térmicos e mecânicos presentes na usinagem, há outras propriedades desejáveis, tais como: ser inerte quimicamente, manter propriedades em altas temperaturas, ser resistente aos impactos, aos esforços de compressão e cisalhamento, aos choques térmicos, etc.

Segundo Amorim (2002), as ferramentas utilizadas em processos de corte interrompido estão mais suscetíveis a avarias e falhas catastróficas devido às oscilações de temperatura e esforços existentes. No fresamento, por exemplo, há duas fases: a ativa e a inativa (Figura 5), na primeira, a fresa é aquecida e submetida

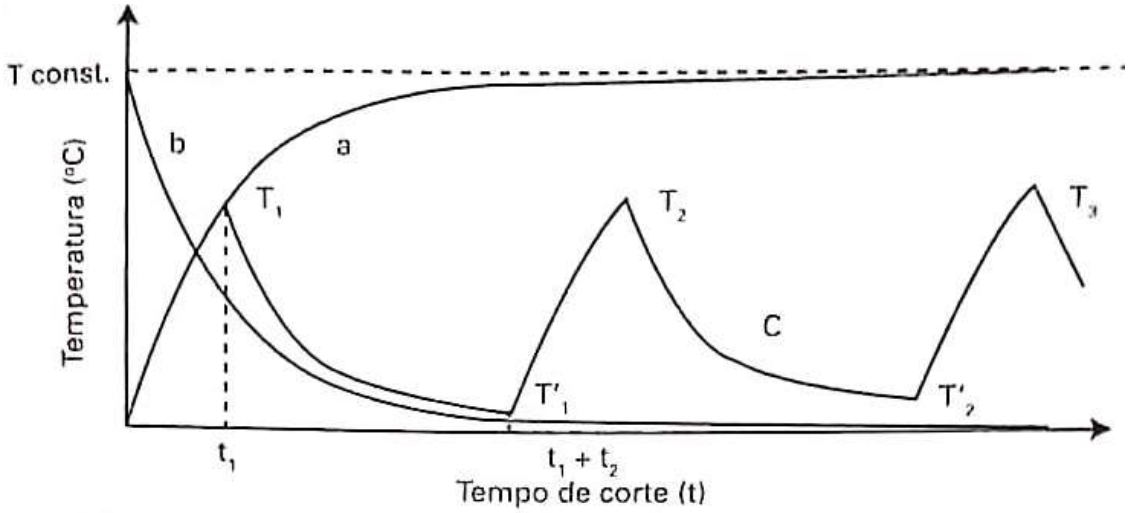
a forças e, na segunda, é resfriada e trabalha em vazio, originando assim as oscilações térmicas (Figura 6) e mecânicas (MONTALVÃO, 2014).

Figura 5 - Representação da fase ativa e inativa no fresamento.



Fonte: Montalvão (2014).

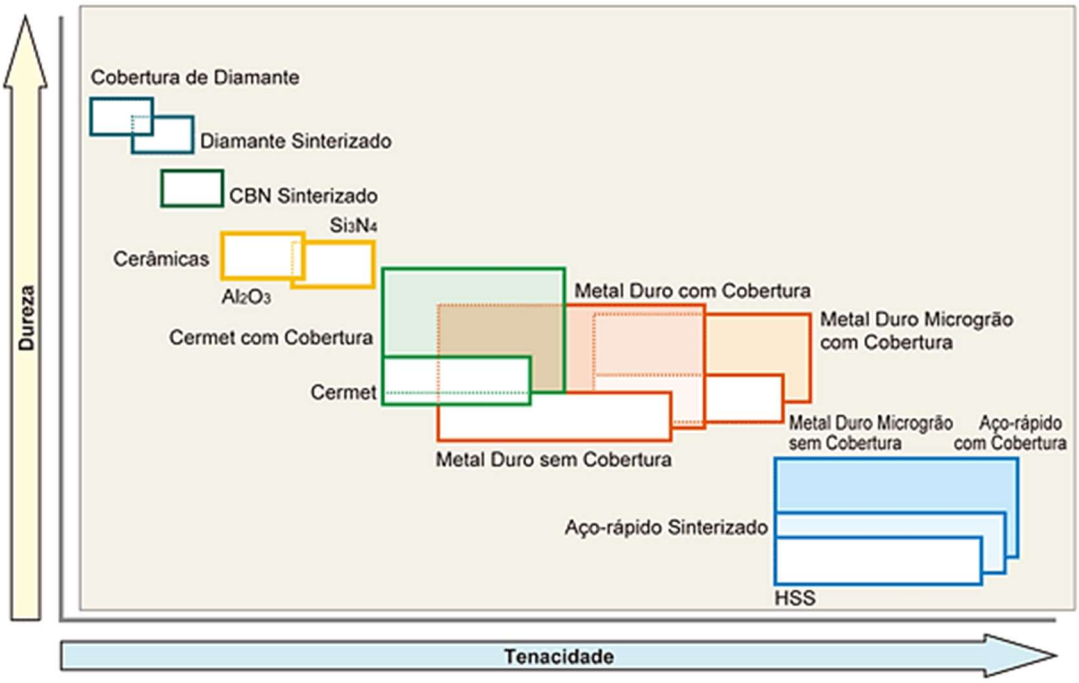
Figura 6 - Oscilações térmicas no fresamento.



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

É impossível possuir todas as características citadas em um único material. A Figura 7 ilustra a relação entre duas propriedades essenciais, dureza e tenacidade, e exemplifica que, muitas vezes, ao priorizar uma propriedade, automaticamente, suprimimos outras. A seleção de uma ferramenta de corte é criteriosa devendo o operador optar pela ferramenta mais adequada à aplicação (MENDES, 2019).

Figura 7 - Relação dureza x tenacidade de materiais para ferramentas de corte.



Fonte: Mitsubishi (2022).

4.3.1 Aço rápido

Em comparação às ferramentas de aço carbono que eram frágeis, perdiam rapidamente a dureza quando aquecidas e operavam a velocidades de corte em torno de 3 a 5 m/min, as ferramentas de aço rápido são capazes de usinar a velocidades até 10 vezes maiores e, por isso foram denominados “rápidos” ou HSS (High Speed Steel). Com o desenvolvimento de novos materiais essa velocidade tornou-se baixa, porém as ferramentas HSS permanecem firmes no mercado (MACHADO *et al., 2015).*

A utilização de HSS destaca-se em produção em massa, pois são versáteis e de ótimo custo benefício. Devido a sua grande utilização, pesquisas têm sido realizadas a fim de desenvolver novos produtos e aprimorar os já existentes. A fabricação por metalurgia do pó e revestimentos gerou ferramentas mais resistentes, duráveis e eficientes ampliando ainda mais sua gama de utilização (DORMER PRAMET, 2018).

4.4 AÇOS

Aços são ligas metálicas à base de ferro e carbono utilizadas em diversas aplicações devido a características como ductilidade, resistência mecânica, condutividade térmica e elétrica, durabilidade, entre outras, podendo essas serem modificadas por alterações em sua composição química, deformação a quente e a frio, tratamentos térmicos e termoquímicos. Como sua matéria-prima, o minério de ferro, é facilmente encontrado na crosta terrestre e seu custo de extração, beneficiamento e fabricacação são relativamente baixos, os aços são muito abundantes em todas as áreas das indústrias (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

De acordo com o Instituto Aço Brasil (2021), o Brasil lidera o ranking de produção de aço bruto na América Latina, tendo uma participação maior que 50% quando comparado aos demais países (Tabela 1) e está em 9ª posição no ranking mundial com um aumento de produção de, aproximadamente, 23% em relação ao mesmo período do ano de 2020 (Tabela 2).

Tabela 1 - Produção de aço bruto da América Latina.

Pais / Country	2º Trimestre / 2nd Quarter			Acumulado até o trimestre/ Year to date			Participação/ Share 2021 (%)
	April/ April	Maio/ May	Junho/ June(*)	2021 (*)	2020 (*)	(%)	
Brasil / *Brazil*	**3.046**	**3.136**	**3.073**	**17.963**	**14.568**	**23,3**	**55,7**
Mexico / *Mexico*	1.623	1.692	1.640	9.437	8.121	16,2	29,2
Argentina	346	391	400	2.263	1.471	53,8	7,0
Colômbia / Colômbia	118	76	115	692	492	40,6	2,1
Chile	108	115	105	644	560	15,1	2,0
Peru	97	109	95	590	290	103,6	1,8
Equador / Ecuador	49	51	50	303	234	29,6	0,9
Guatemala	25	24	25	150	113	21,7	0,5
Cuba	18	18	20	111	83	33,1	0,3
El Salvador	8	8	10	53	38	39,5	0,2
Uruguai / Uruguay	5	4	5	31	22	40,8	0,1
Venezuela	2	2	5	31	16	89,3	0,1
Paraguai / Paraguay	1	1	1	7	8	(9,0)	0,0
Total	**5.447**	**6.628**	**5.544**	**32.274**	**26.015**	**24,1**	**100,0**

Fonte: Adaptado de Instituto Aço Brasil (2021).

Tabela 2 - Produção mundial de aço bruto.

Pais / Country	2º Trimestre / 2nd Quarter			Acumulado até o trimestre/ Year to date			Participação/ Share 2021 (%)
	April/ April	Maio/ May	Junho/ June (*)	2021 (*)	2020 (*)	(%)	
China	97.850	99.450	93.880	560.191	506.010	10,7	56,0
Índia / *India*	9.390	9.050	9.362	57.930	44.103	31,4	5,8
Japão / *Japan*	7.819	8.420	8.108	48.057	42.223	13,8	4,8
EUA / *USA*	7.130	7.369	7.144	42.037	36.399	15,5	4,2
Rússia / *Russia*	6.360	6.559	6.350	38.227	35.233	8,5	3,8
Coréia do Sul / *South Korea*	5.753	5.880	5.969	35.196	32.493	8,3	3,5
Alemanha / *Germany*	3.361	3.661	3.421	20.621	17.457	18,2	2,1
Turquia / *Turkey*	3.290	3.235	3.355	19.705	16,338	20,6	2,0
Brasil / *Brazil*	**3.046**	**3.136**	**3,073**	**17.963**	**14.568**	**23,3**	**1,8**
Irã / *Iron*	2.470	2.550	2.470	14.990	13.886	8,0	1,5
Itália / *Italy*	2.056	2.210	2.179	12.738	10.111	26,0	1,3

Fonte: Adaptado de Instituto Aço Brasil (2021).

4.4.1 Classificação dos aços

A diversificação dos aços é imensa. Eles se diferenciam pela forma e disposição dos grãos e, principalmente, por sua composição química que pode ser alterada de acordo com a aplicação por meio da inserção de elementos químicos específicos (FERRAZ, 2003).

Pannoni (2021) classifica os aços em carbono comuns e ligados: os comuns são aqueles que contêm de 0,008% a 2,11% de carbono, além dos elementos residuais e os aços ligados que possuem outros elementos de liga e/ou apresenta elementos residuais acima do considerado normal.

Os aços carbonos comuns são subdivididos da seguinte forma:

- Baixo carbono: apresentam até 0,3% de carbono;
- Médio carbono: apresentam entre 0,3% e 0,7% carbono;
- Alto carbono: apresentam mais que 0,7% de carbono.

Já os aços carbono ligados, podem ser subdivididos em aço de baixa liga, que contém menos de 8% de elementos de liga e os de alta liga, que possui mais que 8%.

A classificação dos aços é regida por normas SAE (Society of Automotive Engineers International), ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), entre outras. A norma SAE baseia-se numa numeração que corresponde às composições específicas: os dois primeiros dígitos identificam os teores de liga e os dois últimos, o percentual de carbono dividido por 100. Por exemplo: os aços com aproximadamente 1,75% Mn são identificados como 13XX; os aços com 0,25% Mo, como 40XX e, o aço SAE 1020, utilizado neste trabalho, é identificado pelos algarismos “10” que sinalizam que se trata de um aço carbono comum e os algarismos “20” que indicam 0,2% de carbono (DIFERRO, 2021).

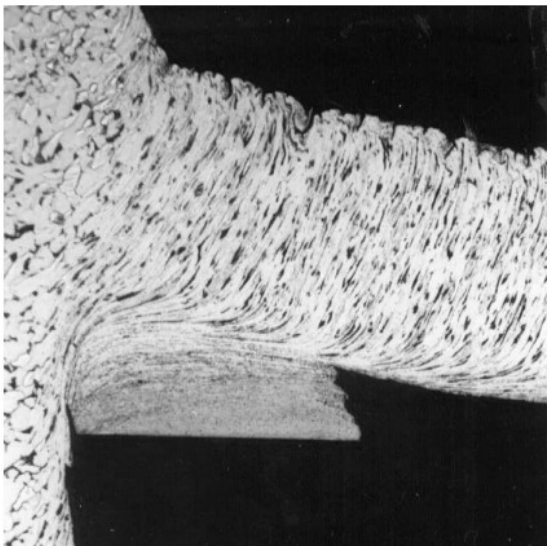
O aço 1020 possui de 0,18 – 0,23% de C, 0,3 – 0,6% de Mn, 0,04% de P e 0,05% de S, sendo utilizado em parafusos, engrenagens e demais peças que não exijam alta resistência mecânica. Ele é muito tenaz e responde bem a tratamentos térmicos para elevar dureza com custo-benefício melhor comparado a outras ligas (AÇOSPORTE, 2022).

4.5 ARESTA POSTIÇA DE CORTE

A aresta postiça de corte, APC, ocorre na interface cavaco/ferramenta geralmente em situações de baixas velocidades de corte. Ela modifica a aresta cortante e, consequentemente, influencia nas forças de corte, potência consumida, acabamento, entre outros (METALS HANDBOOK, 1989).

Esse fenômeno surge devido à deposição de material encruado, da peça, sobre a aresta de corte da ferramenta (Figura 8). (CORRÊA, 2014)

Figura 8 - Aresta postiça de corte.



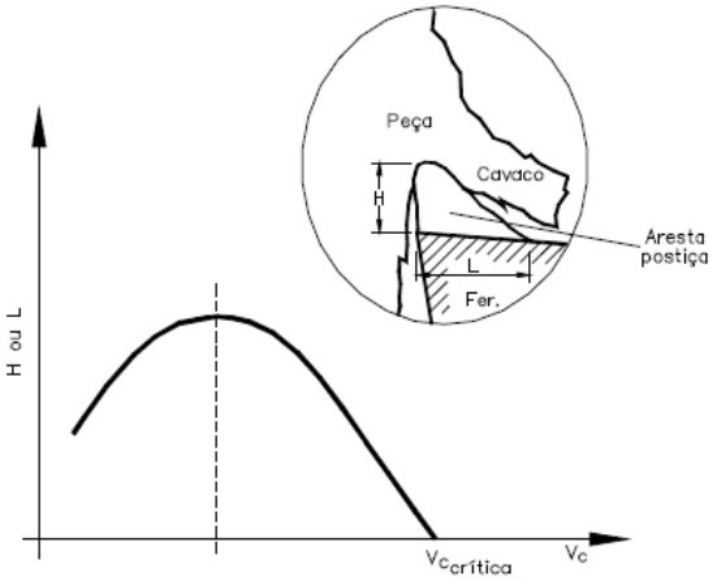
Fonte: Trent, Wright (2000).

Machado *et al.* (2015) obtiveram evidências de que não há movimento relativo entre a parte inferior do cavaco e a superfície de saída, formando um corpo contínuo durante sua ocorrência.

Diniz, Marcondes, Coppini (2008) afirmam que camadas de cavaco se sobrepõem sucessivamente ocasionando encruamento das camadas anteriores deformando-as e tornando-as mais resistentes até o momento em que a tensão cisalhante seja suficiente para romper a APC.

A velocidade de corte influencia diretamente na formação da APC. A Figura 9 ilustra que a APC cresce gradualmente, atinge um valor máximo e desaparece ao atingir uma velocidade crítica. O avanço também interfere na APC, pois diminui a velocidade crítica conforme o seu aumento (FERRARESI, 1969).

Figura 9 - Influência da velocidade de corte na formação da APC.



Fonte: Ferraresi (1969).

4.6 RUGOSIDADE

Por mais que, macroscopicamente, uma superfície seja lisa, durante todo e qualquer processo de usinagem, a atuação da ferramenta deixa sulcos na peça trabalhada o que influencia diretamente no acabamento superficial da mesma. Essas reentrâncias podem influenciar nos níveis de desgaste de peças móveis, na velocidade dos processos de corrosão, concentração de tensão, entre outros (MACHADO *et al.*, 2015; ALMEIDA, 2019). A rugosidade é uma forma de medir as variações de relevo geradas nas diversas superfícies e, segundo Hammes, Rosa, Walker (2017), é a variável mais importante para verificar se o acabamento do componente está dentro dos padrões de qualidade e de tolerâncias aceitáveis. Ela é medida, em mícrons (μm), por meio de um equipamento denominado rugosímetro.

Para efetuar a medição de um perfil de rugosidade, é necessário conhecer alguns conceitos, tais como linha média, comprimento inicial, comprimento de amostragem e comprimento de avaliação, definidos de acordo com Novaski (2014) da seguinte maneira:

- Linha média (l_m): é uma linha paralela à direção do perfil no comprimento de avaliação de uma forma com que a soma das áreas superiores e inferiores sejam iguais.
- Comprimento inicial (l_v): é a primeira parte apalpada, porém não é utilizada na medição e sim, na estabilização do rugosímetro.
- Comprimento de avaliação (l_n): é o trecho realmente utilizado na medição, projetado sobre a linha média. É dividido em cinco partes denominadas comprimento de amostragem (l_e).

A definição do comprimento de amostragem interfere na confiabilidade dos dados medidos pelo rugosímetro por isso, segundo Machado *et al.* (2015), os seguintes valores são recomendados (Tabela 3).

Tabela 3 - Comprimentos de amostragem recomendados.

Ra (μm)	Comprimento de amostragem (mm)	Comprimento de avaliação (mm)
Até 0,002	0,08	0,4
De 0,02 a 0,1	0,25	1,25
De 0,1 a 2	0,8	4
De 2 a 10	2,5	12,5
De 10 a 80	8	40

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

Existem variados parâmetros de rugosidade, alguns deles são:

- Rugosidade média (Ra): é a média aritmética das ordenadas Z(x), dadas pelas alturas dos picos (Z_p) e profundidades dos vales (Z_v), no comprimento de amostragem (NBR ISO 4287, 2002). Esse parâmetro é de fácil medição, mas fornece apenas uma descrição geral das variações de altura não descrevendo o estado real da superfície (GADELMAWLA *et al.*, 2002).

Matematicamente definida pela Equação 3.

$$Ra = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|Z(x)| \qquad 3$$

Em que n é o número de ordenadas consideradas.

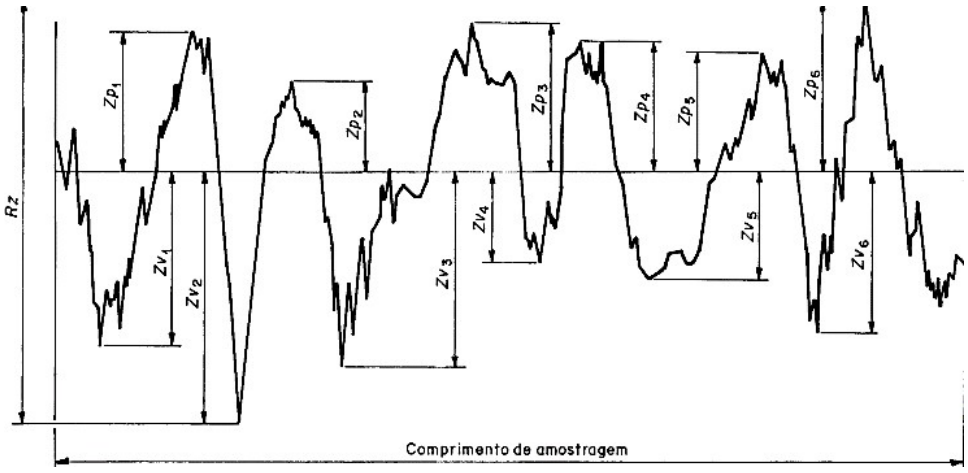
- Desvio médio quadrático (Rq): é o desvio médio do perfil de rugosidade, o que o torna mais sensível a variações em relação à linha média quando comparada com a rugosidade média (GADELMAWLA *et al.*, 2002). Matematicamente encontrado pela Equação 4.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Z^2(x)} \qquad 4$$

Em que n é o número de ordenadas consideradas.

- Rugosidade máxima do perfil (Rz): é a soma da altura máxima dos picos e a maior profundidade dos vales presentes no comprimento de amostragem. (NBR ISO 4287, 2002).

Figura 10 – Representação de Rz.



Fonte: NBR ISO 4287 (2002).

4.7 FLUIDO DE CORTE

Durante a usinagem, praticamente toda a potência consumida se transforma em calor e distribui-se entre cavaco, peça, ferramenta e meio-ambiente. As porcentagens dissipadas e absorvidas por cada um variam conforme os parâmetros de usinagem, material da peça e da ferramenta, tipo de usinagem, entre outros, mas, de modo geral, maior parte da energia gerada, de 60 a 80% é dissipada pelo cavaco, 10 a 20% pela peça e o restante, cerca de 10%, pela ferramenta. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008; AKHIL *et al.,* 2016). Apesar de a quantidade de calor absorvida pela ferramenta ser pequena, as regiões em que ele é distribuído também são pequenas, por isso, desenvolvem-se ali altas temperaturas que interferem diretamente no desgaste da

ferramenta, podendo ocasionar trincas, sulcos, fraturas, deformação plástica nas arestas cortantes, alterações no acabamento e dimensões da peça devido à dilatação térmica, alterações estruturais, corrosão, etc. Os fluidos de corte surgiram exatamente para amenizar os efeitos indesejáveis citados. Sua primeira utilização foi constatada por Taylor, em 1980, que ao utilizar água reduziu a temperatura e conseguiu aumentar a velocidade de corte em 33% sem danos à ferramenta (LISBOA; MORAES; HIRASHITA, 2013).

De acordo com Diniz, Marcondes, Coppini (2008), as principais funções dos fluidos de corte são:

- Refrigeração: atua na extração do calor produzido durante os processos, principalmente naqueles em que altas velocidades de corte são utilizadas.
- Lubrificação: esse efeito prevalece em baixas velocidades de corte que permitem que o fluido adira-se na interface cavaco ferramenta, atuando na redução do coeficiente de atrito e, consequentemente, diminuindo o calor gerado, os esforços e potências de corte.
- Expulsão de cavaco: dependendo da pressão de fluxo do fluido, ele atua expulsando os cavacos das proximidades, inclusive, em alguns processos como o de furação, os cavacos são expulsos dessa forma.
- Proteção contra corrosão: formam uma camada protetora contra a oxidação na máquina e na peça.

Para Ferraresi (1969), o fluido alcança a interface cavaco-ferramenta através da superfície de saída e/ou da superfície de folga, mas esse processo é inviabilizado quando o fluido não possui resistência suficiente às pressões e temperaturas geradas. Em processos de corte intermitentes, o contato fluido-ferramenta-peça é facilitado, pois na fase inativa, ele se encontra com as superfícies da ferramenta e é levado pela própria às regiões de interesse. Entretanto, a flutuação de temperatura na ferramenta é cíclica podendo causar ruptura por fadiga (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

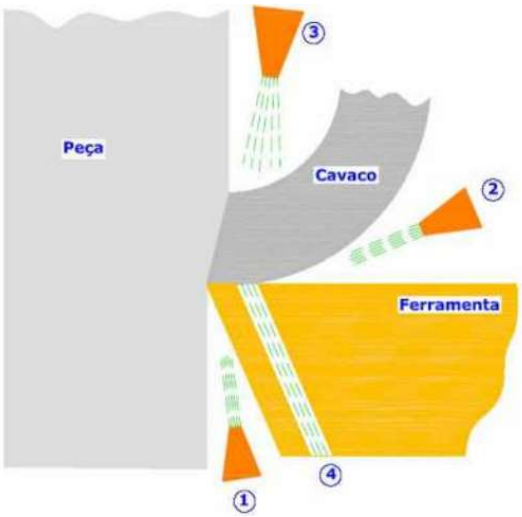
Geralmente, menores temperaturas reduzem o desgaste da ferramenta e podem aumentar sua vida útil, já que a mesma é mais resistente a temperaturas mais baixas, porém com a peça mais fria, a tensão de cisalhamento necessária para formar o cavaco também é aumentada, influenciando assim, na potência de corte consumida. Quanto à peça usinada, a refrigeração não tem muita influência em seu acabamento

superficial. Na verdade, ela passa a ser interessante em operações a baixas velocidades, pois reduz a chance de formação da aresta postiça de corte. (EL BARADIE, 1996).

4.7.1 Métodos de aplicação

Existem várias formas de aplicação do fluido de corte durante a usinagem (Figura 11). Sua vazão, posição e direção são definidas conforme a necessidade de usinagem de forma a expelir os cavacos gerados ou diretamente na região para lubrificar, diminuir temperatura, entre outros (SANTOS; WISLEY, 2007).

Figura 11 - Direções de aplicação do fluido de corte: 1. na superfície de folga; 2. na superfície de saída; 3. sobrecabeça e 4. via canal.



Fonte: Almeida *et al.* (2006).

Segundo Santos e Wisley (2007), os métodos convencionais de aplicação são:

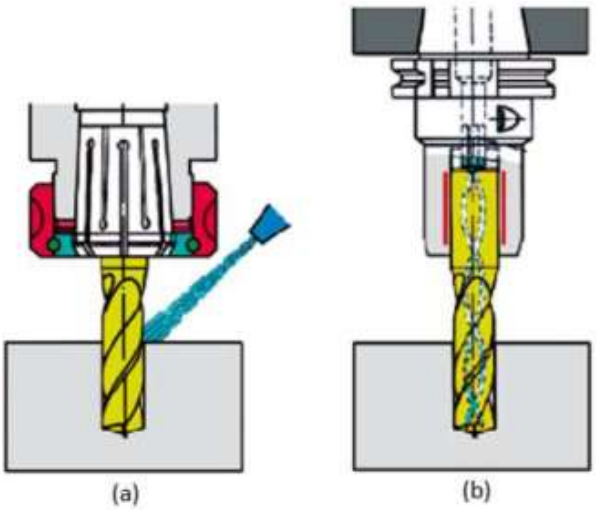
- Fluido de baixa pressão: a aplicação do fluido ocorre de uma só vez e não necessidade de um sistema complexo.
- Mínima quantidade de lubrificante: o fluido é aplicado com o auxílio de ar comprimido, reduzindo muito a quantidade de fluido utilizada.
- Sistema de alta pressão: o fluido é injetado com alta pressão. Esse sistema geralmente utilizado para quebra de cavacos.

4.7.2 Funcionamento do MQL

Nessa técnica, o fluido é transportado por uma corrente de ar comprimido, direcionado e pulverizado na região de interesse (CORREIA; DAVIM, 2006). Esse método reduz muito a quantidade de fluido utilizada, pois utiliza poucos mililitros por hora de usinagem e sua aplicação se dá por meio de orifícios na ferramenta ou externamente em forma de aerossol (DGUV, 2010).

Ribeiro (2017) afirma que a aplicação interna dispõe-se de ferramentas específicas e necessita de um dispositivo para a circulação do fluido dentro da máquina-ferramenta, já a aplicação externa é mais simples sendo indicada para máquinas que não vem com o sistema implementado de fábrica, sendo necessário a adaptação para o funcionamento (Figura 12).

Figura 12 - Aplicações de MQL. (a) aplicação externa. (b) aplicação interna.

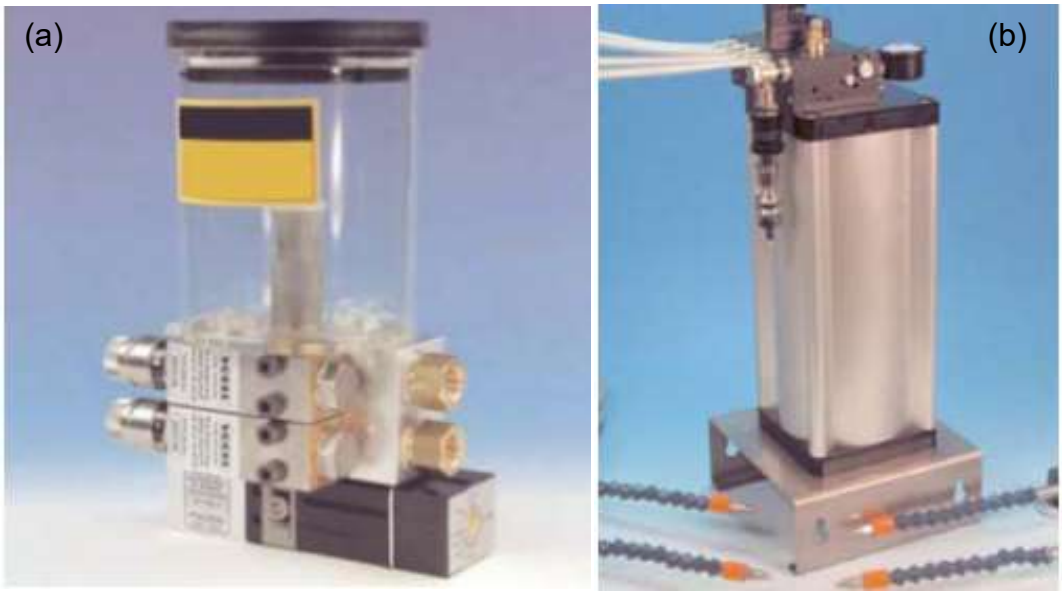


Fonte: DGUV (2010).

DGUV (2010) afirma que há duas formas de aplicação externa e duas formas de aplicação interna. Na aplicação externa:

- Dispositivo com bombas dosadoras: o fluxo é criado por uma pequenina bomba pneumática e é controlado pelo curso e frequência do atuador (Figura 13 (a)).
- Dispositivos com tanque de pressão: o fluido é armazenado em um tanque e seu fluxo é controlado por ajustes na pressão de alimentação do mesmo que o expulsa conforme comandos recebidos. (Figura 13 (b)).

Figura 13 - Métodos de aplicação externa. (a) por bomba. (b) por tanque.



Fonte: Adaptado de DGUV (2010).

Para a aplicação interna temos canal único em que o fluido e o ar são misturados em um tanque fora da máquina e o canal duplo em que a mistura ocorre próximo ao mandril (Tai *et al.*, 2014).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos práticos dessa pesquisa foram realizados no laboratório de fabricação do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), Campus Vitória.

5.1 MATERIAL

O material utilizado nos testes foi o aço SAE 1020. Foram obtidas duas barras quadradas de 101,60 mm de lado e 210 mm de comprimento (Figura 14) na condição laminada. Uma barra foi utilizada para os passes a seco e outra para os passes com MQL.

Figura 14 - Barras utilizadas na obtenção do corpo de prova.

Fonte: autora (2021).

A composição química, descrita no certificado disponibilizado pelo fabricante, está informada na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição em peso do aço SAE 1020 utilizado.

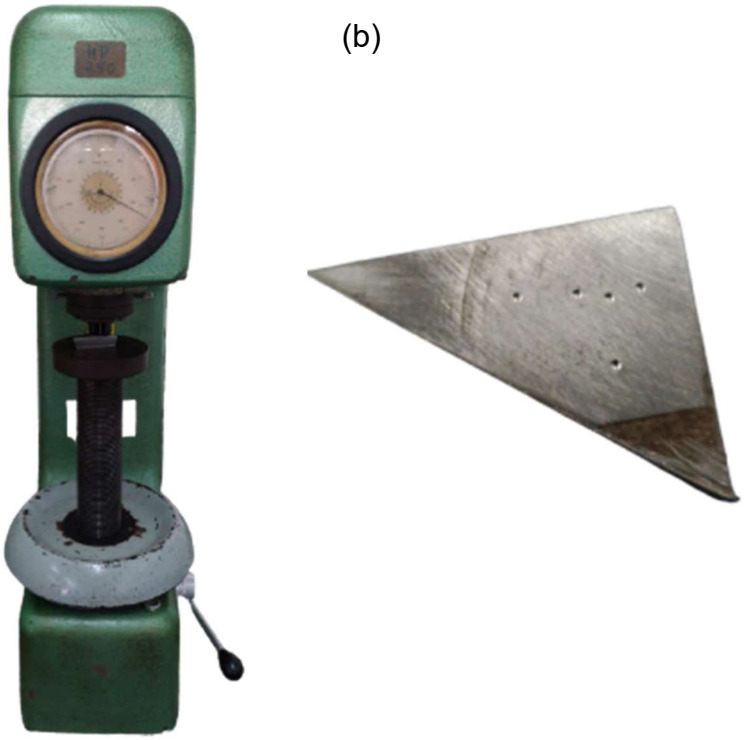
C	Si	Mn	S	P
0,18	0,18	0,48	0,020	0,019

Fonte: Certificado Lirafer (2021).

Sua dureza foi aferida por meio de um durômetro da fabricante WPM, modelo HP 250 (Figura 15). Mensurou-se 5 pontos distintos de uma amostra do material utilizado e obteve-se 60 HRB, 62 HRB, 62 HRB, 62 HRB E 63 HRB, respectivamente resultando em (61,8 ± 1,09) HRB

Figura 15 - Ensaio de dureza. (a) durômetro. (b) amostra.

(a) (b)

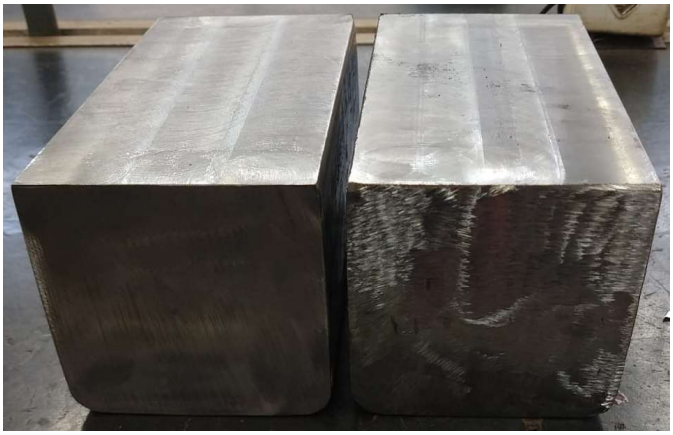


Fonte: autora (2021).

5.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para obtenção dos corpos de prova, foi feito o faceamento no centro de usinagem ROMI D600 por meio do fresamento frontal em três faces: nas duas faces menores, para fins de acabamento e em uma das faces maiores para remover o raio de curvatura a fim de termos uma profundidade de corte uniforme em todos os passes da ferramenta (Figura 16).

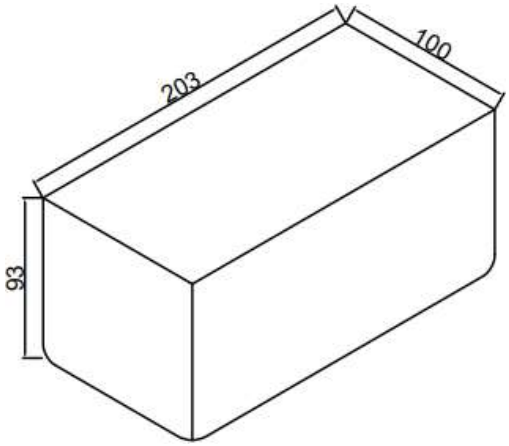
Figura 16- Corpos de prova preparados.



Fonte: autora (2021).

As dimensões de ambos os corpos de prova estão ilustradas na Figura 17.

Figura 17 - Dimensões dos corpos de prova.



Fonte: autora (2021).

5.3 EQUIPAMENTOS

5.3.1 Centro de usinagem

A preparação dos corpos de provas e todos os testes realizados nos mesmos foram feitos no Centro de Usinagem Vertical CNC, marca ROMI, modelo D600, motor principal de 15 kW, três eixos, rotação máxima de 8000 rpm (Figura 18).

Figura 18 - Centro de Usinagem utilizado.

Fonte: autora (2021).

5.3.2 Ferramenta

Os testes foram realizados com duas fresas de topo: uma para cada corpo de prova, da fabricante Vonder, de aço rápido, 16 mm de diâmetro e quatro arestas de corte (Figura 19).

Figura 19 - Ferramenta de corte utilizada nos testes.

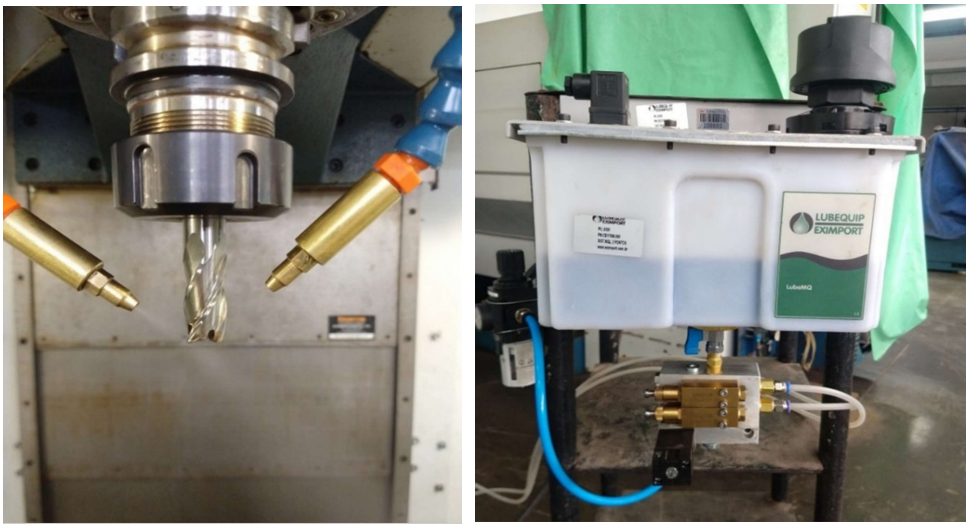
Fonte: autora (2021).

5.3.3 Sistema de aplicação do fluido de corte

O fluido de corte utilizado foi o sintético da marca Rocast Perfecition que possui alto poder lubrificante e de refrigeração. A aplicação do fluido de corte pela técnica da

mínima quantidade de líquido MQL foi feita através de um dispositivo dosador da marca LUbeMQ, regulado com uma vazão de óleo de 240 ml/h, com um fluxo de ar com 0,5 MPa de pressão, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Aplicação externa por dispositivo com bombas dosadoras.



Fonte: autora (2021).

5.3.4 Rugosímetro

Os parâmetros de rugosidade foram medidos utilizando um rugosímetro portátil digital, marca Mitutoyo, modelo SJ-210, com resolução de 0,01 µm, Figura 26. Para efeito estatístico, foram realizadas três medições em pontos distintos da superfície usinada. Antes de cada medição, a superfície usinada foi limpa para retirada dos resíduos provenientes do fluido de corte. Foram utilizados *Cut-off* de acordo com a norma NBR ISO 4287 (2002). Para os valores de rugosidade Ra entre 2 µm até 10 µm, foi utilizado um *Cut-off* de 2,5 mm e entre 0,1 µm a 2 µm um *Cut-off* de 0,8 mm.

Figura 21 - Rugosímetro portátil SJ-210.

Fonte: autora (2021).

Antes de sua utilização, o rugosímetro foi calibrado (Figura 22), seguindo as orientações do fabricante.

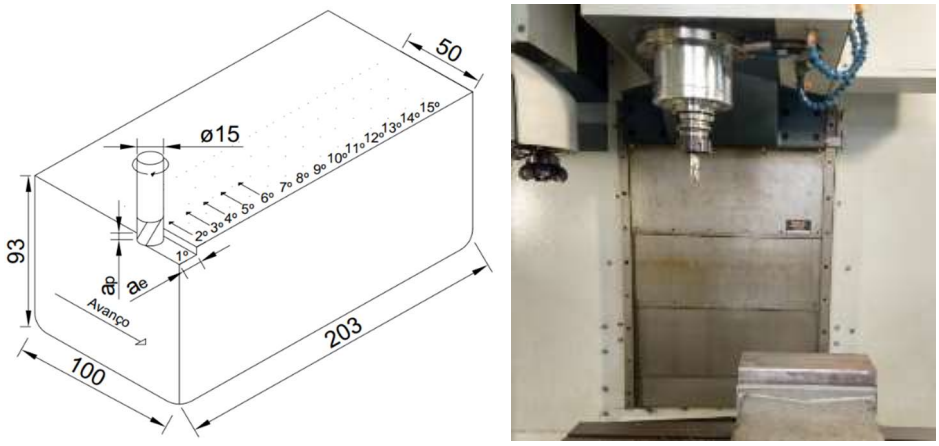
Figura 22 - Calibração do rugosímetro.

Fonte: autora (2021).

5.4 ENSAIOS

Em cada corpo de prova foram realizados 25 passes no sentido discordante com penetração de trabalho (a_e) de 75% do diâmetro da fresa e profundidade de corte (a_p) de 1 mm. Os primeiros 15 passes foram realizados em um dos lados, como ilustrado na Figura 23.

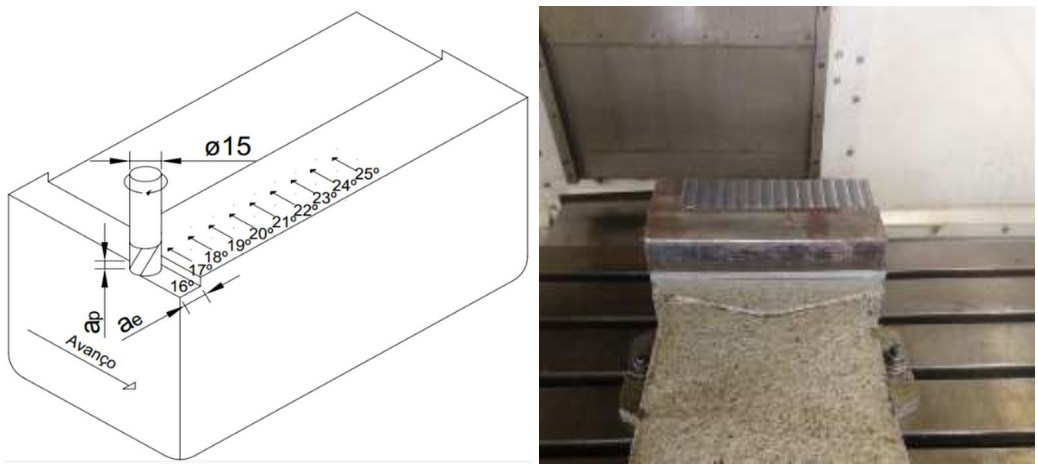
Figura 23 – Primeiras trajetórias da ferramenta.



Fonte: autora (2021).

Em seguida o corpo de prova foi retirado da morsa, girado e fixado novamente, para assim, realizarmos os 10 passes restantes (Figura 24).

Figura 24 - Últimas trajetórias da ferramenta.



Fonte: autora (2021).

Os 25 passes realizados no corpo de prova a seco estão exibidos na Figura 25. A mesma configuração foi gerada para o corpo de prova usinado com MQL.

Figura 25 - Trajetórias no corpo de prova.

Fonte: autora (2021).

As velocidades de corte e avanços utilizados são descritos na Tabela 5, resultando nos 25 passes realizados em cada corpo de prova.

Tabela 5 - Velocidades de corte e avanços utilizados.

v_c (m/min)	*f* (mm/volta)
15	0,074
20	0,080
25	0,090
30	0,116
35	0,230

Fonte: autora (2021).

Diniz, Marcondes, Coppini (2008) aconselham não utilizar velocidades de corte inferiores a 150 m/min para prevenir o surgimento da APC, entretanto isso não foi possível nesse estudo devido às ferramentas não suportarem. Dessa forma, possivelmente, a APC esteve presente nos ensaios realizados.

Devido às variações de v_c e de *f* serem pequenas, para explicitar sua influência nos acabamentos, foram selecionados o menor e maior valor da variável analisada no momento, ou seja, para v_c os valores selecionados foram 15 m/min e 35 m/min e, para *f*, foram 0,074 mm/volta e 0,230 mm/volta.

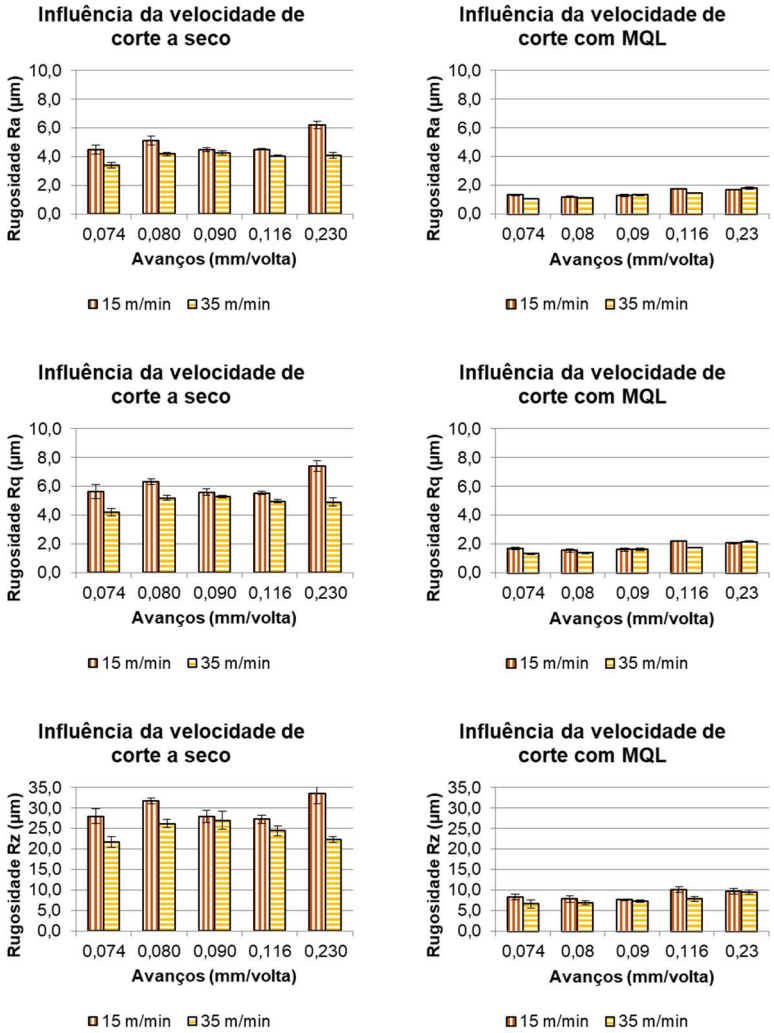
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Para isso, foi analisado como a v_c e o *f* influenciaram nos acabamentos superficiais obtidos nas superfícies usinadas a seco e com MQL e foi realizado um comparativo geral dos passes a seco com os passes com MQL.

6.1 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE NO ACABAMENTO

A Figura 26 exibe os valores das rugosidades Ra, Rq e Rz obtidos nos experimentos para a maior e menor v_c a seco e com MQL em todos os avanços.

Figura 26 – Influência da v_c nas rugosidades a seco e com MQL.



Fonte: autora (2021).

O aumento da velocidade de corte, em quase totalidade das condições, influenciou positivamente nos valores de Ra, Rq e Rz. Analisando a Figura 26, nota-se que, no geral, o aumento da v_c melhorou o acabamento, fato que ficou mais evidente nos passes a seco. A maior diferença foi notada para o avanço de 0,230 mm/volta que foi de 2,131 μm, 2,494 μm e 11,187 μm para Ra, Rq e Rz, respectivamente.

O comportamento apresentado era esperado, pois maiores v_c proporcionam maiores temperaturas que reduzem a resistência ao cisalhamento do material e as forças de usinagem e possibilitam melhores acabamentos (MACHADO *et al.*, 2015).

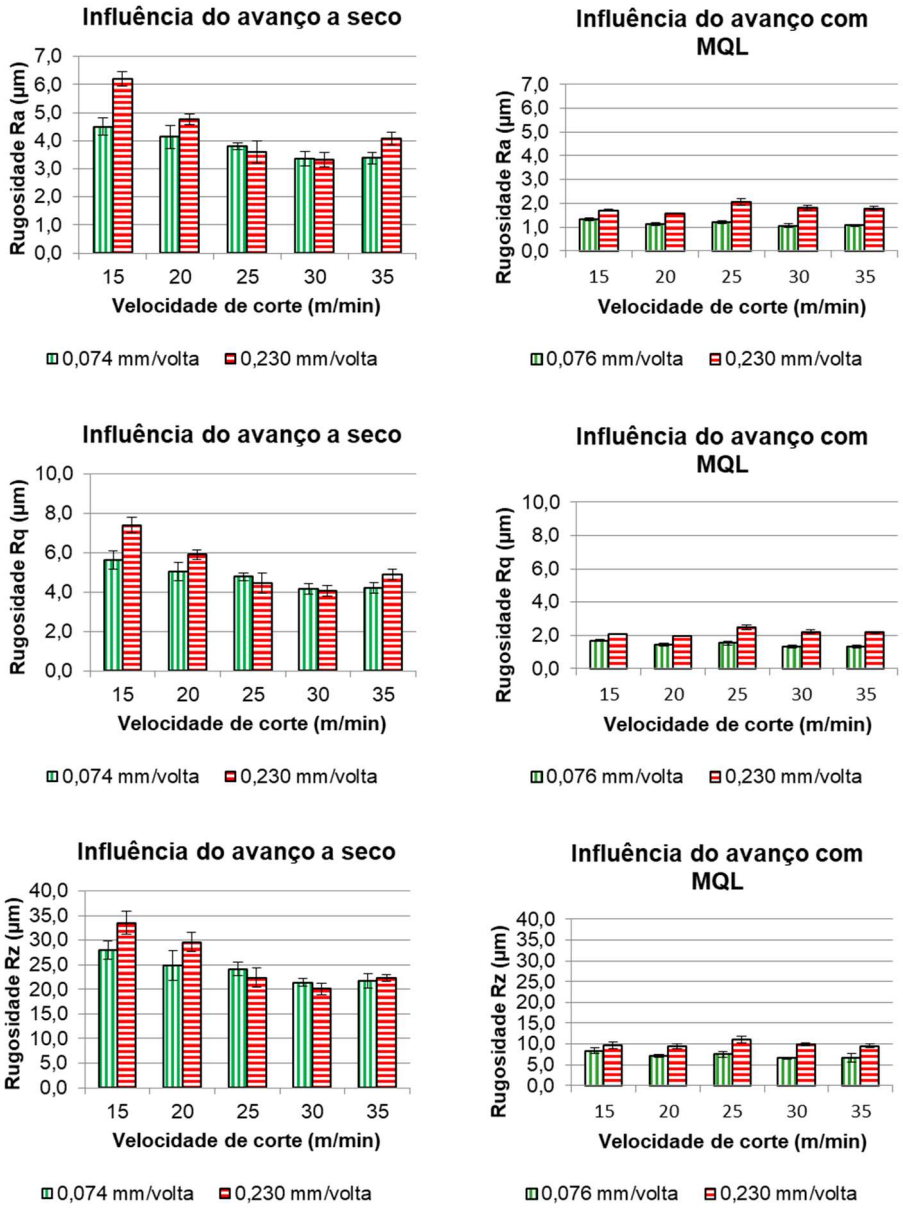
Esse comportamento assemelha-se ao encontrado por Ribeiro (2017) que analisou 4 condições de fluido: a seco, MQL naftênico, MQL parafínico e jorro, com diversas combinações de velocidade e profundidade de corte e avanços por dente no fresamento do aço SAE 8640 e sua influência nas forças e rugosidades. O autor identificou que mantendo o avanço por dente e profundidade de corte fixos e variando a v_c de 80 m/min para 240 m/min a rugosidade diminuiu significativamente para as 4 condições de fluido.

Soares e Rubio (2015) tornearam um corpo de prova cilíndrico de ferro fundido nodular, GGG40. Os autores avaliaram quais os efeitos das variações de *f* e v_c na emissão acústica, temperatura, força de corte e rugosidade Ra. Foram realizados 16 testes os quais evidenciaram que maiores v_c proporcionam melhores acabamentos.

6.2 INFLUÊNCIA DO AVANÇO NO ACABAMENTO

Para avaliar a influência do avanço no acabamento superficial da peça usinada, os parâmetros de rugosidade Ra, Rq e Rz foram medidos. Foi utilizado apenas o menor avanço (*f*) e a menor velocidade de corte (v_c) a fim de facilitar a visualização dos efeitos, conforme apresentado na Figura 27.

Figura 27 - Influência do avanço nas rugosidades Ra, Rq e Rz a seco e com MQL.



Fonte: autora (2021).

Analisando os resultados apresentados na Figura 27, observa-se que, para a maioria das condições avaliadas, com o aumento do avanço, as rugosidades Ra, Rq e Rz tendem a aumentarem. Nos passes a seco, a influência do avanço ficou mais evidente nas v_c de 15 m/min, de 20 m/min e 35 m/min. Nas velocidades de 25 m/min e 30 m/min o menor avanço gerou maior rugosidade o que pode ter acontecido devido às vibrações da máquina e a possível presença da APC.

Muhl (2019), realizou testes no torneamento do aço ABNT 4340 variando velocidade corte, avanço, profundidade de corte e raio de ponta. Ao tratar e interpretar os dados de Ra, observou-se comportamento semelhante ao encontrado para as v_c de 25 m/min e 30 m/min, ou seja, a rugosidade diminuiu com o aumento do avanço. O autor afirma que isso ocorreu porque a avanços muito baixos, podem existir camadas de material deformado e não removido que prejudicam o acabamento.

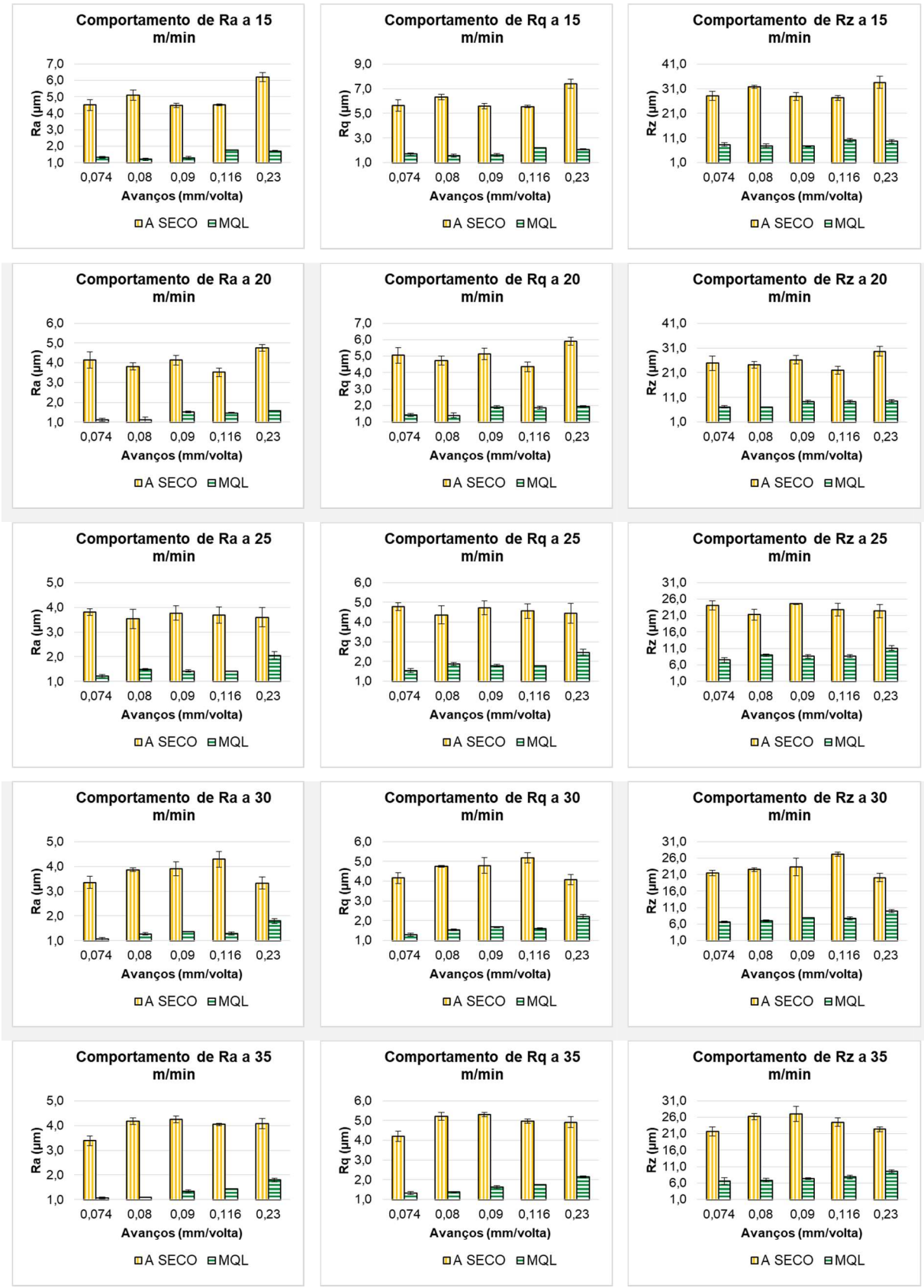
Para os passes com MQL, a influência do avanço ficou mais evidente: para todas as v_c, a rugosidade diminui significativamente. Com maiores avanços, as arestas de corte da ferramenta percorrem a peça menos vezes e aumenta a quantidade de picos na superfície usinada. Aouici *et al.* (2013) testaram combinações distintas de *f*, v_c e ap e analisaram a influência desses parâmetros sobre a rugosidade e força de corte. Os autores afirmaram que com o aumento do avanço, a rugosidade aumenta devido ao acréscimo de sulcos deixados pela ação da ferramenta.

Reis *et al.* (2019) concluiu que, tratando-se de acabamento superficial, o avanço é a variável mais influente. O autor torneou o aço ABNT 4340 com insertos de metal duro e ao aumentar o avanço de 0,16 mm/volta para, aproximadamente, 0,40 mm/volta, a rugosidade saiu de 2 μm e atingiu cerca de 10 μm.

6.3 INFLUÊNCIA DA TÉCNICA MQL NO ACABAMENTO

Na Figura 28, estão representados os resultados dos parâmetros de rugosidade Ra, Rq e Rz em função das condições de lubri-refrigeração (seco e MQL) para todas as condições avaliadas.

Figura 28 - Influência da v_c nas rugosidades Ra, Rq e Rz a seco e com MQL.



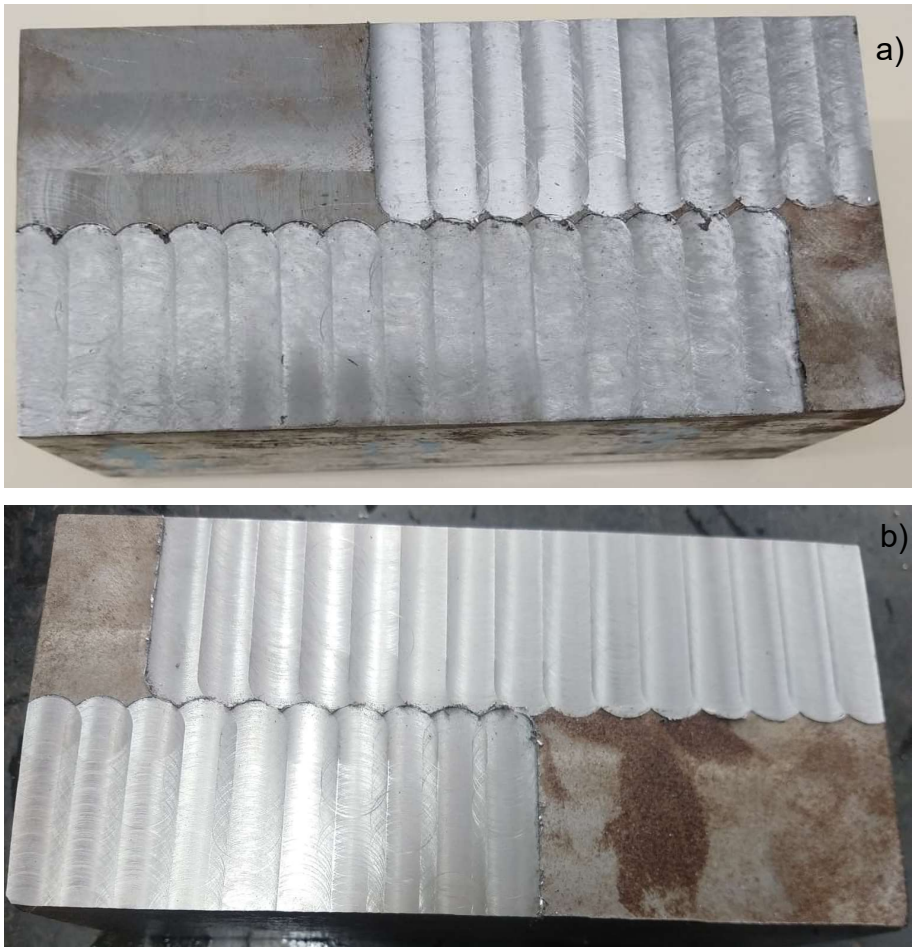
Fonte: autora (2021).

Os valores de rugosidades, apresentados na Figura 28, mostram que a utilização da técnica MQL foi satisfatória, pois, para todos os passes com MQL, os valores de Ra, Rq e Rz medidos foram significativamente menores quando comparados com os passes a seco.

Segundo Coelho e Silva (2018), o fluido de corte modifica o atrito gerado na região cavaco-ferramenta. Quanto mais eficiente for sua penetração e seu efeito lubrificante, maior sua influência na formação dos cavacos.

Os passes com MQL, exibidos na Figura 29 b), geraram uma superfície mais homogênea que os passes a seco ilustrados na Figura 29 a). O lubrificante, provavelmente, atingiu a região cavaco-ferramenta e proporcionou menores coeficientes de atrito, facilitando assim, o escoamento dos cavacos produzidos.

Figura 29 - Aspecto visual dos passes. a) a seco. b) com MQL.



Fonte: autora (2021).

O estudo realizado por Ozbek e Saruhan (2020), no qual foi analisada a influência da técnica MQL no torneamento do aço AISI D2 na temperatura, vibração, desgaste da ferramenta de corte, rugosidade e vida da ferramenta, revelou que a utilização da técnica MQL reduziu o desgaste, temperatura e amplitude de vibração e melhorou significativamente o acabamento (rugosidades, aproximadamente, 89% menores) e mais que duplicou a vida útil das ferramentas utilizadas.

Li e Chou (2010) realizaram microfresamento do aço SKD61 a seco e utilizando a Mínima Quantidade de Lubrificante e compararam o desgaste, formação de rebarbas e acabamento superficial. Os autores concluíram os valores de rugosidades medidos foram influenciados pela MQL e destacam que a diferença entre as Ra medidas foram significativas a partir de comprimentos de corte maiores que 72 mm, chegando a ser 1 μm menor com MQL quando comparado com a usinagem a seco.

7. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados experimentais no fresamento do aço ABNT 1020 nesta pesquisa, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- A influência da velocidade de corte no acabamento superficial foi mais significativa na usinagem a seco.

- A influência do avanço foi mais evidente nos passes com MQL, pois para todas as velocidades de corte utilizadas, o seu aumento piorou o acabamento. Para os passes a seco, o avanço também apresentou esse comportamento para a maioria das condições, para as velocidades de 25 m/min e 30 m/min, o comportamento foi diferente: o aumento do avanço reduziu os valores dos parâmetros de rugosidade.

- A aplicação da mínima quantidade de lubrificante mostrou-se eficaz no processo, pois o acabamento melhora para todas as condições avaliadas.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Verificar se a técnica MQL influencia na rugosidade superficial de materiais que já possuem lubrificantes em sua composição, aços de livre corte, por exemplo.

- Comparar a influência da técnica MQL com a utilização de lubrificantes sólidos no fresamento de topo do aço SAE 1020.

- Realizar ensaio de vida no fresamento de topo com uma ferramenta de aço rápido a seco e com MQL.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇOS ROMAN. **SAE 1020. Aço Carbono Especial – Ligas para Cementação.** 2021. Disponível em: <https://aco.com.br/aco/sae-1020-aco-carbono-especial/>. Acesso em: 25 dez. 21.

AÇOSPORTE COMERCIAL DE AÇOS LTDA. **Aço SAE 1020.** 2022. Disponível em: <https://www.acosporte.com.br/aco-sae-1020>. Acessoa em: 15 jan. 2022.

ADLER, D. P.; HII, W. W. S; MICHALEK, D. J.; SUTHERLAND, J. W. Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated enviromental/health concerns. **Journal Machining Science and Technology.** V. 10, Issue 1. 2006.

AGÊNCIA BRASIL. Produção de aço bruto do Brasil cresce 24% no primeiro semestre. **Diário de Pernambuco.** 22 jul. 2021. Disponível em: <https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/economia/2021/07/producao-de-aco-bruto-do-brasil-cresce-24-no-primeiro-semestre.html>. Acesso em: 07 set. 2021.

AIRES, R. W. A; MOREIRA, F. K.; FREIRE, P.S. Indústria 4.0: desafios e tendências para a gestão do conhecimento. In: SEMINÁRIO UNIVERSIDADES CORPORATIVAS E ESCOLAS DE GOVERNO (SUCEG), 1, 2017, Florianópolis, SC. **Anais**... Florianópolis: SUCEG, 2017. p. 224-247

AKHIL, C. S.; ANANTHAVISHNU M. H.; AKHIL C. K.; AFEEZ P. M.; AKHILESH R.; RAHUL R. . Measurement of Cutting Temperature during Machining. **Journal of Mechanical and Civil Engineering**, v. 13, p. 108-122, 2016.

ALMEIDA, D. O; MACHADO A. R; SUAREZ, M. P; BRITO, D. V. D.; VIEIRA, D. S; SEGATTO, F. Z. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6, 2011, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul. **Influência da utilização de fluido de corte de base vegetal nas forças de usinagem do torneamento do aço ABNT 1050 e estudo do crescimento de microorganismos.** Caxias do Sul, Rio Grande do Sul.

ALMEIDA, D. O; NAVES, V. T. G; MACHADO A. R.; SILVA, M. B. **Influência da direção de aplicação do fluido de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta.** Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, 2006. Disponível em: <http://www.grima.ufsc.br/cobef4/files/011106303.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2022.

ALMEIDA, M. A. M. **Monitoramento das forças e desgaste da ferramenta durante o fresamento concordante e discordante do aço ABNT 4140.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2019.

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2002.

AOUICI H.; YALLESE M.; BELBAH A; AMEUR M. ELBAH M. Experimental investigation of cutting parameters influence on surface roughness and cutting forces in hard turning of X38CrMoV5-1 with CBN tool. **Sadhana,** v. 38, n.3, p 429-445, jun, 2013. Disponível em: https://www.ias.ac.in/public/Volumes/sadh/038/03/0429-0445.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2022.

BAPTISTA, A. L. B. Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços. **Revista Escola de Minas.** Vol. 55. Abr. 2002. Disponível em: <SciELO - Brasil - Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços>. Acesso em: 07 set. 2021.

CALLISTER, W. D; RETHWISCH D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução.** 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO (CBCA). Novo Museu Ipiranga: mais de 120 toneladas de aço. **Revista arquitetura & aço.** Ed. 58. Jan., Fev., Mar, Abr. 2021. p.85. Disponível em: <https://arquiteturaeaco.org.br/ed/58/#p=1>. Acesso em: 07 set. 2021.

Certificado Lirafer. **Lirafer.** 2021.

COELHO, R. T.; SILVA. E. J. **Força e potência de corte em torneamento.** Universidade de São Paulo. Abril, 2018.

CORRÊA, J. G. **Usinabilidade de aço inoxidáveis martensíticos aplicados na indústria de petróleo.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais, 2014.

CORREIA, A. E.; DAVIM J.P. Efeito da lubrificação mínima (MQL – Minimal Quantity of Lubrificant) na maquinagem de uma liga de alumínio. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões.** Portugal, Vol. 13, 2006, p. 27-34.

DEBNATH, S.; REDDY, M.M.; YI, Q.S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 33-47, 2014.

DGUV: German Social Accident Insurance. **Minimun Quantity Lubrification for Machining Operations.** BGI/GUV-/I718E (in German), nov. 2010.

DIB, M. H. M; BENJAMIN, G. M.; JASINEVICIUS, R. G. Uma análise experimental do fresamento discordante e concordante. **Revista Iluminart**, 2015.

DIFERRO Aços Especiais. **Classificação SAE dos aços: entenda como funciona.** 20 mai. 2021. Disponível em: <encurtador.com.br/rCDZ2>. Acesso em: 15 jan. 2022.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 6. ed. São Paulo: Artliber, 2008.

DORMER PRAMET. **O tradicional HSS ainda atende às necessidades de hoje.** 26 jan. 2018. Disponível em <https://www.dormerpramet.com/pt-pt/newssite/pages/traditional-hss-still-meeting-the-needs-of-today.aspx?country=br>. Acesso em: 08 jan. 2022.

EL BARADIE, M. A. C. Cutting fluids, part I: Characterization. **Journal of Materials Processing Technology.** 56 (1996) 786 – 797. Dublin City University. Dublin, Ireland.

EURICH, A. M. **Caracterização da superfície usinada por fresamento de faceamento por meio da rugosidade ao longo da vida da ferramenta.** Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, 2021.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** Vol. 1. São Carlos: Blucher, 1969.

FERRAZ, A. G. K; RIBEIRO T. S. **Revisão integrativa da literatura analisando a influência dos parâmetros de corte no acabamento superficial do aço ABNT 1045 após processo de torneamento.** Monografia, Instituto Federal do Espírito Santo. Aracruz, Espírito Santo, 2021.

FERRAZ, H. O aço na construção civil. **Revista Eletrônica de Ciências Arquitetura e Urbanismo.** 2003. Universidade de São Paulo. São Carlos.

FILHO, F. T. **A utilização de fluido de corte no fresamento de topo do aço inoxidável 15-5PH.** Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2006.

FIRJAN, Federação das Indústrias do Rio de Janeiro. Indústria 4.0: Panorama da Inovação. Abril, 2016.

GADELMAWLA, E.S; KOURA, M.M.; MAKSOUD, T.M.A.; ELEWA, I.M.; SOLIMAN, H.H. Roughness parameters. **Journal of Materials Processing Technology**. V.123, pp 133-145. 2002.

HAMMES, J. M.; ROSA, A. F.; WALKER, E. **Otimização do acabamento superficial no torneamento cilíndrico externo de um aço SAE 1045.** GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, Bauru, Ano 12, nº 2, abr-jun/2017, p. 138-156.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Estatísticas da Siderurgia.** 2º trimestre. 2021.

LAAMOURI, A., GHANEM, F.; BRAHAM C.; SIDHOM, H. Influences of up-milling and down-milling on surface integrity and fatigue strength of X160CrMoV12 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.** 105 (2019) 1209-1228.

Li K.; CHOU S. Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling. **Journal of Materials Processing Technology.** 210 (2010) 2163-2170. National Sun Yat-Sen University, Taiwan.

LISBOA, F. C. D.; MORAES, J. J. B. D.; HIRASHITA, M. D. A. Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências. **XXXIII Encontro nacional de engenharia de produção.** A gestão dos processos de produção e as parcerias globais para o desenvolvimento sustentável dos sistemas produtivos. Salvador, Bahia. 08 a 11 de out. 2013.

MACHADO, A. R; ABRÂO, A. M; COELHO, R, T; SILVA, M, B. **Teoria da Usinagem dos Materiais.** 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MENDES, H. D. O. **Otimização de parâmetros de corte no processo de torneamento CNC.** Dissertaçãoi de mestrado. Instituto politécnico de Bragança, escola superior de tecnologia e gestão. Out. 2019.

METALS HANDBOOK. **Machining.** 9 ed. v. 16. ASM International, 1989.

MITSUBISHI MATERIALS. **Materiais para ferramenta de corte.** 2022. Disponível em <http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/cutting_tool.html>. Acesso em: 08 jan. 2022.

MONTALVÃO, J. A. **Determinação da Usinabilidade dos Aços - Ferramentas N2711M e VPATLAS no Fresamento de Topo**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, 2014.

MUHL, R.T. **Otimização dos Parâmetros de Usinagem de Acabamento Através da Rugosidade no Torneamento do aço ABNT 4340**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, RS, 2019.

NBR ISO 4287 (2002). **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade.**

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2014.

OZBEK. O; SARUHAN. H. The effect of vibration and cutting zone temperature on surface roughness and tool wear in eco-friendly MQL turning of AISI D2. **Journal of Materials Research Technology.** Vol. 9, p. 2762-2772, Jun. 2020.

PANNONI, F. D. **Aços estruturais.** Disponível em: <http://engmarcoantonio.com.br/cariboost_files/A_C3_A7os_estruturais.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2021.

PEREIRA, A; SIMONETTO, E. O. Indústria 4.0: Conceitos e perspectivas para o Brasil. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, Minas Gerais, v.16, n.1, p.1-9 jan./jul. 2018.

REIS, B. C. M.; PEREIRA, N. F. S.; SANTOS, A. J.; CÂMARA, M. A.; FARIA, P. E.; RODRIGUES, P. C. M.; RUBIO, J. C. C. Influência do material da ferramenta de corte sobre a usinabilidade do aço ABNT 4340 no torneamento. **Revista Matéria**, v.24, n.1, 2019.

REIS, R. **Estudo da influência da geometria da cunha da ferramenta de aço rápido na usinagem do aço ABNT 1045 em diferentes condições lubri-refrigerantes.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, 2015.

Rexroth A bosch Company. **Fusos de esfera.** 2014 – 2021. Disponível em: <https://www.boschrexroth.com/pt/br/produtos/grupos-de-produtos/tecnologia-de-acionamento-linear/topicos/fusos/fusos-de-esfera/index>. Acesso em: 09 jan. 2022.

RIBEIRO, A. S; **Aplicação de mínima quantidade de lubrificante no fresamento do aço SAE 8640.** Monografia, Universide de Brasília, Brasília, 2017.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. PUC Minas, 2004.

SANTOS, S. C.; WISLEY, F. S. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais.** 1. Ed. Arliber, 2007.

SENAI. **Usinagem - tecnologia do corte.** Divisão de recursos didáticos da diretoria de educação do departamento regional do SENAI-SP. Vol. 1: Processos mecânicos de usinagem. São Paulo, SP, 1998.

SOARES, C. L.; RUBIO, J. C. C. Torneamento do ferro fundido nodular GGG40: estudo sobre a influência de variáveis essenciais. **V Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção.** Ponta Grossa, Paraná. 02 a 04 dez. 2015.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos e abrasivos.** 2. ed. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.

TAI, B. L; STEPHESON D. A.; FURNESS, R. J.; SHIH. A. J. Minimun Quantity Lubrication (MQL) in Automotive Powertrain Machining. **6th CIRO International Conference on High Perfomance Cutting, HPC2014.** USA, 2014, p.523-528.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting.** 4th ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.