



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* MARACANAÚ
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS

FRANCISCO ROBERTO DE SÁ PEREIRA

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PROCESSO DE USINAGEM POR FRESAMENTO
FRONTAL**

MARACANAÚ, CE

2024

FRANCISCO ROBERTO DE SÁ PEREIRA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PROCESSO DE USINAGEM POR FRESAMENTO
FRONTAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Energias Renováveis.

Linha de pesquisa: Mecânica Aplicada a Conservação do Meio Ambiente. Área de concentração: Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Nélcio Costa Freitas.

MARACANAÚ

2024

FRANCISCO ROBERTO DE SÁ PEREIRA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM PROCESSO DE USINAGEM POR
FRESAMENTO FRONTAL

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

Aprovada em 16/05/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Nélcio Costa Freitas (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Josias Guimarães Batista
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

Prof. Dr. Luís Flávio Gaspar Herculano
Universidade Federal do Ceará - UFC

A Deus.

A minha esposa Katrine Kerla e minhas filhas
Daniela e Ana Letícia.

Aos meus pais, José e Rita que me educaram
com muito amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por derramar suas ricas bênçãos espirituais sobre todos os que o amam e são obedientes a ele.

Aos professores do PPGER, que tem uma atuação formidável e se preocupam com o ensino e aprendizagem desse programa, em especial ao professor Francisco Frederico, Marcelo Parente e Auzuir Ripardo. Meus sinceros agradecimentos.

Ao professor Francisco Nélío orientador dessa pesquisa, pela dedicação, paciência e confiança em minha pessoa, por todas as orientações e contribuições realizadas ao longo desse trabalho.

A todos do IFCE *campus* de Maracanaú, que concederam o suporte necessário com recursos, infraestrutura para desenvolver essa pesquisa, especialmente os professores: Venício Soares, Francisco Oliveira e José Ciro e ao Técnico de Laboratório Pádua.

A minha família, por entender e compreender os momentos intensos de estudos durante todo esse percurso de trabalho.

Aos professores, que muito contribuíram com minha formação acadêmica, agradeço os ensinamentos, as orientações, as lições de vida, os risos, a atenção. Vocês são verdadeiros mestres.

Ao colega e amigo Jean Carlos que sempre com muita paciência e prontidão me ajudou nas dificuldades encontradas durante esse percurso de estudo.

“O temor do Senhor é o princípio da sabedoria”
(Provérbios 9:10).

RESUMO

A expansão das atividades industriais evidencia o crescimento da necessidade de produção de energia elétrica, uma vez que esse tipo de energia é a principal a ser utilizada para tais atividades. A indústria de manufatura contribui para um expressivo consumo de energia elétrica, com destaque para o processo de fabricação por usinagem. Nesse processo de fabricação os equipamentos são os principais consumidores de energia elétrica. Dessa forma é possível melhorar a eficiência energética dessas máquinas, reduzindo o consumo de energia por meio da otimização dos parâmetros de usinagem, uma vez que estudos comprovam que no fresamento, a usinagem representa 65% de consumo de energia. De acordo com o exposto, a presente pesquisa tem como objetivo, avaliar o consumo de energia elétrica do processo de usinagem por fresamento frontal, considerando a variação dos parâmetros de corte em peças fabricadas de aço carbono. Para isso foi realizada a caracterização da composição química dos materiais por meio de espectrometria, a medição da dureza, a determinação dos parâmetros velocidade de corte e avanço para o processo de fresamento frontal. Posteriormente foi feita a avaliação do consumo de energia elétrica através da correlação dos parâmetros de corte com a rugosidade superficial, tempo de corte, força e potência de usinagem, potência elétrica e consumo de energia elétrica. Os resultados mostraram, que a força de usinagem e a rugosidade reduzem, com o aumento da velocidade de corte. Por outro lado, a potência elétrica e a potência de usinagem aumentam, com o aumento da velocidade de corte e de avanço. O consumo de energia elétrica reduz, com aumento da velocidade de avanço, sendo os valores percentuais de 48,4% para o aço ABNT 1020 e de 46,8% para o aço ABNT 1045. Conclui-se com esse estudo que, os parâmetros de corte, têm significativa influência, no consumo de energia elétrica do equipamento. Sendo recomendado usar maiores velocidades de avanço, na usinagem dos materiais ensaiados, uma vez que, a qualidade da superfície não é prejudicada.

Palavras-chave: eficiência energética; usinagem; parâmetros de corte; fresamento frontal.

ABSTRACT

The expansion of industrial activities highlights the growing need for electricity production, as this type of energy is primarily used for such activities. The manufacturing industry contributes to a significant consumption of electric energy, with machining processes being particularly noteworthy. In this manufacturing process, the equipments are the main energy electrical consumers. In this way, it is possible to improve the energy efficiency of these machines, reducing energy electric consumption by optimizing machining parameters, since studies show that in milling, machining represents 65% of energy consumption. Therefore, the present research aims to evaluate the energy electric consumption of the machining process by face milling, considering the variation of cutting parameters in carbon steel workpieces. The study began with the characterization of the material's chemical composition through spectrometry, followed by hardness measurement and the determination of cutting speed and feed for the face milling process. Subsequently, the energy electric consumption was evaluated by correlating the cutting parameters with surface roughness, cutting time, machining force and machining power, electrical power, and energy electric consumption. The results showed that machining force and surface roughness decrease with increasing cutting speed. On the other hand, electrical power and machining power increase with increasing cutting speed and feed rate. The energy electric consumption decreases with increasing feed rate, with percentage reductions of 48.4% for SAE 1020 steel and 46.8% for SAE 1045 steel. This study concludes that cutting parameters have a significant influence on the equipment's energy electric consumption. It is recommended to use higher feed speeds in the machining of the tested materials, as quality surface is not compromised.

Keywords: energy efficiency; machining; cutting parameters; face milling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de energia elétrica no Brasil por setor no ano de 2022.	17
Figura 2 - Relação de pesquisas.	19
Figura 3 – Tipos de Fresamentos.....	23
Figura 4 - Componentes da força de usinagem no fresamento frontal.	25
Figura 5- Triângulo das potências elétricas.....	30
Figura 6 - Consumo de energia elétrica em fresadora CNC três eixos.	31
Figura 7 - Comprimentos para a avaliação da rugosidade.....	32
Figura 8 - Percentagem dos materiais utilizados nas pesquisas.	40
Figura 9 - Fresadora Universal.	41
Figura 10 - Cabeçote fresador.	42
Figura 11 - Dimensões do inserto.....	42
Figura 12- Durômetro de bancada.	44
Figura 13 - Rugosímetro portátil.	45
Figura 14 - Corpo de prova - a) desenho, b) modelo real.....	45
Figura 15 - Bancada Teste - a) Esquema elétrico, b) Modelo real.	47
Figura 16 - a) Analisador de energia, b) Interface do software.....	48
Figura 17 - Metodologia para realização dos ensaios e coleta dos dados.	49
Figura 18 - Rugosidade Final, Potência elétrica requerida e consumo de energia no aço ABNT 1020.	51
Figura 19 - Consumo de energia e avanço por dente no aço ABNT 1020.	52
Figura 20 - Potência elétrica requerida, tempo de usinagem e consumo de energia no aço ABNT 1020.	53
Figura 21 - Força de usinagem, potência de usinagem e consumo de energia em função da velocidade de corte no aço ABNT 1020.....	54
Figura 22 - Força de usinagem, potência de usinagem e consumo de energia em função da velocidade de avanço no aço ABNT 1020.	55
Figura 23 - Rugosidade Final, Potência elétrica requerida e consumo de energia no aço ABNT 1045.	57
Figura 24 - Consumo de energia e avanço por dente no aço ABNT 1045.	58
Figura 25- Potência elétrica requerida, tempo de usinagem e consumo de energia no aço ABNT 1045.	59
Figura 26 - Força de usinagem, potência de usinagem e consumo de energia em função da velocidade de corte no aço ABNT 1045.....	60

Figura 27 - Força de usinagem, potência de usinagem e consumo de energia em função da velocidade de avanço no aço ABNT 1045	61
Figura 28 - ANOVA aplicada nos resultados da Rugosidade Média considerando os parâmetros variados.	65
Figura 29- Estimativa Marginal Média para os valores de Rugosidade.....	66
Figura 30 - ANOVA aplicada nos resultados da Força de Usinagem considerando os parâmetros variados.....	66
Figura 31 - Estimativa Marginal Média para os Valores de Força de Usinagem.....	67
Figura 32 - ANOVA aplicada nos resultados da Potência Requerida considerando os parâmetros variados.....	67
Figura 33 - Estimativa Marginal Média para os valores da Potência Requerida	68
Figura 34 - ANOVA aplicada nos resultados do Consumo de energia considerando os parâmetros variados.....	68
Figura 35 - Estimativa Marginal Média para os valores do Consumo de Energia.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de artigos relevantes.	38
Tabela 2 - Composição química dos aços.	43
Tabela 3 - Parâmetros de corte.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMOPSO	<i>Adaptive Multi-objective Particle Swarm Optimization</i>
ANOVA	Análise de Variância
BEN	Balanço Energético Nacional
CNC	Comando Numérico Computadorizado
EECI	Indicador de Consumo de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HB	Dureza <i>Brinel</i>
HRB	Dureza <i>rockwell B</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LACAM	Laboratório de Caracterização dos Materiais
MQL	Mínima Quantidade de Líquido
NC	<i>Numerical Control</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A_p	Profundidade de corte
d	Diâmetro da ferramenta
F_a	Força de avanço
F_c	Força de corte
F_e	Força efetiva de corte
F_t	Força tangencial
F_r	Força radial
F_u	Força de usinagem
F_z	Avanço por dente da fresa
hm	Espessura média do cavaco
I	Corrente elétrica
K_c	Força específica de corte
K_r	Força específica radial
K_s	Pressão específica de corte
K_{s1}	Pressão específica de corte proporcional a espessura de corte
N	Número de rotações por minuto
P_a	Potência de avanço
P_c	Potência de corte
P_e	Potência efetiva de corte
P_{req}	Potência requerida do equipamento
P_u	Potência de usinagem
V_a	Velocidade de avanço
U	Tensão elétrica
V_e	Velocidade efetiva de corte
V_c	Velocidade de corte

Z	Número de dentes da fresa
π	Constante PI
λ	Ângulo de inclinação da aresta de corte
Θ	Posição angular da aresta de corte
η	Coefficiente de rendimento
ϑ	Fator de potência elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	18
1.2	Objetivos	19
1.2.1	Geral	19
1.2.2	Específicos.....	19
1.2.3	Contribuições da Pesquisa.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	Processos de Usinagem.....	22
2.2	Parâmetros de Usinagem.....	23
2.2.1	Velocidade de Corte e Avanço.....	23
2.2.2	Força de Usinagem no Fresamento Frontal.....	24
2.2.3	Potências de Usinagem.....	26
2.3	Eficiência Energética em Máquinas Ferramentas	28
2.4	Medição de Energia.....	29
2.4.1	Potências Elétricas.....	29
2.4.2	Consumo de Energia Elétrica em Máquinas Ferramentas.....	31
2.5	Rugosidade Superficial	32
2.5.1	Medição da Rugosidade	32
2.6	Estado da Arte	33
2.7	Relação de Pesquisas Relacionadas ao Tema	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	Equipamentos.....	41
3.1.1	Equipamento utilizado	41
3.1.2	Ferramenta para a Usinagem	42
3.2	Materiais	43
3.3	Métodos.....	43
3.3.1	Medição da macrodureza.....	43
3.3.2	Medição da rugosidade.....	44
3.3.3	Procedimento de Usinagem.....	45
3.3.4	Parâmetros de Corte	46
3.3.5	Medição do Consumo de Energia	46

3.4	Avaliação dos Resultados Obtidos.....	48
3.5	Determinação das Variáveis de Saída	49
3.6	Fluxograma da Metodologia Aplicada na Pesquisa	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	Aço ABNT 1020	50
4.1.1	Medida da Rugosidade	50
4.1.2	Avanço por Dente	52
4.1.3	Tempo de Usinagem.....	52
4.1.4	Força de Usinagem e Potência de Usinagem	54
4.2	Aço ABNT 1045	57
4.2.1	Medida da Rugosidade	57
4.2.2	Avanço por Dente.....	58
4.2.3	Tempo de Usinagem.....	59
4.2.4	Força de Usinagem e Potência de Usinagem	60
4.3	Discussões Gerais.....	62
4.4	Análise das Variações dos Parâmetros.....	65
4.5	Produção Científica.....	69
5.	CONCLUSÕES	70
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
7.	REFERÊNCIAS.....	73
	APÊNDICE A – Certificado de Apresentação de Artigo Científico no 12º COBEF.	78
	APÊNDICE B – Certificado de Apresentação de Trabalho no VI SERES.....	79

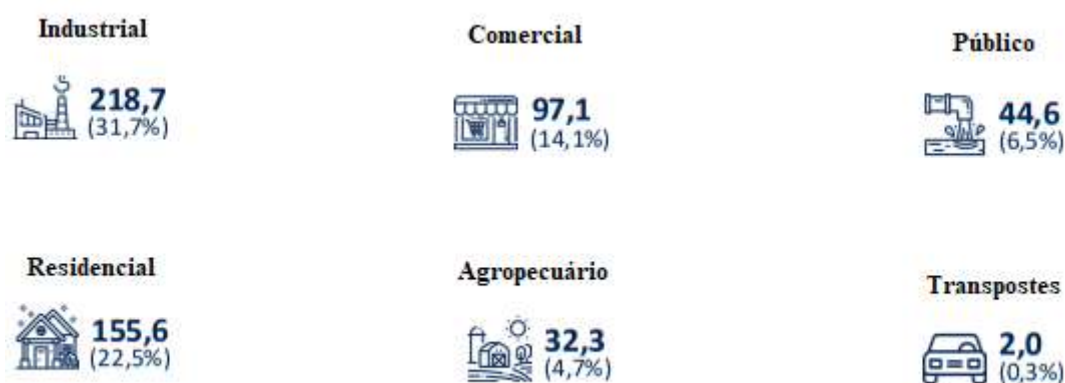
1 INTRODUÇÃO

Com a expansão das atividades industriais fica evidente o crescimento da necessidade de produção de energia elétrica, uma vez que esse tipo de energia é o principal a ser utilizado para tais atividades.

O *World Energy Outlook* aponta um crescimento do consumo de energia elétrica, para cerca de 22% no ano de 2030 em relação ao ano de 2022 (International Energy Agency, 2022). No Brasil o consumo final de energia elétrica aumentou em 4,2% do ano de 2020 para 2021 (EPE, 2022). O Setor industrial teve uma contribuição mais significativa, sendo um aumento de 7,5% o que representa 15,0 TWh para o mesmo período.

A Figura 1 retrata dados do Balanço Energético Nacional de 2023, ano base 2022. O consumo de energia elétrica pelo setor industrial brasileiro representou 31,7%, o correspondente a 218,7 TWh. Parte dessa energia é gerada por fontes renováveis hidráulicas representando 61,9%, quantificando 427,1 TWh (EPE, 2023).

Figura 1 - Consumo de energia elétrica no Brasil por setor no ano de 2022.



Fonte: Balanço Energético Nacional (2023).

O setor do processo de fabricação por usinagem faz parte das indústrias de manufatura brasileiras. Esse processo de fabricação é considerado um dos mais antigos, passando por operações em máquinas-ferramentas que trabalham com cerca de 30% de eficiência energética (He *et al.*, 2012). No entanto, esse setor apresenta um grande potencial para economia de energia e ganho de eficiência.

Grande parte das pesquisas concentraram-se nos estudos de otimização dos processos de usinagem como por exemplo o processo de torneamento e fresamento.

Diante do exposto constatamos que o cenário Brasileiro demanda por um consumo maior de energia nos próximos anos. Essa situação leva ao segmento industrial a se planejar e implementar práticas que considerem a sustentabilidade dos seus processos. Isso é um atrativo para o desenvolvimento de estudos acadêmicos.

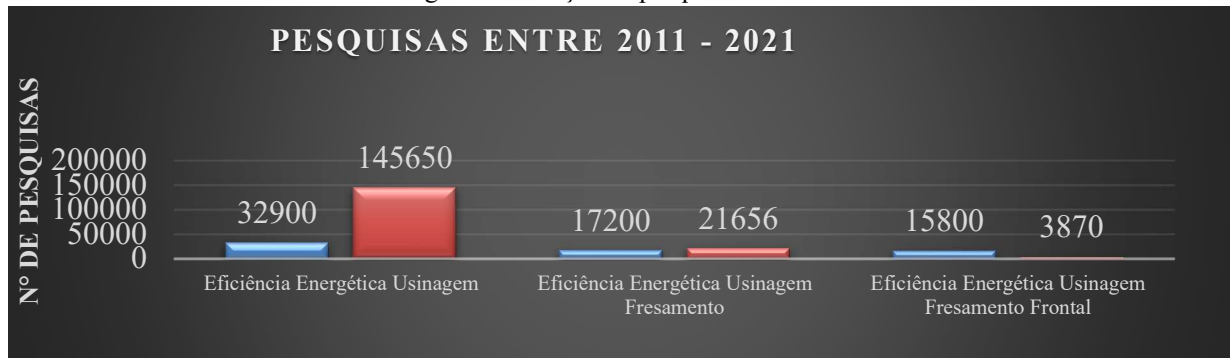
1.1 Justificativa

É notório que as indústrias buscam por otimizar seus processos, visando uma maximização produtiva. O processo de fabricação por usinagem está incluído nessas indústrias, em destaque temos o fresamento como um dos princípios (Pelegriño, 2018). Muitas pesquisas acadêmicas têm concentrado seus estudos nessa área, levando em consideração os parâmetros de corte e sua influência direta no consumo de energia elétrica (Campatelli *et al.*, 2015). Outras pesquisas consideram a relação da qualidade da superfície da peça usinada com os parâmetros de corte. É visto também pesquisas que relacionam o desgaste de ferramentas, a geometria da peça com esses mesmos parâmetros.

Agora listamos alguns pesquisadores que desenvolveram seus trabalhos com a temática da eficiência energética no processo de fresamento, são eles: Shin, Woo e Rachuri (2017); Cai *et al.*, (2018); Zhou, *et al.*, (2018); Zhao, *et al.*, (2019); Chen, *et al.*, (2019); Jamil, *et al.*, (2020); Li, *et al.*, (2020) e Pawan, Bera e Sangwan (2021). Esses trabalhos citados apresentam lacunas como: Os ensaios de usinagem são realizados em apenas um tipo de material, os equipamentos utilizados são acionados por CNC e não fresadoras convencionais.

De acordo com uma busca realizada no google acadêmico e na *science direct*, considerando um intervalo de tempo entre os anos de 2011 e 2021 e seguindo as palavras chaves: “eficiência energética; usinagem”, “eficiência energética; usinagem; fresamento”, “eficiência energética; usinagem; fresamento frontal”. Observa-se por meio da Figura 2, que a quantidade de pesquisas que estudaram especificamente, a eficiência energética do processo de usinagem na operação de fresagem frontal é menor, quando comparado com a quantidade de estudos realizados com a temática eficiência energética em processo de usinagem. Ressalta-se que esses números podem se sobrepor de uma fonte de pesquisa para a outra.

Figura 2 - Relação de pesquisas.



Fonte: O Autor.

No entanto, mesmo com essa redução ainda é considerada grande, a quantidade de pesquisas com a temática da eficiência energética em fresamento frontal. Mesmo assim, considerando as lacunas de trabalhos pesquisados e o universo de materiais, que podem ser usinados por esse processo, conclui-se que a proposta dessa pesquisa, se torna viável e trará grande contribuição para o meio acadêmico e também para a indústria.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

O objetivo geral desse trabalho é avaliar o consumo de energia elétrica do processo de usinagem por fresamento frontal, considerando a variação dos parâmetros de corte em peças fabricadas de aço carbono.

1.2.2 Específicos

Para que seja atingido o objetivo geral desse trabalho será necessário realizar os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a influência da variação da velocidade de corte no consumo de energia elétrica;
- Avaliar a influência da variação da velocidade de avanço no consumo de energia elétrica;
- Avaliar a influência da variação da força de usinagem e da potência de usinagem no consumo de energia elétrica;

- Avaliar o perfil de rugosidade com a variação da velocidade de corte e sua relação com o consumo de energia elétrica;
- Avaliar o perfil de rugosidade com a variação da velocidade de avanço e sua relação com o consumo de energia elétrica;

1.2.3 Contribuições da Pesquisa

Nessa seção são apresentadas as principais contribuições dessa pesquisa, são elas:

Colaboração para o universo acadêmico, por meio dos conhecimentos técnicos desenvolvidos na pesquisa. No tocante ao estudo do consumo de energia com variação dos parâmetros de corte em fresadora convencional, na usinagem de mais de um tipo de aço carbono.

Otimização dos parâmetros de corte adequados ao processo de fresamento frontal, considerando o baixo consumo de energia elétrica e a qualidade superficial das peças usinadas em aço carbono ABNT 1020 e 1045.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está organizado em seis capítulos. No Capítulo 2 é feito uma abordagem da fundamentação teórica e da revisão da literatura referente ao tema da pesquisa, por meio de explanação dos conceitos dos processos de usinagem e do consumo de energia elétrica das máquinas ferramentas. É apresentado também os principais artigos, que foram desenvolvidos com a temática do consumo de energia, no processo de usinagem por fresamento, considerando a variação dos parâmetros de corte, rugosidade superficial e geometria da peça.

O Capítulo 3 detalha os materiais e os métodos necessários para a realização da pesquisa.

O Capítulo 4 apresenta os resultados que foram obtidos durante a pesquisa, como também as discussões e análises estatísticas, ligadas ao tema proposto desse trabalho.

Por meio do Capítulo 5 é feita a realização das conclusões do trabalho de acordo com os resultados obtidos, alinhando com os objetivos e contribuições da pesquisa.

Por fim o Capítulo 6 traz as sugestões de trabalhos futuros, proporcionando a continuidade da pesquisa realizada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma explanação, sobre os aspectos conceituais dos processos de usinagem com ênfase no fresamento, nos parâmetros de corte, no consumo de energia em máquinas ferramentas, na qualidade superficial e no estado da arte relacionando as principais pesquisas que tem como tema, analisar a eficiência energética em processo de fresamento frontal.

2.1 Processos de Usinagem

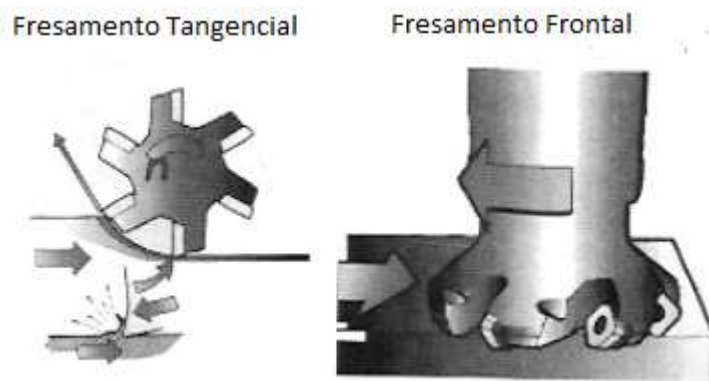
A usinagem é um processo de fabricação, onde ocorre a remoção de material conferindo a peça: dimensão, forma e acabamento (Ferraresi, 1970). As aparas, ou seja, o que é retirado da peça durante esse processo é chamado de cavaco. Dessa forma se entende que a usinagem produz resíduos sólidos que na maioria das vezes são reciclados. Também se observa que esse excesso de material, é formado por forças de cisalhamento que são exercidas pela ferramenta sobre o material da peça, após mecanismos de deformação elástica e plástica (Shaw, 1984).

Para Groover (2010) os processos de torneamento, furação e fresamento são considerados os principais processos de usinagem.

O fresamento é um processo de usinagem que, objetiva a obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas de corte multicortantes (Ferraresi, 1970). As ferramentas utilizadas, nesse processo de usinagem são denominadas fresas, que são providas de arestas cortantes, dispostas simetricamente em torno do seu próprio eixo (Diniz, 2014).

No processo de fresamento existe uma classificação, que é baseada na disposição dos dentes ativos da fresa, sendo: o fresamento tangencial e o fresamento frontal, conforme a Figura 3. No fresamento frontal, os dentes da fresa, estão na superfície frontal e na operação o eixo da ferramenta fica perpendicular à superfície gerada. Enquanto que o fresamento tangencial, o eixo da ferramenta fica paralelo à superfície gerada (Diniz, 2014).

Figura 3 – Tipos de Fresamentos.



Fonte: Diniz (2014).

Machado *et al.* (2015) afirmam que é necessário ajustar os parâmetros de usinagem para obter a superfície da peça, conforme os padrões estabelecidos pelos projetos, visando as funcionalidades dos componentes de um conjunto mecânico.

2.2 Parâmetros de Usinagem

Os parâmetros de usinagem têm influência direta na qualidade da superfície da peça, na produtividade e no consumo de energia das máquinas ferramentas. O comportamento dos esforços de corte durante a usinagem precisa ser conhecido, pois esses afetam de forma direta a potência necessária para o corte. Essa potência é importante para determinar o dimensionamento do motor de uma máquina ferramenta (Diniz, 2014).

Os erros em peças fabricadas em máquinas ferramentas, estão relacionados com os parâmetros de corte associados a esse processo (Liu *et al.*, 2017).

Os parâmetros do processo em máquinas ferramentas, estão relacionados com as ferramentas de corte e com a usinagem, sendo eles: a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a profundidade de corte (Bhushan, 2013).

2.2.1 Velocidade de Corte e Avanço

A velocidade de corte é um parâmetro de usinagem, que na maioria das vezes é determinado pelo próprio fabricante das ferramentas, levando em consideração os materiais a serem usinados, os materiais das ferramentas e o tipo de operação de usinagem.

Essa velocidade de corte é considerada, como a velocidade instantânea de um ponto da aresta de corte da ferramenta, de acordo com a direção e sentido de corte (Ferraresi, 1970).

A velocidade de corte (V_c) é expressa em metros por minuto (m/min) e pode ser calculada pela equação 1.

$$V_c = \frac{\pi \times d \times N}{1000} [m/min] \quad (1)$$

Onde (d) é o diâmetro da ferramenta em milímetros para o processo de fresamento e (N) é o número de rotações por minuto.

A velocidade de avanço (V_a) utilizada no processo de fresamento, é determinada em milímetros por minuto (mm/min), sendo determinada pela equação 2.

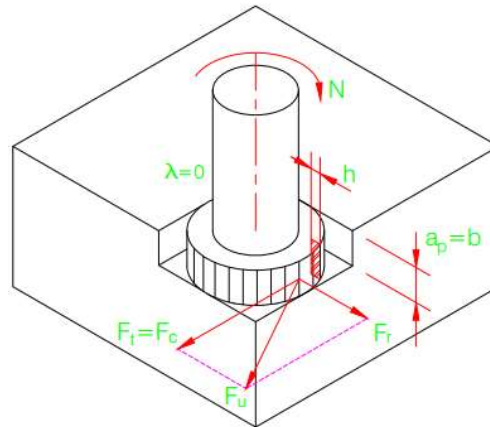
$$V_a = N \times F_z \times Z [mm/min] \quad (2)$$

Em que (F_z) é o avanço por dente da fresa, que é fornecido pelo fabricante da fresa e o (Z) é o número de dentes da ferramenta.

2.2.2 Força de Usinagem no Fresamento Frontal

A força de usinagem, tem relação com as cargas que exercem contato direto com a cunha de corte. Todas as componentes da força usinagem no plano de trabalho, contribuem para potência de usinagem. Dessa forma a componente (F_u) no processo de fresamento frontal é definida por meio das componentes: a Força radial (F_r) e a Força de corte (F_c) (Araújo, Mougo e Campos, 2020). A Figura 4, apresenta um esquema dessas componentes de força, considerando um fresamento frontal, quando o ângulo de inclinação da aresta (λ) = 0.

Figura 4 - Componentes da força de usinagem no fresamento frontal.



Fonte: Adaptado de Araújo, Mougo e Campos (2020).

O valor da Força de corte (F_c) também conhecida como Força tangencial (F_t), pode ser definida pela equação 3.

$$F_c = k_c \cdot f_z \cdot \text{sen}(\theta) \cdot a_p \quad [\text{N}] \quad (3)$$

Onde o (k_c) é a força específica de corte, o (f_z) é o avanço por dente, o (θ) é a posição angular da aresta de corte e o (a_p) é a profundidade de corte.

Para determinar o valor da Força radial (F_r) utiliza-se a equação 4, sendo que o (k_r) é a força específica radial.

$$F_r = k_r \cdot f_z \cdot \text{sen}(\theta) \cdot a_p \quad [\text{N}] \quad (4)$$

Logo podemos escrever, que a Força de Usinagem (F_u) é representada pela soma das duas componentes, conforme a Equação 5.

$$F_u = F_c + F_r \quad [\text{N}] \quad (5)$$

Conhecer e entender essas variáveis que afetam a força de usinagem, permitirá a obtenção de parâmetros necessários, para a melhoria desse processo (Amorim, 2002).

2.2.3 Potências de Usinagem

As potências de usinagem são definidas como, as potências necessárias para realizar a usinagem. São obtidas pelo produto das componentes da força de usinagem, pelas respectivas componentes da velocidade de corte (Ferraresi, 1970).

A potência de corte (P_c) é determinada, pelo produto da velocidade de corte (V_c) com a força de corte (F_c), conforme a equação 6.

$$P_c = \frac{F_c \times V_c}{60 \times 75} \text{ [CV]} \quad (6)$$

A forma para determinar a potência de avanço (P_a) é pelo produto da força de avanço (F_a) com a velocidade de avanço (V_a), que é representada pela equação 7.

$$P_a = \frac{F_a \times V_a}{1000 \times 60 \times 75} \text{ [CV]} \quad (7)$$

A potência efetiva de corte (P_e) pode ser encontrada, pelo produto da força efetiva de corte (F_e), com a velocidade efetiva de corte (V_e), conforme a equação 8.

$$P_e = \frac{F_e \times V_e}{60 \times 75} \text{ [CV]} \quad (8)$$

Essa potência corresponde a soma da potência de corte (P_c), com a potência de avanço (P_a) como mostrado pela equação 9.

$$P_e = P_c + P_a \text{ [CV]} \quad (9)$$

Nas equações 6, 7 e 8 as forças: de corte, de avanço e efetiva estão expressas em Kgf. Então para utilizar a força em Newton (N) essas equações podem ser reescritas. Reescrevendo a equação da potência de corte (P_c) temos a equação 10.

$$P_c = \frac{F_c \times V_c}{60 \times 75 \times 10} \text{ [CV]} \quad (10)$$

Considerando o coeficiente de rendimento da máquina ferramenta, novamente a equação da potência de corte é reestruturada e mostrada na equação 11.

$$P_c = \frac{\frac{F_c \times V_c}{60 \times 75 \times 10}}{\eta} [CV] \quad (11)$$

Para que a potência de corte, possa ser expressa em quilowatts (kW) considerando o coeficiente de rendimento temos a equação 12.

$$P_c = \frac{\frac{F_c \times V_c \times 0,735}{60 \times 75 \times 10}}{\eta} [kW] \quad (12)$$

Simplificando a equação 12 obtemos a equação 13.

$$P_c = \frac{F_c \times V_c}{60 \times 10^3 \times \eta} [kW] \quad (13)$$

No fresamento frontal a Força de corte (F_c), foi determinada por meio da equação 3. Dessa forma, é possível utilizar a potência de corte expressa na equação 13 substituindo a força de corte e obter a equação 14.

$$P_c = \frac{k_c \times f_z \times \sin(\theta) \times a_p \times V_c}{60 \times 10^3 \times \eta} [kW] \quad (14)$$

Outra forma de determinar a Força de corte é utilizar a espessura média do cavaco. Sendo o valor de (K_c) substituído por (K_s) que é expresso pela equação 15. Em que (K_{s1}) e (z) são determinados por meio de tabelas, levando em consideração a dureza de cada material e (hm) é espessura média do cavaco (MACHADO, 2015).

$$K_s = k_{s1} \times hm^z [N/mm^2] \quad (15)$$

De acordo com Araújo *et. al* (2020) a potência requerida do equipamento pode ser calculada pela equação 16.

$$P_{req} = \frac{P_u}{\eta} \text{ [kW]} \quad (16)$$

Onde (P_u), é a potência de usinagem e (η), é coeficiente de rendimento do equipamento.

Quando é considerado as grandezas elétricas, a força de corte também pode ser determinada indiretamente pela equação 17 (REIS, *et al.*, 2019).

$$F_c = \frac{60 \times I \times V \sqrt{3} \times \cos(\vartheta) \times \eta}{V_c} \text{ [N]} \quad (17)$$

Sendo que (I) a corrente elétrica, (V) a tensão de alimentação do equipamento, o $\cos(\vartheta)$, é o fator de potência, (η) é coeficiente de rendimento do equipamento e (V_c) é a velocidade de corte.

2.3 Eficiência Energética em Máquinas Ferramentas

Usar a energia de forma eficiente é uma busca frequente por parte da indústria. Peng e Xu (2014) definem eficiência energética como sendo, obter a mesma qualidade e mesmo produto final consumindo menos energia.

Máquinas ferramentas eficientes não é um assunto fácil de definir, devido à dificuldade em estabelecer métricas confiáveis para a sua avaliação (Pelegriño, 2018). As características intrínsecas e as condições do processo, afetam diretamente a eficiência energética em máquinas ferramentas.

Considerando a complexidade para se definir a eficiência energética em máquinas ferramentas, alguns pesquisadores avaliam esse indicador por meio do conceito de entrada e saída. Para Thied (2012) a taxa de eficiência em máquinas ferramentas, se baseia na demanda de energia, conforme equação 18.

$$Eficiência\ energética = \frac{peças\ produzidas}{demanda\ de\ energia \times tempo} \left[\frac{peças}{kWh} \right] \quad (18)$$

Atualmente muitos estudos, utilizam o consumo específico de energia, (SEC- *specific energy consumption*) para avaliar a eficiência energética em máquinas ferramentas. De acordo com Li e Kara (2011), a SEC é definida como a energia necessária para remover um volume de 1 cm³ do material, de acordo com equação 19.

$$SEC = \frac{\text{demanda de energia}}{\text{volume do material}} \left[\frac{kW}{cm^3} \right] \quad (19)$$

Segundo Pelegrino (2018) a SEC é uma forma comum, para estimar o consumo de energia e avaliar a eficiência energética. Para ele a complexidade em se avaliar as máquinas ferramentas com um sistema, utilizando alguns indicadores de consumo de energia para refletir a eficiência energética da máquina, fará com que o resultado tenha um significado limitado. Dessa forma se entende, que esse tema do indicador de eficiência energética, em máquinas ferramentas ainda será bastante discutido.

2.4 Medição de Energia

É necessário o fornecimento de energia, para ocorrer em um sistema as mudanças de estado ou alterações de condições. Implicando dessa forma na ocorrência de um fluxo de energia (Whitaker, 2007).

2.4.1 Potências Elétricas

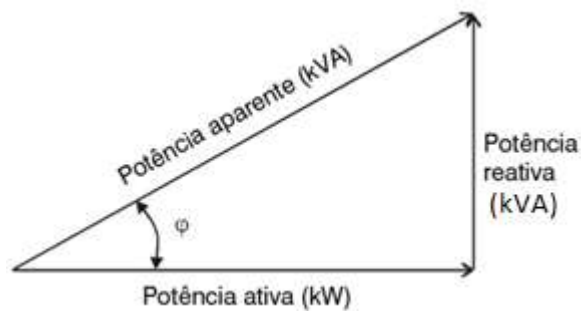
As potências elétricas em máquinas e equipamentos, fazem relação com o trabalho realizado em transmissões de movimentos, motores e elementos associados a funções determinadas. Em eletricidade a potência pode ser determinada, pelo produto da corrente pela tensão como apresentado pela equação 20.

$$P = I \times U [w] \quad (20)$$

Sendo (P) a potência instantânea, (I) a corrente elétrica medida no tempo e (U) a tensão elétrica medida no tempo.

Levando em consideração, que a corrente elétrica nas máquinas ferramentas é alternada, a potência elétrica é representada por duas partes, sendo uma ativa que realiza trabalho e outra reativa que está relacionada com os campos magnéticos necessários, para o funcionamento dos motores e transformadores, contidos nos equipamentos industriais. A Figura 5, representa o triângulo de potências elétricas.

Figura 5- Triângulo das potências elétricas.



Fonte: ENGELETRICA (2023).

De acordo com a Figura 5, se pode definir a equação 21, que relaciona as potências ativa, reativa e aparente.

$$Pot_{aparente} = \sqrt{Pot_{reativa}^2 + Pot_{ativa}^2} \text{ [kVA]} \quad (21)$$

Também é possível determinar o ângulo (ϑ), conhecido como fator de potência (F_p), pela relação entre a potência ativa (kW) e a potência aparente (kVA), através da equação 22.

$$\cos \vartheta = \frac{Pot_{ativa}}{Pot_{aparente}} \quad (22)$$

Dessa forma para uma situação ideal, deve haver uma igualdade entre as componentes ativa e aparente, sendo a parcela de energia total transformada em trabalho, uma vez que o fator de potência é um índice que indica, quanto de energia foi utilizado no trabalho e quanto foi utilizado em magnetização.

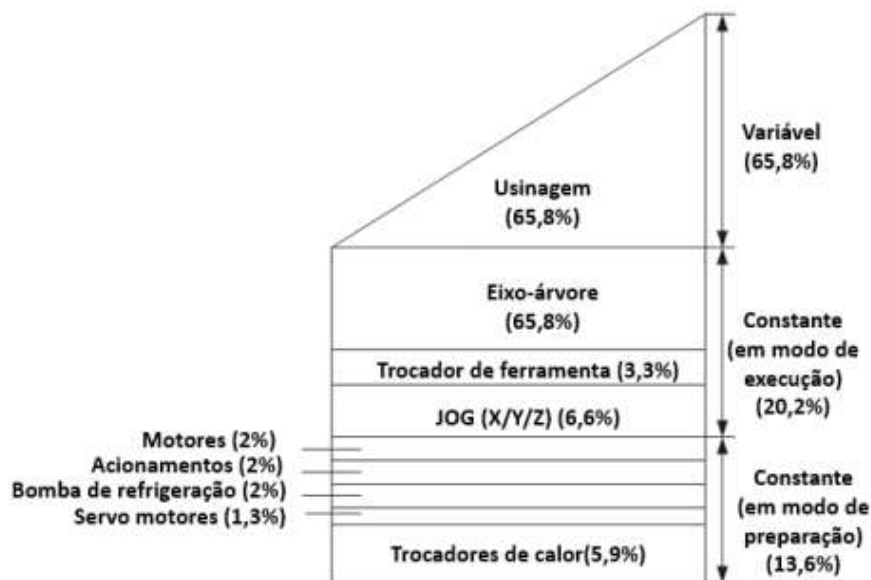
2.4.2 Consumo de Energia Elétrica em Máquinas Ferramentas

O desenvolvimento das máquinas ferramentas, está diretamente relacionado com a revolução industrial. Desde então o processo de usinagem com máquinas ferramentas, tem sido fundamental na fabricação de produtos (Groove, 2010).

Máquinas ferramentas são definidas como um conjunto de componentes com funções específicas, permitindo que esses equipamentos entrem em funcionamento e realizem funções necessárias ao processo desejado. Os componentes elétricos de uma máquina ferramenta, podem ser classificados como: Acionamentos elétricos, motor do eixo-árvore, sistema de refrigeração e componentes auxiliares (Li *et al.*, 2011).

Um requisito fundamental, para analisar um consumo de energia das máquinas ferramentas, é entender que esse consumo é dinâmico e não estático, dependendo diretamente do estado atual da máquina (Zein, 2012). Então o consumo de energia nas máquinas ferramentas, fica dividido em constante e variável. A Figura 6 mostra as formas de divisões mais comum dos consumos de energia em uma fresadora CNC três eixos.

Figura 6 - Consumo de energia elétrica em fresadora CNC três eixos.



Fonte: Adaptado Pellegrino (2018).

O consumo variável é atribuído ao processo de usinagem e aos componentes utilizados para a sua execução. Enquanto que o consumo constante é atribuído aos componentes necessários, para que a máquina ferramenta entre na execução de um processo (Pellegrino, 2018).

2.5 Rugosidade Superficial

Segundo a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), rugosidade são erros microgeométricos que são associados a um conjunto de irregularidades, caracterizados por pequenas saliências (picos) e reentrâncias (vales) que pertencem a uma superfície.

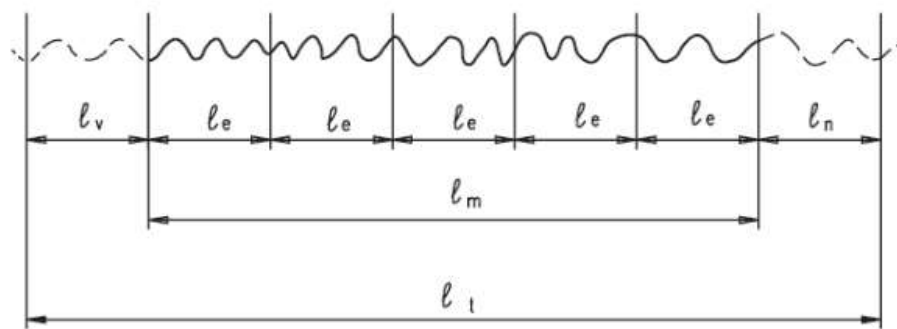
A rugosidade tem influência no desempenho do funcionamento de componentes mecânicos. Ela está diretamente associada a qualidade do deslizamento, da resistência ao desgaste, da possibilidade de ajuste para acoplamentos do tipo forçado, da resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluídos, da qualidade que a estrutura oferece a camadas protetoras, da resistência a corrosão e fadiga, da vedação e da aparência (Neto, 2018).

Em processos de usinagem como torneamento e fresamento, a rugosidade superficial está diretamente relacionada com a velocidade de corte, velocidade de avanço e afiação da ferramenta.

2.5.1 Medição da Rugosidade

Para realizar a medição da rugosidade superficial é utilizado um instrumento denominado rugosímetro. Os critérios estabelecidos para a avaliação da rugosidade são definidos como: Comprimento de amostragem (l_m), comprimento total da medição (l_t), comprimento de medição (l_e), comprimento para atingir a velocidade de medição (l_v) e o comprimento para a parada do apalpador (l_n). Sendo que o comprimento de amostragem (l_m) é igual a 5 vezes o comprimento de medição (l_e), conforme a Figura 7 (ABNT NBR ISO 4287, 2002).

Figura 7 - Comprimentos para a avaliação da rugosidade.



Fonte: Adaptado de Neto (2018).

A escala de rugosidade mais utilizada para avaliar uma superfície produzida com processo de usinagem de avanço contínuo é a escala (Ra), sendo os seus valores de medidas expressos em micrômetros (ABNT NBR ISO 4287, 2002). Nesse processo se encontra o fresamento e o torneamento, como os principais que apresentam velocidade de avanço não variada durante um passe de corte.

2.6 Estado da Arte

Nessa seção do trabalho se apresentará os artigos que fazem relação com o tema da pesquisa a ser desenvolvida.

Shin *et al.* (2017) desenvolveram uma modelagem denominada de modelos de componentes, para implementar a otimização de consumo de energia em uma fresadora de forma online. Os modelos foram criados usando os dados históricos, incluindo planos de processos, programas *numerical control* (NC) e dados de monitoramento da máquina. Um experimento foi realizado no processo de fresamento para viabilizar o método estudado. A principal métrica considerada no estudo foi a energia, não sendo considerado os padrões de rugosidade da usinagem. Para viabilizar a metodologia se considerou os parâmetros de corte: velocidade de corte, avanço de corte e profundidade de corte. Ficou concluído nesse estudo que a energia consumida é reduzida com o aumento dos referidos parâmetros.

Li *et al.* (2017) analisaram a influência do número de passes e dos parâmetros de corte na eficiência energética, e custos de produção em processos de usinagem. O processo analisado foi o fresamento. Para tanto foi realizada uma modelagem matemática e a otimização do modelo foi obtida com algoritmo AMOPSO. A validação dos resultados ocorreu mediante testes de usinagem, onde os melhores resultados obtidos para retirada de 12 mm de material apresentaram a seguinte configuração: 3 passes de desbaste e 1 passe para acabamento. Reduzindo assim o consumo de energia do equipamento em 23,6% e os custos de produção em 12,4%.

Liu *et al.* (2017) propuseram um método para determinação de parâmetros de corte em máquina ferramenta CNC, levando em consideração a precisão de usinagem. Nessa pesquisa foi utilizado testes volumétricos como métodos de controle de precisão de máquinas ferramentas.

Para definição e verificação dos parâmetros foi realizado um estudo de caso, contemplando a usinagem de um componente de aeronaves. O referido componente foi feito de liga de alumínio AL6061-T6 e a sua usinagem foi realizada em um centro de usinagem.

No trabalho desenvolvido por Cain *et al.* (2018), foi considerado inicialmente ser muito difícil identificar o estado de eficiência energética nos processos de fresamento, uma vez que a eficiência energética é diferente da potência e do consumo de energia. Sabendo que fatores como condições da máquina e desgaste da ferramenta tem uma grande influência nesse aspecto.

Então é proposto em sua pesquisa, a identificação do estado de eficiência energética em processo de fresamento, usando o modelo oculto de Markov e raciocínio das informações. O trabalho experimental foi realizado na fresadora modelo DMUSO, sendo que a alta eficiência foi vista quando as taxas de velocidade do fuso e remoção do material são maiores. O método apresentado no trabalho é viável para identificação do estado de eficiência energética em fresagem.

Zhao Guoyong *et al.* (2018), estudaram a influência dos parâmetros de corte na qualidade da superfície usinada da peça e no consumo de energia do processo de fresamento. A otimização dos parâmetros de corte foi realizada pelo método de análise relacional GREY. Os parâmetros ideais para produzir um menor consumo de energia foram: profundidade de corte de 1 mm, profundidade de corte radial de 16 mm, velocidade de avanço de corte de 500 mm/min e número de rotação por minuto de 600 rpm, para a usinagem do aço 1045 na operação de semi acabamento.

Por meio do trabalho desenvolvido por Cai *et al.* (2018), foi proposto um modelo para avaliação do estado de eficiência energética para o processo de fresamento. Os resultados comprovaram que o modelo apresentou alta eficiência energética com um percentual de 42,83%.

Zhou *et al.* (2018), apresentaram um modelo de otimização de parâmetros de corte, focando na minimização de tempo e consumo de energia por volume de material removido na operação de fresamento de topo. Para realizar a otimização foi utilizado um algoritmo genérico (GA) e os experimentos foram feitos pela metodologia de Taguchi. Os resultados comprovaram que a otimização dos parâmetros de corte reduziu o consumo de energia e tempo de processamento do fresamento de topo.

Haas *et al.* (2019), apresentaram em seu trabalho uma plataforma de monitoramento inteligente de consumo de energia, para processo de usinagem por meio de um único indicador de consumo de energia elétrica (EECI). Eles usaram o monitoramento de consumo de energia em processo de fresamento com medição de energia e força de corte.

Para testar a eficiência do EECI foram realizados testes de usinagem em dois tipos de fresadoras com os mesmos parâmetros de corte, em segundo lugar o teste que foi realizado utilizando apenas uma fresadora com variação dos parâmetros de corte, em terceiro lugar outro teste é realizado com variação da ferramenta de corte. Foi constatado pelos testes a eficácia do método na avaliação da eficiência energética nos processos de usinagem e máquinas-ferramentas.

Zhao Junhua *et al.* (2019), analisaram a influência da complexidade da superfície da peça na eficiência energética e no consumo de energia do processo de usinagem por fresamento. Foi desenvolvido um modelo matemático da complexidade da superfície e os experimentos foram realizados na operação de desbaste e acabamento de uma liga de alumínio C6061. Os resultados apresentaram que o aumento da complexidade de superfície da peça gera um acréscimo no consumo de energia e no tempo de usinagem.

Chen *et al.* (2019), estudaram a otimização dos parâmetros de corte e da ferramenta de corte de forma integrada. A otimização foi resolvida por meio de algoritmo multi-objetivos. Os testes de validação do modelo de otimização, foram realizados com uma série de ferramentas de diâmetro e números de dentes variados, na usinagem de aço com resistência de 650 Mpa. O modelo de otimização integrada dos parâmetros de corte e ferramenta de corte apresentou redução no consumo de energia de 30,96% em relação a otimização dos parâmetros relacionados e ferramenta e de 28,05% em relação aos parâmetros de corte.

Carlini *et al.* (2020), avaliaram o consumo de energia elétrica e o desgaste da ferramenta de corte levando em consideração as estratégias de usinagem no processo de fresamento. Os ensaios de fresamento foram realizados com uma fresa com diâmetro de 10 mm, feita de metal duro revestida de AlCrN. Os parâmetros de corte foram fixados em: velocidade de avanço de corte de 2000 mm/min, profundidade de corte de 3,0 mm, profundidade de corte radial de 2,0 mm e velocidade de corte de 200 m/min. Como forma de realizar os testes de usinagem foram determinadas as estratégias de usinagem spiral, waveforme e laceform com uso do *software* Edgecam. De acordo com os resultados dessa pesquisa a estratégia de usinagem spiral apresentou um tempo de usinagem 50% menor em relação as outras duas estratégias e 31% de eficiência energética. A estratégia de usinagem laceform apresentou maior desgaste de ferramenta.

Li *et al.* (2020), abordaram uma análise energética para avaliar a eficiência energética abrangente de uma fresadora, considerando o consumo de energia para remoção de material e estabilidade térmica.

Os resultados mostraram que a eficiência energética convencional (considerando apenas a remoção de material) foi de 14,38% que é um valor considerado baixo. Enquanto que quando a estabilidade térmica é alcançada esse valor de eficiência energética vai para 21,57%.

Jamil Muhammad *et al.* (2020), estudaram a influência da aplicação de refrigeração de corte com nanofluidos na eficiência energética no fresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V. Os resultados apresentaram que o uso dos nanofluidos híbridos Al₂O₃-MWCNTS, fornecem boa lubrificação reduzindo o desgaste da ferramenta e por consequente o baixo consumo de energia. Com base nessa lubrificação conseguiu-se uma energia de corte mínima de 327 W com velocidade de rotação de 2150 rotações por minuto, avanço por dente da fresa de 0,012 mm/dente.

Osman *et al.* (2020), estudaram os efeitos da lubrificação do corte com concentração de nanopartículas de nitreto de boro hexagonal na operação de fresagem em ligas de titânio. O estudo visou analisar a influência da lubrificação na rugosidade de superfície da peça e na força de corte. Ficou comprovado que o uso de nanopartículas de nitreto de boro com concentração de 24,75%, reduz a força de corte em 19,8% e 35,24% na rugosidade de superfície da peça. O fluxo do fluido de corte também desempenhou uma significativa influência na força de corte e na rugosidade sendo que o fluxo 40,11 ml/h reduz a força de corte em 42,55% e 28,47% da rugosidade em relação ao fluxo 18,8 ml/h. A alta eficiência de energia foi conseguida com o uso de algoritmo PSO no software *MATLAB*. Os parâmetros otimizados foram: avanço de corte 0,0105 mm/dente, velocidade de corte de 73,165 m/min, profundidade de corte de 0,81 mm, fluxo de fluido de corte de 18,8 ml/h com concentração de partículas de 0,252%.

Pawar *et al.* (2021), estudaram o consumo de energia no fresamento levando em consideração as geometrias circulares de usinagem. Foi desenvolvido um modelo matemático da geometria considerando as variáveis do processo como: avanço por dente, ângulos de entrada e saída do dente. Em seguida é realizado a modelagem de força considerando as variáveis das geometrias e constantes de corte. Por último o consumo energético também é modelado com base na componente da força instantânea e velocidade de corte da ferramenta, para estimar a potência consumida no fresamento de geometrias circulares. Os experimentos foram realizados para validar o modelo, concluindo-se que as geometrias circulares côncavas consomem maior energia do que as convexas.

Em outro estudo realizado por Jamil *et al.* (2021), foi analisado a influência da refrigeração de corte na eficiência energética do processo de fresagem da liga de titânio Ti6AlV4.

A análise foi realizada levando em consideração os seguintes modos de refrigeração: a seco, mínima quantidade de líquido (MQL) e névoas de CO₂. Após a usinagem sob essas condições de refrigeração verificou-se que a refrigeração criogênica LN₂ obteve alta eficiência de 30,72% usando uma fresa com ângulo de hélice de 30° e velocidade de corte de 110 m/min.

As pesquisas têm sido desenvolvidas na modelagem e monitoramento da eficiência energética para o processo de fresamento, propiciando a otimização dos parâmetros de usinagem por meio de técnicas computacionais de forma *online*. As estratégias de usinagem e complexidade das superfícies também são avaliadas no consumo de energia das fresadoras.

Outro fator estudado por meio das pesquisas é a influência da refrigeração de corte na rugosidade e na eficiência energética para os processos de fresagem. Percebe-se que os fluídos de corte por sua vez melhoram a qualidade das superfícies usinadas por fresamento, contribuindo também para a redução do desgaste das ferramentas e do consumo de energia.

No programa de pós-graduação em energia renováveis, da qual faz parte essa pesquisa, já foram realizados dois estudos, com foco em avaliar a influência da variação dos parâmetros de corte, na eficiência energética dos processos de usinagem. Essas pesquisas são a de Caetano, (2019) que estudou a influência da variação dos parâmetros de corte, na eficiência energética para o processo de torneamento, na operação de faceamento de diferentes tipos de aços. Nesse estudo concluiu-se que, para ter um processo mais eficiente e de melhor acabamento superficial, necessita-se trabalhar com rotações elevadas, maiores avanços e altas velocidades de corte, uma vez que nessas condições resultam: redução do tempo de processo, maior rendimento da produção, menor força de corte, consequentemente, menor desgaste da ferramenta de corte, redução da energia de corte e elétrica e da potência elétrica.

Por fim Fernandes (2022), em sua pesquisa trouxe uma avaliação da eficiência energética na usinagem de aço por torneamento CNC. Esse estudo mostra que, os menores consumos de energia elétrica do equipamento, ocorreram nas faixas de maiores avanços de corte. Por outro lado, os maiores avanços propiciaram nos materiais ensaiados, maiores valores de rugosidade superficial.

2.7 Relação de Pesquisas Relacionadas ao Tema

Na Tabela 1 estão relacionadas as pesquisas que contemplam o estado da arte, apresentando as principais métricas estabelecidas para comparação.

Tabela 1 - Relação de artigos relevantes.

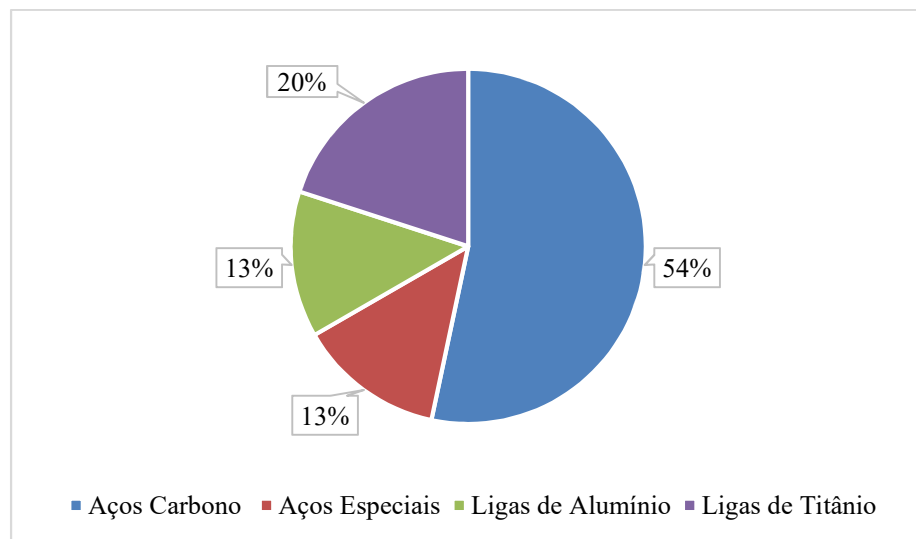
Artigo	Material/ Máquina	Método	Variáveis de entrada do Processo	Resposta de saída processo	Lacunas
Shin et al. (2017)	Aço 1018 Fresadora CNC MORI SEIKI NVD 1500 DCG	Modelos de componentes	Velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de corte	Energia	Usinou apenas um tipo de aço carbono.
Li et al. (2017)	Aço carbono S45C Fresadora vertical CNC VGC1500	Algoritmos AMOPSO (<i>Adaptive multi- object particle swarm optimization</i>)	Velocidade de corte, avanço prondidade de corte axial e radial, numero de passes	Consumo de energia especifica (SEC)	Usinou apenas um tipo de aço carbono.
Liu et al. (2017)	Liga de Alumino AL6061-T6 Centro de Usinagem	Medodologia de Superficie de Resposta	Velocidade de Corte, avanço e profundidade de cote	Consumo de Energia	Não usinou aços carbono
Cai et al. (2018)	Inconel 625 Fresadora CNC DMU50	Modelo Hidden Markov	Velocidade de corte, avanço e profundidade de corte	Eficiência energética	Não usinou aços carbono.
Zhao Guoyong et al. (2018)	Aço 45 Fresadora Vertical CNC XD- 40A	Análise de correlação GREY	Rotação por minuto, avanço, profundidade de corte axial e radial.	Consumo de energia especifica (SEC) e rugosidade	Usinou apenas um tipo de aço carbono.
Cai et al. (2018)	Aço 45 Fresadora CNC X5030A	Experimental	Número de rotações por minuto, avanço, profundidade de corte	Estado de eficiência energética	Usinou apenas um tipo de aço carbono.
Zhou et al. (2018)	Aço AISI 1045 Fresadora Vertical CNC XKA 714B/B	Algoritmos Genéricos	Numero de rotação por minuto, avanço, profundidade de corte axial e radial	Rugosidade, Potência e tempo	Usinou apenas um tipo de aço carbono.
Haas et al. (2019)	Aço St 52 Fresadora CNC DMG MORI e VMC600	Experimental	Velocidade de corte, avanço e profundidade de corte	Força de corte e indicador de consumo de energia elétrica	Não variou os parâmetros de corte. Usinou apenas um tipo de aço carbono.

Artigo	Material/ Máquina	Método	Variáveis de entrada do Processo	Resposta de saída processo	Lacunas
Zhao Junhua et al. (2019)	Liga de alumínio C6061 Fresadora CNC JTV C650B	Algoritmo de agrupamento Fuzzy c-mens.	Modelo pentagono: peça, equipamento, corte, meta e processo	Potência total	Não analisa a operação de fresamento frontal.
Chen et al.(2019)	Aço carbono S45C Fresadora Vertical CNC	Algoritmo MOCS	Velocidade de corte, avanço, profundidade de corte axial e radial	Energia Total	Usinou apenas um tipo de aço carbono.
Carlini et al. (2020)	Aço P20 – 1.2711 Fresadora CNC ROMI D600	Experimental	Estratégias de usinagem: espiral, waveforme e laceform	Desgaste da ferramenta, volume de material removido, tempo de corte e potência consumida	Os parâmetros de cortes não foram variados.
Li et al., (2020)	Aço AISI 1045 Fresadora Vertical CNC	Experimental	Potência de corte, potência dos periféricos	Potência total	Usinou apenas um tipo de aço carbono.
Jamil Muhammad et al. (2020)	Liga de titânio Ti6Al4V Frsadora CNC – CARVER 400M-RT	Análise de variância (ANOVA)	Número de rotação por minuto, avanço por dente, profundidade de corte axial e radial	Volume de material removido, rugosidade e energia de corte	Não usinou aço carbono.
Osman et al.(2020)	Liga de titânio Ti6Al4V Fresadora CNC 3 eixos	Análise de variância (ANOVA)	Velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, vazão de fluido de corte e percentual de nitreto de boro	Força de corte, Rugosidade e Consumo de energia específica (SEC).	Não usinou aço carbono.
Pawar et al.(2021)	Liga de alumínio Al6351-T6 Fresadora CNC KODI-40	Experimental	Número de rotação por minuto, profundidade de corte e avanço	Potência de corte e potência total	Não usinou aço carbono.
Jamil Muhammad et al. (2021)	Liga de titânio Ti6Al4V Fresadora CNC – MICRON UCP - 710	Experimental	ângulo de helice, temperatura e velocidade de avanço	Potência total e a rugosidade de superfície	Não usinou aço carbono.

Fonte: O Autor.

Por meio das informações listadas na Tabela 1, é possível concluir que boa parte das pesquisas utilizam apenas um tipo de material, como meio de estudo, conforme Figura 8. No entanto se observa a necessidade de realizar, pesquisas em mais de um tipo de material, implicando assim, diretamente em suas propriedades. Outro fator destacado é o tipo de equipamento em que as pesquisas são desenvolvidas, sendo que 100% desses são fresadoras do tipo CNC.

Figura 8 - Percentagem dos materiais utilizados nas pesquisas.



Fonte: O Autor.

Dessa forma esse trabalho desenvolve os estudos na avaliação do consumo de energia em fresadora universal, tendo como principais métricas: a velocidade de corte, a velocidade de avanço e a profundidade de corte.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo será apresentado os materiais, equipamentos, instrumentos e a metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa. Em síntese o processo percorre desde a preparação das amostras, definição dos parâmetros de corte, preparação do equipamento, usinagem das amostras, medição e avaliação do consumo de energia elétrica, força de corte, potência de corte e rugosidade superficial.

3.1 Equipamentos

3.1.1 Equipamento utilizado

Para a realização dos ensaios de usinagem foi determinado o uso de uma fresadora universal da marca DIPLOMAT, modelo FU 360, lotada no laboratório de mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE, *campus* de Maracanaú, de acordo com a Figura 9.

Figura 9 - Fresadora Universal.



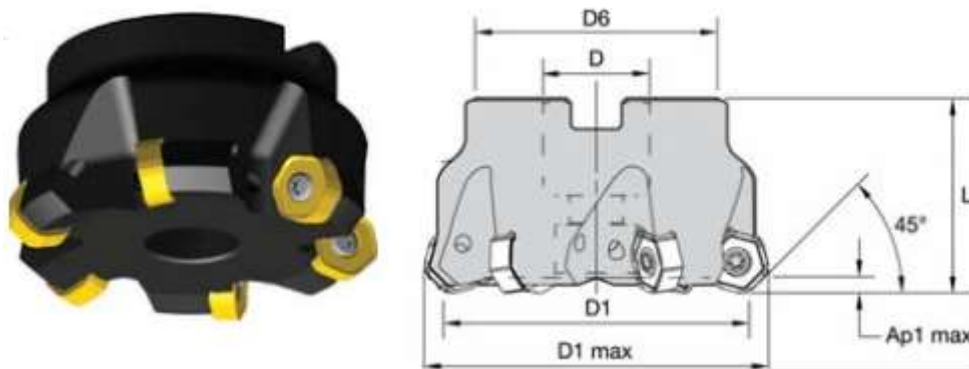
Fonte: O Autor.

A fresadora apresenta uma gama de velocidades de 40 a 2160 rpm, com 24 posições. As velocidades de avanço da mesa são diferenciadas em cada eixo, sendo para o eixo longitudinal de 22 a 770 mm/min, para o eixo transversal de 20 a 718 mm/min e para o eixo vertical de 8 a 306 mm/min, todos com 16 posições. A máquina é acionada por um motor elétrico trifásico de com potência de 4 ou 5.5 kW. A fixação da ferramenta é feita por meio de parafuso tirante e a peça é fixada em uma morsa de máquina.

3.1.2 Ferramenta para a Usinagem

A ferramenta escolhida para realizar a usinagem das amostras foi um cabeçote fresador com diâmetro ($D1$) de 63mm, referência KSHR063A06RS45HN06-KTB do fabricante KENNAMETAL, com alojamento para 06 insertos de metal duro. A Figura 10, fornece detalhes da ferramenta. A profundidade de corte máxima ($Ap1$) para essa ferramenta é 3,2 mm, sua rotação máxima é de 10100 rpm.

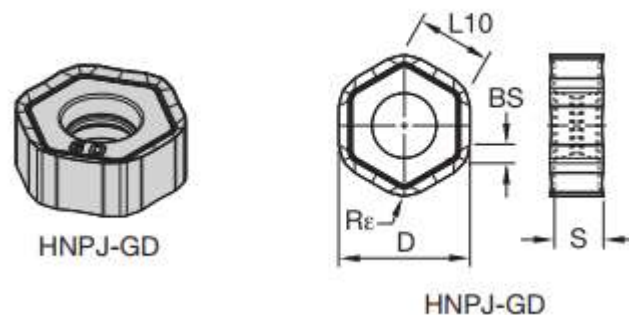
Figura 10 - Cabeçote fresador.



Fonte: Adaptado catálogo KENNAMETAL (2018).

Para a usinagem foram utilizados os insertos de metal duro de referência HNPJ0604ANSNGD-KCSM40. Esse inserto tem substrato de alta qualidade e boa resistência ao choque térmico, com revestimento de TiAlN/TiN. As dimensões principais do inserto são raio da aresta (R_ϵ) de 1,0 mm, espessura (S) de 4,45 mm e comprimento de aresta ($L10$) de 6,44 mm, de acordo com a Figura 11.

Figura 11 - Dimensões do inserto.



Fonte: Adaptado, catalogo KENNAMETAL (2018)

3.2 Materiais

Para a realização da pesquisa foram utilizados como materiais os aços com a designação ABNT 1020 e 1045. Esses dois aços têm ampla aplicação na fabricação de componentes mecânicos utilizados nos equipamentos aplicados na indústria.

Os corpos de prova foram confeccionados com dimensões quadradas de 50,8 mm por 20 mm de espessura.

Para garantir a uniformidade das dimensões primárias, foi realizado uma pré-usinagem em cada corpo de prova, de forma que todos os corpos ficaram com a mesma espessura.

Para assegurar a caracterização dos elementos químicos dos corpos de prova, foi realizado um ensaio de espectroscopia, no laboratório de caracterização dos materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará. A Tabela 2 representa os resultados com os elementos químicos de cada aço.

Tabela 2 - Composição química dos aços.

Aço	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Fe
1020	0,260	0,419	0,151	0,086	0,082	0,010	0,021	0,020	99,053
1045	0,540	0,665	0,195	0,020	0,007	0,010	0,020	0,024	98,528

Fonte: O autor.

3.3 Métodos

A presente subseção objetiva apresentar os métodos utilizados na pesquisa para caracterizar a resistência dos materiais por meio do ensaio de macrodureza, medição da rugosidade das peças, realização da usinagem e medição da energia elétrica.

3.3.1 *Medição da macrodureza*

A resistência mecânica do material pode ser identificada de forma aproximada pelo ensaio de dureza, levando em consideração que a dureza é a resistência mecânica do material de sofrer deformação plástica (Callister, 2021).

Dessa forma foi realizado um ensaio de macrodureza nas amostras dos aços que para posterior ensaio de usinagem. A medição foi realizada utilizando um durômetro de bancada modelo DG – 150 do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, *campus* de Itapipoca, conforme Figura 12. Os ensaios foram feitos em três pontos da amostra, para posterior realização das médias das medidas. Como parâmetro de pré-carga foi estabelecido 10 kg com carga total de 150 kg, sendo a dureza registrada na escala HRB e depois foi convertida para a escala HB.

Figura 12- Durômetro de bancada.



Fonte: O Autor.

3.3.2 Medição da rugosidade

Para mediação da rugosidade foi utilizado um rugosímetro portátil da marca MITUTOYO, modelo SJ-201 do laboratório de metrologia – LMET do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, *campus* de Maracanaú. Cada corpo de prova após usinagem foi submetido a verificação da rugosidade, sendo essa realizada em 6 pontos da amostra em sentido transversal, aos riscos produzidos pela ferramenta. Como parâmetros de (*cut-off*) do instrumento foi utilizado um valor de 0,8 mm e como escala de rugosidade foi adotada a escala (*Ra*), com unidades de medidas em micrômetros (μm). A Figura 13 apresenta o modelo do rugosímetro utilizado.

Figura 13 - Rugosímetro portátil.

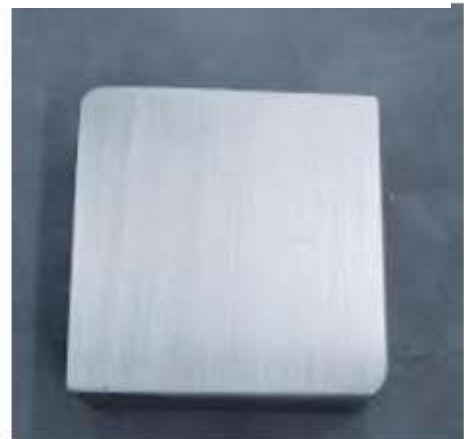
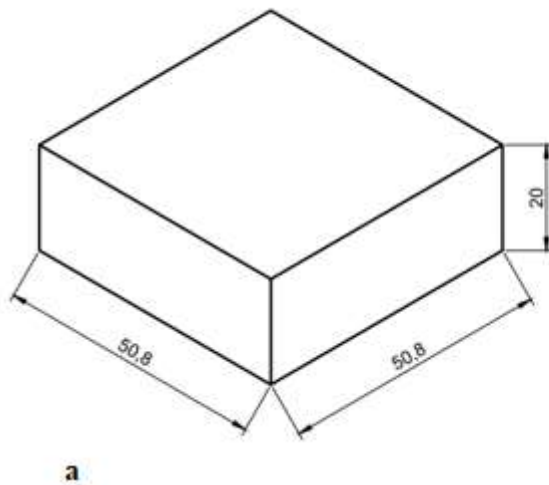


Fonte: O Autor

3.3.3 Procedimento de Usinagem

Os testes de usinagem foram realizados em corpos de prova conforme Figura 14, utilizando uma fresadora universal na operação de fresamento frontal. Foram realizados 9 testes para cada aço conforme níveis estabelecidos na Tabela 3. Para cada teste houve uma repetibilidade de 6 passes de corte, com profundidade de corte de 1,5mm, totalizando 108 ensaios.

Figura 14 - Corpo de prova - a) desenho, b) modelo real.



Fonte: O Autor.

As dimensões dos corpos de prova foram definidas, levando em consideração a facilidade de encontrar esses materiais no comércio local. Como também permitir a avaliação da rugosidade, de acordo com o comprimento a ser usinado e a facilidade de fixação por meio de morsa de máquina, na operação de fresamento frontal.

3.3.4 *Parâmetros de Corte*

Os parâmetros de corte a serem variados nos ensaios foram: A velocidade de corte e a velocidade de avanço da mesa. Esses parâmetros foram escolhidos dentro de uma faixa aceitável das velocidades de cortes definidas para a ferramenta de trabalho. Em especial as velocidades de avanço da mesa, foram definidas tomando como base o tempo necessário, para a realização das medições de energia elétrica do equipamento. Com a combinação dos parâmetros apresentados na Tabela 3, pode-se avaliar a influência dos mesmos no consumo de energia elétrica da máquina. A velocidade de corte é definida de acordo com a equação 1.

Tabela 3 - Parâmetros de corte.

Níveis	Vc (m/min)	Va (mm/min)	Ap (mm)	Materiais
1	60	35	1,5	1020 e 1045
2	81	35	1,5	
3	112	35	1,5	
4	60	48	1,5	
5	81	48	1,5	
6	112	48	1,5	
7	60	75	1,5	
8	81	75	1,5	
9	112	75	1,5	

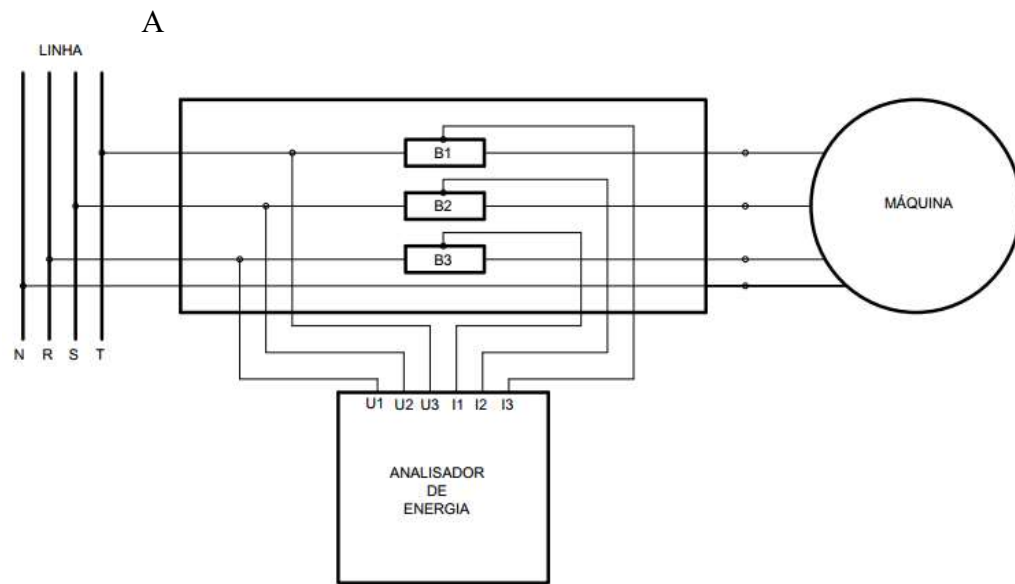
Fonte: O Autor.

3.3.5 *Medição do Consumo de Energia*

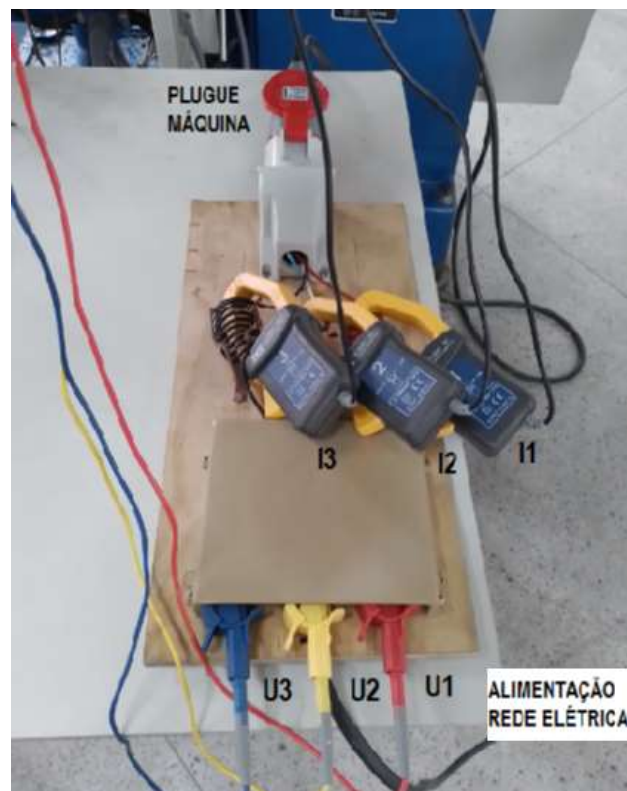
As grandezas elétricas foram medidas por meio de um analisador de energia conectado a uma bancada teste, que por sua vez está interligada com a máquina. A bancada foi desenvolvida com o objetivo de aumentar a resolução das escalas de medições das grandezas elétricas (corrente elétrica, potência ativa e energia elétrica consumida).

Dessa maneira a bancada permite, um aumento de 10 vezes os valores medidos e a Figura 15, representa o esquema elétrico para ligação da bancada, com o analisador de energia e a máquina. Outro aspecto a ser considerado com o uso da bancada é a segurança do operador e do equipamento.

Figura 15 - Bancada Teste - a) Esquema elétrico, b) Modelo real.



B

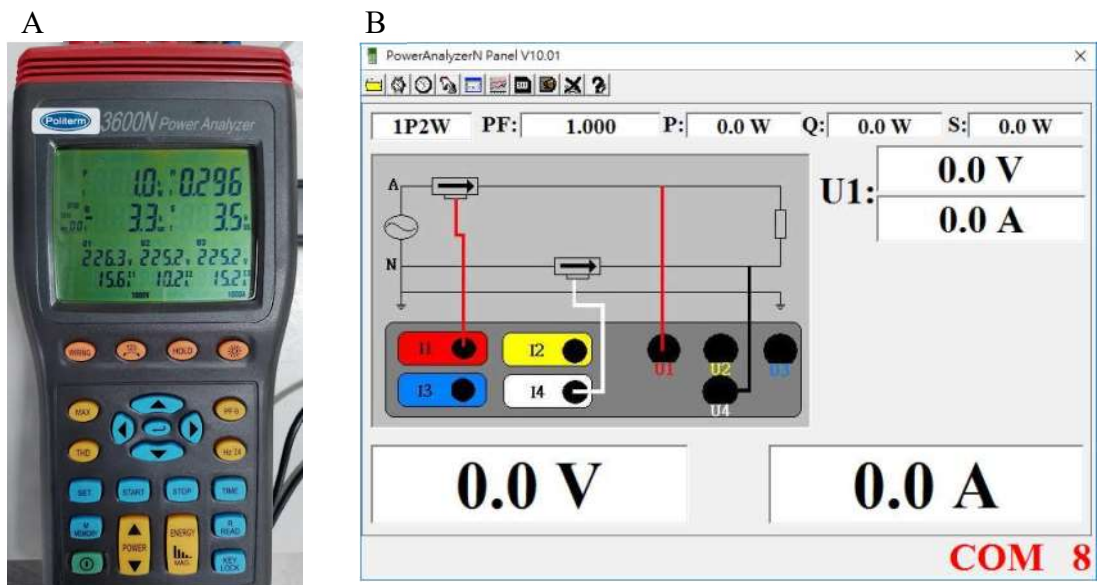


Fonte: O Autor.

As informações das medições de energia foram coletadas do analisador de energia da marca POLITERM, modelo: 3600N, através do *software* Power AnalyzerN. Sendo essas coletas realizadas a um tempo de cada 5s. Esses dados foram tabulados em planilha do Excel para posteriormente serem analisados.

A Figura 16, traz uma representação do analisador de energia e da interface do programa utilizado para a coleta dos dados.

Figura 16 - a) Analisador de energia, b) Interface do software.



Fonte: O Autor.

Os instrumentos que foram apresentados para a realização das medições de energia do equipamento utilizado nessa pesquisa fazem parte do Laboratório de Metrologia – LMET dos Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, *campus* de Maracanaú.

3.4 Avaliação dos Resultados Obtidos

Como forma de avaliar os resultados obtidos na pesquisa, foi utilizado uma análise gráfica que faz uma relação, da variação da velocidade de corte e da velocidade de avanço da mesa com a potência de corte, potência de usinagem, potência requerida e rugosidade da peça.

Também foi realizada uma análise de variância (ANOVA), de acordo os parâmetros variados nos aços ensaiados (velocidade de corte e avanço) e as variáveis de resposta.

De forma que será possível verificar os fatores que podem contribuir para o menor consumo de energia elétrica do equipamento, durante a usinagem dos aços na operação de fresamento frontal, respeitando a qualidade da superfície das peças.

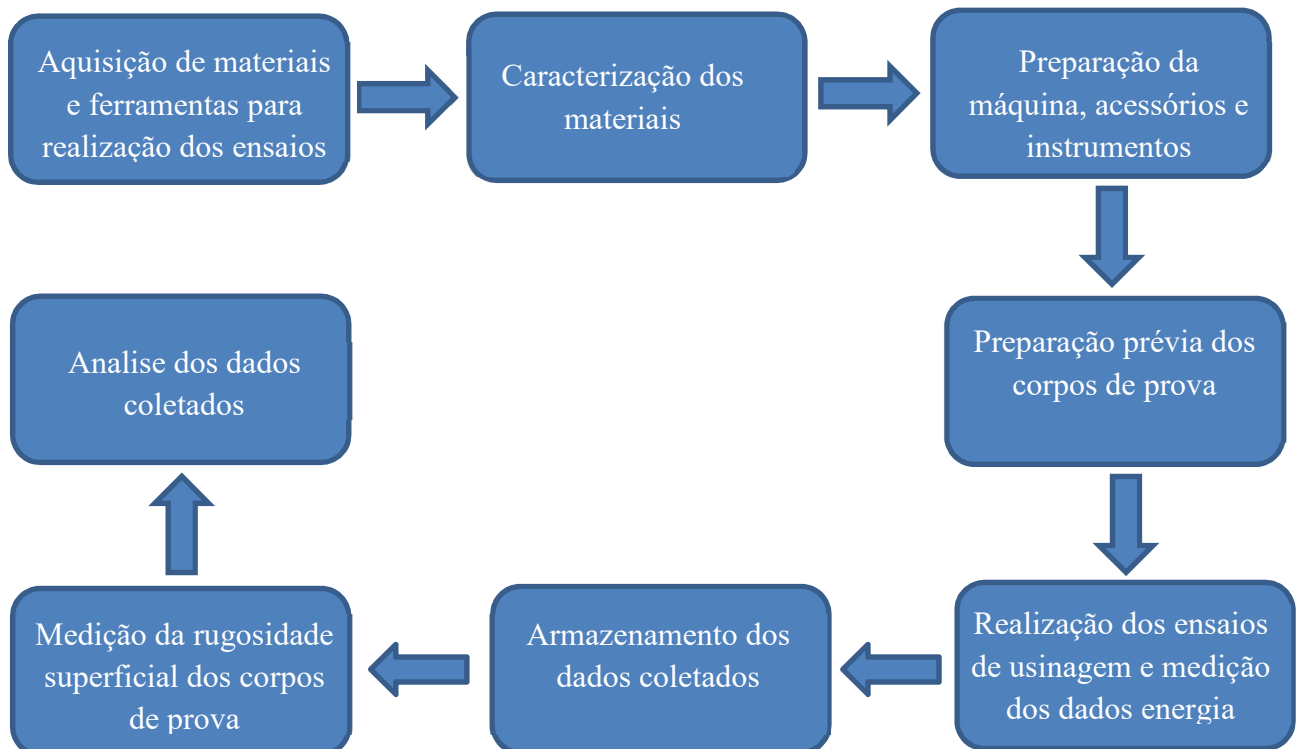
3.5 Determinação das Variáveis de Saída

A variável de saída potência elétrica requerida foi medida com o uso do analisador de energia, o tempo de usinagem foi cronometrado para cada passe de usinagem, a potência de usinagem foi determinada subtraindo da potência elétrica requerida o valor da potência elétrica em vazio (sem usinar), a força de usinagem foi encontrada dividindo o valor da potência de usinagem pelo valor da velocidade de corte e o consumo de energia foi determinado pelo produto da potência elétrica requerida com o tempo de usinagem.

3.6 Fluxograma da Metodologia Aplicada na Pesquisa

Com o objetivo de facilitar o entendimento da metodologia aplicada nessa pesquisa foi elaborado um fluxograma, conforme Figura 17.

Figura 17 - Metodologia para realização dos ensaios e coleta dos dados.



Fonte: O Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos, levando em consideração os ensaios realizados conforme metodologia especificada anteriormente com o objetivo, de avaliar a influência dos parâmetros de corte no consumo de energia elétrica, potência de usinagem, potência requerida do equipamento, força de usinagem, tempo de usinagem e rugosidade final. Para isso foram usinados aços ABNT 1020 e 1045 com macrodurezas determinadas antes da realização dos testes e parâmetros definidos na Tabela 3.

4.1 Aço ABNT 1020

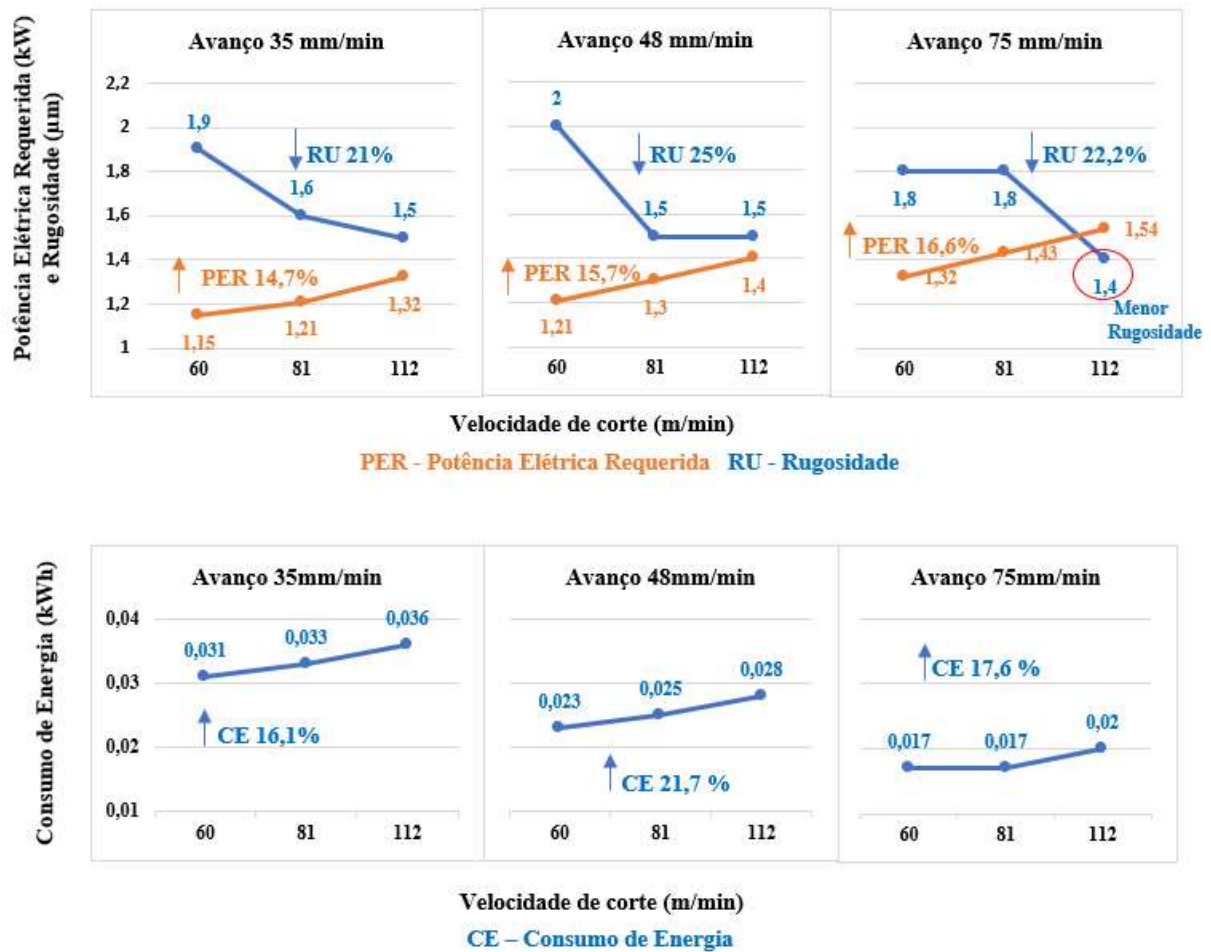
Para o aço ABNT 1020 são apresentadas as medidas de macrodureza e os gráficos relacionados a rugosidade final, potência de usinagem, potência requerida, força de usinagem e tempo de usinagem comparando com o consumo de energia elétrica do equipamento.

A medida da macrodureza encontrada para o aço ABNT 1020 foi de 44 HRB que convertida para a dureza Brinel corresponde a 89 HB. Segundo Callister Jr. (2021), podemos multiplicar esse valor por 3,45 e encontrar o limite de resistência a tração do aço. Para o aço ABNT 1020 foi encontrado $3,45 \times 89 = 307 \text{ MPa}$.

4.1.1 Medida da Rugosidade

A rugosidade final foi obtida por meio do fresamento frontal. Esse parâmetro visa avaliar a qualidade da superfície de uma peça usinada. Os gráficos da Figura 18, relacionam as medidas da rugosidade, consumo de energia e potência requerida do equipamento em função da variação da velocidade de corte para cada faixa de velocidade de avanço, após a usinagem dos corpos de prova do aço ABNT 1020.

Figura 18 - Rugosidade Final, Potência elétrica requerida e consumo de energia no aço ABNT 1020.



Fonte: O Autor.

Os experimentos mostraram uma redução da rugosidade com o aumento da velocidade de corte, conforme Figura 18. Para a faixa de avanço de 35 mm/min a redução foi de 21%, para a faixa de avanço de 48 mm/min a redução foi de 25% e para o avanço de 75 mm/min a redução foi de 22,2%. Os valores de rugosidades variaram pouco com a mudança da velocidade de avanço. O menor valor de rugosidade obtido foi de 1,4 μm usando a velocidade de avanço de 75 mm/min e a velocidade de corte de 112 m/min.

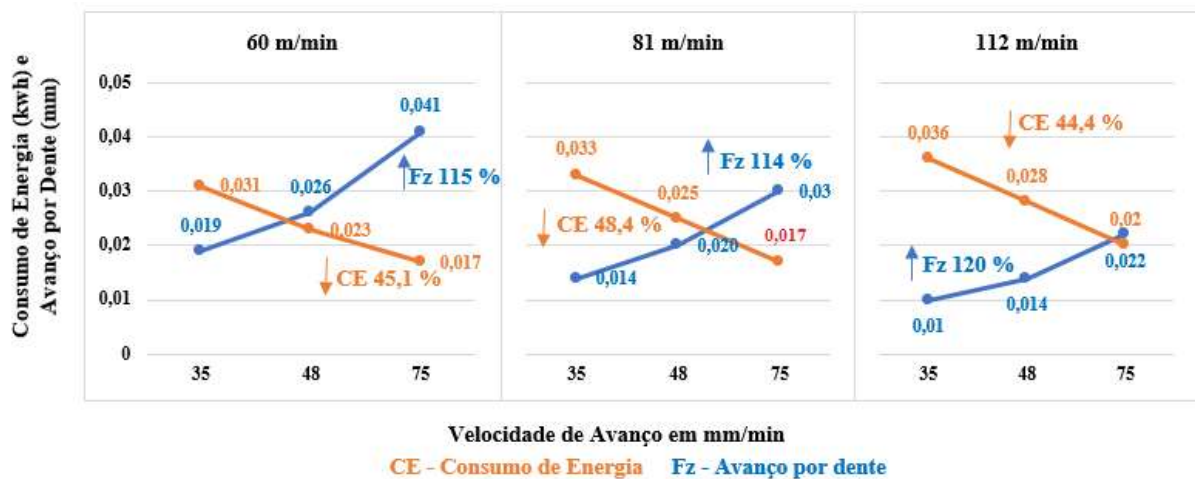
A potência requerida do equipamento aumenta com o aumento da velocidade de corte para cada faixa de avanço. Para a faixa de avanço de 35 mm/min o aumento foi de 14,7%, para o avanço de 48 mm/min o aumento foi de 15,7% e para o avanço de 75 mm/min o aumento foi de 16,6%. Essa potência foi medida diretamente pelo analisador de energia.

O consumo de energia elétrica do equipamento aumenta com o aumento da velocidade de corte. Esse aumento foi de 16,1% para a faixa de avanço de 35 mm/min, de 21,7% para a faixa de avanço de 48 mm/min e de 17,6% para a faixa de avanço de 75 mm/min.

4.1.2 Avanço por Dente

O avanço por dente da fresa é determinado em função do número de dentes da fresa e do número de rotações por minuto. Para tanto foi utilizada a Equação 2 e a Figura 19, mostra os gráficos para cada faixa de velocidade de corte.

Figura 19 - Consumo de energia e avanço por dente no aço ABNT 1020.



Fonte: O Autor.

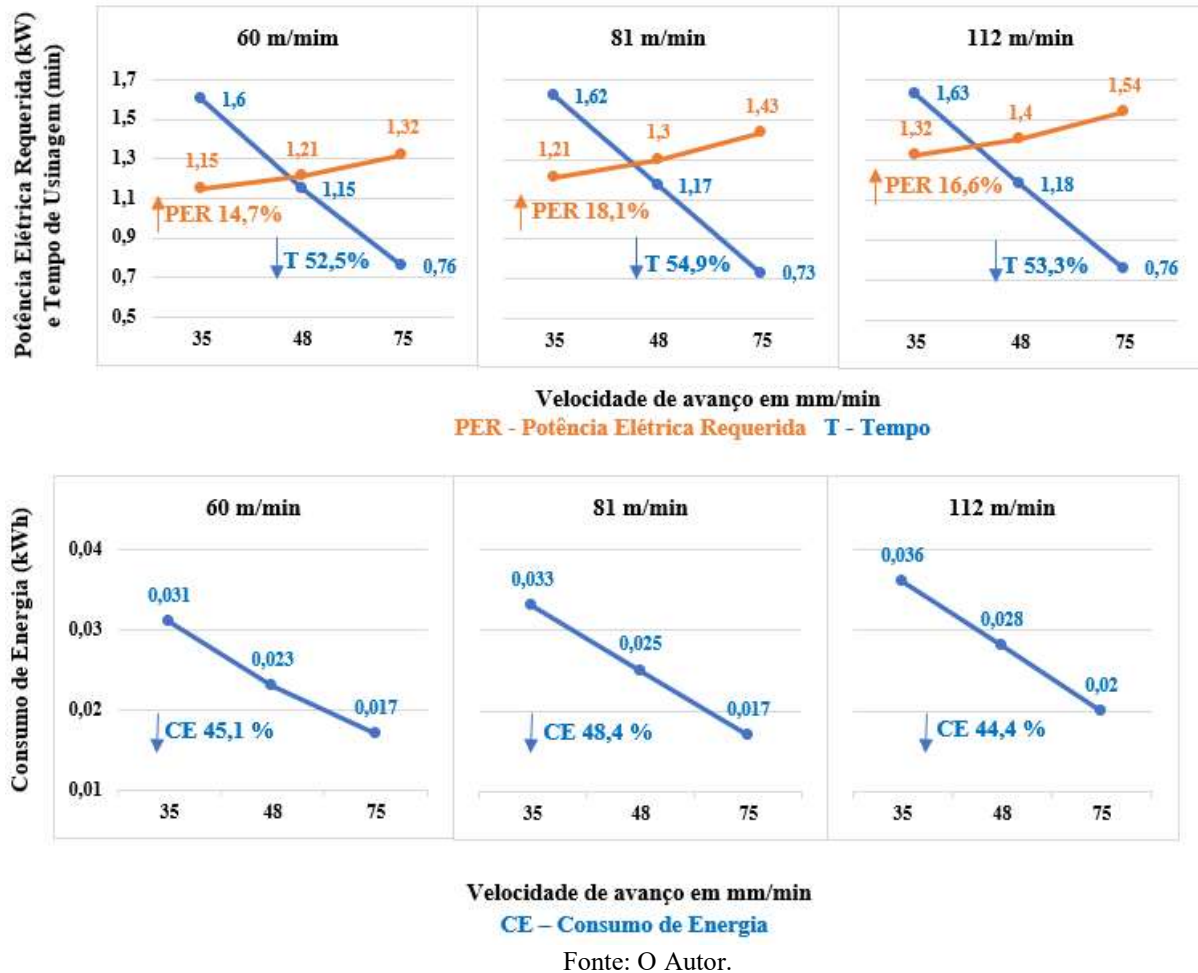
Para cada faixa de velocidade de corte houve um aumento do avanço por dente, sabendo-se que se a velocidade é constante e o número de dentes da fresa também, o único fator que faz o avanço por dente variar é a velocidade de avanço. Para a velocidade de 60 m/min o aumento do avanço por dente foi de 115 %, para a velocidade de 81 m/min o aumento foi de 114 % e para a velocidade de 112 m/min o aumento foi de 120 %.

É reduzido o consumo de energia com o aumento da velocidade de avanço e do avanço por dente para cada faixa de velocidade de corte. Na faixa de velocidade de 60 m/min a redução foi de 45,1 %, na faixa de velocidade de 81 a redução foi de 48,4 % e para a faixa de velocidade de 112 m/min a redução foi de 44,4 %.

4.1.3 Tempo de Usinagem

No processo de fresamento o tempo de usinagem é inverso a velocidade de avanço, ou seja, para maiores velocidades de avanço temos menores tempos de usinagem. A Figura 20 representa a potência elétrica, o tempo de usinagem e o consumo de energia em função da variação da velocidade de avanço para cada faixa de velocidade de corte.

Figura 20 - Potência elétrica requerida, tempo de usinagem e consumo de energia no aço ABNT 1020.



O tempo de usinagem reduz com o aumento da velocidade de avanço para cada faixa de velocidade de corte. Os tempos de usinagem são praticamente iguais quando se compara com o mesmo avanço em cada faixa de velocidade de corte. Isso porque a velocidade de avanço trabalha com um motor independente. Grande parte das máquinas fresadoras atuais trabalham dessa forma. Os tempos de usinagem são menores quando as velocidades de avanço são maiores.

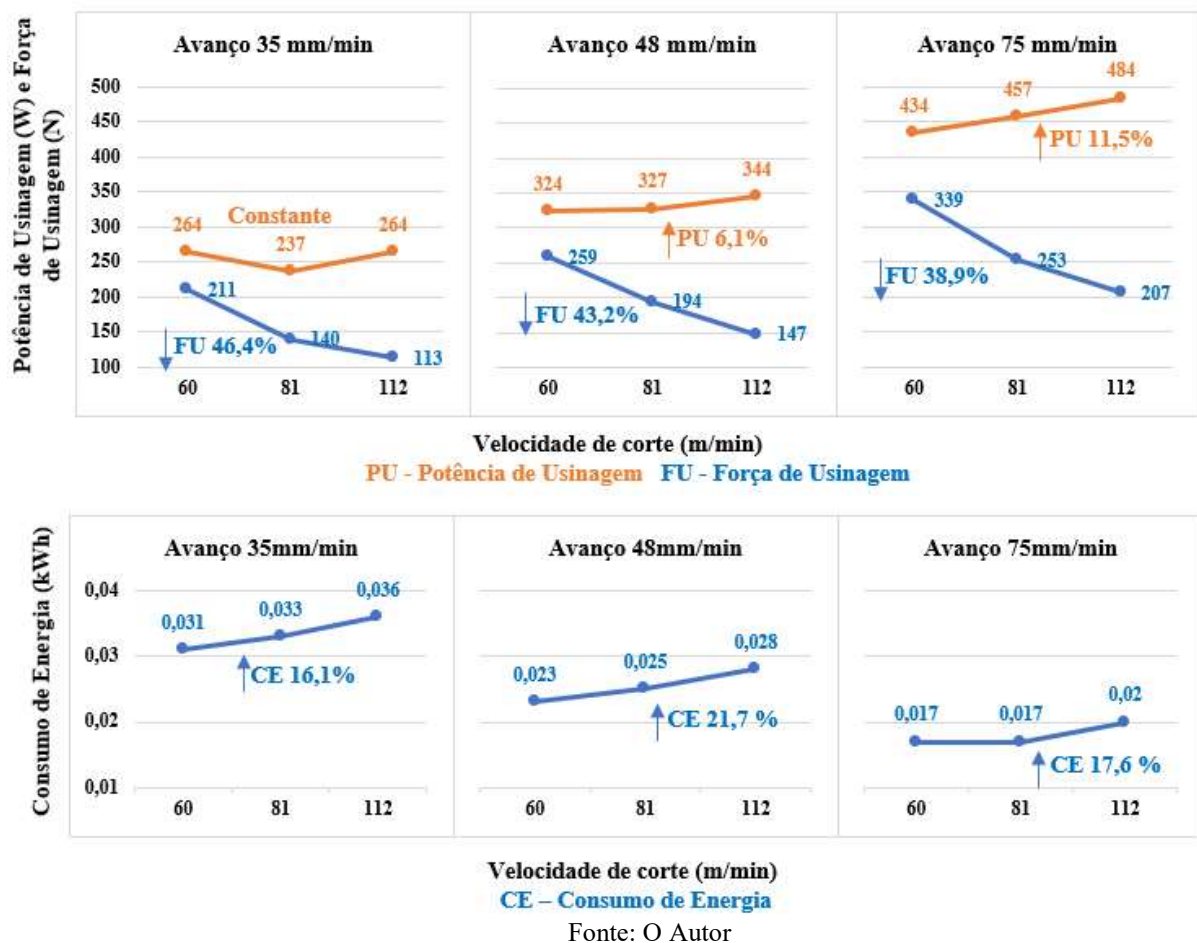
A potência requerida aumenta à medida que a velocidade de avanço também aumenta em cada faixa de velocidade de corte. Para a faixa de 60 m/min o aumento foi de 14,7%, para a faixa de 81 m/min o aumento foi de 18,1% e para a faixa de 112 m/min o aumento foi de 16,6%.

O consumo de energia elétrica é reduzido, com o aumento da velocidade de avanço e com a redução do tempo de usinagem, para cada faixa de velocidade de corte. Esse resultado foi apresentado na subseção 4.1.2 da página 47.

4.1.4 Força de Usinagem e Potência de Usinagem

A força de usinagem tem sua significância na potência de usinagem. Para determinar a força de usinagem conhecendo a força de corte e a força radial pode-se usar a Equação 5 da página 20. Nessa pesquisa que tem caráter experimental a força de usinagem, foi determinada pela relação entre a potência de usinagem e a velocidade de corte. A Figura 21 representa graficamente os valores da força de usinagem e potência de usinagem para cada faixa de velocidade de avanço variando a velocidade de corte.

Figura 21 - Força de usinagem, potência de usinagem e consumo de energia em função da velocidade de corte no aço ABNT 1020.



De acordo com os gráficos da Figura 21, nota-se uma redução da força de usinagem com o aumento da velocidade de corte para cada faixa de avanço. A maior redução ocorreu na faixa de avanço de 35 mm/min com um valor de 46,4%, enquanto que a menor redução foi de 38,9% para a faixa de avanço de 75 mm/min.

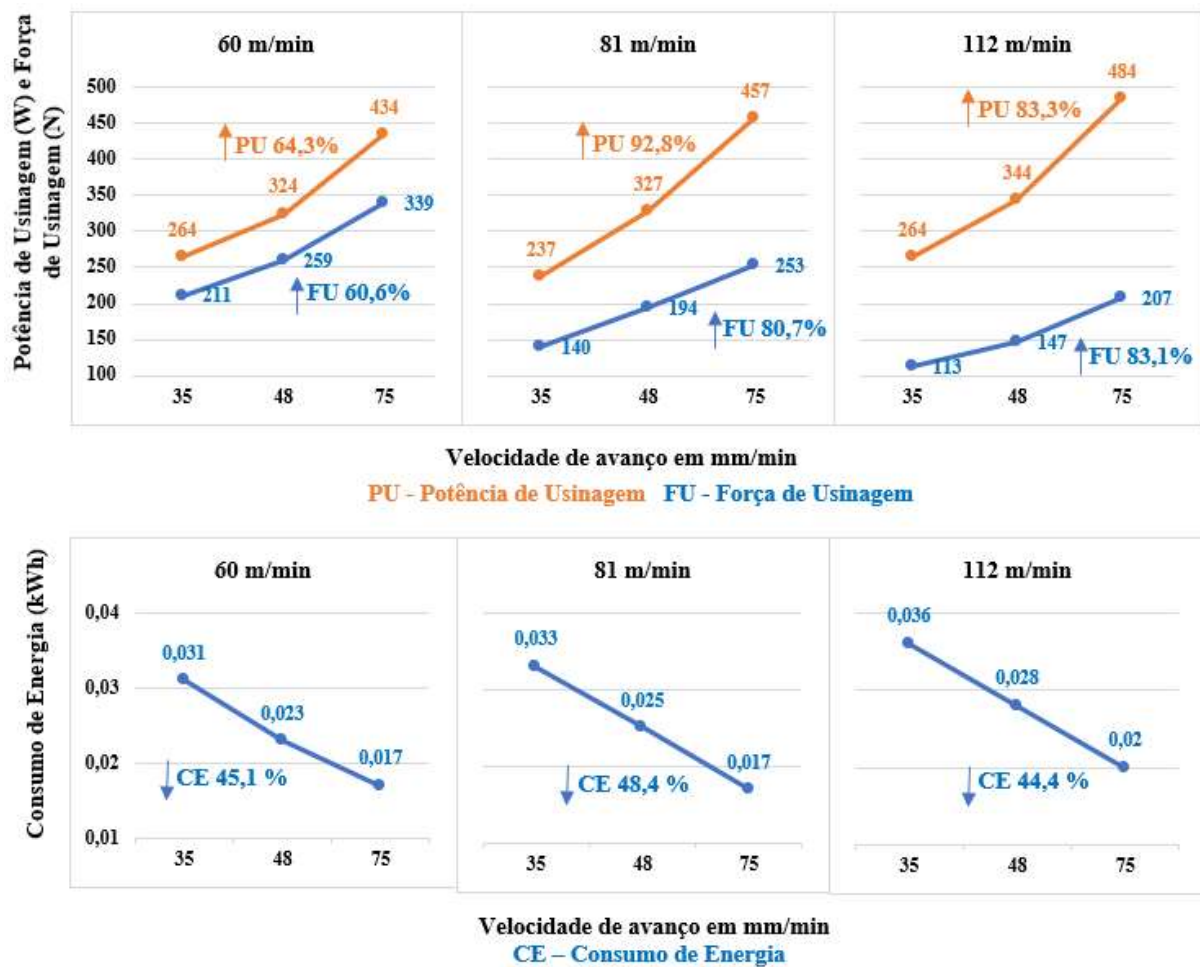
A potência de usinagem foi determinada reduzindo da potência requerida, o valor da potência em vazio, ou seja, sem usinar. Essa potência sofre pequenos aumentos com o aumento

da velocidade de corte. Para a faixa de velocidade de avanço de 35 m/min essa potência se manteve praticamente constante. Para a faixa de avanço de 48 m/min teve um aumento de 6,1% enquanto que para a faixa de 75 m/min o aumento foi de 11,5%.

O consumo de energia aumenta com o aumento da velocidade de corte, para cada faixa de velocidade de avanço. O maior aumento foi de 21,7% na faixa de avanço de 48 mm/min.

A Figura 22 mostra os gráficos com os valores da força de usinagem e da potência de usinagem em função da variação da velocidade de avanço para cada faixa de velocidade de corte. A força de usinagem aumenta com o aumento da velocidade de avanço para cada velocidade de corte.

Figura 22 - Força de usinagem, potência de usinagem e consumo de energia em função da velocidade de avanço no aço ABNT 1020.



Fonte: O Autor.

Para a faixa de velocidade de corte de 60 m/min o aumento da força de usinagem foi de 60,6%, para a velocidade de corte de 81 m/min o aumento foi de 80,7% e para a faixa de velocidade de corte de 112 m/min o aumento foi de 83,1%.

A potência de usinagem também aumenta com o aumento da velocidade de avanço para cada faixa de velocidade de corte. O maior aumento foi de 92,8% para a faixa de velocidade de corte de 81 m/min, enquanto que o menor valor de aumento foi de 64,3% para a faixa de velocidade de corte de 60 m/min.

O consumo de energia do equipamento diminui com aumento da velocidade de avanço para cada faixa de velocidade de corte, conforme já analisado na subseção 4.1.2 da página 47.

4.2 Aço ABNT 1045

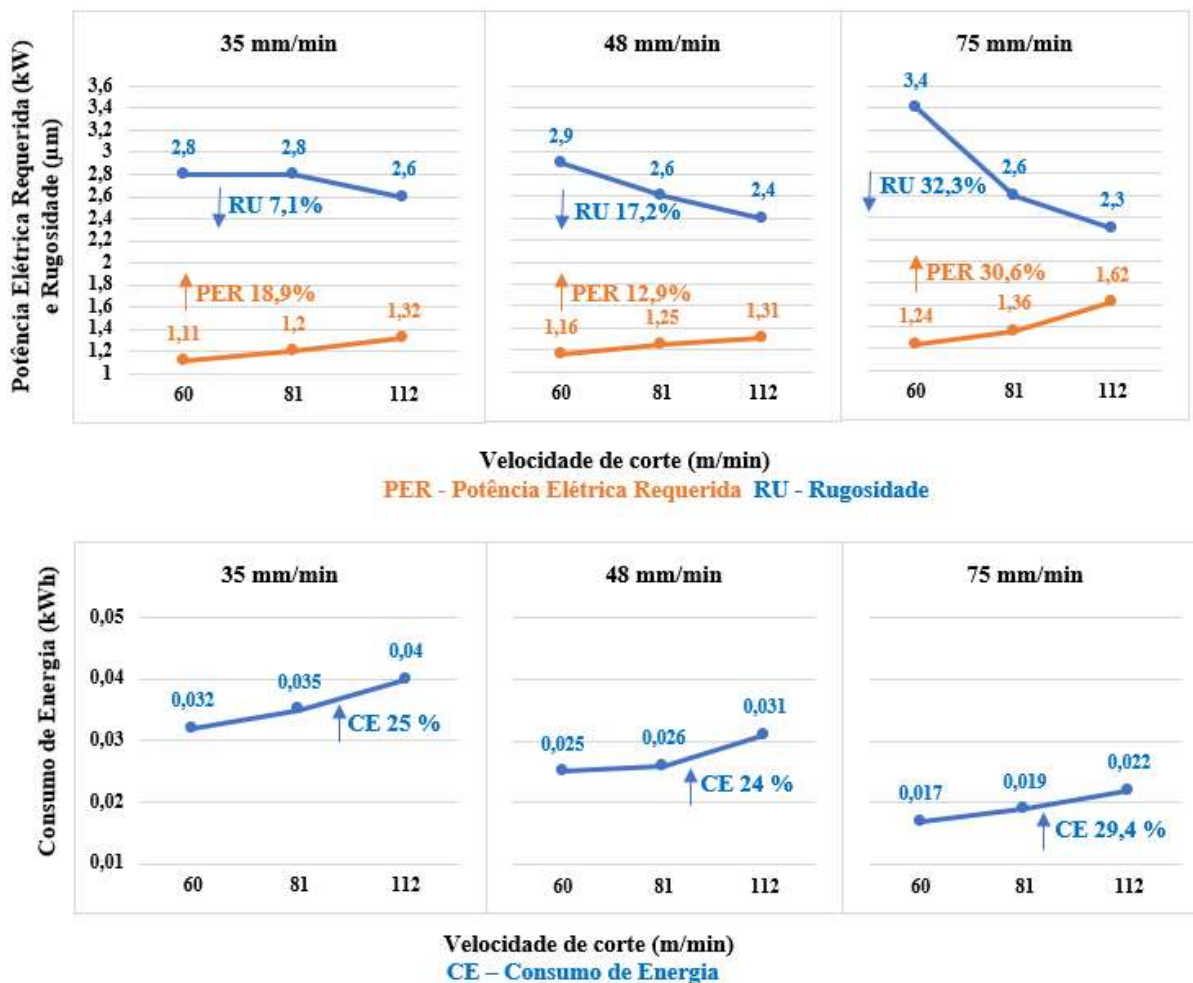
Para o aço ABNT 1045 são apresentadas as medidas de macrodureza e os gráficos relacionados a rugosidade final, potência de usinagem, potência requerida, força de usinagem e tempo de usinagem comparando com o consumo de energia elétrica do equipamento.

A medida da macrodureza encontrada para o aço ABNT 1045 foi de 73 HRB que convertida para a dureza Brinell corresponde a 132 HB. Segundo Callister Jr. (2021), podemos multiplicar esse valor por 3,45 e encontrar o limite de resistência a tração do aço. Para o aço ABNT 1045 foi encontrado $3,45 \times 132 = 455$ MPa.

4.2.1 Medida da Rugosidade

O presente subtópico apresenta a rugosidade final, a potência requerida e o consumo de energia do equipamento após operação de fresamento frontal. A Figura 23 mostra os gráficos com os parâmetros desse subtópico para a usinagem do aço ABNT 1045.

Figura 23 - Rugosidade Final, Potência elétrica requerida e consumo de energia no aço ABNT 1045.



A rugosidade reduz com o aumento da velocidade de corte para todas as faixas de velocidade de avanço. Na faixa de 35 mm/min a redução foi de 7,1%, para faixa de 48 mm/min a redução foi de 17,2% e para a faixa de 75 mm/min houve a maior redução na ordem de 32,3%.

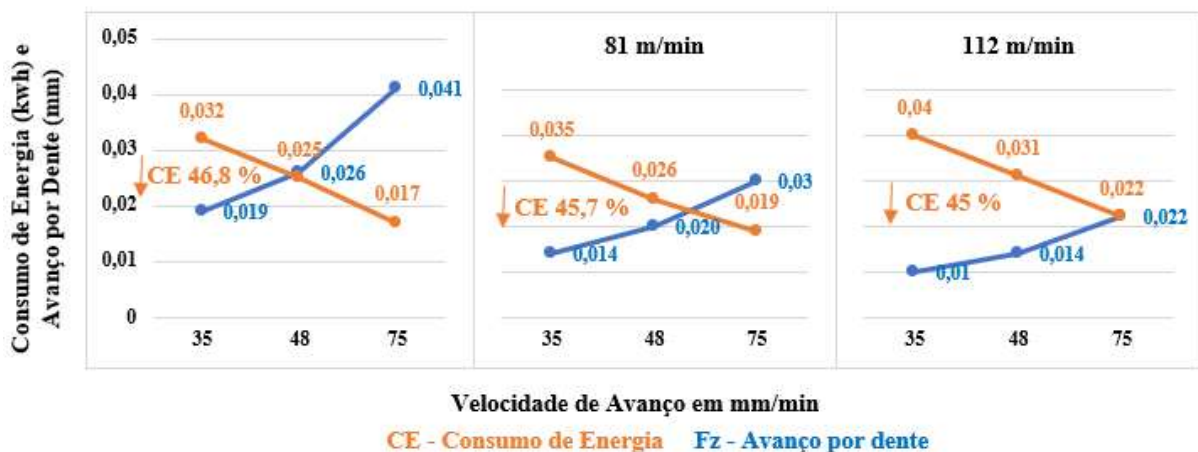
A velocidade de corte tem influência na potência requerida do equipamento. Essa potência cresce com o aumento da velocidade de corte. Aumentando a velocidade de corte em 86,6% para cada faixa de avanço foi observado o maior aumento da potência requerida na ordem de 30,6% na faixa de avanço de 75 mm/min.

O consumo de energia também aumenta com o crescimento da velocidade de corte em cada faixa de velocidade de avanço. Para a faixa de velocidade de avanço de 35 mm/min o aumento foi de 25%, para a faixa de avanço de 48 mm/min o aumento foi de 24% e para a faixa de 75 mm/min o aumento foi de 29,4%. Por outro lado, esse consumo é reduzido quando as velocidades de avanço aumentam isso por que quando as velocidades de avanços são maiores o tempo de usinagem é reduzido.

4.2.2 Avanço por Dente

Nesse subtópico será apresentado o avanço por dente da fresa e o consumo de energia em função da variação da velocidade de avanço para cada faixa de velocidade de corte. A figura 24 apresenta os gráficos contemplando essas informações.

Figura 24 - Consumo de energia e avanço por dente no aço ABNT 1045.



Fonte: O Autor.

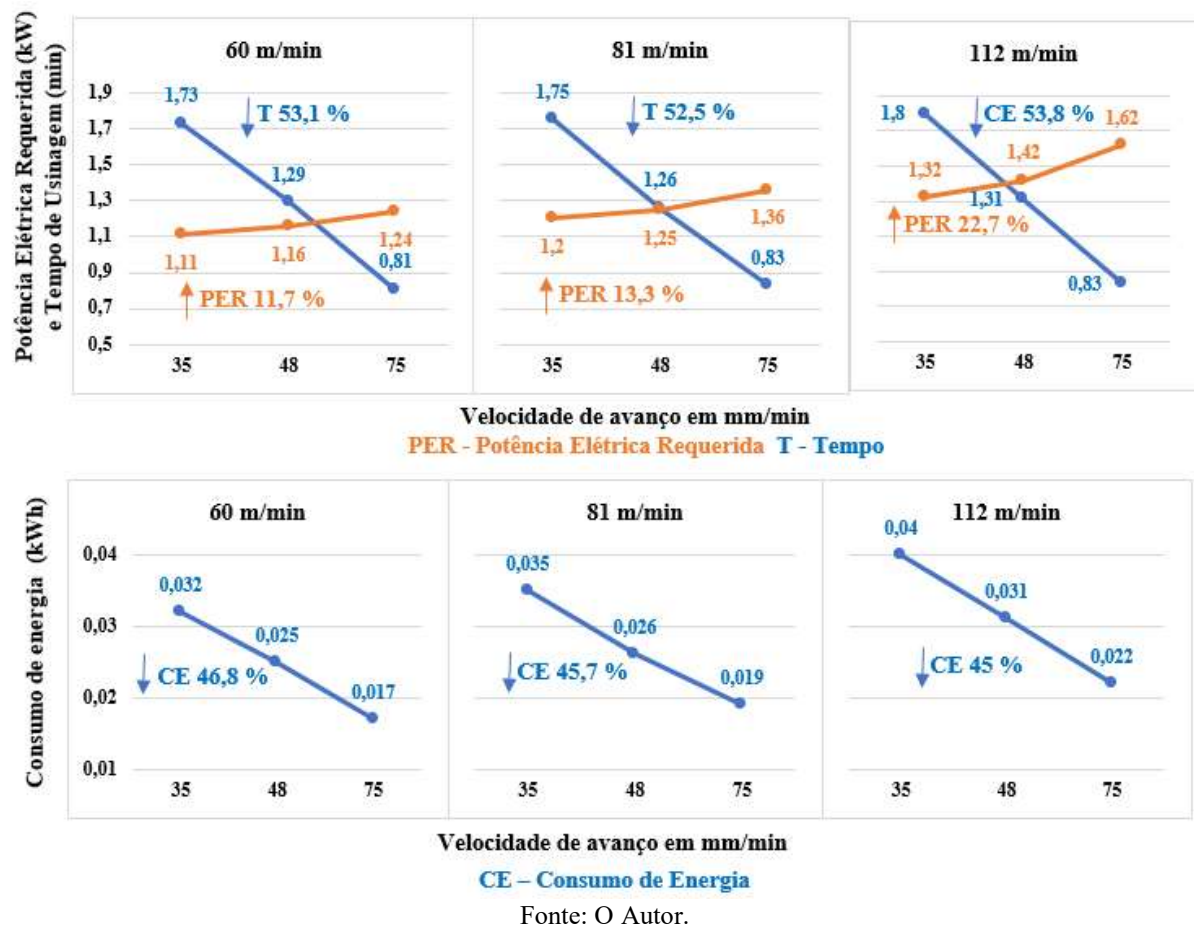
Os valores do avanço por dente aumentam com o crescimento da velocidade de avanço para cada faixa de velocidade de corte. Esse aumento percentual foi mostrado na subseção 4.1.2 da página 47, não sendo mais discutido aqui, pois as condições de usinagem são as mesmas.

O consumo de energia do equipamento reduz com o aumento da velocidade de avanço e do avanço por dente para cada faixa de velocidade de corte. Para a faixa de velocidade de corte de 60 m/min a redução foi de 46,8%, para a faixa de velocidade de 81 m/min a redução foi de 45,7% e para a faixa de velocidade de corte de 112 m/min a redução foi de 45%.

4.2.3 Tempo de Usinagem

A presente subseção apresenta por meio de gráficos da Figura 25 a potência requerida do equipamento, o tempo de usinagem e o consumo de energia elétrica em função da velocidade de avanço para cada faixa de velocidade de corte.

Figura 25- Potência elétrica requerida, tempo de usinagem e consumo de energia no aço ABNT 1045.



O tempo de usinagem reduz com o aumento da velocidade de avanço para todas as faixas de velocidade de corte. Isso ocorre pelo fato de sabermos que a velocidade de avanço é inversa ao tempo de usinagem. O tempo sofreu redução de 53% em média.

A potência requerida do equipamento cresce com aumento da velocidade de avanço para todas as faixas de velocidade de corte. Para a faixa de 60 m/min o aumento foi de 11,7%, para

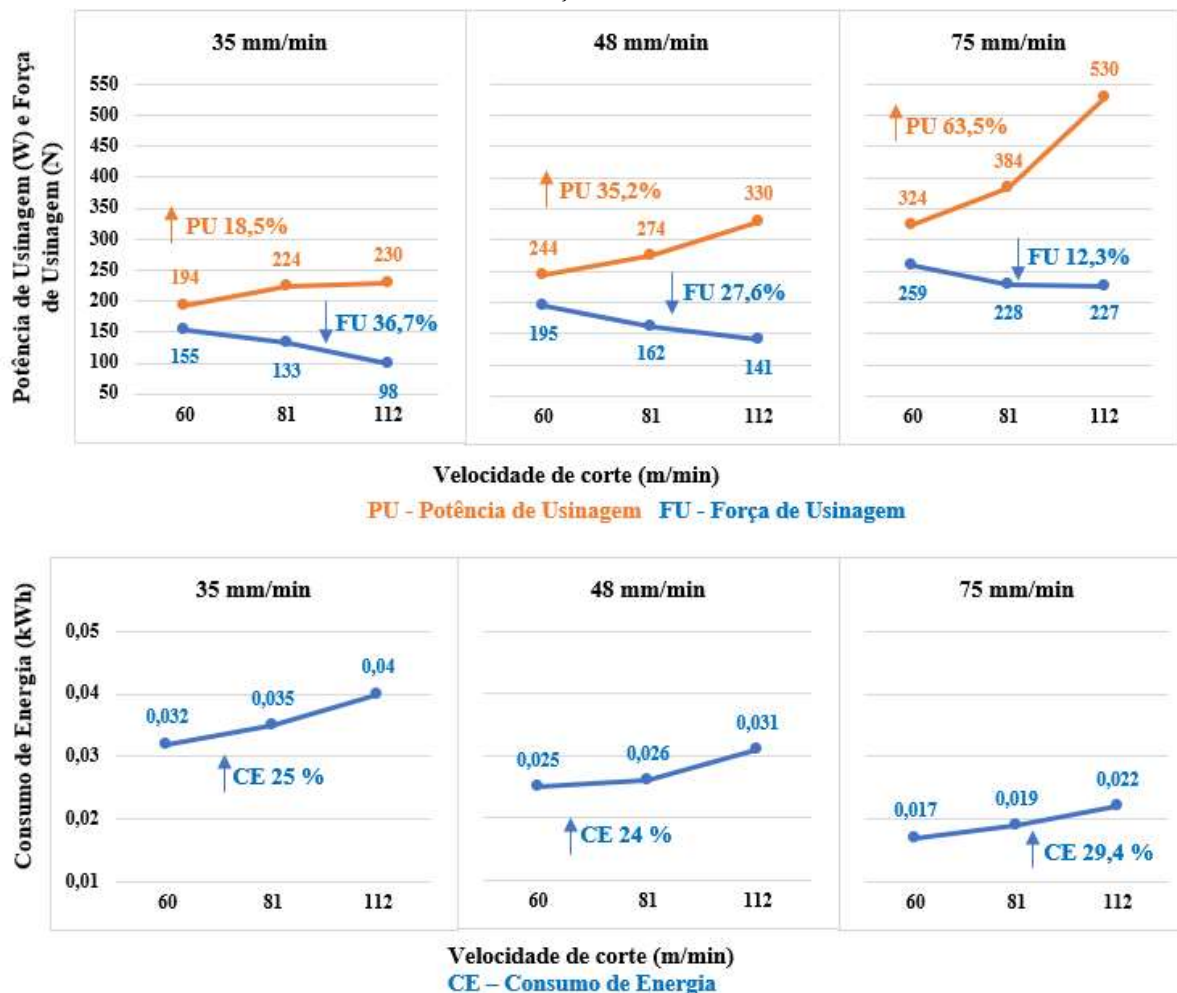
a faixa de 81 m/min o aumento foi de 13,3% e para a faixa de velocidade de corte de 112 m/min o aumento foi de 22,7%.

Por último temos a observação do consumo de energia elétrica reduz com o aumento da velocidade de avanço para todas as faixas de velocidade de corte. Os valores percentuais foram apresentados na subseção 4.2.2 da página 53.

4.2.4 Força de Usinagem e Potência de Usinagem

O presente subtópico apresenta a força de usinagem, a potência de usinagem e o consumo de energia elétrica em função da velocidade de corte conforme Figura 26.

Figura 26 - Força de usinagem, potência de usinagem e consumo de energia em função da velocidade de corte no aço ABNT 1045.



Fonte: O Autor.

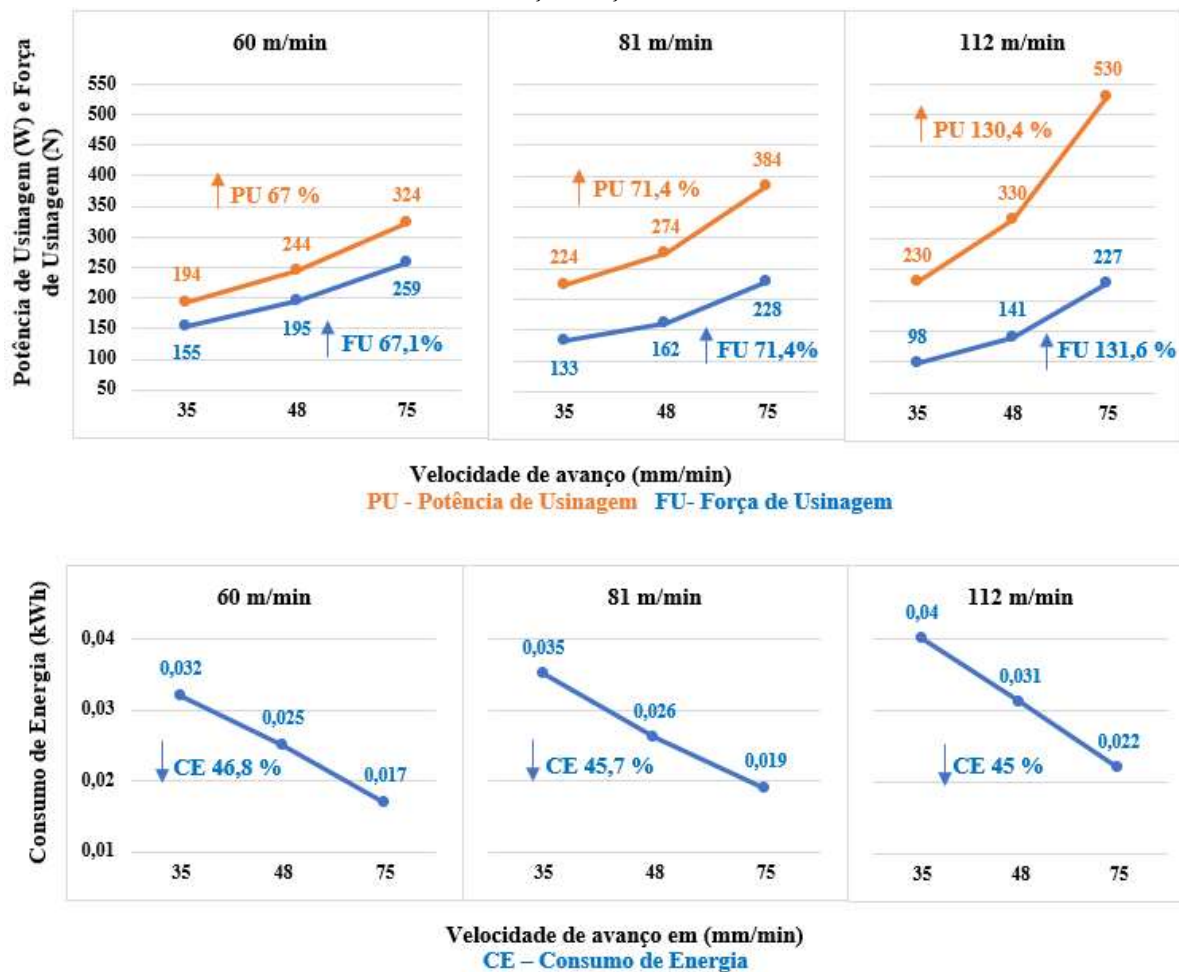
Para todas as faixas de velocidade de avanço ocorreu uma redução da força de usinagem em função do aumento da velocidade de corte. A maior redução foi de 36,7% para faixa de velocidade de avanço de 35 mm/min, enquanto que a menor redução foi de 12,3% para a faixa de 75 mm/min.

A potência de usinagem aumenta com o crescimento da velocidade de corte para cada faixa de avanço. Para a faixa de velocidade de avanço de 35 mm/min o aumento foi de 18,5%, para faixa de 48 mm/min o aumento foi de 35,2% e para a faixa de velocidade de avanço de 75 mm/min o aumento 63,5%.

A velocidade de corte tem influência direta no consumo de energia, denotando um aumento de consumo de energia elétrica com o aumento da velocidade de corte para cada faixa de velocidade de avanço. Os resultados percentuais foram apresentados na subseção 4.2.1 da página 52.

A Figura 27 representa a força de usinagem, a potência de usinagem e o consumo de energia em função da velocidade de avanço para cada faixa de velocidade de corte.

Figura 27 - Força de usinagem, potência de usinagem e consumo de energia em função da velocidade de avanço no aço ABNT 1045



Fonte: O Autor.

A força de usinagem aumenta com o aumento da velocidade de avanço para cada faixa de velocidade de corte. Para a faixa de velocidade de corte de 60 m/min o aumento foi de 67,1%,

para a faixa de velocidade de 81 m/min o aumento foi de 71,4% e para a faixa de velocidade de corte de 112 m/min o aumento foi de 131,6%.

A potência de usinagem também aumenta com o crescimento da velocidade de avanço em cada faixa de velocidade de corte. O maior aumento foi de 130,4% para a faixa de velocidade de corte de 112 m/min.

O consumo de energia do equipamento reduz com o aumento da velocidade de avanço para cada faixa de velocidade de corte.

4.3 Discussões Gerais

Nesta seção são apresentadas as discussões gerais, considerando os parâmetros de corte utilizados na pesquisa e sua relação com as variáveis de saída para cada ensaio realizado nos materiais propostos.

Por meio das experimentações realizadas na máquina fresadora, observou-se interações entre as variações dos parâmetros de corte e as variáveis de saída que foram estabelecidas para serem avaliadas.

As medidas de rugosidade média sofreram pequenos aumentos com a variação de velocidades de avanço para todos os ensaios realizados nos aços ABNT 1020 e 1045. A pesquisa de Zhao *et al.* (2018) afirma que os valores de rugosidades menores são obtidos quando as velocidades de avanço são baixas.

Por outro lado, as maiores velocidades de corte promoveram uma redução dos valores de rugosidade média nos referidos aços. O menor valor de rugosidade média obtido ocorreu na usinagem do aço ABNT 1020 e o maior valor de rugosidade foi na usinagem do aço ABNT 1045.

Essas qualidades de superfícies usinadas por meio desse estudo alcança valores de rugosidades condizentes com a operação de fresamento realizada nos ensaios. Para o aço ABNT 1020 os valores de rugosidades variaram de 1,4 μ m à 2,0 μ m, sendo o menor valor de rugosidade média de 1,4 μ m obtido com velocidade de avanço igual a 75 mm/min, velocidade de corte de 112 m/min com um consumo de 0,020 kWh.

Para o aço ABNT 1045 esses valores variaram de 2,3 μ m à 3,4 μ m, sendo o menor valor de rugosidade média de 2,3 μ m obtido com velocidade de avanço igual a 75 mm/min, velocidade de corte de 112 m/min e consumo de 0,022 kWh. Percebe-se então os mesmos parâmetros com uma pequena variação do consumo de energia elétrica do equipamento.

A velocidade de corte utilizada para o processo de fresamento frontal apresenta influência no consumo de energia para todos os ensaios realizados. O aumento das velocidades de corte contribui para os valores mais altos de consumo energético do equipamento. O maior aumento foi constatado na faixa de avanço de 75 mm/min com crescimento da velocidade de corte 86,6% para o aço 1045 e para o aço ABNT 1020 o maior aumento ocorreu na faixa de avanço de 48 mm/min.

Zhou *et al.* (2018) realizaram uma pesquisa para otimização de parâmetros de corte visando a eficiência energética no processo de fresamento e contaram que as altas velocidades de corte e baixas velocidades de avanço contribuem para maiores consumos de energia.

A velocidade de avanço tem influencia significativa no consumo de energia na operação de fresamento frontal de acordo com os ensaios realizados nessa pesquisa. Os valores de menores avanços contribuem para maiores consumos de energia para cada faixa de velocidade de corte.

Tanto para o aço ABNT 1020, quanto para o aço ABNT 1045 o maior valor de consumo ocorreu na faixa de avanço de 35 mm/min com velocidade de corte de 112 m/min. O menor consumo para ambos os aços ensaiados foi quando a velocidade de corte foi de 60 m/min e velocidade de avanço igual a 75 mm/min. Contatou-se também que na usinagem do aço ABNT 1045 ocorre maior consumo de energia, com cerca de 11,1% maior que na usinagem do aço ABNT 1020. Essas variações são associadas a propriedades dos materiais como: dureza, resistência mecânica e microestruturas de acordo com Anand *et al.* (2016).

A Tabela 3 apresenta os valores de redução de consumo de energia para cada aço com variação das velocidades de corte e aumento de velocidade de avanço de 114,4%.

TABELA 3 – Redução de consumo de energia em função da velocidade de corte e aumento da velocidade de avanço em 114,4%.

Velocidade de corte em (m/min)	AÇO ABNT 1020	AÇO ABNT 1045
60	45,1%	46,8%
81	48,4%	45,7%
112	44,4%	45,0%

Fonte: O Autor.

De acordo com a Tabela 3, para o aço ABNT 1020 a maior redução ocorre na faixa de velocidade de corte de 81 m/min e para o aço ABNT 1045 na faixa de velocidade de corte de 60 m/min.

A potência elétrica requerida do equipamento é influenciada pela velocidade de avanço e também pela velocidade de corte na operação de fresamento frontal dos aços ABNT 1020 e 1045. Valores altos de velocidade de corte requer do equipamento maiores potências elétricas, constatou-se que com o aumento de 86,6% da velocidade de corte a potência pode aumentar em 16,6% para o aço ABNT 1020 e 30,6% para o aço ABNT 1045. Esses resultados são condizentes com a pesquisa realizada por Fernandes (2022), que da mesma forma apresenta aumento de potência elétrica para os referidos aços na operação de ciclo de torneamento externo.

A força de usinagem reduz com o aumento da velocidade de corte. Os maiores valores de redução ocorreram na usinagem do aço ABNT 1020. Sendo o valor de 46,4% a maior redução quando ocorreu a usinagem desse aço na faixa de velocidade de avanço de 35 mm/min.

Quando comparado os valores de força de usinagem entre os dois materiais se observa, que quando os parâmetros de corte estão ajustado para 112 m/min de velocidade de corte e 75 mm/min de avanço a força de usinagem é maior para o aço ABNT 1045, sendo um acréscimo em torno de 10% em relação ao aço 1020. Esse fato ocorre devido ao percentual maior de carbono para o aço ABNT 1045.

A velocidade de avanço tem uma influencia na força de usinagem. Para valores maiores de velocidade de avanço a força de usinagem foi maior para todas as faixas de velocidade de corte em ambos os aços ensaiados. Os maiores valores de aumento da força de usinagem ocorreram para o aço ABNT 1045. Na faixa de velocidade de corte de 112 m/min o aumento foi de 131,6%.

A velocidade de corte tem influencia significativa na potência de usinagem para os dois aços ensaiados. Os maiores valores de aumento de potência de usinagem ocorreram para o aço ABNT 1045, sendo o valor de 63,5% o maior acréscimo na faixa de avanço de 75 mm/min.

A mesma análise pode ser feita para a velocidade de avanço. Sabendo que de acordo com esse estudo teve significativa contribuição para a potência de usinagem. Com aumento de velocidade de avanço em 114,4%, o maior valor percentual de aumento potência de usinagem foi de 130,4% na faixa de velocidade de corte de 112m/min para o aço ABNT 1045.

4.4 Análise das Variações dos Parâmetros

Levando em consideração, a análise estatística dos parâmetros variados: Velocidade de corte e velocidade de avanço e as variáveis de resposta, uma Análise de Variância (*ANOVA*) foi realizada. Essa análise tem como objetivo verificar a influência dos parâmetros de corte e a combinação destas variáveis sobre a rugosidade superficial, a força de usinagem, a potência elétrica requerida e o consumo de energia elétrica do equipamento, em um nível de significância de 5%.

Nas Figuras 28, 30, 32 e 34 estão tabulados, de acordo com o programa estatístico JAMOV, os seguintes dados: Soma dos quadrados (SQ), grau de liberdade (GL), quadrado médio (QM), teste estatístico (F) e probabilidade de significância (P). Conforme a Figura 28 foi observado, que as variáveis material e velocidade de corte, apresentam significância estatística para o parâmetro de rugosidade, de acordo com o valor de $P < 0,05$.

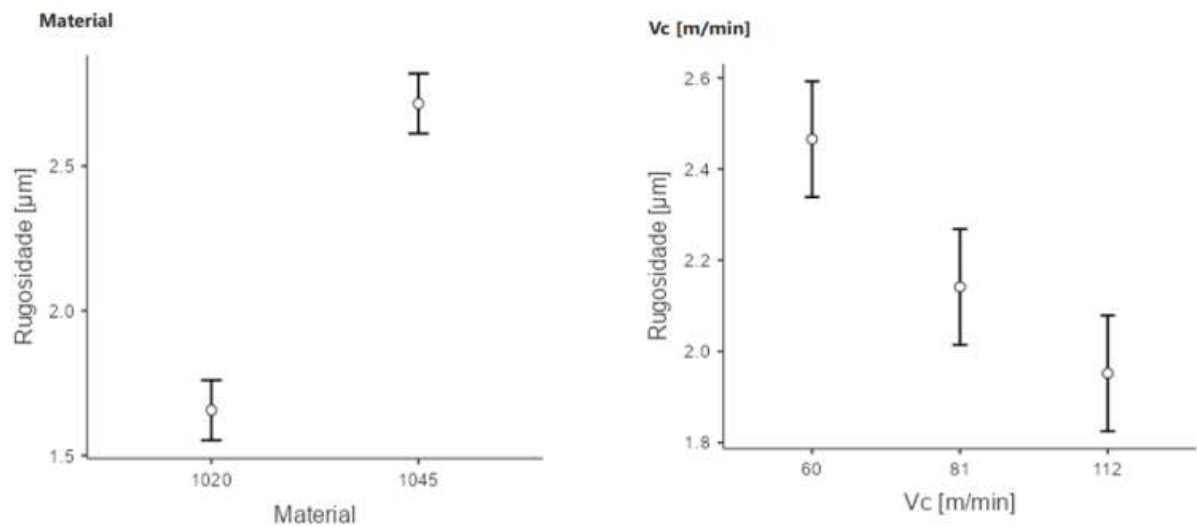
Figura 28 - ANOVA aplicada nos resultados da Rugosidade Média considerando os parâmetros variados.

ANOVA - Rugosidade [μm]					
	SQ	GL	QM	F	p
Material	30.3160	1	30.3160	206.085	< .001
Vc [m/min]	4.8572	2	2.4286	16.509	< .001
f [mm/min]	0.0868	2	0.0434	0.295	0.745
Material * Vc [m/min]	0.1875	2	0.0938	0.637	0.531
Material * f [mm/min]	0.0494	2	0.0247	0.168	0.846
Vc [m/min] * f [mm/min]	0.7281	4	0.1820	1.237	0.301
Material * Vc [m/min] * f [mm/min]	1.1215	4	0.2804	1.906	0.116
Residual	13.2394	90	0.1471		

Fonte: O Autor.

No processo de torneamento, o parâmetro avanço de corte, tem maior significância para a rugosidade (FERNANDES,2022). No entanto essa variável não foi significativa para a rugosidade, de acordo com o processo de fresamento frontal, estudado nessa pesquisa. Atribui-se esse resultado a ferramenta de corte utilizada, pois apresenta raio nas arestas cortantes, fato que permite a usinagem com maiores avanços de corte (FERRARESI, 1970). Observar-se também que a interação dupla, não se mostra significativa para a métrica de rugosidade estudada. A Figura 29, apresenta a estimativa marginal média para os valores de rugosidade média final, considerando o tipo de material e a velocidade de corte.

Figura 29- Estimativa Marginal Média para os valores de Rugosidade



Fonte: O autor

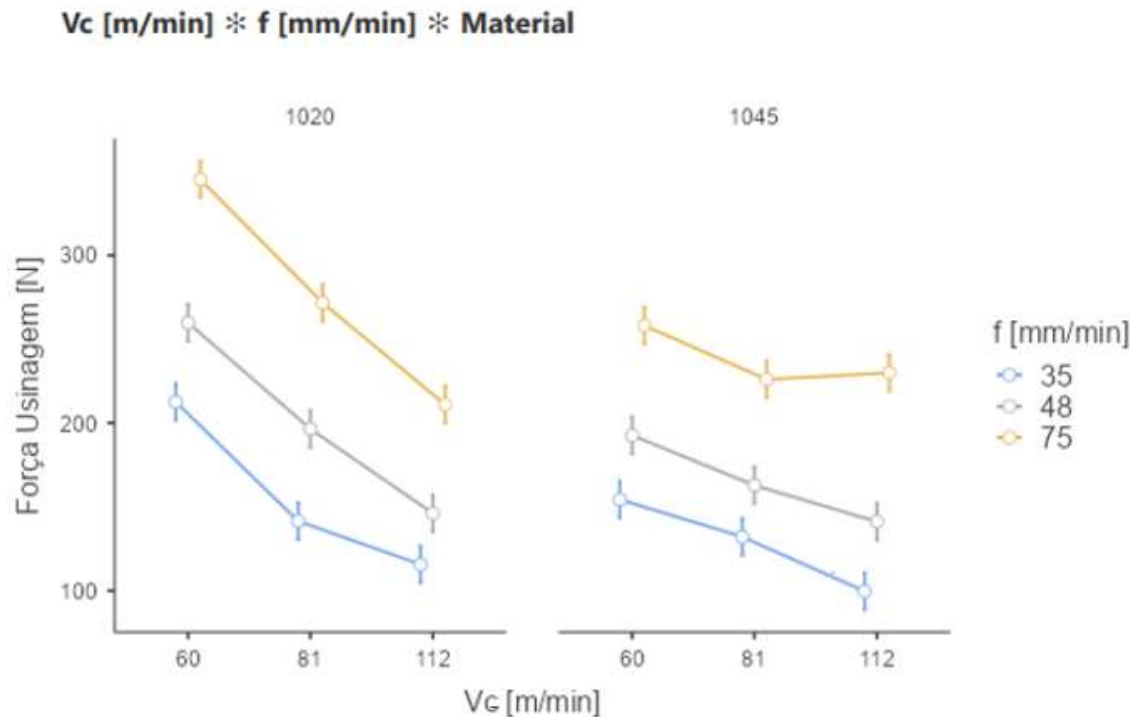
Para a métrica força de usinagem, segundo a variação dos parâmetros, a interação tripla entre material, velocidade de corte e velocidade de avanço apresentaram um valor $P < 0,05$, o que representa um nível de significância estatística, de acordo com a análise considerada, conforme a Figura 30. A estimativa marginal média para os valores de força de usinagem, está representada na Figura 31.

Figura 30 - ANOVA aplicada nos resultados da Força de Usinagem considerando os parâmetros variados

ANOVA - Força Usinagem [N]					
	SQ	GL	QM	F	p
Material	30670	1	30670.4	167.645	< .001
Vc [m/min]	116729	2	58364.7	319.023	< .001
f [mm/min]	242068	2	121034.0	661.575	< .001
Material * Vc [m/min]	22423	2	11211.3	61.281	< .001
Material * f [mm/min]	488	2	244.2	1.335	0.268
Vc [m/min] * f [mm/min]	349	4	87.3	0.477	0.752
Material * Vc [m/min] * f [mm/min]	4799	4	1199.8	6.558	< .001
Residual	16465	90	182.9		

Fonte: O Autor.

Figura 31 - Estimativa Marginal Média para os Valores de Força de Usinagem



Fonte: O Autor.

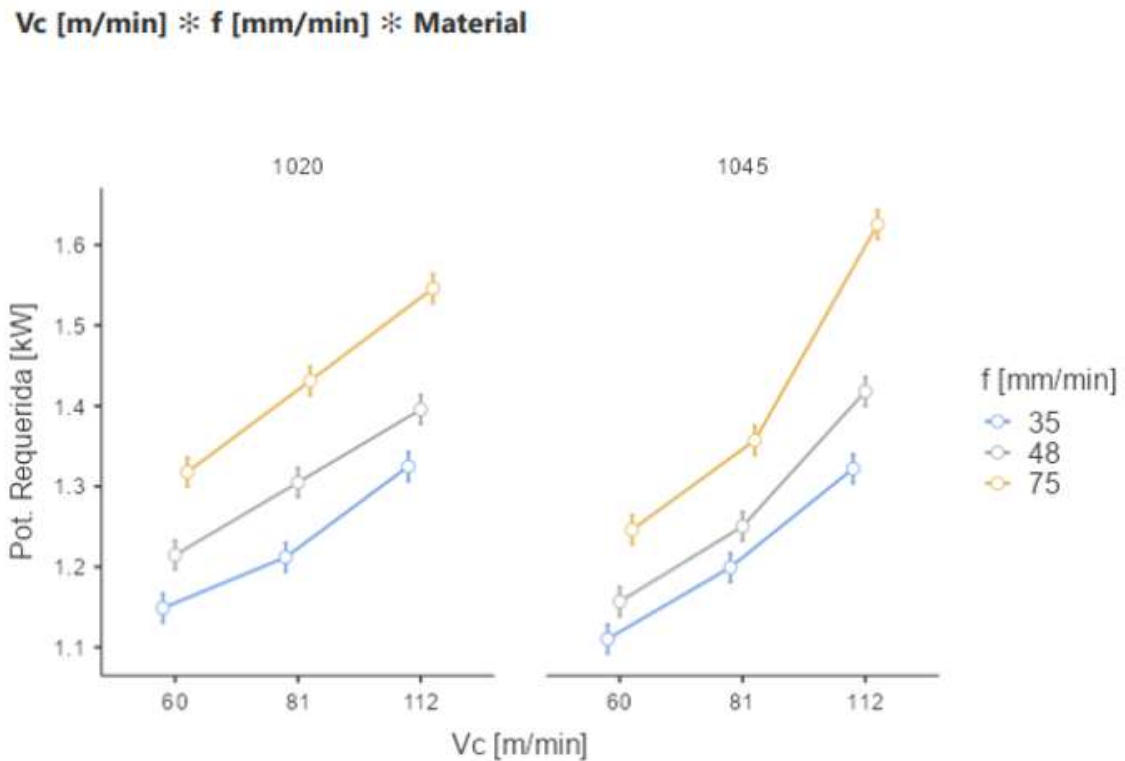
Para a potência elétrica requerida e de acordo com os parâmetros variados, a interação tripla entre material, velocidade de corte e velocidade de avanço, apresentam um valor $P < 0,05$, o que representa um nível de significância estatística, de acordo com a análise considerada, conforme a Figura 32. A estimativa marginal média para os valores da potência requerida, está representada na Figura 33.

Figura 32 - ANOVA aplicada nos resultados da Potência Requerida considerando os parâmetros variados

ANOVA - Pot. Requerida [kW]					
	SQ	GL	QM	F	p
Material	0.0147	1	0.01470	29.903	< .001
Vc [m/min]	1.0492	2	0.52458	1067.122	< .001
f [mm/min]	0.7499	2	0.37496	762.760	< .001
Material * Vc [m/min]	0.0432	2	0.02160	43.946	< .001
Material * f [mm/min]	6.68e-4	2	3.34e-4	0.680	0.509
Vc [m/min] * f [mm/min]	0.0414	4	0.01034	21.035	< .001
Material * Vc [m/min] * f [mm/min]	0.0175	4	0.00439	8.924	< .001
Residual	0.0442	90	4.92e-4		

Fonte: O autor.

Figura 33 - Estimativa Marginal Média para os valores da Potência Requerida



Fonte: O Autor.

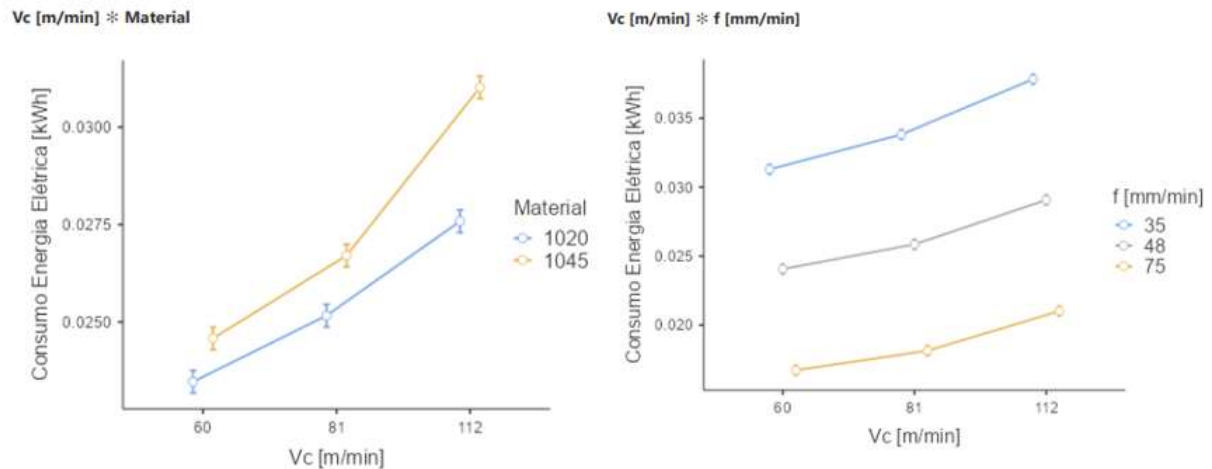
Considerando a variável de saída consumo de energia elétrica e de acordo com os parâmetros variados, houve duas interações duplas, sendo a primeira entre material e velocidade de corte e a segunda entre velocidade de corte e a velocidade de avanço, ambas apresentam um valor $P < 0,05$, o que representa um nível de significância estatística, de acordo com a análise considerada, conforme a Figura 34. A estimativa marginal média para os valores do consumo de energia elétrica, está representada na Figura 35.

Figura 34 - ANOVA aplicada nos resultados do Consumo de energia considerando os parâmetros

ANOVA - Consumo Energia Elétrica [kWh]					
	SQ	GL	QM	F	p
Material	1.11e-4	1	1.11e-4	290.81	< .001
Vc [m/min]	5.14e-4	2	2.57e-4	672.09	< .001
f [mm/min]	0.00443	2	0.00222	5795.34	< .001
Material * Vc [m/min]	2.74e-5	2	1.37e-5	35.86	< .001
Material * f [mm/min]	5.57e-6	2	2.78e-6	7.28	0.001
Vc [m/min] * f [mm/min]	1.58e-5	4	3.94e-6	10.31	< .001
Material * Vc [m/min] * f [mm/min]	3.71e-6	4	9.28e-7	2.43	0.054
Residual	3.44e-5	90	3.82e-7		

Fonte: O Autor.

Figura 35 - Estimativa Marginal Média para os valores do Consumo de Energia



Fonte: O Autor.

De acordo com a análise estatística realizada, foi possível avaliar as interações dos parâmetros variados utilizados na pesquisa. Levando a melhor compreensão da influência desses parâmetros, no consumo de energia do equipamento, quando submetido a usinagem dos aços ABNT 1020 e 1045, na operação de fresamento frontal. As imagens e análises dos dados foram obtidas, por meio do *software* JAMOV.

4.5 Produção Científica

Durante o período de desenvolvimento dessa pesquisa foi apresentado e publicado o artigo científico: **A Eficiência Energética em Processo de Usinagem por Fresamento – Uma revisão na literatura**, no 12º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), em 10 de maio de 2023, conforme o DOI: //10.26678/ABCM.COBEF2023.COF23-0541 e certificado apresentado no Apêndice A.

Também foi apresentado o trabalho: **Eficiência Energética em Processo de Usinagem por Fresamento**, no VI Seminário de Pesquisa e Inovação em Energias Renováveis e Sustentabilidade (SERES), em 08 de novembro de 2022, conforme certificado apresentado no Apêndice B.

5. CONCLUSÕES

De acordo com a proposta desse trabalho, que visa analisar a influência da variação dos parâmetros de corte da operação de fresamento frontal na eficiência energética de uma fresadora universal. Para tanto foi realizado uma correlação dos parâmetros de corte determinados com o consumo de energia do equipamento, potência requerida, força de usinagem e potência de usinagem.

- A caracterização da composição química dos materiais foi realizada por meio de ensaio de espectrometria de emissão óptica, constatado que os aços aplicados na pesquisa apresentaram uma composição de elementos químicos de acordo com as normas estabelecidas.
- Os parâmetros de velocidade de corte e de avanço foram determinados levando em consideração a gama de velocidades do equipamento e os dados do fabricante da ferramenta.
- Por meio de uma bancada adaptada ao equipamento foi realizada a montagem do analisador de energia para fazer a medições das variáveis aplicadas ao processo de fresamento frontal. Os parâmetros de velocidade de corte e avanço foram variados objetivando a avaliação da rugosidade final, potência requerida do equipamento, potência de usinagem, força de usinagem e consumo de energia elétrica do equipamento.
- A rugosidade média final obtida no processo, reduz com o aumento da velocidade de corte e aumenta com o crescimento da velocidade de avanço. Os valores de rugosidade foram menores na usinagem do aço ABNT 1020 chegando a $1,4\mu\text{m}$. Nenhuma rugosidade encontrada ficou fora da faixa de rugosidade estabelecida para o processo, denotando que os parâmetros de corte selecionados estão coerentes.
- As maiores taxas de velocidade de avanço contribuíram, para o menor consumo de energia, sendo para esse estudo os menores valores de consumo encontrados nas faixas de avanços de 75mm/min . Tanto no aço ABNT 1020 como no 1045 as reduções ficaram na ordem de 45%.
- A força de usinagem apresenta redução com o aumento da velocidade de corte como já esperado. As maiores reduções ocorreram para a usinagem do aço ABNT 1020 que ficaram em torno de 40%, já para o aço ABNT 1045 ficaram em torno de 25%.
- A velocidade de avanço contribui para o aumento da força de usinagem. O aço ABNT 1045 apresenta maior aumento de força de usinagem com os acréscimos de avanço, sendo o maior valor na ordem de 130%.

- A potência de usinagem aumenta com os acréscimos das velocidades de corte e avanço para todos os ensaios realizados nos aços. O aço ABNT 1045 apresenta maiores valores percentuais de aumento da potência de usinagem em torno de 63%, quando usinado na faixa de avanço de 75 mm/min e aumento da velocidade de corte em 86,6%.
- Considerando que os consumos mais baixos ocorreram nas faixas de avanços altas para os dois materiais ensaiados e que nessas faixas as rugosidades foram pequenas conclui-se que é recomendado a usinagem com essas velocidades uma vez que a qualidade da superfície da peça não é prejudicada.
- Observando que o consumo de energia, aumenta com o aumento da velocidade de corte e reduz com o aumento da velocidade de avanço. Deve-se encontrar um equilíbrio entre esses dois parâmetros, de forma a garantir a produtividade e a qualidade das superfícies usinadas, pelo processo de fresamento frontal em máquinas fresadoras universais.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudo que possa avaliar a influência da variação dos parâmetros de corte com o consumo de energia do processo de fresamento em operações diferentes do fresamento frontal como: furação e rasgos.

Estudo que avalie a influência das diversas estratégias de usinagem com o consumo de energia em fresadoras CNC.

Estudo que avalie a influência do uso de diferentes sistemas de refrigeração no consumo de energia do processo de fresamento para diferentes materiais.

Simulação computacional de modelos de otimização dos parâmetros de corte para usinagem em torno e fresadora visando o baixo consumo de energia e produtividade.

7. REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 4287**. Especificações geométricas do produto (GPS). Rugosidade: Método do perfil: Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e força de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ANAND, Y., GUPTA, A., ABROL, A., GUPTA, A., KUMAR, V., TYAGI, S. K., ANAND, S. **Optimization of machining parameters for green manufacturing**. Cogent Engineering, v. 3, n. 1, p. 1153292, 2016.

ARAÚJO, C. A., MOUGO, L. A., CAMPOS, O. F. **Usinagem para engenharia**. Rio de Janeiro. E-papers. 2020.

BHUSHAN, R. K. **Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites**. Journal of Cleaner Production, v. 39, p. 242-254, 2013.

CAETANO, R. G. D. **Influência Dos Parâmetros De Corte Na Eficiência Energética Em Processos De Usinagem Por Torneamento**. 2019. 135f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, *Campus Maracanaú*, 2019.

CALY, YUANA, J., SHAO, H., LIAO, S. **Energy Efficiency State Mechanism and Identification in Milling Processes**. Procedia CIRP 72, p.1487-1492, 2018.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

CAMPATELLI, G., SCIPPA, A., LORENZINI, L., SATO, R., **Optimal workpiece orientation to reduce the energy consumption of a milling process**. Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Technol. Vol. 2, p. 5-13, 2015

CARLINI, G. C., MOURA, C. R., SILVA C. **Avaliação do consumo de energia elétrica e desgaste de ferramenta durante o processo de fresamento sobre diferentes trajetórias.** Revista Gestão Industrial. vol.16, p.76-91, 2020.

CHEN, X., LI, C., TANG, Y., LI, L., DU, Y., LI, L. **Integrated optimization of cutting tool and cutting parameters in face milling for minimizing energy footprint and production time.** Energy.175, p.1021-1037, 2019.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 9ª ED., ARTLIBER, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Relatório Síntese/Ano Base 2022 Nacional.** 2022. Disponível em: < [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes/dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico 588/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese% 20BEN%202021-ab%202020_v2.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes/dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico%20588/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202021-ab%202020_v2.pdf)> Acesso em: 20.06.22.

ENGELETRICA. **Manual de correção de fator de potência.** Disponível: <https://www.engeletrica.com.br/novo-site/fatordepotencia-manual-fatordepotencia.html> Acesso em: 18.11.22.

FERNANDES, J. C. A. **Avaliação da Eficiência Energética na Usinagem de Aços por Torneamento CNC 2022.** 124f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, Maracanaú, 2022.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais.** São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1970.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems.** 4. ed. Bethlehem: Wiley, 2010.

HAAS, F., SUÁREZ, A., CUS, F., ZUPERL, U. **Platform for monitoring and comparing machining processes in terms of energy efficiency.** Transactions of famena xliii-2. p. 31-47, 2019.

HE, Y., LIU, B., ZHANG, X., GAO, H., LIU, X. **A modeling method of task-oriented energy consumption for machining manufacturing system.** Journal of Cleaner Production, p. 167-174, 2012.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Key world energy statistics.** 2022. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2022.pdf>> Acesso em: 02.10.22.

JAMIL, M., KHAN, A. M., HEGAB, H., GUPTA, M. K., MIA, M., HE, N., ZHAO, G., SONG, Q., LIU, Z. **Milling of Ti-6Al-4V under hybrid Al₂O₃-MWCNT nanofluids considering energy consumption, surface quality, and tool wear: a sustainable machining.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology. p.1-17, 2020.

JAMIL, M., ZHAO, W., HE, N., GUPTA, M. K., SARIKAYA, M., KHAN, A. M., SANJAY M. R., SIENGCHIN, S., PIMENOV, D. Y. **Sustainable milling of Ti6Al4V: A trade-off between energy efficiency, carbon emissions and machining characteristics under MQL and cryogenic environment.** Journal of Cleaner Production. 281, p.1-15, 2021.

KENNAMETAL. Catálogo Master 2018. **Ferramentas Rotativas.** 1920 f. 2018.

LI, B., CAO, H., HON, B., LIU, L., GAO, X. **Exergy-based Energy Efficiency Evaluation Model for Machine Tools Considering Thermal Stability.** International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. p.1-12, 2020.

LI, C., CHEN, X., TANG, Y., & LI, L. **Selection of optimum parameters in multi-pass face milling for maximum energy efficiency and minimum production cost.** Journal of Cleaner Production, 140, 1805-1818, 2017.

LI, W., KARA, S. **Unit process energy consumption models for material removal processes.** CIRP Annals – Manufacturing Technology, v 60, p. 37-40, 2011.

LI, W., ZEIN, A., KARA, S., HERRMANN, C. An investigation into fixed energy consumption of machine tools. **Glocalized solutions for sustainability in manufacturing.** p. 268-273. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

LIU, D., WANG, W., WANG, L. **Energy-efficient cutting parameters determination for NC machining with specified machining accuracy.** Procedia CIRP, v. 61, p. 523-528, 2017.

MACHADO, Á. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., & DA SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo, Edgard Blücher, 2015.

OSMAN, K. A., YILMAZ, V., ÜNVER, H. O., EKER, U. S., KILIÇ, S. E. **Slot milling of titanium alloy with hexagonal boron nitride and minimum quantity lubrication and multi-objective process optimization for energy efficiency**. Journal of Cleaner Production. 258, p. 1-15, 2020.

PAWAR,S.S., BERA, T.C., SANGWAN, K.S. **Modelling of Energy Consumption for Milling of Circular Geometry**. Procedia CIRP 98, p.470-475, 2021.

PELEGRINO, D. H. **Estudo do consumo de energia elétrica em máquinas-ferramentas**. 2018. 111f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.

PENG, T.: XU, X. **Energy-efficient machining systems: A critical review**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. v 72, n. 9 - 12, p. 1389-1406, 2014.

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

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. New York: Oxford Science Publications, p.594, 1984.

SHIN S-J, WOO J, RACHURI S. **Energy efficiency of milling machining: Component modeling and online optimization of cutting parameters**. Journal of Cleaner Production, p.1-36, 2017.

SILVA NETO, J. C. Da. **Metrologia e controle dimensional: Conceitos, normas e aplicações**. 2ª ed. Rio de Janeiro. Elsevier. 2018.

THIEDES, S. **Energy Efficiency in Manufacturing Systems**. [s.l.] Springer Heidelberg New Youk Dordrecht London, 2012.

WHITAKER, J. C. **Power Systems Handbook Third Edition**. [s.l.] CRC Press 2006, 2007.

ZEIN, A. et al. **Energy Efficiency Measures for the Design and Operation of Machine Tools: An Axiomatic Approach.** Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, p. 274 – 297, 2011.

ZHAO, G., GUOB, Y.B., ZHUA,P., ZHAOA,Y. **Energy Consumption Characteristics and Influence on Surface Quality in Milling.** Procedia CIRP 71, p.111-115, 2018.

ZHAO,J., LI, L., WANG,Y., SUTHERLAND, J. W. **Impact of surface machining complexity on energy consumption and efficiency in CNC milling.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology. p.1-15, 2019.

ZHOU, L., LI, J., LI, F., MENDIS, G., SUTHERLAND, J. W. **Optimization Parameters for Energy Efficiency in End milling.** Procedia CIRP 69, p.312-317, 2018.

APÊNDICE A – Certificado de Apresentação de Artigo Científico no 12º COBEF.



APÊNDICE B – Certificado de Apresentação de Trabalho no VI SERES.



INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Ceará

CERTIFICADO

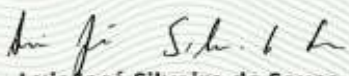
Certificamos que **Francisco Roberto de Sá Pereira** participou do VI Seminário de Pesquisa e Inovação em Energias Renováveis e Sustentabilidade (VI SERES) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, apresentando o seguinte trabalho:
Eficiência energética em processo de usinagem por fresamento com carga horária de **2 horas**, no dia 8 de novembro de 2022.

Maracanaú, 9 de novembro de 2022.

IFCE Campus Maracanaú




Rossana Barros Silveira
Diretora-geral do IFCE campus de Maracanaú


Luis José Silveira de Sousa
Chefe do Depto. de Extensão, Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação
do IFCE campus de Maracanaú