

Renan Cavalcante Santos

INVESTIGAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO NO FRESAMENTO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE TRAJETÓRIA E DOS PARÂMETROS DE USINAGEM

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.

Coorientador: Prof. Milton Pereira, Dr.

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Santos, Renan Cavalcante
INVESTIGAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO NO FRESA
MENTO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE TRAJETÓRIA E DOS
PARÂMETROS DE USINAGEM / Renan Cavalcante Santos ;
orientador, João Carlos Espíndola Ferreira ,
coorientador, Milton Pereira , 2019.

91 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Sustentabilidade. 3.
Fresamento. 4. Eficiência energética. I. , João
Carlos Espíndola Ferreira. II. , Milton Pereira.
III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV.
Título.

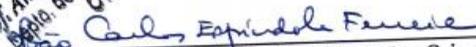
Renan Cavalcante Santos

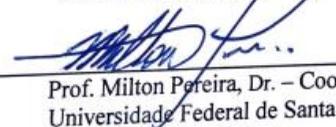
INVESTIGAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO NO FRESAMENTO EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE TRAJETÓRIAS E DOS PARÂMETROS DE USINAGEM

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre/Doutor em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 07 de março de 2019.


Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr.
Coordenador do Curso
Curso de Engenharia Mecânica
CTC/UFSC

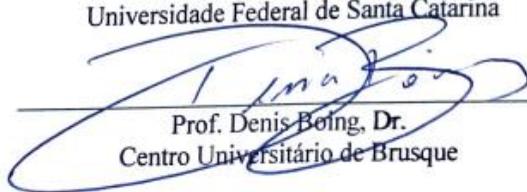

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D. – Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Milton Pereira, Dr. – Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:


Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D. – Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Denis Böing, Dr.
Centro Universitário de Brusque

O melhor presente que podemos dar a
alguém é o acréscimo de vida, tirar
tempo para estar ao lado de quem
amamos. Com todo meu respeito e
admiração a minha querida bisavó
Guiomar Sotero.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por guiar meus passos. Que na minha vida seja sempre feita a tua vontade. E a Nossa Senhora de Aparecida por ser a motivadora da minha fé e protetora.

Ao meu orientador João Carlos Espíndola Ferreira por ter sido paciente e um grande amigo nessa jornada. Ao meu coorientador Milton Pereira, pelo suporte, pelas suas correções e incentivos.

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFSC, pela oportunidade de crescimento profissional e pessoal. Ao laboratório LMP, e ao grupo de pesquisa GRIMA, agradeço a estrutura para que pudesse realizar o trabalho e às amigas construídas neste meio.

Às amigas criadas, no decorrer da pesquisa, Michel Tavares, Fernando Castro, Lucas Marra, Marco Túlio, João Argolo, Thiago Wilvert, Julian Fernando e demais colegas. Obrigado pelo companheirismo, comentários técnicos e momentos de descontração. Aos meus amigos da república, obrigado pela companhia e parceria, no decorrer desta jornada principalmente aos amigos Lucas Farias e Dr. Gildean Portela, e obrigado por não gostarem da minha farinha. Ao meu irmão de outra nacionalidade Santiago Jaramillo, obrigado pela amizade, trilhas e histórias que tornaram a experiência de viver em uma república única.

Ao meu amigo Junout, que sempre esteve ao meu lado, mesmo à distância, caminhando comigo desde a graduação com almoços em RU e hoje, com a amizade mais recíproca que eu poderia ter. Valeu mano.

À minha mãe Franci, foi ela quem tudo fez. Exemplo de mulher guerreira, fonte de amor incondicional e meu suporte para que eu pudesse conquistar meus objetivos durante toda a minha vida.

Ao meu irmão Fabian, principal motivo de me fazer procurar ser uma pessoa melhor, espero poder contribuir com sua jornada.

À minha avó Léa, que sempre me amou incondicionalmente e é um dos pilares de minha educação.

À minha esposa Gleicy, que me fez perceber que voar à dois é ainda melhor. Obrigado por todos os momentos ao seu lado, pela ajuda na pesquisa, por ser a minha fã e leitora, e por ser complicada e perfeita para mim.

*A verdadeira função do
homem é viver, não existir.*
(Jack London)

RESUMO

Processos de manufatura possuem grande importância econômica desde a primeira revolução industrial. Esta atividade, no entanto, gera muitos resíduos e consome grande quantidade de energia, de forma que o setor industrial é responsável pelo consumo de um terço de toda energia produzida no mundo. Atendendo a pressões internacionais cada vez maiores, o setor produtivo procura se adequar para ter processos mais eficientes energeticamente e que proporcionem um menor impacto ambiental. O conceito de sustentabilidade aplicado na manufatura tem por objetivo consumir energia e matéria-prima de forma mais eficiente, adotando práticas que consideram os pontos de vista ambiental, social e econômico. Empresas que conseguem implementar estratégias sustentáveis em seus processos de fabricação podem obter um diferencial competitivo no mercado. Dentre os diferentes processos de fabricação, a usinagem ganha grande importância devido à sua ampla utilização e, dentre os processos de usinagem, o fresamento proporciona versatilidade para fabricar diferentes componentes para os mais variados segmentos industriais. Nesta dissertação é apresentado um estudo que objetiva o aumento da eficiência energética durante operação de fresamento mediante a seleção adequada de parâmetros e trajetórias de corte. Inicialmente um experimento fatorial completo foi realizado para avaliar o comportamento de diferentes parâmetros de usinagem do ponto de vista energético. Os parâmetros avaliados foram: velocidade de corte, velocidade de avanço, profundidade axial e profundidade radial. A variação de parâmetros de corte apresentou forte influência no consumo de energia, nos tempos de fabricação e na taxa de material removido. Visando avaliar a efetividade dos parâmetros selecionados, uma cavidade foi usinada utilizando os parâmetros propostos utilizando os parâmetros padrão indicados por dois softwares comerciais, NX e FUSION. Como resultado obteve-se uma redução de 26,9% e 36,0% de energia elétrica consumida, respectivamente.

Palavras-chave: Fresamento, Consumo de Energia Elétrica, Manufatura Sustentável, Parâmetros de Usinagem, Trajetórias de Ferramentas.

ABSTRACT

Manufacturing processes have great economic importance since the first industrial revolution. Such activity, however, generates much waste and consumes a lot of energy, so that the industrial sector is responsible for the consumption of a third of all energy produced in the world. In response to increasing international pressures, the productive sector seeks to perform more energy efficient processes and to provide a lower environmental impact. The concept of sustainability applied to manufacturing aims to consume energy and raw materials more efficiently, adopting practices that consider the environmental, social and economic points of view. Companies that can implement sustainable strategies in their manufacturing processes can obtain a competitive advantage in the market. Among the different manufacturing processes, machining is of great importance due to its wide use and, among the machining processes, milling provides versatility to manufacture different components for the most varied industrial segments. In this dissertation a study is presented that aims to increase the energy efficiency during milling operation by means of the appropriate selection of cutting parameters and tool paths. Initially a complete factorial experiment was carried out to evaluate the behavior of different machining parameters in the energy consumption point of view. The evaluated parameters were: cutting speed, feed rate, axial and radial depths of cut. The variation of cutting parameters had a strong influence on the energy consumption, the manufacturing times and the rate of material removed. In order to evaluate the effectiveness of the selected parameters, a pocket was machined using the proposed parameters, as well as the standard parameters indicated by commercial pieces of software NX and Fusion. As a result, the parameters proposed in this research led to a reduction of 26.9% of electric energy consumed compared with software NX, and 36.0% compared with software Fusion.

Keywords: Milling, Electrical Energy Consumption, Sustainable Manufacturing, Machining Parameters, Tool Paths.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DRX	Difração de raio X
ONU	Organização das Nações Unidas

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino:

a_e	[mm]	Profundidade radial
a_p	[mm]	Profundidade axial
D	[mm]	Diâmetro da ferramenta
f	[mm]	Avanço
F_a	[N]	Força ativa
F_{ap}	[N]	Força de apoio
F_c	[N]	Força de corte
F_f	[N]	Força de avanço
F_p	[N]	Força passiva
F_r	[N]	Força resultante
F_t	[N]	Força ativa
f_z	[mm/dente]	Avanço por dente
N	[rpm]	Rotação da ferramenta
P_c	[W]	Potência de corte
$P_{ope.}$	[W]	Potência de operação
$P_{standby}$	[W]	Potência de <i>standby</i>
P_{total}	[W]	Potência total
P_{usi}	[W]	Potência de usinagem
r_e	[mm]	Raio de quina
v_c	[m/min]	Velocidade de corte
v_e	[m/min]	Velocidade efetiva
v_f	[mm/min]	Velocidade de avanço
Z		Número de dentes da ferramenta
A	[graus]	Ângulo de incidência
Γ	[graus]	Ângulo de saída

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.1.1	Objetivo geral.....	18
1.1.2	Objetivos específicos.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Sustentabilidade	19
2.1.1	Cenário atual.....	19
2.1.2	Desenvolvimento sustentável e tripé da sustentabilidade ...	20
2.1.3	Manufatura sustentável.....	21
2.2	Fresamento	23
2.2.1	Definição.....	23
2.2.2	Classificação.....	24
2.2.3	Parâmetros de corte.....	26
2.2.4	Forças e potência de corte.....	28
2.2.5	Trajетórias da ferramenta.....	29
2.3	Consumo de energia no processo de usinagem	34
2.3.1	Modelo de consumo energético.....	35
2.3.2	Aumento de eficiência energética na usinagem.....	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	Metodologia	41
3.1.1	Avaliação de parâmetros de usinagem.....	42
3.1.2	Usinagem de uma cavidade.....	44
3.2	Materiais	45
3.2.1	Sistema de aquisição de dados.....	45
3.2.2	Máquina ferramenta.....	46
3.2.3	Ferramenta de corte.....	46
3.2.4	Material usinado.....	47
3.2.5	Transdutor de energia.....	48
3.3	Procedimento experimental	48
3.3.1	Parâmetros de corte.....	49
3.3.2	Experimento fatorial.....	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	Avaliação de parâmetros de usinagem	53
4.1.1	Profundidade axial.....	53
4.1.2	Profundidade radial.....	56
4.1.3	Velocidade de avanço.....	58
4.1.4	Velocidade de corte.....	59
4.1.5	Análise da influência de desgaste.....	61
4.1.6	Análise combinatória de parâmetros.....	62

4.2	Avaliação quanto à eficiência	69
4.2.1	Energia específica	70
4.3	Usinagem de cavidade.....	71
4.3.1	Usinagem com software Fusion	72
4.3.2	Usinagem com software NX	74
4.3.3	Usinagem com parâmetros selecionados.....	77
4.3.4	Comparativo de estratégias	80
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS	
FUTUROS.....		82
5.1	Conclusões.....	82
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	83
REFERÊNCIAS		84

1 INTRODUÇÃO

A manufatura desempenha um papel vital na economia mundial. Porém, esta atividade provoca impacto ambiental devido ao consumo de materiais, renováveis ou não, geração de resíduos e consumo de grande quantidade de energia. Ao longo dos últimos 50 anos tem aumentado a preocupação com fatores ambientais e conservação de energia no setor industrial, seja por meio de leis mais severas ou maior consciência ambiental de fabricantes e consumidores [1–3].

Neste cenário, as empresas têm procurado adotar estratégias ambientalmente amigáveis, principalmente por meio da redução tanto do consumo de energia quanto da emissão de gases de efeito estufa. Essas estratégias devem ser integradas à produção, objetivando máxima eficiência operacional e energética simultaneamente [4, 5]. Uma vez implementadas de maneira correta, tais estratégias são capazes de reduzir desperdícios, poluição, promover ganhos financeiros e melhorar a imagem da empresa [5].

Carvalho [6] cita as principais dificuldades na busca do aumento da eficiência energética em um ambiente fabril, dentre elas: pouca divulgação do conceito de energia e trabalho útil, dificuldade de identificar desperdícios energéticos e falta de informações sobre o consumo de energia de equipamentos.

Os processos de usinagem são aqueles que geram remoção de material e conferem à peça usinada, forma, dimensões, acabamento, ou a combinação destes itens. São amplamente utilizados no setor industrial porque proporcionam a fabricação de peças com superfícies complexas, capazes de atender tolerâncias dimensionais mais apertadas e possibilitam alcançar melhores níveis de rugosidade ao comparar com processos de fundição, conformação, metalurgia do pó e outros processos de fabricação [7]. No entanto, máquinas-ferramenta consomem grande quantidade de energia e possuem baixa eficiência, apresentando, portanto, um potencial significativo para incremento da eficiência [8]. Ainda de acordo com Cai *et al.* [8] a eficiência de máquinas ferramenta fica, em geral, abaixo de 30%.

Desta forma, com o objetivo de se obter processos de fabricação mais sustentáveis, é importante que os processos de usinagem sejam avaliados a fim de se encontrar condições de trabalho mais eficientes e menos agressivas ao meio ambiente.

Um estudo das condições corte relacionadas ao consumo energético pode proporcionar um embasamento para a tomada de decisões que

proporcionem processos de usinagem mais eficientes. Se, por um lado, a escolha de condições de corte mais reduzidas pode diminuir a potência necessária para a realização da usinagem, por outro lado o uso de condições mais severas de corte proporciona maior remoção de material e, conseqüentemente, menor tempo de operação.

Neste contexto, esta pesquisa se propõe a investigar a influência do consumo energético de um centro de usinagem, durante a operação de fresamento, analisando a influência dos parâmetros de usinagem e trajetória da ferramenta no comportamento de potência requerida para o corte.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Investigar a relação entre parâmetros de corte e consumo energético de um centro de usinagem com comando numérico computadorizado (CNC), durante operação de fresamento, para identificar o melhor conjunto de parâmetros visando obter maior eficiência energética.

1.1.2 Objetivos específicos

- Monitorar o consumo de energia elétrica em um centro de usinagem durante operação de fresamento;
- Investigar o efeito dos parâmetros de usinagem, tais como: profundidades axial e radial, velocidade de avanço e velocidade de corte, no consumo energético;
- Realizar usinagem de uma cavidade de fundo plano considerando os parâmetros que fornecerem maior eficiência energética;
- Comparar o desempenho energético no fresamento, entre os parâmetros propostos pela estratégia *default* de dois softwares comerciais de CAM e as condições de usinagem energeticamente favoráveis definidas no decorrer do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sustentabilidade

2.1.1 Cenário atual

O crescimento desordenado da população mundial durante o último século é uma das causas de problemas globais no fornecimento de alimentos, água e energia [9]. De acordo com o relatório da ONU “Perspectivas da população Mundial: Revisão de 2017”, a população global atual é de 7,6 bilhões, com perspectiva de crescimento anual numa taxa de 1,1% [10]. Em uma sociedade cuja principal atividade financeira é baseada em atividades industriais, um aumento populacional leva a um aumento na demanda por bens de consumo e industriais [11].

De acordo com Grote e Antonsson [12], o ambiente interage de duas formas com a sociedade: sendo fonte de recursos naturais, e como destino de resíduos e emissões. Esta interação é suscetível a grandes desequilíbrios quando se extraem recursos de maneira desordenada e quando se produz resíduos e emissões numa taxa maior que a capacidade do ambiente absorver. Problemas relacionados a estes desequilíbrios incluem a destruição da camada de ozônio, aquecimento global, acidificação, entre outros.

Segundo Paetzold *et al.* [11], a energia é vista como um recurso global cada vez mais caro e raro. Com base no Balanço Energético Mundial, fornecido pela Agência Internacional de Energia [13], e no balanço energético nacional [14], fornecido pela Empresa de Pesquisa Energética, a Figura 1 revela a distribuição e o consumo de energia nos principais setores da sociedade em nível global e em um cenário nacional, sendo que os dados são do ano de 2016.

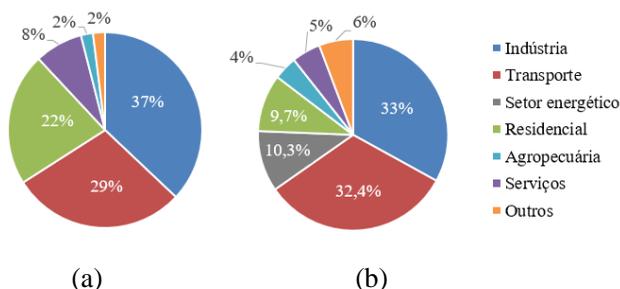


Figura 1 - Consumo de energia para diversos setores: (a) Cenário mundial; (b) Cenário nacional [12, 13].

Pode-se perceber pela Figura 1 que o setor industrial lidera o consumo de energia tanto no cenário mundial quanto no nacional. Estes dados justificam a importância do desenvolvimento de estratégias para a redução do consumo de energia na indústria. A questão que surge consiste em responder como as indústrias podem atender a demanda por produtos, manter a lucratividade e, ao mesmo tempo, minimizar impactos ambientais. Uma das respostas está no uso eficiente de energia elétrica nos processos de fabricação.

2.1.2 Desenvolvimento sustentável e tripé da sustentabilidade

O desenvolvimento sustentável consiste em garantir que sejam atendidas as necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade das gerações futuras atenderem também às suas. Esta definição foi documentada no relatório “*Our Common Future*” [15], da comissão mundial sobre o meio ambiente e desenvolvimento. Este conceito passou a ser aceito por quase todas organizações internacionais, governos nacionais e empresas privadas.

Munier [16] definiu sustentabilidade como: uma visão de futuro que dá um rumo e ajuda a focar a atenção em um grupo de valores e princípios morais e éticos pelos quais as ações são guiadas. Desta forma, a sustentabilidade pode ser vista como um objetivo a ser alcançado, enquanto o desenvolvimento sustentável é o processo para alcançá-la.

Finkbeiner [17] relata uma quebra de paradigma quando estratégias de proteção ambiental passaram a ser substituídas por estratégias visando a sustentabilidade. Isto porque a sustentabilidade não busca apenas soluções ambientais, e sim o equilíbrio nas esferas ambiental, social e econômica de uma sociedade.

Desta forma, o conceito de sustentabilidade é amparado pelo paradigma “*Triple Bottom Line*”, ou Tripé da Sustentabilidade, que afirma que o sucesso final de uma corporação deve ser medido não apenas pelo aspecto financeiro tradicional, mas também por seus desempenhos social e ambiental. Esta perspectiva fornece uma estrutura para gerir projetos sustentáveis, e seu principal objetivo é melhorar o contexto econômico, ambiental e social, simultaneamente [18].

O tripé da sustentabilidade é representado na Figura 2 e sugere a equidade entre as três esferas: econômica, ambiental e social.

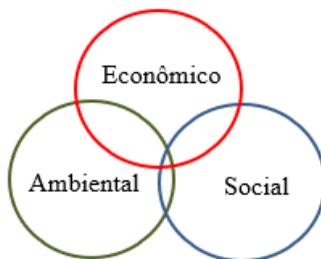


Figura 2 - Tripé da sustentabilidade.

Seguindo esta abordagem, os três fundamentos, econômico, social e ambiental, precisam ser considerados simultaneamente. O lado econômico envolve um progresso econômico; o ponto de vista social envolve aspectos sociais como saúde, segurança e desenvolvimento profissional; o foco ambiental visa garantir a utilização de recursos sem prejudicar as gerações futuras [16].

A redução do consumo de energia pode ser associada aos três pilares da sustentabilidade. Do ponto de vista ambiental, a redução do consumo é um fator primordial na redução de emissão de gases de efeito estufa. A redução de energia também é um fator para uma economia sustentável, tendo em vista os altos preços da demanda energética. Por fim, a disponibilidade de energia é enxergada como fator sócio-político para diversas nações [19].

2.1.3 Manufatura sustentável

Empresas de manufatura, em geral, consomem uma grande quantidade de energia proveniente de fontes como carvão ou eletricidade. Além disso, há utilização de diversos produtos químicos e materiais tóxicos no processo de fabricação. Conseqüentemente, uma grande quantidade de poluentes é descartada durante os diversos processos de fabricação. Sem uma gestão eficaz, o setor de manufatura pode causar danos irreversíveis ao meio ambiente [20].

Carvalho [6] avaliou o contexto atual da manufatura, no cenário nacional, e levantou três argumentos:

I - A indústria moderna baseia-se na utilização ineficiente de bens de consumo;

II - A utilização eficiente de bens de consumo resultará em um aumento de competitividade;

III - A eficiência energética possui forte influência na competitividade industrial.

O terceiro argumento de Carvalho [6] pode ser ratificado por Yoon *et al.* [9], que afirmam que o consumo de energia em atividades de manufatura corresponde a um terço do consumo energético mundial, dado comprovado pelos relatórios de consumo energético, como apresentado na Figura 1.

Neste contexto, surge a manufatura sustentável, que é um modo de fabricação que deve avaliar de forma abrangente as influências sobre o meio ambiente e eficiência dos recursos. Além disso, tem por objetivo minimizar impactos sobre o meio ambiente, seja minimizando dejetos ou desenvolvendo processos mais eficientes energeticamente [20].

A evolução do conceito de sustentabilidade tem modificado os modelos de gestão de manufatura e, portanto, é cada vez mais comum a adoção de modelos que contenham indicadores de sustentabilidade para avaliar as dimensões econômica, social e ambiental [21].

Álvarez e Bárcena [22] apresentam o tripé da sustentabilidade aplicado no setor industrial, conforme ilustrado na Figura 3. A indústria é responsável por movimentar a economia, interage com a sociedade através da geração de empregos, oferece produtos e serviços e recebe em contrapartida recursos humanos. Por sua vez, o meio ambiente interage com a indústria, fornecendo recursos naturais e absorvendo os resíduos dos processos de fabricação.



Figura 3 - Tripé da sustentabilidade no setor industrial [22].

No entanto, a tarefa de conciliar os três aspectos na indústria não é tão simples. Svensson *et al.* [23] avaliaram o tripé da sustentabilidade em uma aplicação prática, em um cenário industrial atual, e concluíram

que há grande conflito, principalmente entre as relações econômica e ambiental. Muitas vezes, a busca por metas econômicas, como redução de custos e competitividade, não condiz com metas ambientais, como a redução de pegada de carbono ou utilização de materiais recicláveis.

Apesar das dificuldades de trabalhar simultaneamente os aspectos do tripé da sustentabilidade, de uma forma geral há muitos relatos que indicam resultados práticos positivos quando os conceitos de sustentabilidade são aplicados na indústria. Nicoletti Júnior *et al.* [21] propuseram um modelo de avaliação de sustentabilidade por meio de indicadores, sendo que, ao final, avaliaram a adoção de estratégias sustentáveis com base no desempenho de um sistema de manufatura. Os resultados obtidos no estudo de caso indicaram um aumento da competitividade de forma rentável após a adoção de estratégias sustentáveis.

Práticas sustentáveis devem ser apoiadas no comprometimento da alta administração das empresas, que deve procurar operações sustentáveis e inovações tecnológicas apoiadas no tripé da sustentabilidade. Resultados práticos fornecem evidências de melhorias econômicas, ambientais e melhor imagem junto ao cliente [24].

A manufatura sustentável lida principalmente com o planejamento de processos, seleção de materiais, embalagens de produtos, reciclagem, gerenciamento ecológico e utilização de equipamentos, e avalia todo o ciclo de vida do produto [20].

Além disso, a manufatura sustentável pode ser implementada em diversos ramos da indústria. Burki *et al.* [24] e Biswas *et al.* [25] avaliaram cadeias de suprimentos sustentáveis e destacaram as vantagens ambientais e econômicas das empresas adotarem esta metodologia em toda a cadeia de fornecimento. Kono *et al.* [26] propuseram a utilização de indicadores de sustentabilidade na indústria da construção civil, enquanto Pactwa *et al.* [27] aplicaram conceitos de sustentabilidade no setor de mineração.

2.2 Fresamento

2.2.1 Definição

O fresamento é uma operação de usinagem na qual camadas de material são separadas mecanicamente de uma peça de trabalho na forma de cavacos. Ele confere forma e dimensão à peça por meio do movimento relativo entre peça e ferramenta. É classificado como um processo de usinagem com geometria definida, uma vez que o número de

gumes, a geometria e a posição dos gumes em relação à peça são conhecidos e descritíveis [12,28].

A ferramenta, geralmente com múltiplos dentes, executa um movimento circular, denominado movimento de corte, enquanto há um movimento de avanço relativo entre peça e ferramenta [28, 29]. O processo é largamente utilizado devido à sua versatilidade na obtenção de diversas geometrias e às elevadas taxas de remoção de material. A Figura 4 exemplifica o processo.

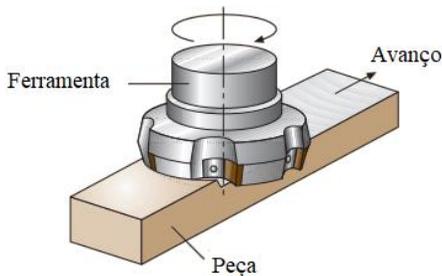


Figura 4 – Processo de fresamento [12].

Uma característica inerente ao fresamento é o corte interrompido, no qual o gume da ferramenta não fica constantemente em contato com a peça. Para cada rotação da ferramenta, o gume passa por uma fase ativa, removendo material, e uma fase inativa, na qual não há remoção. Estas interrupções de corte significam tensões térmicas e mecânicas atuando alternadamente, o que pode levar ao surgimento de trincas e desgaste prematuro da ferramenta, caso as condições de corte não sejam especificadas corretamente para a operação. Portanto, as condições de contato entre a ferramenta e peça são de grande relevância, pois impactam diretamente os esforços envolvidos no processo, a vida da ferramenta e a qualidade da peça usinada [7,12,28].

2.2.2 Classificação

O fresamento pode ser dividido em dois tipos, de acordo com a interação entre peça e ferramenta: fresamento frontal e tangencial. No fresamento frontal a superfície usinada é produzida pela face frontal da ferramenta e é gerada em um ângulo reto em relação ao eixo da ferramenta. Para este caso, a profundidade radial é muito maior que a profundidade axial. Já no fresamento tangencial ou periférico, a superfície

usinada situa-se em um plano paralelo ao eixo da ferramenta e é gerada pelos gumes localizados na periferia da ferramenta [12, 28]. A Figura 5 ilustra a diferença entre fresamento frontal e tangencial.

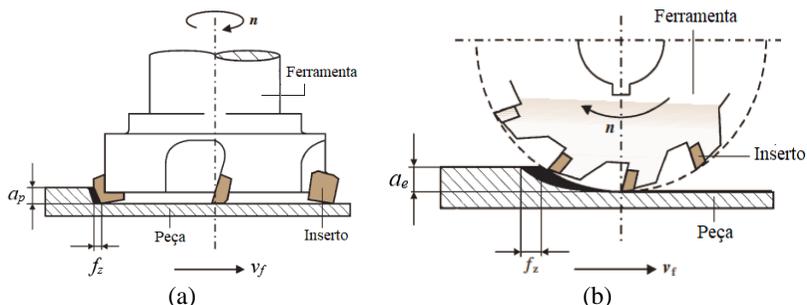


Figura 5 - Fresamento frontal (a) e tangencial (b) [11].

Os movimentos na usinagem ocorrem entre ferramenta e peça, e podem ser classificados como ativos e passivos. Os movimentos ativos promovem efetivamente a remoção de material enquanto os movimentos passivos não removem material.

Entre os movimentos ativos, destacam-se o movimento de corte, definido como sendo aquele que provoca a remoção do cavaco durante uma única rotação da ferramenta, e o movimento de avanço que, por sua vez, é o movimento entre peça e ferramenta. Os movimentos de corte e de avanço, quando ocorrem simultaneamente, possibilitam a remoção de material. Já os movimentos passivos, também abordados nesta pesquisa, são o de aproximação, no qual a ferramenta se aproxima da peça momentos antes da usinagem, e o movimento de recuo, no qual a ferramenta se afasta da peça [30].

Dependendo do sentido de rotação da ferramenta e da direção de avanço, o fresamento pode ser classificado ainda como concordante ou discordante, conforme indicado na Figura 6.

No fresamento concordante os movimentos de corte e avanço possuem o mesmo sentido. Para este caso, o corte inicia com uma espessura máxima de cavaco e, ao final, encontra-se a uma espessura teoricamente igual a zero. Já no fresamento discordante o vetor da velocidade de corte aponta na direção contrária ao vetor da velocidade de avanço. Para este caso, o corte inicia com uma espessura de cavaco próxima de zero e termina com espessura máxima dependendo da posição da

ferramenta em relação à peça, o processo de fresamento pode ocorrer de maneira concordante e discordante simultaneamente [28].

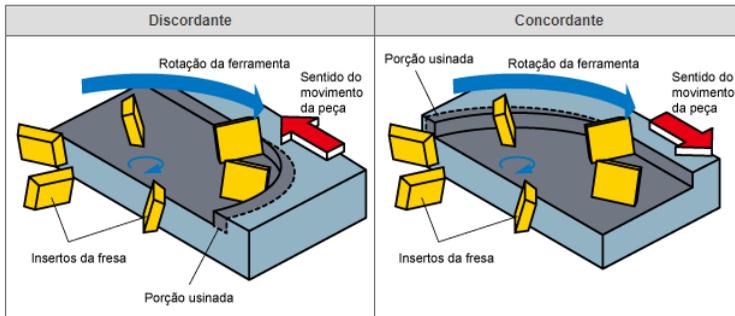


Figura 6 - Corte discordante e concordante [31].

2.2.3 Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte influenciam significativamente os esforços gerados durante a usinagem. Múltiplas combinações podem ser alcançadas, e estas proporcionam diferentes resultados na superfície usinada, na formação de cavacos e na vida da ferramenta [28]. Os parâmetros de usinagem devem ser selecionados de modo que a potência da máquina seja utilizada de maneira ideal, que a vida da ferramenta seja adequada para a produção, e que o tempo de usinagem seja o menor possível [29].

A escolha de parâmetros que removam maior quantidade de material proporciona um menor tempo de usinagem. Porém, em geral, aumentam os esforços envolvidos no processo, podendo induzir deformações tanto na peça quanto na máquina-ferramenta, gerar erros dimensionais e prejudicar a qualidade da superfície usinada [28].

Os principais parâmetros de usinagem selecionados para operação de fresamento são [30]:

- **Avanço (f):** É o percurso de avanço em cada volta da ferramenta. O aumento do avanço acarreta maiores solicitações mecânicas na ferramenta, enquanto um avanço reduzido aumenta o percurso usinado por cada gume, o que pode aumentar o desgaste da ferramenta.

- **Avanço por dente (f_z):** Avanço de cada dente medido na direção de avanço da ferramenta. Relaciona-se com o avanço e o número de dentes da ferramenta conforme a equação (1).

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (1)$$

onde:

f_z : avanço por dente [mm/dente];

f : avanço [mm];

z : número de dentes da ferramenta.

- **Velocidade de avanço (v_f):** velocidade instantânea do ponto de referência do gume, segundo a direção e sentido do avanço. Pode ser expressa conforme a equação (2).

$$v_f = f \cdot n \quad (2)$$

onde:

v_f : velocidade de avanço [mm/min];

f : avanço [mm];

n : rotação [rpm].

- **Profundidade axial (a_p):** Consiste na profundidade de penetração do gume principal, medida perpendicularmente ao plano de trabalho.

- **Profundidade radial (a_e):** Consiste na profundidade de penetração da ferramenta com relação à peça perpendicularmente à direção de avanço.

- **Velocidade de corte (v_c):** É a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça. Possui influência direta no desgaste da ferramenta, condições de atrito e temperatura. Ela é calculada usando-se a equação (3).

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}, \quad (3)$$

onde:

d : diâmetro da ferramenta [mm];

n : rotação da ferramenta [rpm].

2.2.4 Forças e potência de corte

A força de usinagem pode ser definida como uma resistência do material da peça à penetração do gume da ferramenta. Para fins práticos, é usual trabalhar com as componentes desta força atuando em direções conhecidas [28,30]. A Figura 7 apresenta a decomposição da força de usinagem para o fresamento tangencial.

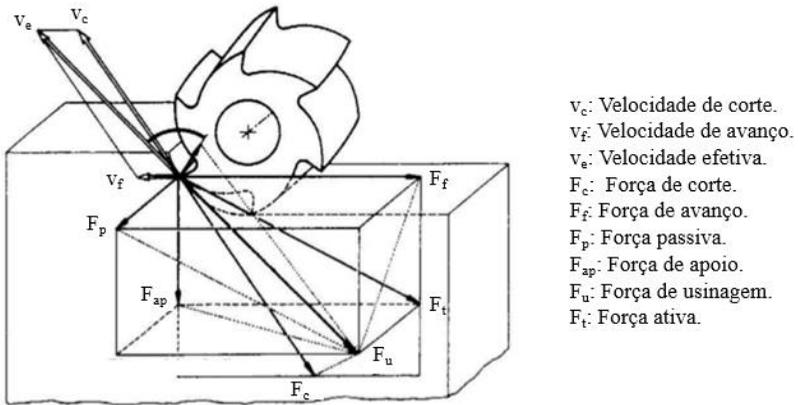


Figura 7 - Forças de usinagem no fresamento tangencial.

A força de usinagem, F_u , é decomposta nas forças ativa, F_t , e passiva, F_p . A força passiva atua perpendicularmente ao plano de trabalho, e por isso não influencia na potência. Por sua vez, a força de usinagem contribui para a potência de usinagem, uma vez que atua no plano de trabalho.

A força de usinagem pode ser decomposta em duas componentes: força de corte, F_c , que é uma projeção da força de usinagem na direção de corte. E força de avanço, F_f , que, por sua vez, é a projeção da força de usinagem na direção de avanço. A força de apoio, F_{ap} , é definida como uma projeção da força de usinagem na direção perpendicular à direção de avanço [12,28,30].

Pode-se estabelecer uma relação direta entre as componentes da força de usinagem e parâmetros de usinagem, conforme apresentado na Figura 8.

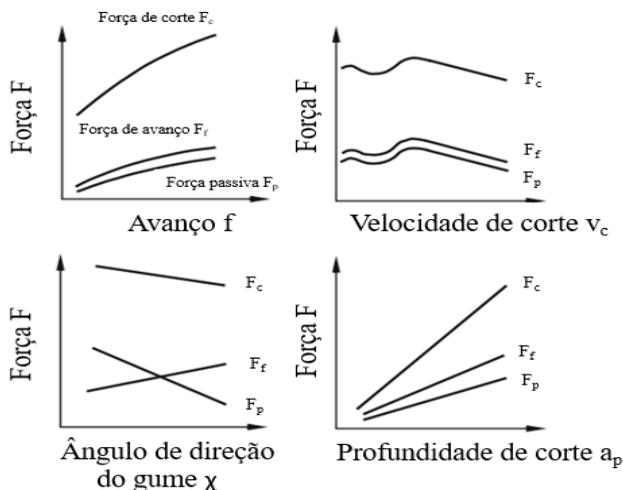


Figura 8 - Relação entre parâmetros de usinagem e forças de usinagem [10].

Uma máquina ferramenta precisa gerar potência para proporcionar os movimentos de usinagem, tanto rotacionando o eixo-árvore, quanto movimentando a mesa. Esta potência é diretamente proporcional às forças envolvidas no processo [30]. A potência de corte (P_c) pode ser obtida segundo a equação (4).

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^3} ; \quad (4)$$

onde:

P_c : Potência de corte [kW];

F_c : Força de corte [N];

v_c : Velocidade de corte [m/min].

Outra forma de se estimar a potência de usinagem é através da medição direta da potência ativa na máquina ferramenta, com o uso de transdutores que medem grandezas elétricas proporcionais a esta potência.

2.2.5 Trajetórias da ferramenta

O fresamento pode ser dividido em operações de desbaste e acabamento. O desbaste é a operação inicial de fresamento, na qual busca-

se a maior remoção de material possível em um menor tempo admissível. Já no acabamento o objetivo é precisão dimensional e qualidade superficial adequada [32].

Em geral, durante o desbaste selecionam-se as maiores ferramentas possíveis e parâmetros que promovam maior taxa de remoção de material. As estratégias mais adotadas são paralelas a uma direção ou paralelas ao contorno. Já no acabamento, podem ser utilizadas ferramentas menores e a seleção de parâmetros é definida de acordo com os parâmetros de qualidade, principalmente rugosidade. A trajetória da ferramenta segue o contorno da peça, conferindo precisão dimensional e de forma [32]. A Figura 9 exemplifica as operações de desbaste e acabamento.

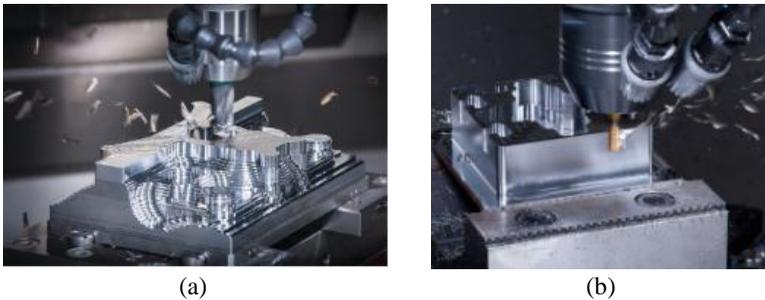


Figura 9 - Operações de desbaste (a) e acabamento (b) [33].

Trajетórias da ferramenta são definidas como movimentos percorridos da ferramenta em relação à peça usinada. Para efetuar uma operação de fresamento de modo eficiente, além da seleção adequada das ferramentas e parâmetros de usinagem, precisa-se definir a trajetória que a ferramenta executará. Com o avanço tecnológico de máquinas ferramenta, as trajetórias de corte são obtidas através da integração de modelos CAD, CAM e CNC [34, 35].

As estratégias mais usuais para usinagem de cavidades são apresentadas na Figura 10 [36].

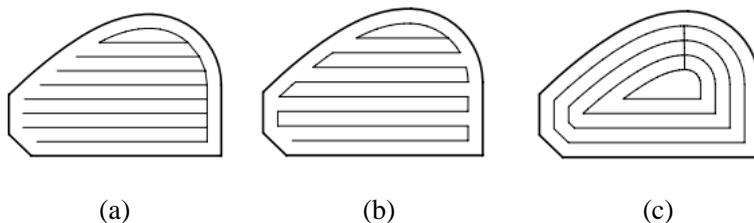
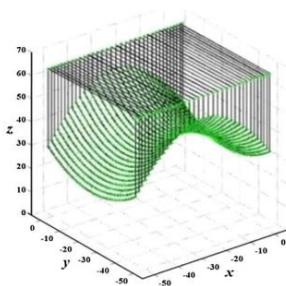


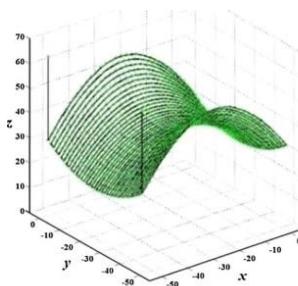
Figura 10 - Tipos de trajetória: (a) paralela unidirecional; (b) paralela bidirecional (c) paralela ao contorno [36].

Em geral, trabalhos que avaliam trajetórias de ferramentas buscam otimizar os tempos de processo, qualidade da superfície usinada, esforços envolvidos e vida da ferramenta [37]. Além disso, visam melhorar a integração do comando numérico com o software CAD/CAM.

Ma *et al.* [37] apresentaram uma proposta para otimização de trajetória na usinagem de uma superfície complexa em um centro de usinagem três eixos. O fresamento de superfícies complexas nesse tipo de máquina ferramenta gera grande flutuação das forças de usinagem, uma vez que as condições de contato entre peça e ferramenta mudam constantemente durante o processo. A fim de se obter maior qualidade da superfície usinada, foram monitoradas as forças de usinagem e foi proposta uma nova trajetória de corte. Como resultado, obtiveram-se menores flutuações das forças envolvidas e menor rugosidade, e as trajetórias investigadas são mostradas na Figura 11.



(a) Paralelo unidirecional



(b) Paralelo bidirecional

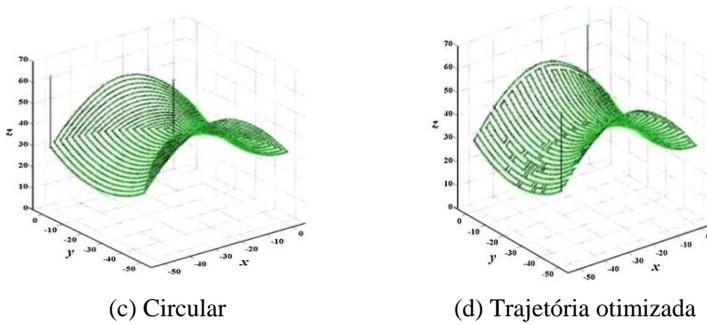


Figura 11 - Trajetórias de corte [37].

González [35] apresentou um método para a geração de trajetórias trocoidais e espirais combinadas para fresamento de cavidades, utilizando a teoria da transformada de eixo médio e implementada na linguagem computacional *Octave*. Na trajetória trocoidal, a ferramenta executa movimentos circulares repetidos, seguidos de deslocamento entre eles. Apesar dos resultados positivos em termos de qualidade da superfície usinada, a trajetória trocoidal proporcionou um comprimento de usinagem maior, o que gera impactos negativos tanto na produtividade quanto no consumo de energia global do processo. A Figura 12 ilustra o corpo de prova e as trajetórias geradas por González [35].

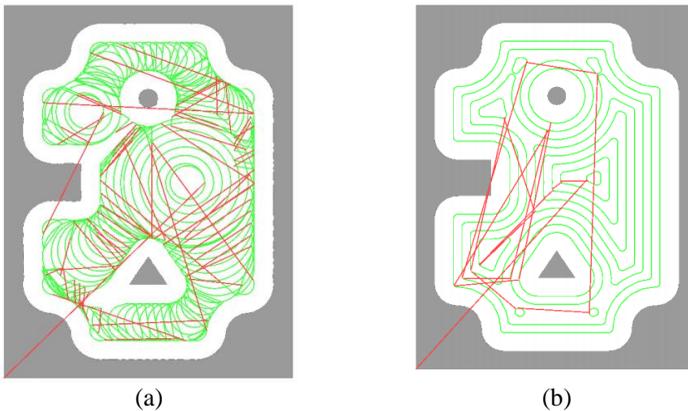


Figura 12 - Trajetórias de corte: (a) trocoidal; (b) paralela ao contorno [35].

A maioria das trajetórias de ferramenta é composta de séries de segmentos lineares curtos, os chamados movimentos G01 (código que

identifica um comando de trajetória obtida por interpolação linear do movimento entre dois pontos). Esse formato discreto de caminho da ferramenta limita a velocidade e a precisão alcançáveis das máquinas CNC. Para usinagem de superfícies complexas, o comando numérico, em geral, suaviza os cantos, porém, com uma diminuição de velocidade e alteração da direção de avanço dentro dos limites cinemáticos da máquina, o que faz com que a máquina-ferramenta execute acelerações bruscas constantemente [38].

Tajima e Sencer [38] propuseram uma técnica para planejar um perfil de avanço com aceleração tangencial constante, que proporciona interpolação precisa de movimentos, mantendo uma velocidade constante e gerando movimentos suaves e rápidos.

Outros trabalhos que propuseram novas metodologias para a geração de trajetórias e com aumento da precisão de interpolação da ferramenta são encontrados em [39-42]. Nesses trabalhos os principais benefícios obtidos foram: geração de trajetórias de corte *online* capazes de realizar interpolações precisas com maiores velocidades aplicadas no fresamento de geometrias complexas; criação de algoritmo para geração de trajetórias com diminuição de movimentos em vazio; geração de trajetórias para usinagem de cavidades de fundo plano aplicado no fresamento de alta velocidade.

Abrahamsem [41] apresentou um método de geração de trajetória por meio do mapeamento da superfície da cavidade usinada, sendo que a Figura 13 ilustra o diagrama da cavidade (a) e a trajetória gerada (b). O método se mostrou versátil para diferentes cavidades, e eficiente, uma vez que a ferramenta não passa duas vezes pelo mesmo local.

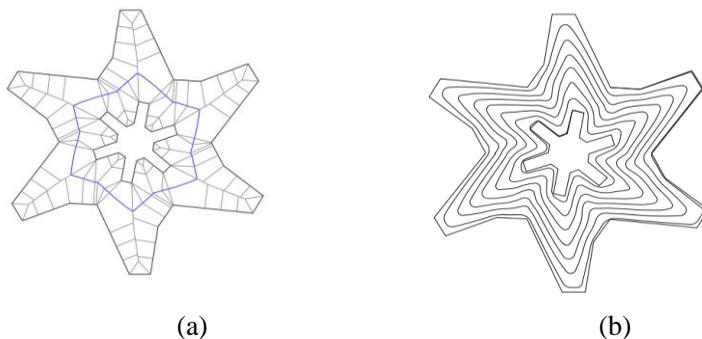


Figura 13 – Geração de trajetória: (a) Diagrama da cavidade usinada; (b) Trajetória gerada [41].

2.3 Consumo de energia no processo de usinagem

Atualmente, sistemas de usinagem são amplamente utilizados no setor industrial, ao mesmo tempo em que consomem grande quantidade de energia e possuem baixa eficiência energética. Portanto, possuem um potencial significativo para aumento da eficiência [8].

A principal fonte de energia de máquinas ferramenta atuais é a eletricidade [43]. Carvalho [6] afirma que o custo com energia chega a superar o custo com ferramentas de corte. Além de aumentar custos de fabricação, um elevado consumo de energia proporciona maiores níveis de emissão de gases de efeito estufa [19].

Entender as características do consumo de energia permite compreender como as máquinas ferramenta consomem recursos e quais componentes ou subsistemas precisam ser melhorados. Monitorar e analisar o consumo de energia durante o processo de usinagem é fundamental para reduzir o consumo de energia e obter um processo de fabricação mais sustentável [1, 23]. Sistemas de medição e gerenciamento de energia permitem não apenas medir o consumo, mas também mapear detalhadamente a entrada de energia em diferentes estágios da fabricação de um produto [24].

Diversos autores realizam pesquisas visando aumento de eficiência energética em processos de usinagem, e alguns desses trabalhos serão apontados neste trabalho [43-48]. Dentre as diversas estratégias para a redução do consumo energético, pode-se citar a otimização de parâmetros de usinagem, alterações no projeto de máquinas-ferramenta, modelos matemáticos para descrever consumo energético e planejamento de processos usando a eficiência energética como critério.

Cai *et al.* [8] relatam que os principais desafios ao avaliar o consumo de energia em processos de usinagem se devem à complexidade envolvida nesses processos e à variedade de formas como cada processo consome energia.

O desenvolvimento tecnológico de máquinas ferramenta, auxiliado pela evolução dos sistemas CAD/CAM, resultou em um aumento significativo de produtividade, maior qualidade de peças usinadas e maior precisão. No entanto, os dispositivos instalados nessas máquinas passaram a ser os principais consumidores de energia, de modo que cada máquina ferramenta possui um perfil de consumo característico relacionado aos seus diversos componentes. Desta forma, os avanços tecnológicos proporcionaram um novo comportamento de consumo de energia, que deve ser estudado [1, 7].

Os principais componentes do consumo de energia das máquinas-ferramenta são o eixo-árvore, responsável pelo movimento de rotação, e os movimentos lineares de avanço da mesa, acionada por servomotores. O consumo de energia desses componentes é altamente dependente da resistência ao corte. Outras demandas de energia vêm da unidade hidráulica, bombas de fluido de corte, dispositivos de refrigeração e dispositivos periféricos [23].

2.3.1 Modelo de consumo energético

Dahmus e Gutowski [45] e Gutowski *et al.* [46] propuseram uma metodologia para avaliação do consumo de energia em processos de usinagem que é amplamente aceita no meio acadêmico, a partir da qual diversas metodologias se desenvolveram. Esta abordagem divide a energia consumida em uma energia fixa, devido aos componentes da máquina, e uma energia variável, influenciada pelos esforços de corte. Em trabalhos recentes, foi atestado que o consumo fixo de energia pode ser bem superior ao consumo variável, ou seja: os diversos dispositivos periféricos de máquinas ferramenta podem consumir mais potência que os esforços de corte.

A metodologia para avaliação do consumo de energia em processos de usinagem consiste em gerar gráficos potência vs tempo, que indiquem a variação da potência consumida pela máquina ferramenta durante as diferentes etapas de usinagem. A Figura 14 ilustra o gráfico obtido durante uma operação de torneamento. A área abaixo da curva representa a energia consumida durante o processo.

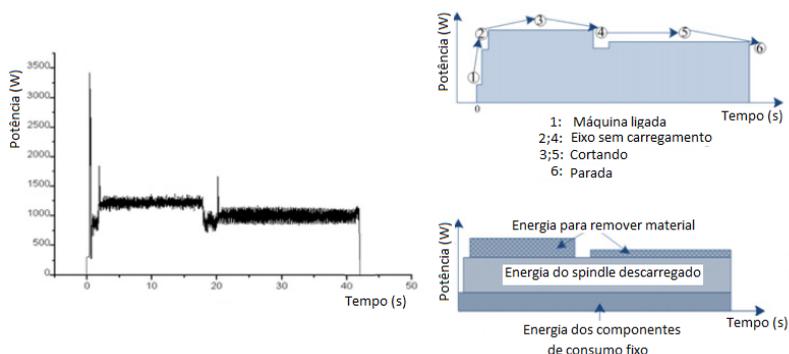


Figura 14 – Gráfico potência vs tempo no processo de torneamento [48].

Na Figura 14, pode-se observar o perfil da potência e analisar a energia consumida para diferentes etapas de usinagem. A energia fixa é consumida pelo sistema hidráulico, sistema de lubrificação, sistema de controle e outros dispositivos periféricos. O consumo destes itens é independente das condições de usinagem. O consumo de energia variável vem do sistema acionado pelo eixo-árvore e por servo acionadores, nos quais o uso de energia é altamente dependente da resistência ao corte [47].

A energia consumida por uma máquina ferramenta pode ser dividida em quatro fases:

- Fase de acionamento: caracterizada por um pico de potência, no momento do acionamento da máquina;
- Fase *standby*: a máquina consome uma quantidade de energia constante, em geral, devido a componentes que não podem ser desligados;
- Fase operação: este modo é caracterizado por movimentos passivos, ou seja, sem remoção de material;
- Fase de produção: nesta fase ocorre a remoção de material. Além do consumo constante da máquina, é adicionado o consumo variável devido aos esforços de corte.

A Figura 15 mostra um gráfico de potência vs tempo durante uma operação de torneamento. Estas curvas foram obtidas em tempo real e mostra a potência exigida pela máquinas-ferramenta durante toda uma operação. Esta abordagem de medição também pode ser encontrada em Behrendt *et al.* [3], Liu *et al.* [49] e Hu *et al.* [50].

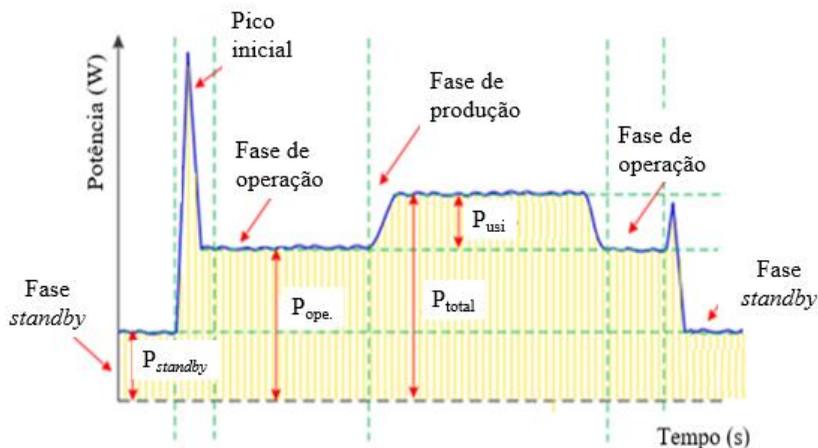


Figura 15 - Gráfico potência vs tempo para torneamento [43].

A Figura 15 mostra a divisão do gráfico de acordo com as fases de operação realizadas. A divisão referente ao modo de *standby* proporciona um consumo constante ao longo do tempo. Outro consumo constante ocorre durante o modo de operação. No entanto, este consumo é influenciado principalmente pela rotação da ferramenta e avanço da mesa, enquanto realiza movimentos passivos. O modo de produção é variável e é diretamente influenciável pelos parâmetros de corte.

Outra informação importante no gráfico é a área abaixo da curva, que representa a energia total consumida durante operação de usinagem.

Desta forma, pode-se estabelecer as relações mostradas nas equações (5) e (6).

$$P_{total} = P_{ope} + P_{usi} \quad (5)$$

$$E_{total} = P_{total} \cdot t_{usi} + P_{ope} \cdot t_{ope} + P_{standby} \cdot t_{standby} \quad (6)$$

onde:

P_{total} : Potência máxima durante remoção de material;

P_{ope} : Potência durante fase de operação;

P_{usi} : Potência de usinagem, devido a esforços de corte;

$P_{standby}$: Potência durante fase de *standby*;

E_{total} : Energia consumida durante toda operação de usinagem;

t_{usi} : Tempo de usinagem;

t_{opc} : Tempo durante fase de operação, sem remover material;

t_{standby} : Tempo de duração da fase de *standby*;

Quanto mais severas as condições de corte, maior será a potência requerida para realizar o corte. No entanto, a taxa de remoção de material aumenta e, com um tempo de operação menor para remover a quantidade desejada de material, os componentes periféricos da máquina-ferramenta consumirão menos energia. Entretanto, não basta aumentar as condições de corte indiscriminadamente, uma vez que velocidade de corte e taxa de avanço excessivos podem causar um desgaste prematuro da ferramenta ou a um acabamento superficial ruim [8, 43, 48].

2.3.2 Aumento de eficiência energética na usinagem

Uma quantidade significativa de energia é consumida por máquinas ferramenta durante a fase de operação, como na troca de ferramentas e movimentação em vazio de ferramenta, além de movimentos rápidos, que alcançam elevadas velocidades. Hu *et al.* [51] apresentaram um modelo de otimização do consumo de energia de uma fresadora durante movimentos de transição, sem remoção de material, incluindo os movimentos de aproximação, recuo e troca de ferramentas. Os resultados obtidos levaram a uma redução de 27,9% da energia consumida em movimentos passivos.

Li *et al.* [52] apresentaram uma metodologia para otimizar a trajetória da ferramenta durante a remoção de material propriamente dita. Eles avaliaram a solução proposta com base em um menor consumo de energia e menor pegada de carbono durante a usinagem de uma peça com superfície complexa. Como resultado, obteve-se uma redução de 17,43 % na energia consumida e 17,42% na pegada de carbono. A trajetória otimizada é apresentada na Figura 16.

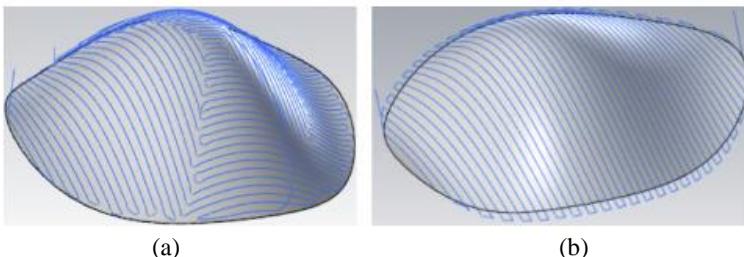


Figura 16 - Trajetória otimizada (a) Trajetória paralela (b)

Jeon *et al.* [4] propuseram um método para simular a demanda energética em uma planta fabril com base em dados de consumo de energia de fresadoras em função de parâmetros de usinagem. Como conclusão, apresentaram uma ferramenta para avaliar custos de energia para diferentes planos de produção em função dos parâmetros adotados. A metodologia adotada reduziu em 15% o pico de potência consumida e 4% a energia global consumida.

Lee *et al.* [53] desenvolveram um sistema experimental de monitoramento de consumo de energia e utilizaram um algoritmo genético para otimizar parâmetros de velocidade de avanço e rotação do eixo. Os resultados obtidos indicaram uma redução de 13% do consumo de energia da máquina ferramenta com a otimização destes parâmetros.

Por vezes, a seleção de parâmetros que proporcionem maior produtividade ou mesmo maior eficiência energética podem prejudicar o processo em outros aspectos. As estratégias visando menor consumo de energia não podem comprometer a integridade da superfície da peça usinada, pois a qualidade deve permanecer suficiente para garantir que o produto atenda à função. Além de um importante requisito de projeto, uma superfície adequada pode melhorar o desempenho de um produto e aumentar seu ciclo de vida, o que reduzirá impactos ambientais futuros [54,55].

Por esta razão, Carvalho *et al.* [54] propuseram a adição de uma análise de vibrações ao avaliar a eficiência energética em um processo de fresamento frontal. Os parâmetros selecionados por meio desta abordagem proporcionaram uma redução de 18% no tempo de operação, 23% no consumo de energia e redução no valor médio do desgaste de flanco em torno de 13,5%.

Helu *et al.* [55] quantificaram o impacto de estratégias energeticamente eficientes na qualidade da superfície obtida durante o torneamento de uma liga de titânio. Eles avaliaram o consumo de energia elétrica, desgaste de ferramenta e custo de processo, e ao final apresentaram uma relação entre parâmetros de usinagem durante operação de acabamento, relacionando qualidade da superfície usinada com parâmetros de sustentabilidade.

Banerjee e Sharma [56] aplicaram a técnica de mínima quantidade de lubrificação (MQL) no torneamento de uma liga de liga de titânio, Ti-6Al-4 V, buscando uma otimização com múltiplos objetivos: rugosidade, energia de corte específica, desgaste de ferramenta, consumo de óleo, e taxa de remoção de material. Foi identificado que o controle dos parâmetros do fluido de corte, como vazão e direção de aplicação, foi

mais influente nos resultados. Yoon *et al.* [9] também trabalharam com torneamento com MQL e justificaram os ganhos de eficiência energética obtidos pelo fato das bombas do sistema de lubrificação contribuírem significativamente no consumo de energia.

A pesquisa desenvolvida neste trabalho busca dar continuidade aos trabalhos apresentados neste capítulo, e contribuir com o aumento de eficiência energética no fresamento. Para isso busca-se investigar a influência de diferentes parâmetros de usinagem, propor uma combinação de parâmetros mais eficiente, e separar as parcelas de potência total e potência de usinagem. Desta forma, pretende-se identificar a proporção de energia consumida para remoção de material na energia global do processo. Além disso, busca-se avaliar o quanto os procedimentos de geração de trajetórias atuais, via *softwares* CAM, são eficientes do ponto de vista energético.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metodologia

Em diversos estudos que buscam minimizar o consumo energético durante operações de usinagem, os parâmetros de corte foram identificados como principais fatores que afetam a quantidade de energia consumida (por exemplo, [50,54,55,57]). Por este motivo, uma primeira etapa desta pesquisa consiste na investigação da relação entre parâmetros de usinagem e consumo de energia elétrica por meio de um experimento fatorial completo. Desta forma, pretende-se investigar o efeito dos parâmetros de usinagem no consumo de energia e buscar uma melhor combinação de parâmetros.

A segunda etapa consiste em usinar uma cavidade utilizando parâmetros que proporcionem maior eficiência energética de acordo com o experimento fatorial. Nesta etapa são avaliadas as trajetórias que melhor se adequam à cavidade. Para validar a seleção de parâmetros, a mesma geometria de cavidade é usinada novamente, utilizando parâmetros de corte indicados pelo *default* de dois softwares CAM. O fluxograma apresentado na Figura 17 descreve o procedimento adotado nesta pesquisa.

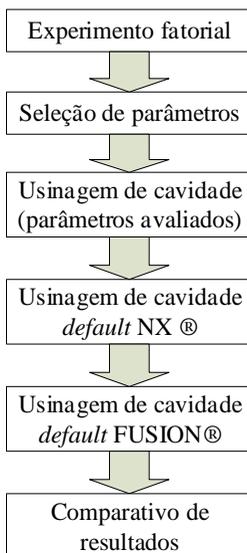


Figura 17 - Metodologia aplicada na pesquisa.

A metodologia adotada nesta dissertação tem como base as abordagens propostas por Gutowski *et al.* [46], Wang *et al.* [48] e Cai *et al.* [58].

3.1.1 Avaliação de parâmetros de usinagem

Por meio da leitura, em tempo real, do consumo de energia elétrica de uma fresadora CNC em operação, são gerados gráficos potência vs tempo. Em seguida, o gráfico é dividido em diferentes áreas, que representam o consumo de energia nos diferentes modos de operação da máquina. Esta divisão permite separar a potência total consumida da potência necessária para o corte. A Figura 18 representa a potência em função do tempo durante o fresamento.

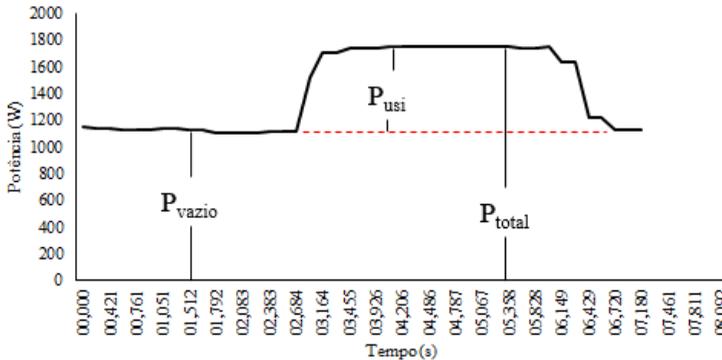


Figura 18 - Potência vs tempo.

O gráfico possibilita obter três indicações de potência distintas:

- P_{vazio} : É a potência consumida para realização de movimentos passivos, sem remoção do material. Também contempla o consumo fixo da máquina ferramenta devido a componentes auxiliares;
- P_{usi} : A potência de usinagem é a parcela variável do gráfico, que depende exclusivamente dos esforços de cortes inerentes ao processo. Sofre influência direta dos parâmetros de corte;
- P_{total} : Corresponde à potência total que o centro de usinagem está consumindo, e engloba as parcelas de consumo fixo e variável.

A partir dos valores adquiridos são calculadas as médias dos valores de potência medidos quando a ferramenta executa movimento em vazio e quando remove material. Desta forma, pode-se avaliar o aumento de potência e distinguir a potência necessária para movimentos passivos e para remoção de material propriamente dita. A análise de resultados será realizada em termos da potência de usinagem, correspondente à parcela variável do gráfico, e à potência total consumida. A Figura 22 esquematiza o procedimento adotado para a investigação da influência dos parâmetros de corte.

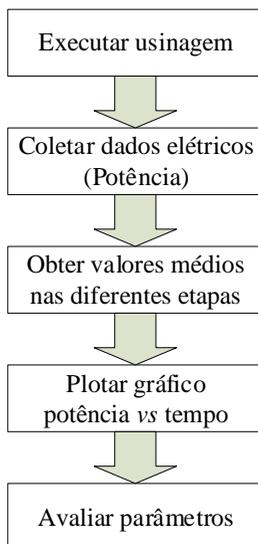


Figura 19 – Monitoramento de parâmetros de usinagem.

A etapa de avaliação de parâmetros consiste em avaliar a influência dos parâmetros de usinagem de acordo com três critérios de avaliação: potência requerida, energia consumida e energia específica, como indicado na Figura 23.

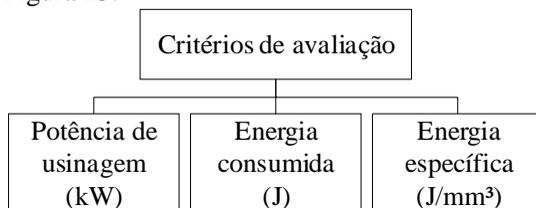


Figura 20 - Critérios de avaliação.

A potência de usinagem é a potência necessária para a remoção de material, enquanto a energia consumida é representada pela área abaixo da curva no gráfico potência vs tempo. Por fim, a energia específica representa a energia necessária para remover 1 mm³ de material. Estes critérios permitem uma avaliação que proporciona uma relação direta com critérios de produtividade.

O objetivo desta abordagem é encontrar uma combinação de parâmetros de corte que forneça maior eficiência energética e avaliar como cada parâmetro influencia o consumo de energia da máquina-ferramenta durante operação. A seleção de parâmetros será realizada com base no critério de energia específica.

Vale ressaltar que as características construtivas das máquinas ferramenta modificam significativamente o perfil de consumo de energia. Portanto, os resultados obtidos nesta pesquisa são válidos para a máquina ferramenta utilizada nos ensaios, uma fresadora vertical Charles MVC-955. A análise em outras máquinas demandaria ensaios próprios.

3.1.2 Usinagem de uma cavidade

Com o objetivo de validar a avaliação de parâmetros, uma cavidade será usinada utilizando um conjunto de parâmetros que proporcione maior eficiência energética. A Figura 21 mostra a cavidade que será usinada.

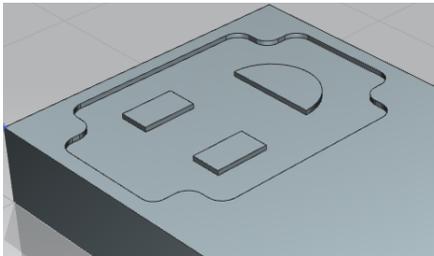


Figura 21 - Cavidade escolhida para usinagem.

A cavidade projetada para realização do ensaio possui fundo plano e três ilhas. Duas ilhas possuem laterais retas enquanto uma possui formato semicircular. A presença das ilhas exigirá que a trajetória se adapte ao formato da peça, e permitirá avaliar a quantidade de movi-

mentos de entrada e saída da ferramenta de acordo com as trajetórias geradas nos *softwares* CAM.

Em seguida, a mesma cavidade será usinada utilizando parâmetros definidos por dois softwares CAM. Os parâmetros de usinagem indicados pelos softwares são indicações *default*. O objetivo nesta etapa do trabalho é avaliar o quanto se pode ganhar em eficiência energética ao substituir os parâmetros *default* por parâmetros selecionados por meio de uma metodologia que busca maior eficiência energética. Esta etapa fornecerá uma ideia do quão energeticamente eficientes são as sugestões de parâmetros indicadas pelos softwares CAM analisados.

3.2 Materiais

3.2.1 Sistema de aquisição de dados

A indústria de manufatura vem sofrendo constantes evoluções em seu processo de produção. Em um cenário atual, a indústria 4.0 exige uma nova geração de máquinas mais inteligentes, conectadas, amplamente acessíveis e mais adaptáveis [59, 60]. Nesse contexto, dentre os projetos desenvolvidos pelo GRIMA, laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, encontra-se uma plataforma de comunicação e monitoramento de máquinas ferramenta via internet.

O MTConnect é um padrão aberto que permite coletar dados de uma máquina e estabelece uma comunicação entre máquina e um aplicativo de software, via internet. Desta forma, é possível acompanhar em tempo real a leitura de diversas variáveis, tais como posição do eixo, potência consumida, rotação da ferramenta, linha da programação executada, dentre outras [60]. A

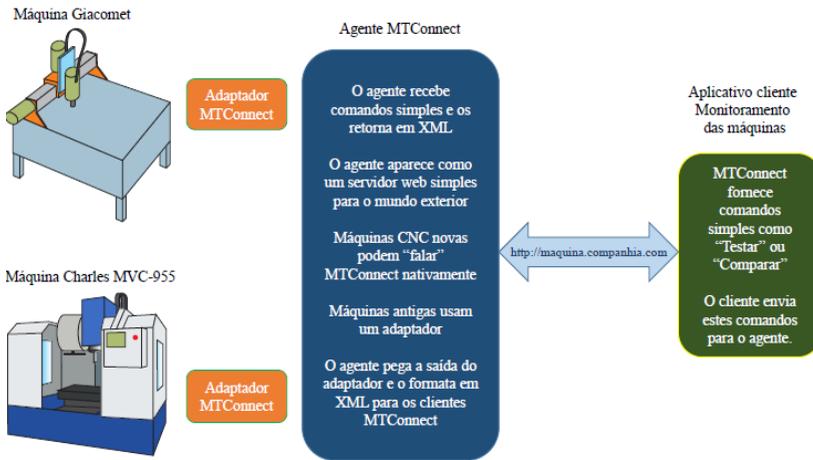


Figura 22 - Esquema do sistema de aquisição de dados [60].

3.2.2 Máquina ferramenta

A máquina ferramenta utilizada nos ensaios foi uma fresadora CNC Charles MVC-955 com controlador Siemens Sinumerik 840 Di. As principais características da máquina-ferramenta encontram-se na

Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações técnicas - Charles MVC-955

Curso da mesa (eixos X, Y)	900 x550 mm
Curso do cabeçote (eixo Z)	530 mm
Rotação máxima do eixo-árvore	8000 rpm
Potência do motor principal	7,5 kW
Avanço rápido (eixos X,Y)	20 m/min
Avanço rápido (eixo Z)	15 m/min

3.2.3 Ferramenta de corte

Para os ensaios, foram utilizados insertos intercambiáveis de metal duro, classe P 20 da fabricante Kyocera. A escolha de insertos de metal duro se deu por sua larga aplicação industrial devido ao fator econômico e larga faixa de aplicabilidade em diversos materiais.

O inserto BDMT 11T308ER-JT, com suas principais características geométricas, é mostrado na Figura 23.

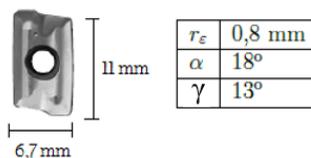


Figura 23 - Inseto BDMT 11T308ER-JT, com suas principais características geométricas.

O inserto possui um revestimento TiALN +TiN, conforme informado pelo fabricante.

O porta-ferramentas possui diâmetro de 20 mm e utiliza três insertos, como mostrado na Figura 24. **Erro! Fonte de referência não encontrada.**



Figura 24 – Porta-ferramenta KBMEC20-S18-11T

3.2.4 Material usinado

O material usinado foi o aço AISI P20, e sua escolha se deu por ser um material largamente utilizado para confecção de moldes e matrizes. As principais características do material usinado encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Características do material da peça.

Propriedades físicas	
Dureza média	31HRC
Composição química	
Carbono	0,417%
Silício	0,252%
Manganês	1,44%
Cromo	1,93%
Molibdênio	0,240%

3.2.5 Transdutor de energia

Os dados referentes às grandezas elétricas foram obtidos pelo transdutor de energia com sensor de corrente não invasivo Mult-K 120 da fabricante Kron, mostrado na Figura 25. Ele realiza aquisição de diversos dados de grandezas elétricas, incluindo a potência ativa e energia consumida em um intervalo de tempo. O transdutor ligado ao MTConnect permite o acompanhamento em tempo real da potência durante usinagem.



Figura 25 – Transdutor de energia Mult-K 120.

3.3 Procedimento experimental

Para a realização do experimento fatorial, foi utilizado um corpo de prova com formato de paralelepípedo, no qual a ferramenta de corte executa um fresamento frontal. Nos diferentes passes que a ferramenta executa, são ensaiados os diferentes níveis dos parâmetros de corte previstos. A Figura 26 ilustra a movimentação que a ferramenta executa no decorrer do ensaio.

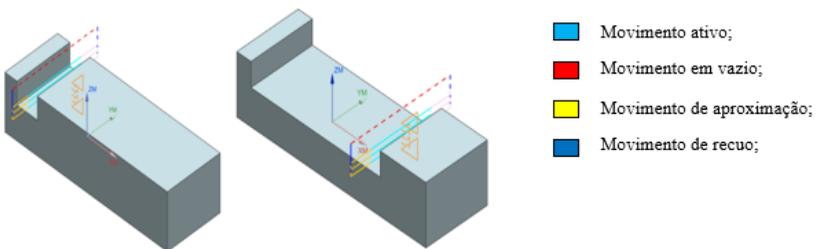


Figura 26 - Usinagem do corpo de prova.

A ferramenta executa um movimento de aproximação, mantém uma profundidade axial especificada e realiza o movimento de corte, em

seguida retorna para a posição inicial e executa o ciclo novamente para executar a usinagem com outros parâmetros de usinagem.

Esta abordagem permite avaliar a potência consumida mantendo um comprimento de usinagem fixo e a mesma direção de corte. A fim de se obter um gráfico potência vs tempo com as diferentes fases de operação bem definidas, a ferramenta executa um movimento de aproximação, com o mesmo comprimento de usinagem de quando remove material. Esta abordagem, coletando dados de potência em vazio exatamente antes da ferramenta entrar em contato com a peça, permite uma avaliação mais precisa da influência dos esforços de corte. A Figura 27 ilustra a trajetória da ferramenta durante o ensaio.

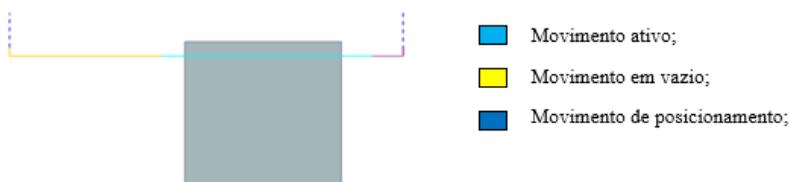


Figura 27- Movimentos com e sem remoção de material.

3.3.1 Parâmetros de corte

Os parâmetros avaliados são: velocidade de corte (v_c), velocidade de avanço (v_f), profundidade axial (a_p) e profundidade radial (a_e).

A velocidade de corte é um dos parâmetros mais importantes na usinagem, uma vez que ela influencia diretamente a vida da ferramenta e os esforços de corte envolvidos. A velocidade de avanço impacta os esforços envolvidos e a produtividade do processo, assim como as profundidades axial e radial.

3.3.2 Experimento fatorial

Foi realizado um experimento fatorial completo, contendo quatro fatores, quatro níveis e três aferições para cada combinação, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Níveis dos parâmetros de corte.

Fatores	a_p	a_e	v_c	v_f
Níveis	$a_p 1$	$a_e 1$	$v_c 1$	$v_f 1$
	$a_p 2$	$a_e 2$	$v_c 2$	$v_f 2$
	$a_p 3$	$a_e 3$	$v_c 3$	$v_f 3$
	$a_p 4$	$a_e 4$	$v_c 4$	$v_f 4$

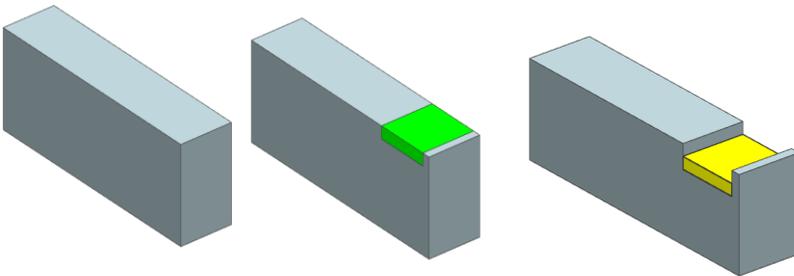
O experimento fatorial completo implica que todas as combinações dos níveis dos fatores são investigadas. É possível ainda avaliar o efeito principal de cada fator e a presença ou não de interação. O efeito de um fator é a variação na resposta produzida pela mudança do nível do fator. A interação, por sua vez, ocorre quando a diferença na resposta entre os níveis de um fator não é a mesma. Análises fatoriais são a única maneira de descobrir interações entre as variáveis [61].

Todas as combinações possíveis entre os quatro parâmetros de usinagem foram investigadas, e cada combinação foi executada três vezes, resultando em um total de 768 medições. A tabela 4 mostra os valores dos parâmetros que foram investigados no decorrer da pesquisa. A escolha desses parâmetros respeitou os limites de trabalho da ferramenta de corte.

Tabela 4 - Valores dos parâmetros abordados na pesquisa.

a_p (mm)	a_c (mm)	v_c (m/min)	v_f (mm/min)
0,375	5	126	480
0,75	10	144	720
1,125	15	162	960
1,5	20	180	1200

Para realizar o ensaio fatorial, o corpo de prova foi dividido em dezesseis áreas iguais, conforme a Figura 28. Cada área representa uma combinação de velocidade de corte e velocidade de avanço. Em cada área todas as combinações de profundidade axial e radial foram contempladas.



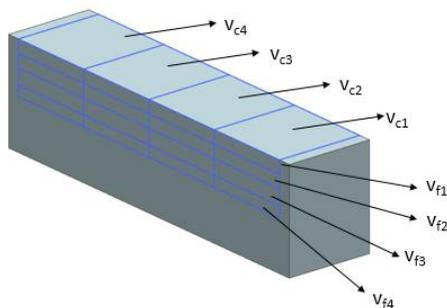


Figura 28 - Divisão do corpo de prova.

As dimensões das áreas a serem usinadas são mostradas na Figura 29. Embora a largura do corpo de prova seja de 50 mm, para evitar grandes dispersões dos dados, devido ao momento em que a fresa inicia o contato com o corpo e a área de corte ainda não é constante, foi considerado que os dados válidos seriam coletados a partir de 20 mm, quando a fresa já está inteiramente em contato com a peça. Desta forma o comprimento de usinagem será de 30 mm.

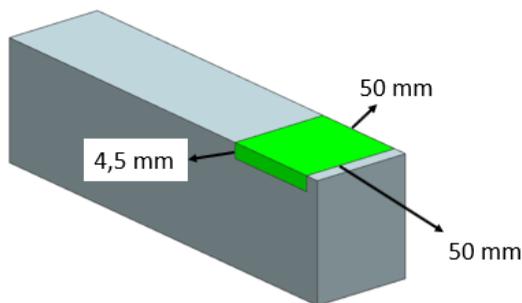


Figura 29 - Dimensões do corpo de prova.

Ao final da usinagem de cada área, um último passe foi realizado com os parâmetros de corte da Tabela 5. Isto teve como objetivo avaliar se o desgaste da ferramenta apresentou influência significativa durante o ensaio. Além disso, ao final da usinagem de cada área, o desgaste da ferramenta foi avaliado por microscopia.

Tabela 5 - Parâmetros de usinagem para avaliação do efeito do desgaste.

a_p (mm)	a_e (mm)	v_c (m/min)	v_f (mm/min)
0,75	5	144	720
	10		
	15		
	20		

Para exemplificar a metodologia adotada no decorrer do trabalho, a Tabela 6 apresenta os valores medidos durante a usinagem de uma das combinações avaliadas no decorrer do trabalho.

Tabela 6 - Aferições para uma combinação de parâmetros.

	c		
	Potência de operação (W)	Potência de produção (W)	Potência de usinagem (W)
Aferição 1	1106,79	1434,96	328,16
Desv. Padrão 1	13,12	4,97	14,03
Aferição 2	1099,56	1434,42	334,85
Desv. Padrão 2	11,90	2,12	12,09
Aferição 3	1101,39	1427,78	326,38
Desv. Padrão 3	9,76	10,87	14,61
Média	1102,58	1432,39	329,80
Desv. padrão	20,20	12,14	23,59

Para cada aferição, conforme a ferramenta executou os movimentos em vazio e removendo material o sistema de monitoramento coletou dados de potência, que resultaram em um valor médio de potência de operação e de potência de produção. A potência de usinagem por sua vez, foi obtida pela diferença entre as demais potências. Foram realizadas três aferições e o valor médio entre elas foi considerado nas análises no decorrer do trabalho. O desvio padrão manteve-se em um nível aceitável.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Avaliação de parâmetros de usinagem

4.1.1 Profundidade axial

A Figura 30 apresenta a influência da profundidade axial na potência, fixando-se os outros parâmetros de usinagem.

Percebe-se uma relação linear entre potência e profundidade axial. As curvas de potência total e potência de usinagem apresentam um valor de $R^2 = 0,9997$ e $0,9981$ respectivamente, o que indica que é válido considerar uma relação linear entre os parâmetros avaliados. Já a energia específica reduz com o aumento da profundidade axial. Isso porque mesmo que a potência aumente, o incremento na taxa de remoção de material faz com que a energia consumida para remoção de cada mm^3 seja menor.

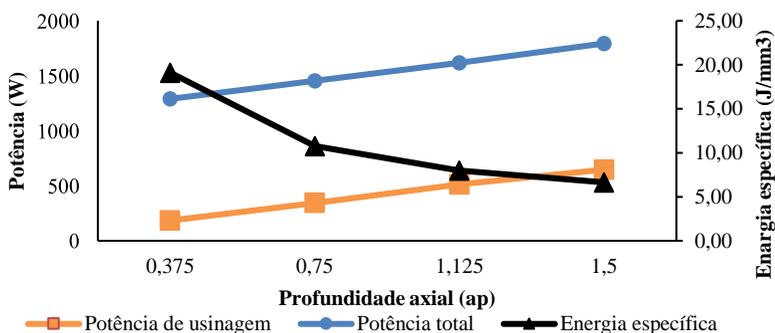


Figura 30- Potência e energia específica em função da profundidade axial.

Os parâmetros de usinagem para obtenção da Figura 30 são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados para gerar Figura 30.

a_e (mm)	a_p (mm)	v_c (m/min)	v_f (mm/min)
15	0,375	144	720
	0,75		
	1,125		
	1,5		

A Tabela 8 mostra os valores médios de potência e energia específica para os diferentes níveis de profundidade axial avaliados na Figura 30, considerando um intervalo de confiança de 95,45%.

Tabela 8 - Potência e energia específica obtidos na Figura 30

a_p	0,375 mm	0,75 mm	1,125 mm	1,5 mm
P_{total} (W)	1290,07±28,54	1454,07±18,61	1618,22±27,42	1794,28±33,69
P_{usi} (W)	184,73± 42	344,46±38,76	512,28±45,84	647,392±42,58
ϵ (J/mm ³)	19,11	10,77	7,99	6,65

Com relação à potência de usinagem, além de um comportamento linear, percebe-se que a resposta apresenta uma relação quase que na mesma proporção que o parâmetro de entrada. Ou seja, na mesma proporção em que se aumenta a profundidade axial aumenta-se a potência de usinagem.

O comportamento linear que a variação de a_p proporcionou, pode ser explicado pela relação linear entre profundidade de corte e força de corte, como apresentado por Klocke [28] e ilustrado na Figura 8 - Relação entre parâmetros de usinagem e forças de usinagem [10]. Figura 8. Uma vez que a potência de corte é diretamente proporcional à força de corte, conforme equação 4, um aumento linear da força de corte resultará em um aumento linear da potência de usinagem, conforme verificado.

Porém ao avaliar a potência de usinagem que a máquina-ferramenta está efetivamente entregando percebe-se que a relação de proporcionalidade com o aumento da profundidade axial é diferente.

Por exemplo, ao modificar a profundidade axial da condição de 0,375 mm para 0,75 mm, houve um aumento de duas vezes da taxa de remoção de material, contudo isto resultou em um aumento de potência de apenas 12%. Já ao usinar com a condição de a_p igual a 1,5 mm, valor quatro vezes maior que a condição inicial, a potência aumentou em torno de 40%.

A Figura 31 mostra a relação de proporcionalidade entre a variação da profundidade axial e sua respectiva potência fornecida pela máquina ferramenta.

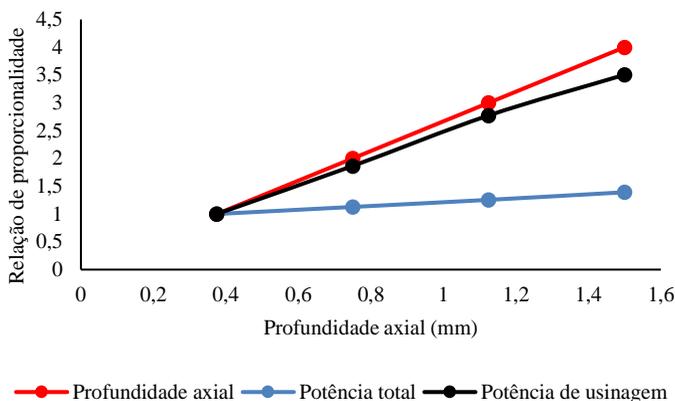


Figura 31 - Relação de proporcionalidade entre profundidade axial e potência.

Por meio da Figura 31 observa-se que a potência de usinagem aumenta na mesma proporção em que se aumenta a profundidade axial e que, por sua vez, a potência total aumenta em uma proporção bem menor.

Isto ocorre devido à alta potência requerida para movimentar a mesa e rotacionar a ferramenta. Ou seja, a potência do modo de operação, quando não há remoção de material, representa uma grande proporção da potência total.

Este comportamento inerente à máquina ferramenta já havia sido constatado por Dahmus [45], onde afirmou que o consumo fixo de uma máquina ferramenta pode chegar a 85% de seu consumo total. Outros pesquisadores que fizeram apontamentos similares foram Hu *et al.* [50], onde em uma dada combinação de parâmetros, o consumo fixo representou 47% do consumo total de energia. Enquanto Wang *et al.* [48] constataram que manter o movimento do eixo árvore consumia 50% da energia total. Deste valor apenas 6,4% foram identificados pelos autores como em decorrência dos esforços de usinagem.

Para ilustrar o efeito que a variação da profundidade axial proporciona na potência de corte e a potência total de processo, a Figura 32 apresenta um comparativo entre os valores máximo e mínimo de profundidade axial considerados: 0,375 mm e 1,5 mm.

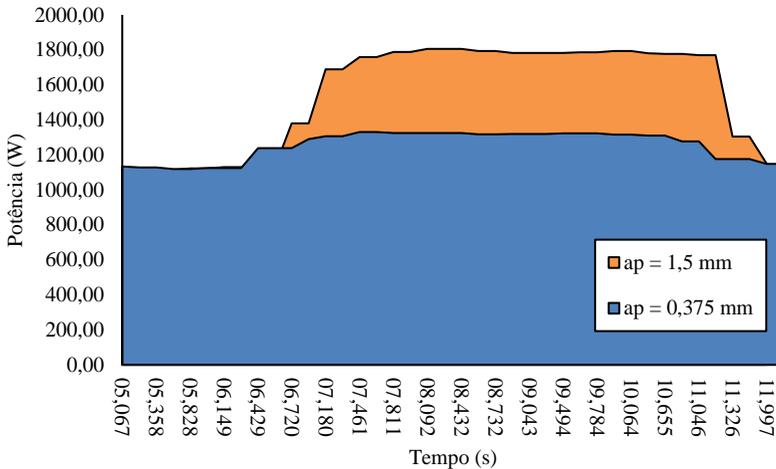


Figura 32 - Comparativo de duas profundidades de corte.

A Figura 32 inicia momentos antes da ferramenta entrar em contato com a peça e, nesta etapa, a potência é a mesma, uma vez que a velocidade de avanço e a rotação da ferramenta são as mesmas para as duas condições. Quando a ferramenta inicia a remoção de material, a potência aumenta, a qual corresponde à potência total para cada condição avaliada. Para este caso, a variação de a_p proporcionou um aumento na taxa de remoção de material em quatro vezes, no entanto ao avaliar a potência total do processo, o aumento foi em torno de 40%.

A área abaixo da linha do gráfico representa a energia consumida durante o processo. Ao relacionar a potência com a taxa de remoção de material obtém-se a energia específica para a remoção de material, expressa em J/mm^3 .

De acordo com os dados da Tabela 8, comparando as duas condições avaliadas na Figura 32 percebe-se que a condição com a_p máximo consome em torno de 65% menos Joule por milímetro cúbico de material removido. Ou seja, para os níveis de profundidade axial investigados neste trabalho, a condição que apresentou maior remoção de material proporcionou a menor energia específica.

4.1.2 Profundidade radial

O efeito que o aumento da profundidade radial gerou na potência teve um comportamento similar à profundidade axial. A Figura 33 re-

presenta a variação da profundidade radial e sua influência em termos de potência de usinagem, potência total consumida e energia específica.

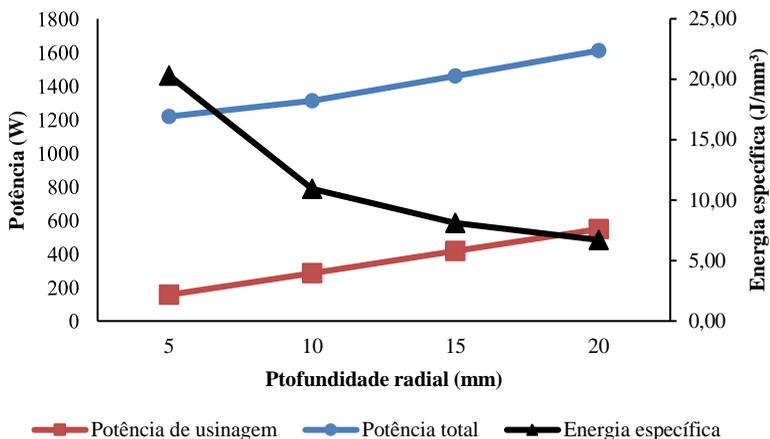


Figura 33 - Potência e energia específica em função da profundidade radial.

A Tabela 9 apresenta os parâmetros de usinagem utilizados para gerar o gráfico da Figura 33.

Tabela 9 - Parâmetros de usinagem para obtenção da Figura 33.

a_c (mm)	a_p (mm)	v_c (m/min)	v_f (mm/min)
5	0,75	162	960
10			
15			
20			

No **Erro! Fonte de referência não encontrada.** pode-se notar que a potência de usinagem aumenta praticamente na mesma proporção que a profundidade radial. A potência total consumida apresenta uma relação linear, porém ao comparar o valor máximo e mínimo da profundidade radial, nota-se que enquanto a taxa de remoção de material aumentou quatro vezes, a potência total consumida teve um acréscimo de aproximadamente 32%. Outra constatação é que, para os valores investigados, quanto maior a profundidade radial, menor a energia específica. Este comportamento também foi atestado por Mori *et al.* [43], que avaliaram o fresamento em condições tanto de desgaste quanto de acaba-

mento. Os resultados obtidos apontam para uma um menor consumo de energia específica conforme aumenta-se a taxa de remoção de material.

A Tabela 10 apresenta os resultados para os diferentes valores de profundidade radial.

Tabela 10 - Resultados obtidos na Figura 33.

a_e	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm
P_{total} (W)	1218,34±12,99	1310,93±17,46	1460,00±25,51	1610,38±29,90
P_{usi} (W)	156,57±39,17	286,46±30,70	416,66±36,55	544,77±39,15
ϵ (J/mm ³)	20,31	10,92	8,11	6,71

4.1.3 Velocidade de avanço

Mantendo constantes os demais parâmetros, pode-se examinar a influência da variação da velocidade de avanço na potência e energia específica, conforme o gráfico apresentado na Figura 34. Os parâmetros de usinagem para obtenção do gráfico são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros de corte para geração do **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

a_e (mm)	a_p (mm)	v_c (m/min)	v_f (mm/min)
15	0,75	126	480
			720
			960
			1200

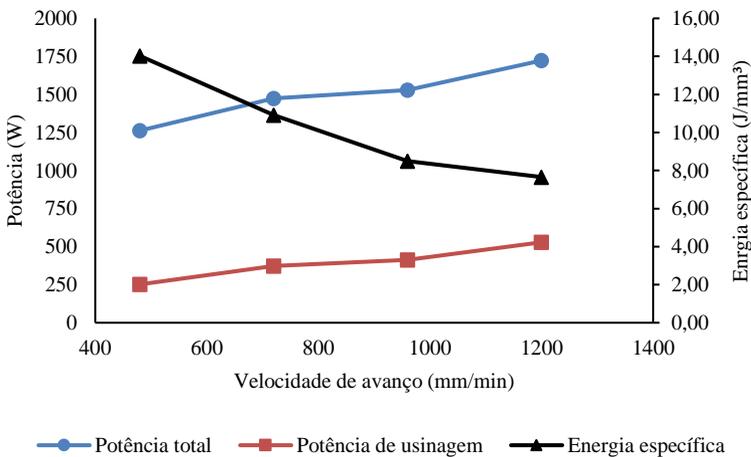


Figura 34 - Potência e energia específica em função da velocidade de avanço.

De acordo com o comportamento apresentado na Figura 34, percebe-se que um aumento da velocidade de avanço resultou em uma menor energia específica. Isto leva a crer que para os níveis de velocidade de avanço avaliados, a condição com velocidade de avanço mais elevada mostrou-se mais eficiente.

O aumento da eficiência devido ao aumento do avanço foi atestado por Hu [50], onde o autor avaliou três níveis de velocidade de avanço durante operação de torneamento. Apesar do aumento do avanço proporcionar um aumento da potência, ao considerar a taxa de remoção de material, notou-se que a eficiência do processo aumentou conforme o incremento do avanço.

Outra justificativa para o ganho de produtividade devido ao aumento da velocidade de avanço é a redução do tempo de operação. Para certas combinações de parâmetros, por mais que a máquina ferramenta necessite de uma potência maior, a energia consumida diminuirá, uma vez que a energia consumida é função da potência pelo tempo de operação. Este comportamento foi atestado por Mori [43], onde foram avaliados diferentes níveis de avanço, e apesar de exigir maiores esforços, esta estratégia proporcionou um consumo menor de energia.

A Tabela 12 apresenta os valores médios das leituras realizadas.

Tabela 12 - Resultados obtidos na Figura 34.

v_f (mm/min)	480	720	960	1200
P_{total} (W)	1262,35±8,86	1474,29±11,79	1528,27±10,72	1722,97±11,12
P_{usi} (W)	252,64±17,23	385,63±24,72	435,29±18,64	530,14±21,09
ε (J/mm ³)	14,03	10,92	8,49	7,66

De acordo com os dados apresentados na Tabela 12, ao comparar o maior e menor nível avaliado, enquanto a velocidade de avanço aumentou duas vezes e meia, o que representa um ganho direto em produtividade, a potência aumentou em torno de 36%.

4.1.4 Velocidade de corte

Variou-se a velocidade de corte de acordo com os quatro níveis determinados, a Figura 35 apresenta o comportamento da potência e energia específica em função da velocidade de corte.

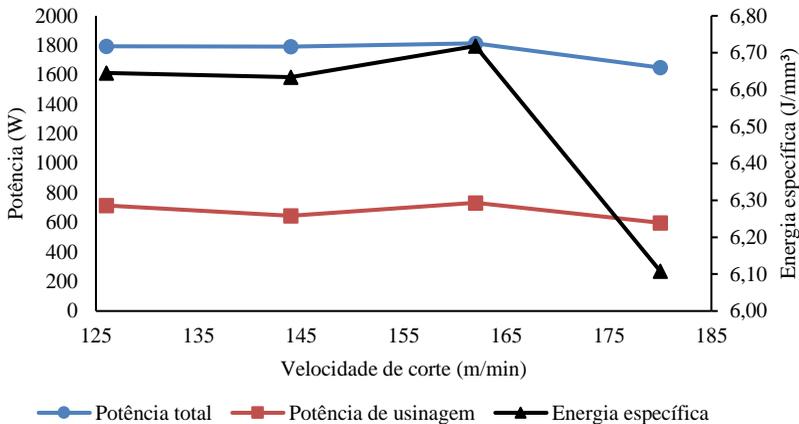


Figura 35 - Potência e energia específica em função da velocidade de corte.

Os parâmetros de usinagem para obtenção do gráfico são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13- Parâmetros de usinagem para geração do gráfico da Figura 35.

a_e (mm)	a_e (mm)	v_c (m/min)	v_f (mm/min)
15	1,5	126	720
		144	
		162	
		180	

Percebe-se que a velocidade de corte não possui um comportamento linear constante. Para o conjunto de parâmetros avaliados, o nível máximo de velocidade de corte proporcionou uma potência menor de usinagem, como pode ser observado na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados obtidos na Figura 35.

v_c (m/min)	126	144	162	180
P_{total} (W)	1794,88±25,72	1794,28±17,6	1813,89±15,06	1635,94±20,15
P_{usi} (W)	715,56±31,73	644,44±26,90	733,43±39,92	584,35±36,32
ϵ (J/mm³)	6,65	6,65	6,72	6,06

A diminuição na potência de usinagem pode ser explicada por uma diminuição dos esforços de corte, proporcionada por esta combinação de parâmetros. Este fenômeno ocorre quando uma maior velocidade de corte proporciona um aumento de temperatura na seção de usinagem.

Este aumento de temperatura irá favorecer a formação de cavaco, proporcionando por consequência uma diminuição dos esforços de usinagem [28].

4.1.5 Análise da influência de desgaste

Durante realização dos experimentos, ao final da usinagem de cada área do corpo de prova, conforme Figura 28, foram realizadas aferições mantendo a combinação de parâmetros. O objetivo desta etapa foi verificar se o desgaste da ferramenta ao longo do tempo afeta significativamente as medições.

A Tabela 15 apresenta os valores obtidos nas diferentes áreas mantendo os parâmetros constantes.

Tabela 15 - influência do desgaste da ferramenta na potência de usinagem. $v_c = 144$ m/min; $v_f = 720$ mm/min; $a_p = 0,75$ mm; $a_e = 5$ mm.

Área	Potência (W)	Área	Potência (W)
Área 1	120,15 ± 22,14	Área 9	124,50 ± 23,70
Área 2	135,78 ± 36,25	Área 10	101,17 ± 25,10
Área 3	137,78 ± 19,18	Área 11	115,82 ± 21,29
Área 4	119,33 ± 15,10	Área 12	110,79 ± 23,86
Área 5	147,19 ± 24,41	Área 13	144,43 ± 22,94
Área 6	126,85 ± 22,48	Área 14	154,91 ± 28,95
Área 7	111,39 ± 38,27	Área 15	127,93 ± 23,41
Área 8	148,26 ± 24,70	Área 16	144,5 ± 22,68

A Figura 36 representa os dados apresentados na Tabela 15. Analisando o gráfico não é possível identificar um comportamento sistemático esperado pela influência do desgaste da ferramenta. O valor médio da potência foi de $129,42 \pm 25,27$ W.

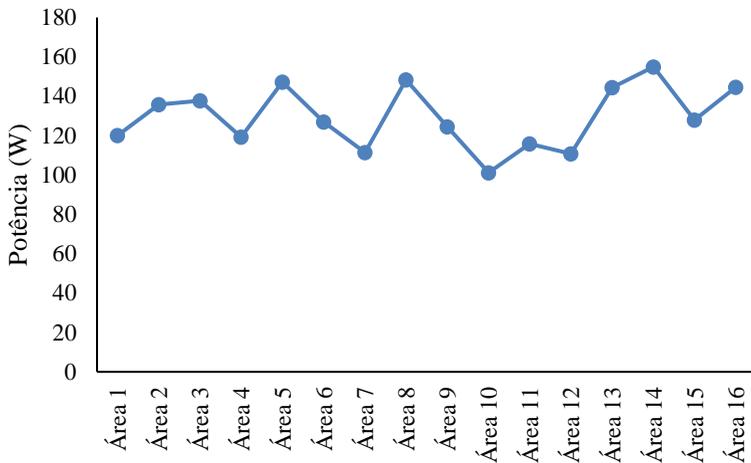


Figura 36 - Avaliação da influência do desgaste.

Desta forma, conclui-se que para os parâmetros avaliados no decorrer do teste não foi possível levar a ferramenta a uma condição de desgaste que afetasse significativamente a potência de usinagem.

4.1.6 Análise combinatória de parâmetros

Além de avaliar o comportamento individual de cada parâmetro, é necessário investigar como os parâmetros interagem entre si e modificam a variável de resposta. Ou seja, além de avaliar o efeito que cada parâmetro apresenta é preciso avaliar se há interação entre eles. Para isso, foi feito um experimento fatorial completo para avaliar a melhor resposta em termos de todos os parâmetros avaliados.

4.1.6.1 Relação entre profundidades radial e axial

As profundidades axial e radial basicamente influenciam na seção de corte, e diferentes combinações destes parâmetros podem fornecer a mesma taxa de remoção de material. No entanto, é necessário avaliar se ambos os parâmetros influenciam igualmente no consumo de energia.

Para esta análise foi realizada uma análise de variâncias, ANOVA, para avaliar o fator mais influente na resposta e se há interação entre eles. Os parâmetros avaliados estão na Tabela 16.

Tabela 16 - Relação entre profundidade axial e radial.

a_p (mm)	a_e (mm)	v_c (m/min)	v_f (mm/min)
0,375	5	126	1200
0,75	10		
1,125	15		
1,5	20		

O resultado da ANOVA para esses parâmetros é mostrado na Tabela 17.

Tabela 17 - ANOVA - profundidade radial e axial.

	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
a_e	2895541,40	3	965180,46	1560,75	9,35 ⁻³⁵	2,90
a_p	2728898,57	3	909632,85	1470,93	2,39 ⁻³⁴	2,90
Interações	766923,89	9	85213,76	137,79	5,24 ⁻²³	2,18
Dentro	19788,99	32	618,40			
Total	6411152,87	47				

A tabela revela o quão influente cada parâmetro de usinagem é no processo mediante o parâmetro F. Percebe-se que a profundidade de corte radial se mostra levemente mais influente do que a profundidade axial.

Outra informação importante retirada da tabela é que há uma interação forte entre as profundidades de corte radial e axial. Isto significa que para diferentes níveis de a_e , haverá uma diferença na resposta entre os níveis de a_p .

O gráfico apresentado na Figura 37 mostra a potência de usinagem em função das profundidades axial e radial de corte.

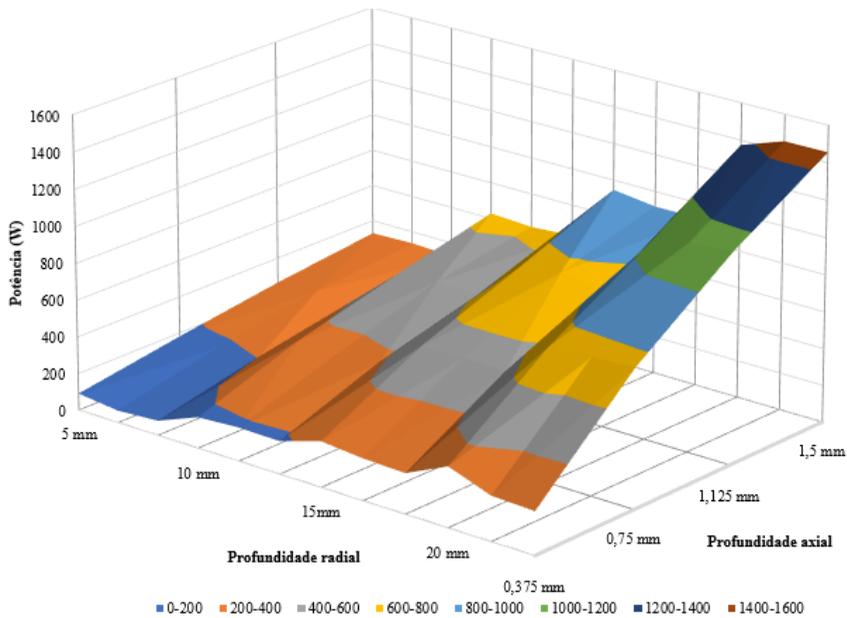


Figura 37- Potência em função de a_p e a_e .

Por meio da análise do gráfico pode-se notar o aumento linear que os dois parâmetros proporcionam. Além disso, para diferentes combinações de a_p e a_e , desde que se mantenha a proporção de material removido, a potência tende a permanecer na mesma faixa de valores.

4.1.6.2 Relação entre profundidade axial e velocidade de avanço

A Tabela 18 apresenta os parâmetros utilizados para relacionar a profundidade axial e a velocidade de avanço.

Tabela 18 - Parâmetros para relação entre velocidade de avanço e profundidade axial.

a_p (mm)	a_e (mm)	v_c (m/min)	v_f (mm/min)
0,375	10	180	480
0,75			720
1,125			960
1,5			1200

A Tabela 19, por sua vez, apresenta o resultado da ANOVA, ao avaliar a relação entre profundidade axial e velocidade de avanço.

Tabela 19 - ANOVA - Profundidade axial e velocidade de avanço.

	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
v_f	443023,6	3	147674,5	301,17	1,6 ⁻²³	2,90
a_p	676384,1	3	225461,4	459,81	2,23 ⁻²⁶	2,90
Interações	70208,31	9	7800,924	15,90	1,76 ⁻⁹	2,18
Dentro	15690,47	32	490,3273			
Total	1205306	47				

De acordo com os resultados da ANOVA, ambos os parâmetros influenciam significativamente a potência de usinagem, com a profundidade axial possuindo uma influência maior.

Além disso foi verificada uma interação significativa entre os parâmetros, no entanto de maneira mais modesta do que a interação entre as profundidades radial e axial. A Figura 38 apresenta o comportamento da potência em função da variação desses dois parâmetros.

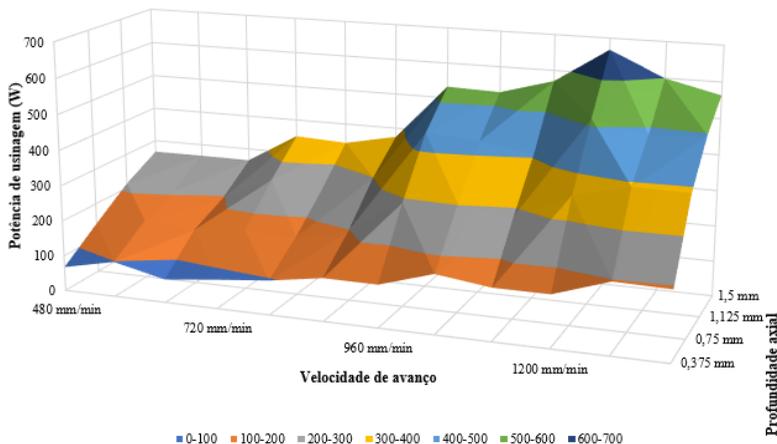


Figura 38- Relação entre profundidade axial e velocidade de avanço.

4.1.6.3 Relação entre profundidade radial e velocidade de corte

Foi avaliada a relação entre a velocidade de corte e a profundidade radial, os parâmetros utilizados no experimento encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Relação entre profundidade radial e velocidade de corte.

a_p (mm)	a_e (mm)	v_c (m/min)	v_f (mm/min)
0,75	5	126	960
	10	144	
	15	162	
	20	180	

A Tabela 21 revela o resultado obtido com a ANOVA, ao relacionar esses dois parâmetros.

Tabela 21 - ANOVA - Profundidade radial e velocidade de corte.

	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítica
a_e	891129,6	3	297043,2	384,39	$3,64^{-25}$	2,90
v_c	368750,4	3	122916,8	159,06	$2,65^{-19}$	2,90
Interações	72687,7	9	8076,41	10,45	$2,54^{-7}$	2,18
Dentro	24728,47	32	772,76			
Total	1357296	47				

De acordo com a Tabela 21, verifica-se uma interação significativa entre os parâmetros avaliados. A Figura 39 revela as potências de usinagem obtidas de acordo com os parâmetros da Tabela 20.

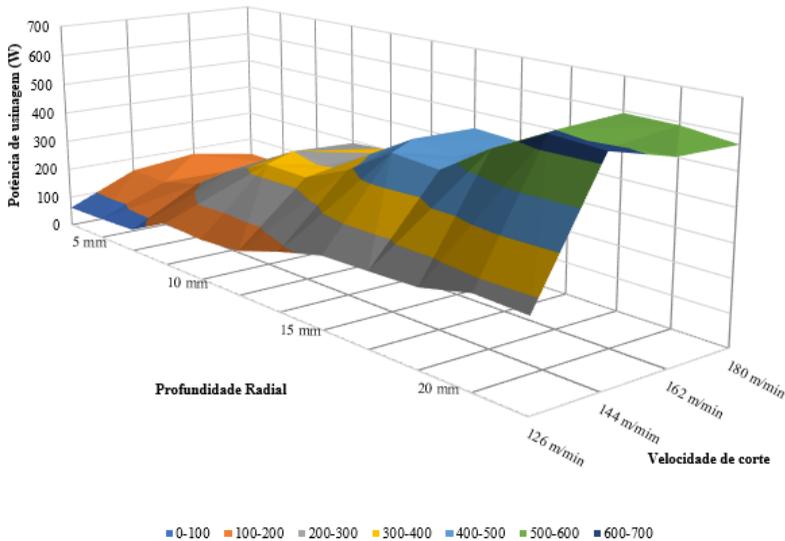


Figura 39- Relação entre profundidade radial e velocidade de corte

Pode-se perceber que o gráfico apresenta uma relação não linear entre os parâmetros, onde foi possível identificar o ponto de inflexão da curva. Dessa forma é possível identificar que a partir de um determinado valor de velocidade de corte o valor da potência tende a diminuir.

Isto se deve a um fenômeno, já conhecido, durante a formação do cavaco. Para uma determinada velocidade de corte, a temperatura aumenta de forma que favorece a formação de cavaco e conseqüentemente os esforços de corte diminuem. Desta forma, para uma faixa de velocidade de corte mais elevada, a força de corte diminui e por conseqüência a potência também diminuirá.

4.1.6.4 Relação entre velocidade de corte e velocidade de avanço

Foi investigada a relação entre os parâmetros velocidade de corte e velocidade de avanço, conforme mostrado na Tabela 22.

Tabela 22 - Parâmetros para avaliação da relação entre velocidade de corte e velocidade de avanço.

a_p (mm)	a_e (mm)	v_c (m/min)	v_f (mm/min)
0,75	15	126	480
		144	720
		162	960
		180	1200

A Tabela 23 apresenta o resultado obtido pela ANOVA.

Tabela 23 - ANOVA - Velocidade de corte e velocidade de avanço.

	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
v_f	633261	3	211087	148,54	7,37 ⁻¹⁹	2,90
v_c	3580,14	3	1193,38	0,84	0,482	2,90
Interações	59633,92	9	6625,991	4,66	0,000541	2,18
Dentro	45473,76	32	1421,055			
Total	741948,8	47				

A ANOVA indica uma forte influência da velocidade de avanço, bem como uma baixa influência da velocidade de corte, quanto estes dois parâmetros são analisados juntos. Isto não significa que a velocidade

de de corte não tenha influência no processo. Por uma restrição tecnológica, devido ao material da ferramenta de corte, durante os experimentos, o campo de variação dos níveis de velocidade de corte foi muito inferior ao campo de variação dos níveis de velocidade de avanço.

Desta forma, para os níveis de parâmetros avaliados, a velocidade de avanço mostrou-se muito mais influente que a velocidade de corte.

O nível mais alto de velocidade de corte é 42% maior que o nível mais baixo, já a relação entre o maior e o menor nível de velocidade de corte é de 2,5 vezes. Essa diferença de proporção nos níveis dos fatores avaliados faz com que a ANOVA entenda que a velocidade de avanço seja predominantemente no ensaio. Para alcançar maiores níveis de velocidade de corte seria necessário utilizar ferramentas de outros materiais.

A ANOVA também indicou uma interação significativa entre os parâmetros. Ou seja, o comportamento da velocidade de avanço não será o mesmo para os diferentes níveis de velocidade de corte.

A Figura 40 apresenta a potência em função da velocidade de avanço e da velocidade de corte.

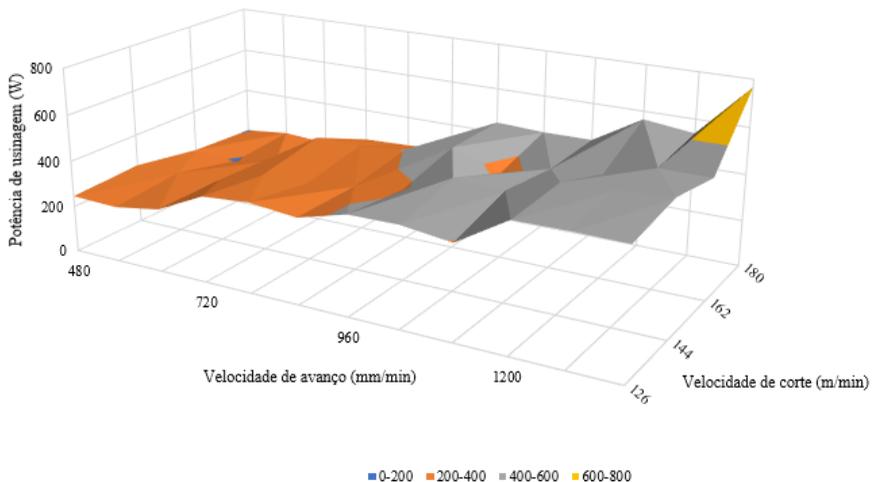


Figura 40- Relação entre velocidade de corte e velocidade de avanço.

Pode-se notar a forte influência da velocidade de avanço. No nível mais baixo de velocidade de avanço, igual a 480 mm/min, a velocidade de corte possui menos influência no processo. Já no nível máximo de velocidade de avanço, de 1200 mm/min, a velocidade de corte produz uma grande variação. Este comportamento de uma variável diferente

para diferentes níveis do fator caracteriza a presença da interação entre os fatores.

4.2 Avaliação quanto à eficiência

Após a realização do experimento fatorial completo, foram geradas 256 combinações entre os parâmetros analisados, e estas combinações foram avaliadas de acordo com critérios de eficiência estabelecidos. Como mencionado anteriormente, os critérios de avaliação de eficiência foram: potência consumida (W), energia consumida (J) e energia específica (J/mm³). A análise ocorreu com base na potência de usinagem e a potência total consumida.

A escolha da combinação mais eficiente seguirá o critério de energia específica, uma vez que este parâmetro proporciona uma relação direta entre energia consumida e produtividade.

A Tabela 24 contém os valores de potência de usinagem mínima e máxima.

Tabela 24 - Condições de usinagem para maior e menor potência de usinagem.

Menor potência de usinagem		Maior potência de usinagem	
Parâmetros	Potência (W)	Parâmetros	Potência (W)
$v_c = 180$ m/min	37,121±15,06	$v_c = 180$ m/min	1538,375±41,15
$v_f = 480$ mm/min		$v_f = 1200$ mm/min	
$a_p = 0,375$ mm		$a_p = 1,5$ mm	
$a_e = 5$ mm		$a_e = 20$ mm	

A condição que demandou maior potência foi onde foram aplicados os níveis máximos dos parâmetros de usinagem. Onde houve a remoção máxima de material, houve mais esforços e, conseqüentemente, foi necessário fornecer maior potência para realizar o corte.

A condição que exigiu menor potência correspondeu aos níveis mínimos de profundidade axial e radial e velocidade de avanço, combinada com o nível máximo de velocidade de corte. Isto ocorreu porque, combinando menor velocidade de avanço com a maior rotação, obtém-se um menor avanço por dente, ou seja, para cada revolução que a ferramenta executa há uma seção de corte menor, o que faz com que os esforços de usinagem sejam menores e, conseqüentemente, a potência necessária para realizar o corte é menor.

Com relação à potência total de usinagem, há uma diferença de resultados quando se trata da menor potência, conforme mostra a Tabela 25.

Tabela 25 - Condições de usinagem para maior e menor potência total.

Menor potência		Maior potência	
Parâmetros	Potência (W)	Parâmetros	Potência (W)
$v_c = 126$ m/min	1059,215 ± 17,51	$v_c = 180$ m/min	2731,868 ± 36,07
$v_f = 480$ mm/min		$v_f = 1200$ mm/min	
$a_p = 0,375$ mm		$a_p = 1,5$ mm	
$a_e = 5$ mm		$a_e = 20$ mm	

A menor potência foi obtida na combinação que utiliza o menor nível de todos os parâmetros avaliados. Esta divergência entre a potência necessária para o corte e a potência total ocorre porque, embora uma rotação maior diminua os esforços de usinagem, a máquina ferramenta consome mais energia para manter esta rotação.

Este comportamento é um indício de que o consumo de energia quando a máquina ferramenta não remove material já representa uma grande proporção da energia consumida durante o processo.

4.2.1 Energia específica

Os resultados foram avaliados em termos de energia específica, que é a energia consumida na remoção de um milímetro cúbico de material. Para obter a energia específica foi considerada a potência total durante a usinagem.

As condições que apresentaram menor e maior energia específica são apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26 - Condições de usinagem para maior e menor energia específica.

Menor energia específica		Maior energia específica	
Parâmetros	ϵ (J/mm ³)	Parâmetros	ϵ (J/mm ³)
$v_c = 144$ m/min	4,044	$v_c = 180$ m/min	78,301
$v_f = 1200$ mm/min		$v_f = 480$ mm/min	
$a_p = 1,5$ mm		$a_p = 0,375$ mm	
$a_e = 20$ mm		$a_e = 5$ mm	

A condição que apresentou menor energia específica possui maior avanço e as maiores profundidades axial e radial. Este comportamento foi notado no decorrer da pesquisa, onde foi constatado que quanto maior a taxa de remoção de material do processo, menor a energia espe-

cífica consumida, como pode ser notado no **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

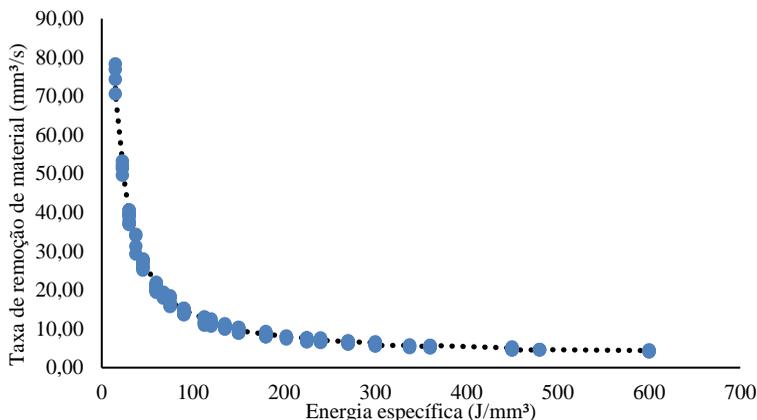


Figura 41- Relação entre taxa de remoção de material e energia específica.

Na Figura 41 pode-se perceber uma relação direta entre a taxa de remoção de material e a energia específica. Nas condições com maior taxa de remoção obteve-se os melhores resultados com relação à energia específica. Este comportamento já havia sido verificado por Diaz et al. [62].

Outra constatação importante é que a combinação de parâmetros que consumiu maior energia específica foi a mesma combinação que proporcionou a menor potência para realizar usinagem, quando considerada a potência de usinagem. Isto comprova que não necessariamente a condição de usinagem que exige menores esforços é a mais eficiente.

4.3 Usinagem de cavidade

A cavidade modelada foi usinada com três estratégias de usinagem diferentes. Foram avaliadas as respostas *default* dos softwares Fusion e NX, e foi realizada uma estratégia de usinagem utilizando os parâmetros selecionados na fase anterior da pesquisa que proporcionam a menor energia específica. A usinagem seguiu padrão de operação de desbaste e o tipo da trajetória utilizado foi paralela ao contorno, uma vez que proporcionou melhores resultados energéticos para Solheid [63] e Amaral [64].

4.3.1 Usinagem com software Fusion

Foi gerada uma trajetória para usinagem da cavidade com o software Fusion, a qual é mostrada na Figura 42.

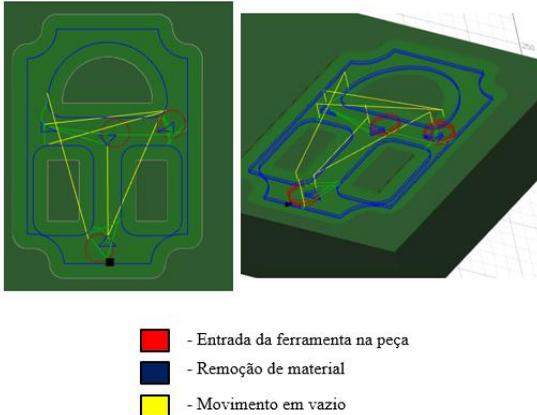


Figura 42 - Trajetória gerada no software Fusion.

O software gerou uma trajetória paralela ao contorno, através do comando *2D pocket*. A velocidade de rotação da ferramenta estava pré-selecionada em 5000 rpm, para adequar a rotação à velocidade máxima indicada pelo fabricante da ferramenta. O valor da rotação foi alterado para 2865 rpm, para proporcionar uma velocidade de corte de 180 m/min. A velocidade de avanço foi determinada pelo software Fusion, valor *default* de 1000 mm/min. Foram informados os valores máximos que as profundidades axial e radial poderiam assumir, que corresponderam a 1,5 mm e 20 mm, respectivamente.

Uma característica notada ao gerar trajetórias neste software é o constante reposicionamento da ferramenta, na qual a ferramenta não realiza o corte de maneira contínua, saindo da peça para se reposicionar. Isto é perceptível pelas diferentes entradas da ferramenta na peça conforme a Figura 42. Esta característica gera demasiados movimentos em vazio. A

Tabela 27 apresenta os parâmetros utilizados para usinagem.

Tabela 27 - Parâmetros de usinagem padrão software Fusion.

Software	Fusion
v_c (m/min)	180
v_f (mm/min)	1000
a_p (mm)	1,5
a_e (mm)	20

Trajetória	Paralela ao contorno
Comprimento de usinagem (m)	5,542
Tempo previsto (min)	06:11

A Figura 43 apresenta o gráfico potência em função do tempo para usinagem da cavidade.

No gráfico pode-se notar dois picos de potência que ocorrem quando é iniciado o programa de usinagem e quando termina. A tabela apresenta um resumo dos dados obtidos com o fresamento da cavidade desde o início de rotação do fuso até o final. Não houve desgaste significativo da ferramenta

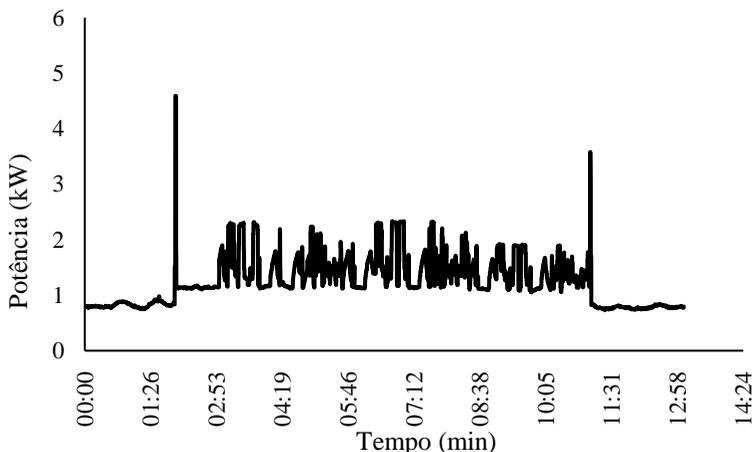


Figura 43- Gráfico potência vs tempo para fresamento de cavidade - software Fusion.

A Tabela 28 apresenta o tempo de processo, a potência média e a energia consumida durante o fresamento da cavidade.

Tabela 28 - Tempo de processo, potência média e energia consumida.

Tempo de usinagem (min)	13:05
Potência média (W)	1337,57
Energia (kWh)	0,1716

Figura 44 apresenta a cavidade usinada utilizando os parâmetros padrão propostos pelo software Fusion.



Figura 44 - Cavidade usinada - software Fusion.

4.3.2 Usinagem com software NX

A usinagem com o software NX seguiu recomendações de seleção de parâmetros e trajetórias fornecidas pelo software mediante a função *Manufacturing Wizards*. Esta função determina, segundo critérios pré-estabelecidos, uma sequência de usinagem para uma cavidade na qual indica trajetória e parâmetros de corte.

Para utilizar esta função o usuário entra com os seguintes dados: geometria da peça, posição do zero-peça, material da peça, dimensões da peça bruta e dimensões da fresa.

Após informar os dados de entrada o software gera a trajetória, seleciona uma velocidade de avanço e indica valores de a_p e a_e . A rotação o software deixa a critério do usuário e, para fins de comparação, foi utilizada a mesma rotação adotada na usinagem com o software Fusion. A Figura 45 mostra a trajetória gerada pelo software NX.

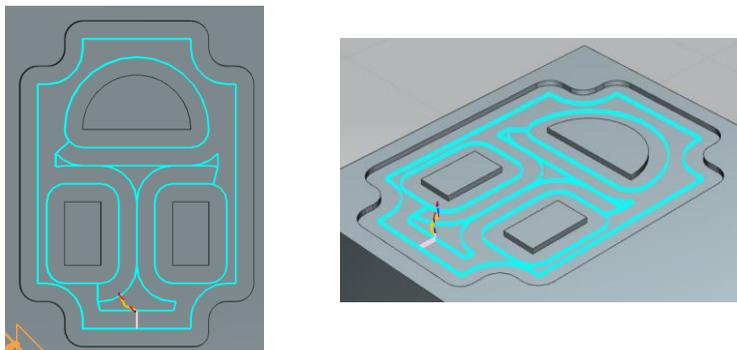


Figura 45 - Trajetória de usinagem gerada pelo software NX

Ao analisar a trajetória gerada, percebe-se uma vantagem do software NX com relação ao Fusion, uma vez que existe apenas um movimento de entrada da ferramenta na peça. desta forma a ferramenta fica mais tempo em contato com a peça reduzindo tempos de usinagem em vazio.

A Tabela 29 mostra os parâmetros de corte utilizados para usinagem da cavidade de acordo com os parâmetros propostos pelo software NX.

Tabela 29 - Parâmetros de usinagem padrão software NX.

Software	NX
v_c (m/min)	180
v_f (mm/min)	250
a_p (mm)	1,5
a_e (mm)	10
Trajetoária	Paralela ao contorno
Comprimento de usinagem (m)	3,204
Tempo previsto (min)	12:50

Pelos dados da Tabela 29 pode-se notar algumas diferenças entre as propostas *default* dos dois softwares: o software NX apresentou um avanço menor, e indicou uma profundidade radial de apenas metade do diâmetro da ferramenta. O tempo previsto de usinagem é de praticamente o dobro, devido ao avanço menor, no entanto o comprimento de usinagem é menor, devido à redução de movimentos em vazio.

A Figura 46 apresenta um gráfico com a relação potência vs tempo da usinagem da cavidade utilizando parâmetros propostos pelo software NX.

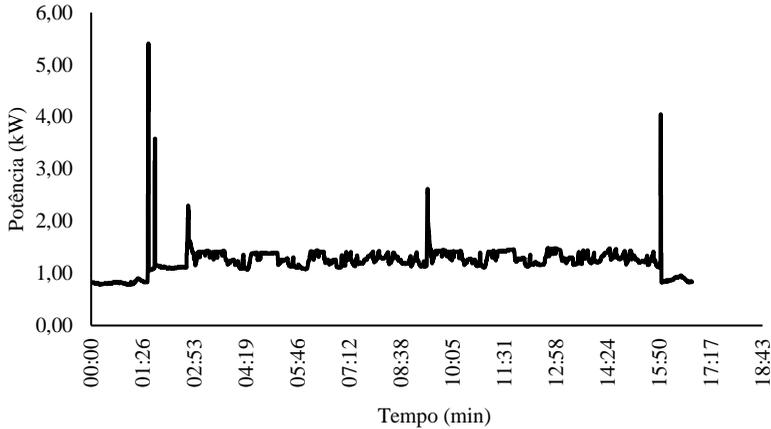


Figura 46- Gráfico potência vs tempo para fresamento de cavidade - software NX.

Em geral a potência de usinagem permaneceu menor quando comparada à usinagem com o software Fusion, e isto se deve principalmente à velocidade de avanço menor.

A Tabela 30 Apresenta os dados obtidos pelo transdutor de energia. Não houve desgaste significativo da ferramenta.

Tabela 30 - Tempo de processo, potência média e energia consumida.

Tempo de usinagem (min)	16:45,326
Potência média (W)	1258,986
Energia (kWh)	0,1500

Figura 47 apresenta a cavidade usinada utilizando os parâmetros propostos pelo software NX.



Figura 47 - Cavidade usinada com parâmetros propostos pelo software NX.

4.3.3 Usinagem com parâmetros selecionados

Outra cavidade foi usinada, agora utilizando os parâmetros selecionados no decorrer da pesquisa. A trajetória de corte foi gerada no software NX, uma vez que este permite mais liberdade para escolher os tipos de trajetória e porque, como avaliado anteriormente, ele mantém a ferramenta em contato com a peça por mais tempo que o software Fusion.

Os parâmetros de corte selecionados foram aqueles que proporcionaram a menor energia específica. Foram avaliadas as trajetórias paralela ao contorno, zigue-zague e trocoidal, conforme mostrado na Figura 48.

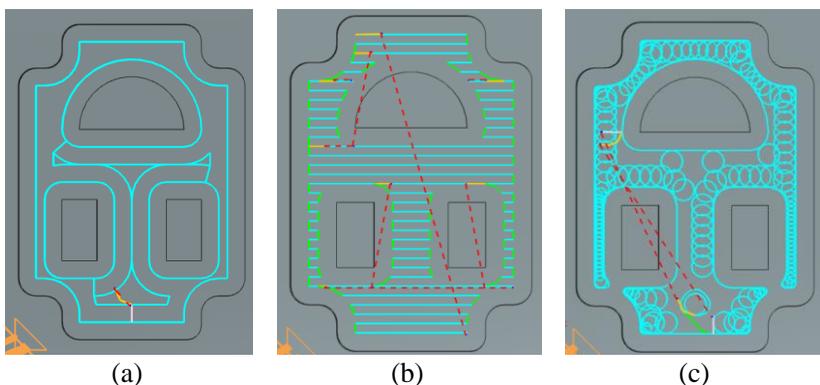


Figura 48 - Comparativo de trajetórias:(a) paralela ao contorno;(b) zigue-zague; (c) trocoidal

A Tabela 31 apresenta um comparativo de tempo previsto e comprimento de usinagem para as diferentes trajetórias.

Tabela 31 - Comparativo de tempo e comprimento de usinagem para diferentes trajetórias.

	Paralela ao contorno	Zigue - zague	Trocoidal
Tempo (min)	02:50	04:06	08:39
Comprimento (m)	3,204	5,606	10,479

Optou-se por utilizar a trajetória paralela ao contorno pois esta se adaptou melhor à geometria da peça. Esta trajetória conteve menos movimentos de entrada e saída da peça quando comparada às demais trajetórias. Além disso, ela apresentou menor tempo de usinagem previsto e menor comprimento de usinagem. Outra razão para a escolha desta trajetória foram os resultados obtidos por Solheid [63] e Amaral [64], nos quais a estratégia paralela ao contorno proporciona uma eficiência energética maior.

A Tabela 32 apresenta os parâmetros de usinagem utilizados para fresamento da cavidade.

Tabela 32 - Parâmetros de usinagem para fresamento da cavidade.

Software	NX
v_c	144
v_f	1200
a_p	1,5
a_e	20
Trajetoória	Paralela ao contorno
Comprimento de usinagem (m)	3,204
Tempo (min)	02:50

A Figura 49 apresenta relação potência vs tempo nesta trajetória de usinagem.

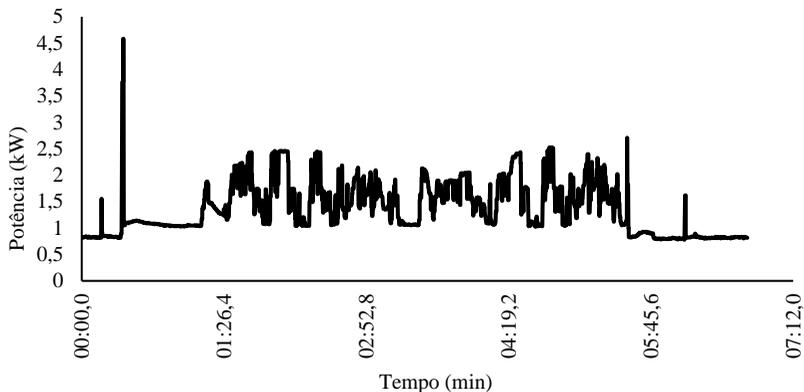


Figura 49- Gráfico potência vs tempo para fresamento de cavidade – parâmetros selecionados na pesquisa.

A Tabela 33 apresenta os dados energéticos obtidos. Pode-se notar uma diferença entre o tempo de usinagem previsto pelo software e o tempo de processo real. Não foram perceptíveis sinais de desgaste da ferramenta.

Tabela 33 - Tempo de processo, potência média e energia consumida.

Tempo de usinagem (min)	06:44
Potência média (W)	1280,972
Energia (kWh)	0,1096

Figura 50 apresenta a cavidade usinada utilizando os parâmetros de usinagem que proporcionam melhor eficiência energética, indicados no decorrer da pesquisa.

Os parâmetros selecionados não favorecem a qualidade da superfície usinada, devido principalmente à elevada velocidade de avanço. Logo, a seleção de parâmetros indicada nesta pesquisa atenderia operações de desbaste de maneira satisfatória. Para operações de acabamento com maior eficiência energética é necessário utilizar critérios de qualidade de superfície, como rugosidade, para indicar uma seleção de parâmetros mais adequada.



Figura 50 - Cavidade usinada com parâmetros indicados na pesquisa.

4.3.4 Comparativo de estratégias

A Figura 51 apresenta um comparativo da potência média total e energia consumida no decorrer do fresamento das cavidades usando-se os três métodos de geração de trajetórias.

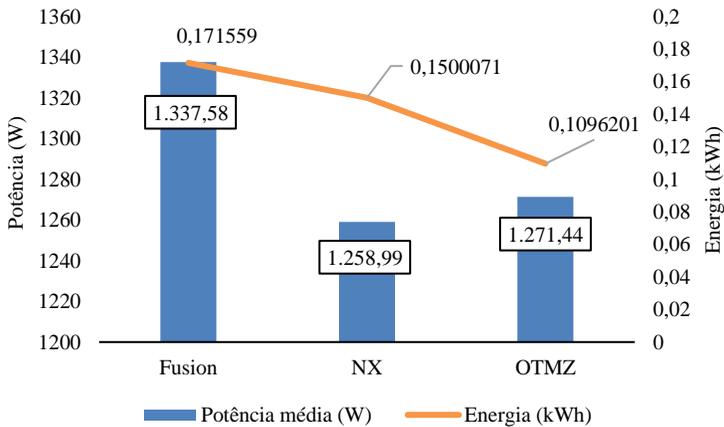


Figura 51- Comparativo entre cavidades usinadas.

A usinagem da cavidade com parâmetros selecionados durante a pesquisa forneceu uma redução de energia consumida de 26% quando comparada à usinagem *default* proposta pelo software NX e reduziu 36% da usinagem realizada com parâmetros *default* do software Fusion.

A cavidade usinada pelo software Fusion apresentou maior potência média e maior consumo de energia, isto ocorreu principalmente pelos diversos movimentos de reposicionamento da ferramenta, que utiliza movimentos de avanço rápido e geram picos de consumo. Além disso, os movimentos em vazio aumentam o tempo de operação da máquina ferramenta.

Apesar da cavidade usinada por parâmetros *default* do NX resultar em um tempo de operação similar, não houve tantos movimentos de reposicionamento e, nesse caso, a máquina ferramenta executou menos movimentos em avanço rápido. Esta operação consumiu 12% a menos de energia quando comparada à gerada pelo *software* Fusion.

Por fim, usinando-se a cavidade utilizando os parâmetros investigados nesta pesquisa, que forneceram menor energia específica, houve uma redução significativa da energia consumida.

A potência média foi maior que a cavidade com trajetória indicada pelo *software* NX, devido à maior velocidade de avanço empregada. No entanto o aumento da taxa de remoção de material reduziu a energia específica e fez com que esta seja a opção com menor consumo de energia.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

No presente trabalho foi avaliada a influência de diferentes parâmetros de usinagem e trajetórias de corte no consumo energético de um centro de usinagem durante operação de fresamento.

Durante a análise dos parâmetros de usinagem, foi constatado que embora condições mais severas de usinagem proporcionem esforços maiores, em geral, proporcionam também uma menor energia específica para remoção de material, e se tornam opções mais eficazes energeticamente.

Isto ocorreu principalmente porque, durante o funcionamento do centro de usinagem, a fase de operação onde não há remoção de material, representa uma proporção grande do consumo de energia. Para usinagem em condições mais severas, com os maiores valores dos parâmetros de corte, o consumo de potência na fase de operação representou 44% da potência total. Enquanto para condições mais amenas de usinagem, com valores de parâmetros menores, e consequentemente menores esforços de usinagem, a potência da fase de operação chegou a representar 96% da potência total.

Desta forma, quando o processo alcança a fase de produção, onde há remoção de material, se mostrou mais eficiente manter uma alta taxa de remoção de material para diminuir a energia consumida por mm^3 de material removido.

A análise por ANOVA revelou uma forte interação entre os parâmetros, o que torna inviável a avaliação individual destes. Desta forma, o experimento fatorial completo é uma ferramenta adequada para se obter uma combinação de parâmetros capaz de proporcionar maior eficiência energética.

A menor potência de usinagem foi obtida na combinação de menor velocidade de corte, menores profundidades axial e radial e maior velocidade de corte. Em contrapartida, a maior potência de usinagem foi obtida nos níveis máximos dos parâmetros avaliados.

Com relação à avaliação da potência total requerida pelo centro de usinagem, que irá definir a energia total consumida no processo, a combinação com os menores níveis dos parâmetros resultou em uma potência menor, enquanto a combinação com os níveis máximos dos parâmetros resultou na maior potência consumida.

A definição da combinação de parâmetros mais eficiente energeticamente foi obtida pela relação entre potência total consumida com a taxa de remoção de material. A combinação mais eficiente energeticamente foi: $v_c=144$ m/min; $v_f=1200$ mm/min; $a_p=1,5$ mm; $a_e=20$ mm.

Para a validação da seleção dos parâmetros, uma cavidade foi usinada utilizando-se os parâmetros propostos nesta pesquisa, bem como utilizando parâmetros padrão (*default*) sugeridos por dois softwares comerciais, NX e Fusion. Os resultados obtidos apontam que na trajetória com os parâmetros propostos houve uma redução de 26,9% na energia consumida em relação à trajetória *default* gerada pelo software NX, e 36,0% de redução de energia consumida em relação à trajetória gerada pelo software Fusion.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Aprofundar o estudo da influência de parâmetros de corte, avaliando parâmetros não abordados nesta pesquisa;
- Avaliar a influência de diferentes geometrias da ferramenta de corte;
- Investigar o consumo energético durante fresamento de diferentes materiais;
- Realizar um estudo adicionando à metodologia utilizada a medição de forças de usinagem e, desta forma, obter uma relação entre potência consumida e forças de usinagem;
- Realizar estudo voltado à análise da relação entre desgaste de ferramenta e consumo de energia;
- Investigar o perfil de consumo de energia em outros processos de usinagem, como torneamento e retificação;
- Desenvolver um algoritmo que, por meio de banco de dados, seja capaz de propor parâmetros de usinagem energeticamente mais eficientes;
- Adicionar à pesquisa outros parâmetros de sustentabilidade, como pegada de carbono e utilização eficiente de matéria-prima;
- Realizar um estudo adicionando uma análise econômica quantitativa.

REFERÊNCIAS

- [1] YINGJIE, Z. **Energy efficiency techniques in machining process : a review**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. v. 71, n. 5-8, p. 1123–1132, 2014.
- [2] YOON, H.S.; MOON, J.S.; PHAM, M.Q.; LEE, G.B.; AHN, S.H. **Control of machining parameters for energy and cost savings in micro-scale drilling of PCBs**. Journal of Cleaner Production. v. 54, p. 41–48, 2013.
- [3] BEHRENDT, T; ZEIN, A.; MIN, S. **Manufacturing Technology Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools**. CIRP annals. v. 61, n. 1, p. 43–46, 2012.
- [4] JEON, H.W.; LEE, S.; WANG, C. **Estimating manufacturing electricity costs by simulating dependence between production parameters**. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. v. 55, p. 129–140, 2019.
- [5] SETH, D.; REHMAN, M.A.; SHRIVASTAVA, R.L. **Green manufacturing drivers and their relationships for small and medium (SME) and large industries**. Journal of Cleaner Production. v. 198, p. 1381-1405 , 2018.
- [6] CARVALHO, H. M. B. de. **Metodologia de avaliação e aumento da eficiência energética em manufatura de alimentos discretos: aplicação em usinagem**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2012. 145f.
- [7] AVALLONE, E. A.; BAUMEISTER, III, T.; SADEGH, A. L. I. M. **Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers**, 1986.
- [8] CAI, W.; LIU, F.; XIE, J.; LIU, P.; TUO, J. **A tool for assessing the energy demand and efficiency of machining systems: energy benchmarking**. Energy. v. 138, p. 332–347, 2017.
- [9] YOON, H.S.; KIM, E.S.; KIM, M.S.; LEE, J.Y.; LEE, G.B.; AHN, S.H. **Towards greener machine tools – a review on energy saving strategies and technologies**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 48, p. 870–891, 2015.
- [10] NEWS.UN.ORG. **População mundial atingiu 7,6 bilhões de habitantes**. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2017/06/1589091-populacao-mundial-atingiu-76-bilhoes-de-habitantes>>.
- [11] PAETZOLD, J.; KOLOUCH, M.; WITTSTOCK, V.; PUTZ, M. **Methodology for process-independent energetic assessment of machine tools**. Procedia Manufacturing. v. 8, p. 254–261, 2017.
- [12] GROTE, K.-H.; ANTONSSON, E. K. **Springer handbook of mechanical engineering**. vol. 10 ed. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2009.
- [13] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Balances:**

Overview, 2018.

- [14] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional, 2017.
- [15] COMISSÃO MUNDIAL SOBRE DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE. **Nosso futuro comum/ comissão mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento.** Rio de Janeiro: FGV, 1991.
- [16] MUNIER, Nolberto. **Introduction to sustainability.** Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2005.
- [17] FINKBEINER, Matthias (Ed.). **Towards life cycle sustainability management.** Springer Science & Business Media, 2011.
- [18] NORMAN, W.; MACDONALD, C. **Getting to the bottom of "triple bottom line".** Business Ethics Quarterly. v. 14, n. 2, p. 243-262, 2004.
- [19] RAJEMI, M. **Energy Analysis in Turning and Milling.** 2011. 168 f. The University of Manchester (United Kingdom). 2011.
- [20] LI, K.; ZHANG, X.; LEUNG, J. Y.; YANG, S.L. **Parallel machine scheduling problems in green manufacturing industry.** Journal of Manufacturing Systems. v. 38, p. 98–106, 2016.
- [21] NICOLETTI JUNIOR, A.; DE OLIVEIRA, M.C.; HELLENO, A.L. **Sustainability evaluation model for manufacturing systems based on the correlation between triple bottom line dimensions and balanced scorecard perspectives.** Journal of Cleaner Production. v. 190, p. 84–93, 2018.
- [22] ÁLVAREZ, M.E.; BÁRCENA, M.M.; González, F.A. **On the sustainability of machining processes . Proposal for a unified framework through the triple bottom-line from an understanding review.** Journal of Cleaner Production. v. 142, p. 3890–3904, 2017.
- [23] SVENSSON, G.; FERRO, C.; HØGEVOLD, N.; PADIN, C.; VARELA, J.C.; SARSTEDT, M. **Framing the triple bottom line approach: direct and mediation effects between economic, social and environmental elements.** Journal of Cleaner Production. v. 197, p. 972–991, 2018.
- [24] BURKI, U.; ERSOY, P.; DAHLSTROM, R. **Achieving triple bottom line performance in manufacturer-customer supply chains: evidence from an emerging economy.** Journal of Cleaner Production. v. 197, p. 1307-1316, 2018.
- [25] BISWAS, I.; RAJ, A.; SRIVASTAVA, S. K. **Supply chain channel coordination with triple bottom line approach.** Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. v. 115, n. May, p. 213–226, 2018.
- [26] KONO, J.; OSTERMEYER, Y.; WALLBAUM, H. **Investigation of regional conditions and sustainability indicators for sustainable product development of building materials.** Journal of Cleaner Production. v. 196, p. 1356-1364, 2018.

- [27] PACTWA, K.; WOZNIAK, J.; STREMPSKI, A. **Sustainable mining – Challenge of Polish mines**. Resources Policy. September, 2018.
- [28] KLOCKE, F.; KUCHLE, A. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. Heidelberg: Springer, 2009.
- [29] TSCHÄTSCH, H. **Applied Machining Tecnology**. Media, Springer Science & Business, 2010.
- [30] DINIZ, A. E.; COPINI, N. L. **Tecnologia de usinagem dos materiais**. Artliber Editora, 2006.
- [31] MATERIALS, M. **Ferramentas de torneamento, ferramentas rotativas e Soluções de Fixação**, 2012.
- [32] SHCHUROV, I. A.; AL-TAIE, L.H. **Constant Scallop-Height Tool Path Generation for Ball-End Mill Cutters and Three-Axis CNC Milling Machines**. Procedia Engineering. v. 206, p. 1137-1141, 2017.
- [33] SUPERFERRAMENTAS.COM. **Fresas integrais**. Disponível em: <<https://www.superferramentas.com/fresas-integrais>>
- [34] CHANDA, L.; CRIPPS, R. J. **Characterising the effects of shape on tool path motion**. International Journal of Machine Tools and Manufacture. v. 132, p. 17–35, 2018.
- [35] GONZÁLEZ, D. M. O. **Método de geração de trajetórias trocoidais e espirais combinadas para o fresamento de desbaste de cavidades 2,5D com múltiplas ferramentas**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2013, 110f.
- [36] CHEN, Z. C.; FU, Q. **Computer-Aided Design An optimal approach to multiple tool selection and their numerical control path generation for aggressive rough machining of pockets with free-form boundaries**. Computer-Aided Design. v. 43, n. 6, p. 651–663, 2011.
- [37] MA, J.W.; SONG, D.N.; JIA, Z.Y.; HU, G.Q.; SU, W.W.; SI, L.K. **Tool-path planning with constraint of cutting force fluctuation for curved surface machining**. Precision Engineering. v. 51, p. 614–624, 2018.
- [38] TAJIMA, S.; SENCER, B. **Global tool-path smoothing for CNC machine tools with uninterrupted acceleration**. International Journal of Machine Tools and Manufacture. v. 121, p. 81–95, 2017.
- [39] TAJIMA, S.; SENCER, B.; SHAMOTO, E. **Accurate interpolation of machining tool-paths based on FIR filtering**. Precision Engineering. v. 52, p. 332–344, 2018.
- [40] TAKASUGI, K.; ASAKAWA, N. **Parameter-based spiral tool path generation for free-form surface machining**. Precision Engineering. v. 52, p. 370–379, 2018.
- [41] ABRAHAMSEN, M. **Spiral tool paths for high-speed machining of 2D pockets with or without islands**. Em: ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. p. V02BT03A017-V02BT03A017, 2018.

- [42] ZHAO, J.; ZOU, Q.; LI, L.; ZHOU, B. **Tool path planning based on conformal parameterization for meshes.** Chinese Journal of Aeronautics. v. 28, n. 5, p. 1555–1563, 2015.
- [43] MORI, M.; FUJISHIMA, M.; INAMASU, Y.; ODA, Y. **A study on energy efficiency improvement for machine tools.** CIRP annals. v. 60, n. 1, p. 145–148, 2011.
- [44] SEOW, Y.; GOFFIN, N.; RAHIMIFARD, S.; WOOLLEY, E. **A “Design for Energy Minimization” approach to reduce energy consumption during the manufacturing phase.** Energy. v. 109, p. 894–905, 2016.
- [45] DAHMUS, J. B.; GUTOWSKI, T. G. **An environmental analysis of machining.** Em: ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. p. 643-652, 2004.
- [46] GUTOWSKI, T.; DAHMUS, J.; THIRIEZ, A. **Electrical energy requirements for manufacturing processes.** Em: 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. 2006, v. 31, n. 1, p. 623-638
- [47] ZHAO, G. Y.; LIU, Z. Y.; HE, Y.; CAO, H. J.; GUO, Y. B. **Energy consumption in machining: classification, prediction, and reduction strategy.** Energy. v. 133, p. 142–157, 2017.
- [48] WANG, Y.; HE, Y.; LI, Y.; YAN, P.; FENG, L. **An analysis framework for characterization of electrical power data in machining.** International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. v. 16, n. 13, p. 2717–2723, 2015.
- [49] LIU, P.; LIU, F.; QIU, H. **A novel approach for acquiring the real-time energy efficiency of machine tools supply.** Energy. v. 121, p. 524–532, 2017.
- [50] HU, S.; LIU, F.; HE, Y.; HU, T. **An on-line approach for energy efficiency monitoring of machine tools.** Journal of Cleaner Production. v. 27, p. 133-140, 2012.
- [51] HU, L.; LIU, Y.; PENG, C.; TANG, W.; TANG, R. **Minimising the energy consumption of tool change and tool path of machining by sequencing the features.** Energy. v. 147, p. 390–402, 2018.
- [52] LI, L.; DENG, X.; ZHAO, J.; ZHAO, F.; SUTHERLAND, J. W. **Multi-objective optimization of tool path considering efficiency, energy-saving and carbon-emission for free-form surface milling.** Journal of Cleaner Production. v. 172, p. 3311-3322, 2018.
- [53] LEE, W.; KIM, S.H.; PARK, J.; MIN, B.K. **Simulation-based machining condition optimization for machine tool energy consumption reduction.** Journal of Cleaner Production. v. 150, p. 352–360, 2017.
- [54] CARVALHO, H. M. B. de; GOMES, J.O.; SCHMIDT, M.A.; BRANDÃO, V.L. **Vibration analysis and energy efficiency in interrupted face milling processes.** Procedia CIRP. v. 29, p. 245–250, 2015.

- [55] HELU, M.; BEHMANN, B.; MEIER, H.; DORNFELD, D.; LANZA, G.; SCHULZE, V. **Impact of green machining strategies on achieved surface quality**. CIRP annals. v. 61, n. 1, p. 55–58, 2012.
- [56] BANERJEE, N.; SHARMA, A. **A comprehensive assessment of minimum quantity lubrication machining from quality, production, and sustainability perspectives**. Sustainable Materials and Technologies. v. 17, 2018.
- [57] MORADNAZHAD, M.; UNVER, H. O. **Energy efficiency of machining operations: a review**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. v. 231, n. 11, p. 1871-1889, 2017.
- [58] CAI, W.; LIU, F.; ZHOU, X.; XIE, J. **Fine energy consumption allowance of workpieces in the mechanical manufacturing industry**. Energy. v. 114, p. 623–633, 2016.
- [59] LIU, C.; VENGAYIL, H.; ZHONG, R. Y.; XU, X. **A systematic development method for cyber-physical machine tools**. Journal of Manufacturing Systems, v. 48, p. 13–24, 2018.
- [60] NANDI, M. S. **Aplicação dos Padrões STEP-NC e MT-Conect Visando a Otimização de Parâmetros de Usinagem em Máquinas CNC no Âmbito da Manufatura Sustentável**. Relatório de Estágio, Universidade Federal de Santa Catarina. 2017.
- [61] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5 ed. Grupo Gen-LTC, 2012.
- [62] DIAZ, N.; REDELSHEIMER, E.; DORNFELD, D. **Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use**. Em: Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, p. 263-267. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [63] SOLHEID, J. dos S. **Avaliação do consumo de energia no processo de fresamento de cavidades 2½D para diferentes trajetórias**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- [64] AMARAL, G. F. do. **Avaliação do fresamento de aço endurecido considerando-se aspectos econômicos, sociais e ambientais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

