

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Mecânica

ROBERTO GIANI PATTARO JUNIOR

ESTUDO DO CONSUMO DE ENERGIA DURANTE A USINAGEM DE UMA CAVIDADE DE MOLDE COM DIFERENTES ESTRATÉGIAS

CAMPINAS 2019

ROBERTO GIANI PATTARO JUNIOR

ESTUDO DO CONSUMO DE ENERGIA DURANTE A USINAGEM DE UMA CAVIDADE DE MOLDE COM DIFERENTES ESTRATÉGIAS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO ROBERTO GIANI PATTARO JUNIOR, E ORIENTADA PELO PROF. DR. AMAURI HASSUI

> CAMPINAS 2019

Ficha catalográfica Universidade Estadual de Campinas Biblioteca da Área de Engenharia e Arguitetura Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Pattaro Junior, Roberto Giani, 1974-P276e Estudo do consumo de energia durante a usinagem de uma cavidade de molde com diferentes estratégias / Roberto Giani Pattaro Junior. - Campinas, SP : [s.n.], 2019. Orientador: Amauri Hassui. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

> 1. Energia - Consumo. 2. Usinagem. 3. Estratégia (Economia). 4. Cavidade. I. Hassui, Amauri, 1967-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Study of energy consumption during machining a mold cavity with different strategies Palavras-chave em inglês: Energy - Consumption Machining Strategy (Economy) Cavity Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica Banca examinadora: Amauri Hassui [Orientador] Daniel Iwao Suyama Juliano Soyama Data de defesa: 19-12-2019 Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a) - ORCID do eutor: https://orcid.org/0000-0003-4992-1008 - Currículo Lattes do autor: http://lattes.cnpq.br/7475087749845436

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Mecânica Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais

Dissertação de Mestrado Acadêmico

ESTUDO DO CONSUMO DE ENERGIA DURANTE A USINAGEM DE UMA CAVIDADE DE MOLDE COM DIFERENTES ESTRATÉGIAS

Autor: Roberto Giani Pattaro Junior Orientador: Prof. Dr. Amauri Hassui

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta dissertação:

Prof. Dr. Amauri Hassui Universidade Estadual de Campinas - Unicamp DEMM/FEM/UNICAMP

Prof. Dr. Daniel Iwao Suyama Universidade Estadual de Campinas – Unicamp DEE/FCA/UNICAMP

Prof. Dr. Juliano Soyama Universidade Estadual de Campinas - Unicamp DEMM/FEM/UNICAMP

A ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade

Campinas, 19 de dezembro de 2019

Dedicatória

Dedico este trabalho em primeiro lugar a Deus, por ter me concedido a bênção da vida e de poder aprender. À minha esposa, pelas horas e horas de apoio incondicional, à minha mãe, por ter colocado em mim uma semente do bem que germinou fortemente e aos meus irmãos, pela torcida e carinho demonstrado ao longo desse trabalho.

Agradecimentos

Este trabalho não chegaria ao fim sem a ajuda de algumas pessoas às quais presto minha homenagem:

Ao meu orientador, prof. Dr. Amauri Hassui, por aceitar dividir seus conhecimentos comigo, pela orientação do trabalho e pelos inúmeros ensinamentos.

Aos professores Daniel Iwao Suyama e Juliano Soyama, pelas discussões, críticas e contribuições.

À Faculdade Senai "Roberto Mange", por ter me concedido espaço e equipamentos tornando possível a realização dos ensaios.

Às bibliotecárias dessa faculdade por terem colaborado com materiais de pesquisa e me incentivando sempre.

Aos diversos amigos da Unicamp que sempre se mostraram prestativos em me auxiliar e trocar experiências.

A todos vocês, agradeço de coração!

Resumo

A competitividade no mercado comercial e industrial vem aumentando de forma exponencial, devido as empresas buscarem uma participação de mercado cada vez maior afim de se manterem estáveis financeiramente, pois é essa estabilidade financeira que faz algumas empresas superarem as dificuldades melhor que as outras, ou ainda possuírem capital suficiente para investir em equipamentos novos e pesquisa, estratégias que certamente aumentam o potencial competitivo das empresas. Um dos pontos mais importante nesse processo é buscar a redução de custos de fabricação e um dos grandes vilões de custos na produção de uma empresa é o consumo de energia, principalmente da área metalmecânica. Este trabalho tem como objetivo identificar as principais estratégias e parâmetros de corte de desbaste e acabamento de uma cavidade de molde e identificar condições que resultem em economia de energia, avaliando as estratégias de usinagem realizando medições de consumo de energia além de comparar as estratégias com o propósito de obter a melhor combinação entre elas. No desbaste, com variações em velocidade de corte, profundidade de corte e avanços, obteve-se uma diferença de mais de quatro vezes o volume de material removido por quilowatt-hora consumido entre os ensaios. No acabamento foram testadas duas ferramentas e duas estratégias, variando também a velocidade de corte. Os resultados apresentaram uma diferença de consumo significativa entre as velocidades de corte ensaiadas e entre as estratégias deixando claro as escolhas a serem feitas pelos técnicos de processos das empresas.

Palavras-chave: consumo de energia. estratégias de usinagem. velocidade de corte

Abstract

Competitiveness in the commercial and industrial markets has been increasing exponentially, as companies seek increasing market share in order to remain financially stable, as it is this financial stability that makes some companies overcome difficulties better than others, or even have enough capital to invest in new equipment and research, strategies that certainly increase companies' competitive potential. One of the most important points in this process is to seek to reduce manufacturing costs and one of the major cost villains in a company's production is energy consumption, especially in the metalworking area. This work aims to identify the main strategies and parameters of roughing and finishing of a mold cavity and to identify conditions that result in energy saving, evaluating the machining strategies performing energy consumption measurements and comparing the strategies with the purpose of getting the best match between them. In roughing, with variations in cutting speed, depth of cut and feeds, a difference of more than four times the volume of material removed per kilowatt-hour consumed between the tests was obtained. In the finishing two tools and two strategies were tested, also varying the cutting speed. The results showed a significant consumption difference between the tested cutting speeds and the strategies, making clear the choices to be made by the process technicians of the companies.

Key words: energy consumption. machining strategies. cutting speed

Lista de figuras

Figura 1 – Classificação dos processos de fabricação	.19
Figura 2 – Tempo de produção por peça de acordo com a velocidade de corte	.23
Figura 3 – Intervalo de máxima eficiência	.25
Figura 4 – Forças de corte e suas componentes no fresamento	.26
Figura 5 – Influência dos parâmetros na pressão específica de corte	.28
Figura 6 – Tipos de entrada de ferramenta na peça: (a) em mergulho; (b) em ramp	ba;
(c) em hélice	.31
Figura 7 – Tipos de trajetórias paralelas: (a) unidirecional; (b) bidirecional	.32
Figura 8 – Trajetória paralela ao contorno	.33
Figura 9 – Evolução das trajetórias paralelas ao contorno com ilhas	.33
Figura 10 – Estratégias de usinagem mais comuns: (a) espiral; (b) zigue-zague; (c	;)
contornos sucessivos	.34
Figura 11 – Acabamento por estratégias de passes paralelos horizontais	.35
Figura 12 – Passes em <i>off-set</i> tridimensional	.36
Figura 13 – Rugosidade média Ra	.37
Figura 14 – Rugosidade máxima Rmax	.37
Figura 15 – Rugosidade parcial Zi para definir Rz	.38
Figura 16 – Esquema simplificado de um circuito elétrico	.40
Figura 17 – Representação vetorial das potências elétricas	.40
Figura 18 – Equação senoidal da tensão e corrente para sistemas resistivos	.42
Figura 19 – Representação da onda senoidal para sistemas indutivos	.43
Figura 20 – Representação da onda senoidal para sistemas capacitivos	.43
Figura 21 – Centro de usinagem utilizado nos ensaios	.46
Figura 22 – Fresa diâmetro de 20mm utilizada no desbaste	.47
Figura 23 – Ferramentas utilizadas para acabamento	.47
Figura 24 – Geometria do corpo de prova	.50
Figura 25 – Analisador de energia	.51
Figura 26 – Caminho da ferramenta das operações de acabamento do 1° grupo	.52
Figura 27 – Caminho da ferramenta na estratégia radial (a) e Z constante e	
otimizado (b)	.54
Figura 28 – Fixação do corpo de provas na morsa	.55
Figura 29 – Caminho da ferramenta no desbaste	.56
Figura 30 – Potência consumida durante as usinagens de desbaste	.57
Figura 31 – Sinal de potência ampliado	.59
Figura 32 – Potência consumida durante as usinagens no vazio	.59
Figura 33 – Potência consumida com o corte	.61
Figura 34 – Composição da potência consumida	.62
Figura 35 – Comparativo entre as potências de acordo com cada parâmetro	.63
Figura 36 – Efeitos principais para potência (kW)	.64
Figura 37 – Gráfico de interação para potência (kW)	.64
Figura 38 – Influência dos parâmetros na pressão específica de corte	.65
Figura 39 – Gráfico cubo para potência (kW)	.66

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores típicos de rugosidade média de acordo	38
Tabela 2 – Combinação de parâmetros de corte para o desbaste	49
Tabela 3 – Combinação de parâmetros de corte para o acabamento	49
Tabela 4 - Composição química do P20	50
Tabela 5 – Estratégias e parâmetros de corte para o acabamento	53

Lista de Abreviaturas e Siglas

- ae penetração de trabalho
- V_{co} velocidade de mínimo custo
- V_{cmxp} velocidade de máxima produção
- tt tempo total de usinagem de uma peça
- t_c tempo de corte
- ts tempo secundário
- ta tempo de aproximação e afastamento
- t_p tempo de preparo da máquina
- t_{ft} tempo de troca da ferramenta
- Nt número de trocas da ferramenta durante a usinagem de um lote de peças
- t1 tempo improdutivo do processo
- t2 tempo relacionado com a troca de ferramenta
- K_p custo de produção por peça
- Kus custo da mão de obra de usinagem
- Kuf custo das ferramentas
- Kum custo da máquina
- S_h salário e encargos do operador
- V_{mi} valor inicial de aquisição da máquina
- m idade da máquina
- M vida prevista para a máquina
- j taxa de juros
- K_{mc} custo anual de manutenção da máquina
- E_m espaço ocupado pela máquina
- K_c custo do m² ocupado pela máquina
- S_m custo total da máquina
- H número de horas de trabalho por ano
- K_{ft} custo da ferramenta por vida
- Zt número de peças usinadas por vida T da ferramenta
- C1 constante independente da velocidade de corte
- C₂ soma das despesas com mão de obra e com máquina
- C₃ constante de custo relativo à ferramenta
- F_u força de usinagem
- F_c força de corte

- F_f força de avanço
- F_p força passiva
- FTR força ativa
- F_n força de compressão
- F_{ap} força de apoio
- Ks_m valor médio de pressão específica Ks
- Pc potência de corte
- Ks1 constantes relativas ao material
- h_m espessura do cavaco
- a_p profundidade de corte
- v_f avanço da mesa
- fz avanço por dente
- z número de facas da fresa
- n rotação de trabalho
- K_c pressão específica de corte
- K_{c1} pressão específica de corte para espessura média de cavaco de 1 mm
- h_m espessura média do cavaco
- Υ_0 ângulo de saída da pastilha
- mc fator de compensação da espessura do cavaco
- Ra rugosidade média
- Yi média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento
- Im percurso de medição

Rmax rugosidade máxima

- Zi maior valor das rugosidades parciais
- Rz média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial
- P potência elétrica
- V tensão da fonte
- I corrente da fonte
- S potência aparente
- W watt
- kW quilowatt
- Q potência reativa
- var volt-ampère reativo
- kWh quilowatt-hora
- v_c velocidade de corte

Sumário

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 Usinagem	19
2.1.1 Fresamento	20
2.1.2 Parâmetros de Corte no Fresamento	20
2.1.2.1 Velocidade de Máxima Produção	21
2.1.2.2 Velocidade de Mínimo Custo	23
2.1.2.3 Intervalo de Máxima Eficiência	25
2.1.3 Forças e Potências no Fresamento	26
2.1.4 Fresamento de Cavidades de Moldes	
2.1.5 Estratégias de Usinagem	
2.1.5.1 Desbaste	29
2.1.5.2 Acabamento	34
2.1.6 Rugosidade	
2.2 Potências Elétricas	
2.2.4 Fator de Potência	41
2.2.1 Potência Aparente	41
2.2.2 Potência Ativa	41
2.2.3 Potência Reativa	42
2.2.4 Cálculo de Consumo de Energia	44
2.3 Consumo de Energia em Usinagem	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 Máquina-Ferramenta	46
3.2 Ferramentas Utilizadas	46
3.2.1 Parâmetros de Corte	48
3.3 Geometria do Corpo de Prova	49
3.4 Analisador de Energia	51
3.5 Procedimentos Experimentais	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1 Desbaste	55
4.2 Acabamento	70

4.2.1 Acabamento do 1º Grupo	10
4.2.2 Acabamento do 2º Grupo	.72
4.2.3 Acabamento do 3º Grupo	76
5 CONCLUSÕES	79
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	79
REFERÊNCIAS	.80

1 INTRODUÇÃO

A competitividade no mercado comercial e industrial vem aumentando de forma exponencial, pois as empresas têm buscado uma participação de mercado cada vez maior com o propósito de se manterem financeiramente estáveis. Nessa competitividade alguns parâmetros estão diretamente ligados à indústria como, por exemplo, a qualidade dos produtos que é de responsabilidade dos fabricantes, porém o volume de produção está diretamente ligado à aceitação e utilização dos produtos pelo cliente final (NEUMANN, 2013). O autor cita também que o Brasil está perdendo competitividade em consequência do crescente aumento da importação de produtos e a redução da produção interna.

Nesse cenário de concorrência e disputa, a empresa que tem um capital financeiro maior também está inclinada à superar possíveis dificuldades e realizar investimentos em pesquisas e aquisição de equipamentos novos, sendo estas estratégias coordenadas que permitirão sua constância no mercado.

Logo, uma estratégia é delineada para proporcionar uma vantagem competitiva e, segundo Nascimento (2017) a estratégia organizacional deve analisar não apenas as características externas, como o setor e o mercado, mas também os aspectos internos, como a estrutura organizacional visando melhorar o funcionamento organizacional e atender às demandas desse mercado.

Porém, para que isso ocorra, é preciso que as empresas façam análises críticas de seus processos de fabricação e de todos os custos relacionados a eles, como o gasto com energia elétrica.

O consumo de energia é um dos custos mais significativos dentro da produção de uma empresa sendo que, segundo Mamede Filho (2015), os motores elétricos numa instalação industrial consomem, em média, 75% da energia de demanda. A indústria metalmecânica abrange todas as áreas responsáveis pela produção e transformação de metais e a diversidade de produtos depende de processos e, principalmente, de equipamentos de grande porte na linha de produção que consomem uma grande quantidade de energia.

De acordo com Mozart Schmitt de Queiroz, gerente executivo de Desenvolvimento Energético da Petrobrás, na revista Petrobrás Magazine (2015 apud MATUMOTO, 2016), a melhoria da eficiência energética poupa recursos naturais e diminui os custos de produção, possibilitando a produção de bens mais baratos e competitivos, aumentando o desempenho econômico das empresas, ou seja, a busca pela redução do consumo de energia faz com que as empresas tenham um lucro maior com a venda de seus produtos e, assim construam uma vantagem financeira que trará uma vantagem competitiva.

Yan e Li (2013) atribuem a priorização da economia do consumo de energia ao aumento da demanda de produtos e às restrições nas emissões de carbono firmadas em acordos internacionais.

Produzir mais com menos energia permite que a empresa possa competir com maior eficácia. Segundo Safarov et al (2017), esse assunto já é prioridade em vários países, pois as empresas bem-sucedidas estão sempre em busca de melhorias contínuas e inovações tecnológicas, tanto em seus produtos quanto em seus processos.

O processo de fabricação que será estudado nesse trabalho é a usinagem, mais precisamente, o fresamento, e o objeto de estudo do fresamento será uma cavidade de molde de injeção de plásticos. A escolha desse objeto é motivada pela constante mutação de produtos que utilizam o processo de injeção para fabricação, como por exemplo, produtos de utilidades domésticas, da área automobilística e embalagens em geral, sendo que, em cada alteração ou criação de um produto é necessário desenvolver e usinagem de um molde específico. Por possuir vários parâmetros que podem ser otimizados, tais como, tempo de usinagem, desgaste e vida de ferramenta, taxa de remoção de cavaco, consumo de energia, entre outros, a usinagem é um dos processos que mais possibilita estudos.

O objetivo deste trabalho é identificar os principais parâmetros e estratégias de desbaste e acabamento de cavidade de molde e qual combinação de estratégia e parâmetros de corte que resultem em menor consumo de energia. Para isso serão realizadas medições do consumo de energia nos percursos de cada estratégia. O interesse reside na possibilidade de gerar peças sem queda na qualidade, porém reduzindo o consumo de energia e os custos de produção e, consequentemente, aumentando a possibilidade da empresa estar mais competitiva no mercado.

O levantamento bibliográfico realizado para este estudo, e apresentado no capítulo de Revisão de Literatura, traz um embasamento teórico sobre o processo de usinagem, seus parâmetros de corte e as teorias e cálculos de potências elétricas.

As medições e a sistemática em que os experimentos foram conduzidos, assim como a descrição da máquina, dos equipamentos e das ferramentas utilizadas e as

estratégias de usinagem e o corpo da prova serão detalhados no capítulo de Materiais e Métodos.

No capítulo Resultados e Discussões serão apresentados os resultados obtidos com relação ao consumo de potência consumido em cada estratégia, tanto do desbaste quanto do acabamento, uma análise gráfica desse consumo e comparativos entre as estratégias. As conclusões que foram retiradas da pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros serão apresentadas em Conclusões, seguido das referências citadas no trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos necessários para a execução do estudo do consumo de energia durante a usinagem de acabamento de uma cavidade de molde, ou seja, conceitos de usinagem, potências elétricas e características de uma cavidade de molde típica.

2.1 Usinagem

Os processos de fabricação são a maneira, método, sistema ou atividade executada em uma sequência adequada para transformar, modificar e dar utilidade a uma matéria-prima. Dependendo do produto e do seu processo de fabricação, menor ou maior quantidade de energia é consumida. Esse consumo é determinante na definição dos preços dos produtos, interferindo diretamente na concorrência de preços industrializados (WEISS, 2012).

Ainda segundo o autor, os processos de fabricação são classificados em dois grandes grupos: sem remoção de cavaco e com remoção de cavaco, sendo como remoção de cavaco o processo de usinagem (Figura 1).





Fonte: (WEISS, 2012)

Entende-se como processo de usinagem aquele que confere à peça a forma ou as dimensões ou o acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três itens que produzem o cavaco, que é uma porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular (FERRARESI, 1970).

2.1.1 Fresamento

O fresamento é uma operação de usinagem que se caracteriza por possuir uma ferramenta, chamada fresa, que é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno do seu eixo. O movimento de corte é proporcionado pela rotação da fresa ao redor do seu eixo e pelo movimento de avanço que é gerado sobre a peça em usinagem. A peça está fixada na mesa da máquina e ao passar sob a ferramenta em rotação, adquire a forma e dimensão desejadas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Ainda segundo os autores, o fato da fresa apresentar-se sob as mais variadas formas, confere a esta operação um caráter de versatilidade em termos de geometrias possíveis a serem geradas.

2.1.2 Parâmetros de Corte no Fresamento

Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2014), os cinco parâmetros de corte, utilizados no fresamento, são: a profundidade de corte, a penetração de trabalho, o avanço, a velocidade de corte e o número de dentes da fresa.

A profundidade de corte deve ser a maior possível, uma vez que esse parâmetro influencia pouco no desgaste da ferramenta e, ampliando a profundidade de corte, provoca um aumento proporcional no volume de cavaco removido.

A penetração de trabalho é a largura a ser fresada (a_e) e, consequentemente, a medida que essa largura cresce, aumenta a temperatura na região de corte por expandir o ângulo de contato fresa-peça.

O avanço no fresamento é dado pelo avanço da mesa, que é o deslocamento da peça, normalmente fixada na mesa, em relação à fresa. Esse avanço é resultante do cálculo, que leva em conta o avanço por dente da fresa, o número de dentes da fresa e a rotação da fresa.

O número de dentes da fresa pode ser definido levando-se em conta o material da peça, o tamanho da peça, a estabilidade do sistema máquina-fresa-dispositivo de fixação-peça e o acabamento desejado, porém ao se usar uma fresa de passo largo gera-se menor potência do que se fosse usada uma fresa de passo fino para o mesmo volume removido de cavaco na unidade de tempo, pois a espessura do cavaco é maior na fresa de passo largo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

A velocidade de corte é o parâmetro que exerce maior influência no desgaste da ferramenta, por esse motivo ela deve ser selecionada seguindo critérios de acordo com a aplicação, ou seja, se a máquina é um recurso chamado de "gargalo", por restringir o escoamento da produção, deve-se escolher a velocidade de corte para a máxima produção e se a máquina não for uma restrição na produção, deve-se escolher a velocidade de corte para mínimo custo, onde o desgaste da ferramenta é menor. Segundo Costa (2003), com relação aos desgastes das ferramentas no desbaste, a resistência ao desgaste do metal duro da ferramenta é uma propriedade mais importante do que a tenacidade, de acordo com as condições por ele testadas.

Essas duas opções referentes à escolha da velocidade de corte afetam significativamente o tempo de usinagem, uma vez que, alterando-se a velocidade de corte deve-se também alterar a velocidade da mesa visando manter o avanço por dente constante.

Por se tratar do parâmetro que mais influencia o desgaste da ferramenta, a velocidade de corte deve ser selecionada de acordo com alguns critérios. Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2014), a velocidade de corte não pode ser muito baixa pois causa o fenômeno chamado de aresta postiça de corte e também não pode ser muito alta pois os desgastes de ferramentas são muito altos e, consequentemente, causa um aumento no dispêndio com ferramental. Existe então, uma faixa intermediária de velocidades de corte que vão desde a chamada velocidade de mínimo custo (V_{co}) e a velocidade de máxima produção (V_{cmxp}).

2.1.2.1 Velocidade de Máxima Produção

Para entender os conceitos de velocidade de máxima produção, devem ser observadas as etapas de um ciclo de produção de uma determinada peça e compreender seus tempos de usinagem. O ciclo completo de produção de um lote de peças é composto diretamente pelas seguintes fases:

- 1. Colocação e fixação da peça;
- 2. Aproximação e posicionamento da ferramenta;
- 3. Corte;
- 4. Afastamento da ferramenta;
- 5. Inspeção (se necessário) e retirada da peça;
- 6. Preparo da máquina;
- 7. Remoção da ferramenta para sua substituição;
- 8. Recolocação e ajustagem da nova ferramenta.

Sendo que os itens 6, 7 e 8 são referentes à produção de um lote de peças.

Para uma aplicação em uma equação matemática cada uma das fases acima será denominada como segue:

tt = tempo total de usinagem de uma peça;

 t_c = tempo de corte (fase 3);

t_s = tempo secundário (fases 1 e 5);

ta = tempo de aproximação e afastamento (fases 2 e 4);

t_p = tempo de preparo da máquina (fase 6);

 t_{ft} = tempo de troca da ferramenta (fases 7 e 8).

Desta forma, o tempo total de usinagem de um lote de peças é dado pela equação 1.

$$t_{t} = t_{c} + t_{s} + t_{a} + \frac{t_{p}}{z} + \frac{N_{t}}{z} \cdot t_{ft}$$
(1)

Onde N_t é o número de trocas da ferramenta durante a usinagem de um lote de peças.

Ainda segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2014), podemos dividir a equação acima em três parcelas onde teremos:

$$t_t = t_c + t_1 + t_2 \tag{2}$$

Onde:

t_c é o tempo de corte, que diminui com o aumento da velocidade de corte;

t₁ é o tempo improdutivo do processo, refere-se à colocação e retirada da peça assim como a inspeção e o tempo de substituição da ferramenta e o preparo da máquina, que são independentes da velocidade de corte escolhida;

t₂ é o tempo relacionado com a troca de ferramenta. Quanto maior a velocidade de corte, menor a vida da ferramenta e maior será o número de trocas. Essa análise pode ser verificada na Figura 2.



Figura 2 – Tempo de produção por peça de acordo com a velocidade de corte

Fonte: (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014)

2.1.2.2 Velocidade de Mínimo Custo

Conforme visto no capítulo anterior, à medida que se aumenta a velocidade de corte eleva-se o número de trocas de ferramentas e, consequentemente, o tempo total de usinagem.

Como alternativa há a possibilidade de reduzir a velocidade de corte, diminuindo os custos com ferramentas, mas esta alteração aumenta o tempo de corte e alguns custos. De forma geral, o custo relacionado à produção de um lote de peças é dado pela equação 3.

$$K_p = K_{us} + K_{um} + K_{uf} \tag{3}$$

Onde:

K_p é o custo de produção por peça;

Kus é o custo da mão de obra de usinagem;

Kuf é o custo das ferramentas (depreciação, troca, afiação, etc.)

K_{um} é o custo da máquina (depreciação, manutenção, espaço ocupado, energia consumida, etc.)

Detalhando cada parcela da equação acima, temos:

$$K_{us} = t_t \cdot \frac{s_h}{60} \tag{4}$$

$$K_{um} = \frac{t_t}{H.60} \cdot \left[\left(V_{mi} \cdot \frac{m}{M} \right) \cdot j + \frac{V_{mi}}{M} + K_{mc} + E_m \cdot K_c \cdot j \right]$$
(5)

$$K_{uf} = \frac{K_{ft}}{Z_t} \tag{6}$$

Onde:

tt é o tempo total de usinagem por peça em minutos;

S_h é o salário e encargos do operador (R\$/hora);

V_{mi} é o valor inicial de aquisição da máquina (R\$);

m é a idade da máquina (anos);

M é a vida prevista para a máquina (anos);

j é a taxa de juros (ano);

K_{mc} é o custo anual de manutenção da máquina (R\$/ano);

 E_m é o espaço ocupado pela máquina (m²);

K_c é o custo do m² ocupado pela máquina (R\$/m².ano);

S_m é o custo total da máquina (R\$/hora);

H é o número de horas de trabalho por ano;

K_{ft} é o custo da ferramenta por vida (para pastilhas intercambiáveis);

Zt é o número de peças usinadas por vida T da ferramenta.

Sendo assim, se for feita a substituição das equações 4, 5 e 6 na equação 3 tem-se uma forma reduzida na equação 7:

$$K_p = C_1 + \frac{t_c}{60} \cdot C_2 + \frac{T_c}{T} \cdot C_3 \tag{7}$$

Onde:

C₁ é a constante independente da velocidade de corte (R\$/peça);

C₂ é a soma das despesas com mão de obra e com máquina (R\$/hora);

 C_3 é a constante de custo relativo à ferramenta.

2.1.2.3 Intervalo de Máxima Eficiência

O comportamento da curva de custo é similar à curva do tempo apresentado na Figura 2, porém como a velocidade de corte é menor para o mínimo custo, tem-se uma faixa entre a velocidade de mínimo custo e a velocidade de máxima produção chamada de intervalo de máxima eficiência. De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2014), é importante que a velocidade de corte utilizada esteja dentro desse intervalo, porque com a velocidade de corte logo abaixo da velocidade de mínimo custo, o custo por peça será próximo do mínimo, porém com mais tempo para fabricála. O mesmo acontece no outro extremo, com velocidade de corte logo acima da velocidade de máxima produção, tem-se um tempo menor de fabricação, porém com um custo elevado. Segue na Figura 3 o intervalo de máxima eficiência.



Fonte: (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014)

2.1.3 Forças e Potências no Fresamento

Conhecer os esforços de corte envolvidos nos processos de usinagem é de suma importância, pois segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2014) eles afetam a potência mínima necessária para o corte, a capacidade de obter tolerâncias apertadas, a temperatura de corte e, consequentemente, o desgaste da ferramenta. As forças de usinagem são ações da peça sobre a ferramenta, sendo a força de usinagem (F_u) a resultante que atua sobre a cunha de corte da ferramenta. Os autores apontam que, as forças de usinagem possuem uma série de componentes, conforme a Figura 4.



Figura 4 – Forças de corte e suas componentes no fresamento

Fonte: (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014)

As três componentes básicas da força de usinagem (F_u) são a força de corte (F_c), a força de avanço (F_f) e a força passiva (F_p). As demais componentes são a força ativa (F_{TR}), a força de compressão (F_n) e a força de apoio (F_{ap}).

Em razão das características do fresamento, a potência consumida varia de acordo com a intermitência dos dentes da fresa e a variação de espessura do cavaco, por esse motivo, na maioria das vezes, é considerada a potência média para o dimensionamento da máquina requerida (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Além disso, deve-se utilizar também o cálculo de espessura média do cavaco (h_m)

para chegar a um valor médio de pressão específica Ks (Ks_m). Para realizar esses cálculos utilizam-se as equações 8, 9 e 10 conforme abaixo.

$$Ks_m = Ks_1 \cdot h_m^{-z} \tag{8}$$

$$Pc = \frac{Ks_m \cdot a_e \cdot a_p \cdot v_f}{60 \cdot 10^6}$$
(9)

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \tag{10}$$

Onde:

Pc é a potência de corte;

Ks1 e z são constantes relativas ao material;

 h_m é a espessura do cavaco;

ae é a penetração de trabalho;

a_p é a profundidade de corte;

vf é o avanço da mesa;

fz é o avanço por dente;

z é o número de facas da fresa;

n é a rotação de trabalho.

Conforme Sandvik (2017), a equação 9, citada acima, utiliza valores de pressão específica do material (Ksm) de acordo com tabelas onde a espessura do cavaco utilizado para gerar essas tabelas eram de 1 mm. Para se obter um valor mais preciso no cálculo da potência de corte deve-se utilizar a equação 11.

$$K_c = K_{c1} \cdot h_m^{-mc} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right)$$
(11)

Onde:

K_c é a pressão específica de corte

 K_{c1} é a pressão específica de corte para espessura média de cavaco de 1 mm

 $h_{m} \,\acute{e}$ a espessura média do cavaco

 Υ_0 é o ângulo de saída da pastilha

 m_c é o fator de compensação da espessura do cavaco

Contudo, sabe-se que os parâmetros de corte influenciam os valores da pressão específica de corte. Conforme Diniz, Marcondes e Coppini (2014), o parâmetro que mais influencia o K_s é o avanço, seguido da velocidade de corte. Como foi representado na Figura 5, essa variação pode ser maior ou menor dependendo de qual faixa dos parâmetros de profundidade de corte (Figura 5a), velocidade de corte (Figura 5b) e avanço (Figura 5c) se está utilizando.



Fonte: (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014)

2.1.4 Fresamento de Cavidades de Moldes

O fresamento de cavidade de moldes possui características específicas por ser uma usinagem de grande remoção de cavaco, possuir geometria indefinida e exigências de tolerâncias apertadas assim como rugosidades baixas para facilitar o processo de polimento. Sua usinagem geralmente só é possível com auxílio de *software* para gerar o programa para a máquina CNC executar. O desempenho e a vida útil desse molde dependerão do material da cavidade e da sua integridade superficial após a usinagem, pois os moldes são constantemente solicitados a esforços mecânicos, tanto na pressão de injeção quanto na força de fechamento (OLIVEIRA, 2006).

A usinagem de desbaste e acabamento são consideradas etapas críticas na produção do molde por corresponder à maior fração do custo total da manufatura. De acordo com a pesquisa realizada por Lanzer, Steffani e Gonçalves (2018), aproximadamente 64% das despesas diretas, no custo de fabricação de um molde, referem-se ao tempo de usinagem. Estes dados corroboram com as informações divulgadas pela Sandvik (2002), que afirma que estes custos podem chegar a 65%, enquanto a matéria prima refere-se a 20% do custo total.

As usinagens de cavidades podem ser realizadas em máquinas a CNC com 3 eixos de deslocamento, porém essa tecnologia apresenta algumas dificuldades no caso de usinagem de geometrias complexas. De acordo com Amorin e Volpato (2005), somente nas regiões da peça onde a ferramenta de corte efetivamente consegue alcançar é que a usinagem se faz possível. Além disso, devido à própria geometria da ferramenta, canais contendo cantos retos ou com pequenas larguras e grandes profundidades não podem ser obtidas por usinagem. No caso de moldes feitos em material metálico estas dificuldades podem ser contornadas pelo uso de gavetas ou pelo processo de eletroerosão.

2.1.5 Estratégias de Usinagem

Para se efetuar a usinagem de uma cavidade de molde deve-se, além de definir todos os parâmetros de corte, definir também as estratégias que serão utilizadas. Essas estratégias se dividem em uma operação de desbaste e uma de acabamento e ambas operações são compostas por estratégias de entrada da ferramenta na peça e o seu percurso durante a remoção de cavaco.

Além dos parâmetros de corte, as estratégias também devem ser definidas para a usinagem de cavidades de moldes. Conforme Monreal e Rodrigues (2003), nas operações de fresamento a trajetória da ferramenta tem uma influência significativa no tempo de ciclo da operação e na qualidade da superfície usinada, ou seja, para o mesmo volume de remoção de cavaco, o tipo escolhido de trajetória da ferramenta influencia o resultado em termos de tempo e, consequentemente, nas variáveis relacionadas ao tempo de usinagem, no qual a ferramenta passa um tempo maior em contato com a peça, como o desgaste da ferramenta, consumo de energia, entre outros.

2.1.5.1 Desbaste

A usinagem de moldes tem como principais características as geometrias irregulares em razão do formato do produto que será gerado no processo de injeção e a alta remoção de cavaco. O desbaste é a operação responsável por extrair o maior volume de cavaco por isso deve-se levar em consideração a escolha dos parâmetros de usinagem que, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2014) são:

- a) profundidade de usinagem: recomenda-se usar a maior possível, pois influencia pouco no desgaste da ferramenta.
- b) penetração de trabalho: quanto maior a penetração de trabalho maior o ângulo de contato entre a peça e a fresa, aumentando assim a temperatura e, consequentemente reduzindo a vida da ferramenta.
- c) avanço: no fresamento, o avanço é dado em milímetros por minuto e é resultante da multiplicação do avanço por dente, o número de dentes da fresa e a rotação. À medida que o avanço cresce, a força aumenta, porém diminui a potência consumida devido a influência do avanço na pressão específica do material. Em operações de desbaste utilizam-se baixas rotações e maiores avanços, visando uma alta taxa de remoção de cavaco.
- d) velocidade de corte: é o parâmetro que mais atua no desgaste da ferramenta e, ao alterar a velocidade de corte no fresamento deve-se também alterar o avanço, mantendo o mesmo volume de remoção de cavaco.
- e) número de dentes: o número de dentes da fresa deve ser escolhido de acordo com a aplicação e levando-se em consideração que, para gerar um mesmo volume de cavaco, uma fresa de passo largo usina em um tempo maior do que uma fresa de passo fino, que possui um número menor de dentes.

A Figura 6 apresenta os principais tipos de entrada da ferramenta na peça, que são caracterizados pela trajetória da entrada sendo: em mergulho, movimentos no eixo Z penetrando na peça em linha reta; em rampa, movimentos em linha reta em dois ou mais eixos penetrando na peça de forma mais gradual; em hélice, movimentos circulares em forma de espiral penetrando na peça gradualmente em torno da trajetória circular. Após a penetração da ferramenta na peça em uma determinada profundidade, esta passa a exercer movimentos laterais removendo o material da cavidade que por sua vez a trajetória e a direção dependem da estratégia adotatada (setas dentro da cavidade da figura).



Figura 6 – Tipos de entrada de ferramenta na peça: (a) em mergulho; (b) em rampa; (c) em hélice

Fonte: (SANDVIK, 1999)

Na entrada em mergulho o movimento da ferramenta é somente na direção axial da mesma, similar a uma furação, o que dificulta a saída do cavaco, embora em menor tempo; na entrada em rampa o movimento da ferramenta é uma combinação entre as direções axial e radial resultando uma interpolação linear e; na entrada em hélice o movimento da ferramenta também é uma combinação entre as direções axial e radial, porém, com interpolação helicoidal. Vale ressaltar que o ângulo resultante da trajetória da entrada em rampa e em hélice é limitado em função da ferramenta utilizada, podendo ocasionar colisões entre a região central no topo do suporte onde não há pastilha e a peça.

Além das definições de entrada da ferramenta deve-se definir o percurso que a ferramenta fará para a remoção do cavaco.

Segundo Choy e Chan (2002), as trajetórias percorridas pelas ferramentas de corte no fresamento de cavidades de moldes são classificadas em dois grupos, linear e não-linear. Ainda de acordo com os autores, no grupo da estratégia linear está a do tipo zigue-zague e no grupo da estratégia não-linear está a trajetória paralela ao contorno, uma das mais comuns.

As trajetórias lineares são caracterizadas pelo percurso que a ferramenta realiza, para a remoção de cavaco, em linhas paralelas a uma direção qualquer. Na Figura 7 são ilustradas duas trajetórias lineares, uma com o movimento de corte sempre em um sentido (a), ou seja, unidirecional, na qual a ferramenta, ao final de um

percurso, sobe, afasta-se da peça e se reposiciona para iniciar outra passada; a outra com os mesmos movimentos lineares, porém em sentido bidirecional (b) no qual, ao final de um percurso, a ferramenta se desloca lateralmente para iniciar a próxima trajetória no sentido inverso ao anterior. Em ambas trajetórias a direção de corte da ferramenta é configurável conforme necessidade e aplicação.



Figura 7 – Tipos de trajetórias paralelas: (a) unidirecional; (b) bidirecional

A vantagem da trajetória linear unidirecional (a) é que o método de remoção de cavaco se mantém o mesmo durante quase todo o corte e como desvantagem possui muitos movimentos em vazio, chamados movimentos passivos, que ocorrem quando a ferramenta se reposiciona para iniciar outro passe. Na trajetória linear bidirecional (b), também chamada de zigue-zague, tem-se como vantagem o tempo significativamente menor de reposicionamento em relação ao citado anteriormente e, como desvantagem, o método de remoção de cavaco se alterna entre concordante e discordante conforme o sentido da ferramenta se alterna nos percursos, podendo causar um desgaste maior na ferramenta (CHOY; CHAN, 2002).

As trajetórias paralelas ao contorno são obtidas pela realização de sequenciais offsets do contorno da cavidade, conforme a Figura 8.

Fonte: (SOLHEID, 2016)



Fonte: (SOLHEID, 2016)

De acordo com Sheen e You (2006), quando há cavidades com ilhas, todo o material da cavidade deve ser removido, limitando-se nas ilhas que possuem seu próprio contorno e, enquanto o *offset* do contorno da peça é feito de fora para dentro, nas ilhas o *offset* é feito de dentro para fora. A Figura 9 ilustra a evolução das trajetórias paralelas ao contorno com ilhas.



Figura 9 - Evolução das trajetórias paralelas ao contorno com ilhas

Fonte: (SOLHEID, 2016)

2.1.5.2 Acabamento

A operação de acabamento é responsável por finalizar a usinagem dando à cavidade a geometria final da superfície. Por possuir baixa remoção de cavaco devido ao pouco sobremetal a ser usinado a operação de acabamento tem como característica o consumo de tempo elevado e, consequentemente o desgaste da ferramenta por utilizar avanços pequenos e o tempo de contato entre ferramenta-peça ser constante.

Os parâmetros e as condições que devem ser levadas em consideração no acabamento são as mesmas do desbaste, além da escolha das estratégias de usinagem de acordo com as exigências de tolerâncias que serão utilizadas. Similar ao desbaste, no acabamento também deve-se selecionar o tipo de entrada da ferramenta na peça e o percurso que essa ferramenta realizará na usinagem. Embora seja com penetração bem menor que a do desbaste, esta operação que merece atenção.

A trajetória da ferramenta que, pela teoria, atingiria o melhor acabamento superficial da peça, nem sempre é a opção mais aconselhável. Isso é devido aos custos de usinagem que esta estratégia pode agregar. Porém, a trajetória mais indicada a ser seguida pela ferramenta é aquela na qual é possível equilibrar um menor tempo de usinagem com valores de rugosidade dentro das especificações do projeto (REINKE et al, 2017).

Ainda segundo Reinke et al (2017), as estratégias de usinagem mais comumente utilizadas, para a geração da trajetória da ferramenta, são as chamadas de espiral, zigue-zague e contornos sucessivos (Figura 10). Essas estratégias são aplicadas às superfícies mais planas.



Figura 10 – Estratégias de usinagem mais comuns: (a) espiral; (b) zigue-zague; (c) contornos sucessivos

Fonte: (REINKE et al, 2017)

Segundo Souza e Ulbrich (2009), a escolha dentre as diferentes trajetórias de ferramenta pode representar uma grande influência sobre o tempo de usinagem, desgaste de ferramentas e qualidade superficial, podendo se agravar na usinagem de superfícies complexas onde o contato entre a ferramenta e a peça se altera constantemente.

As estratégias de acabamento, para peças com geometrias complexas ou tridimensionais, utilizam as mesmas bases de cálculo das geometrias planas. Para os autores, os algoritmos mais importantes disponíveis nos sistemas CAM, para calcular diferentes estratégias de usinagem para acabamento, são:

passes paralelos horizontalmente constantes: o *software* previamente cria as trajetórias paralelas em um plano horizontal paramétrico, superior à geometria a ser usinada. Essas trajetórias, espaçadas igualmente definida pelo usuário, são projetadas sobre a superfície que será usinada no acabamento, como ilustra a Figura 11.



Figura 11 – Acabamento por estratégias de passes paralelos horizontais

Fonte: (SOUZA; ULBRICH, 2009)

- a) passes paralelos verticalmente constantes: esta estratégia é equivalente à anterior, considerando agora o sentido vertical. A combinação de ambas as estratégias é amplamente empregada.
- b) passes em *off-set* tridimensional: nesse algoritmo, as trajetórias da ferramenta são calculadas por *off-set*, a partir do contorno da geometria a ser usinada (Figura 12).



Figura 12 – Passes em *off-set* tridimensional

Fonte: (SOUZA; ULBRICH, 2009)

- c) passes em espiral tridimensional conforme perfil: calculam a trajetória da ferramenta em espiral, seguindo o contorno da geometria.
- d) passes para o acabamento de cantos: estes algoritmos identificam cantos da geometria a serem acabados por uma ferramenta de pequeno diâmetro.

2.1.6 Rugosidade

Após a usinagem, a superfície da peça apresenta uma qualidade de acabamento superficial decorrente de vários fatores na usinagem, como a velocidade de corte, o avanço por dente, a profundidade de corte, os ângulos de corte da ferramenta, e outros que influenciam diretamente na qualidade superficial (QUINSAT; LAVERNHE; LARTIGUE, 2011). A rugosidade é o parâmetro mais utilizado para avaliação dessa qualidade superficial (AXINTE e DEWES, 2002).

A escolha dos parâmetros de corte gera uma variação tanto na rugosidade quanto no tempo de usinagem e alguns autores apontam que ela é difícil de ser feita,
normalmente é conservadora e com baixa taxa de remoção de cavaco (BENARDOS e VOSNIAKOS, 2003; LU, 2008).

Há vários parâmetros para se medir a qualidade superficial de uma peça, ou seja, a rugosidade. Dentre os parâmetros de rugosidade, destacam-se:

Ra, rugosidade média, ou seja, média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (yi), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (Im), conforme representado na Figura 13. Os valores de Ra são expressos em micrometros (µm). Segundo Mitutoyo (2009), as vantagens de se utilizar esse parâmetro é sua aplicável à maioria dos processos de fabricação e os riscos inerentes ao processo não alteram substancialmente o seu valor.



Fonte: (SENAI, 2002)

Rmax, o maior valor das rugosidades parciais (Zi) que se apresenta no percurso de medição (lm), demonstrado na Figura 14. As aplicações desse parâmetro estão em peças de vedação ou superfícies de deslizamento onde o perfil efetivo é constante. Umas das vantagens desse parâmetro é que informa a máxima deterioração da superfície da peça (MITUTOYO, 2009).





Fonte: (SENAI, 2002)

Rz, média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial, sendo que entende-se por rugosidade parcial (Zi) a soma dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dentro do comprimento de amostragem, conhecido como cutoff. O comprimento correspondente à soma dos cinco cutoff compreende o percurso de medição (Im), conforme a Figura 15. De acordo com Mitutoyo (2009), uma das vantagens na utilização desse parâmetro é a facilidade em obtê-lo através de equipamentos que fornecem gráficos.



Figura 15 – Rugosidade parcial Zi para definir Rz

Fonte: (SENAI, 2002)

Todos os processos de fabricação deixam marcas ou riscos de usinagem na superfície da peça, ou seja, de acordo com o processo de fabricação utilizado obtémse uma faixa com valores típicos de rugosidade média possível. Na Tabela 1 temos esses valores típicos de rugosidade de acordo com o processo de fabricação.

com o processo de fabricação						
Processo	Ra (µm)					
Aplainamento, perfilamento	1 – 25					
fresamento	1 – 6					
Trefilamento, extrusão	1 – 3					
Torneamento, furação	0,4 - 6					
retífica	0,1 – 2					
brunimento	0,1 – 1					
Polimento	0,1 - 0,4					
Polimento com disco	0,05 - 0,04					

Tabela 1 – Valores típicos de rugosidade média de acordo

Fonte: (HUTCHINGS, 1992)

Segundo Scandiffio; Diniz; Fagali (2016), um dos fatores mais importantes para se obter uma rugosidade adequada é a estabilidade da ferramenta, evitando as vibrações. O autor relata que a trajetória descendente de uma superfície em forma de raio é mais estável devido ao contato da região central da ferramenta com a peça, já no sentido ascendente, a ferramenta inicia o corte tocando com a região da extremidade da ferramenta na peça gerando vibração e, consequentemente, danificando a rugosidade. Porém, de acordo com Souza; Diniz e Rodrigues (2014), quando o centro da ferramenta está na região de corte, o material é removido por cisalhamento junto com deformação plástica, o que resulta em força de cortes e rugosidades maiores.

2.2 Potências Elétricas

De acordo com Fowler (1992), a potência elétrica se refere a quão rapidamente uma energia é usada ou convertida em outra forma de energia. Desde que energia seja a capacidade de realizar trabalho, a potência está relacionada com a rapidez na realização do trabalho. Para Nilsson e Riedel (2009), a potência elétrica é a capacidade que uma fonte de tensão tem de converter a tensão elétrica do sistema com uma respectiva corrente para realizar algum tipo de trabalho. De modo geral, a energia elétrica, quando gerada, é transmitida por cabos de condução e, à medida em que a quantidade de energia aumenta para o menor intervalo de tempo, pode-se afirmar que maior será a potência de um componente eletrônico (NILSSON e RIEDEL, 2009). A potência em circuitos de corrente contínua pode ser calculada através da equação 12.

P = V.I (12)
Onde:
P é a potência elétrica
V é a tensão da fonte

I é a corrente da fonte

Para a maioria dos problemas encontrados em circuitos elétricos, a potência usada deve ser calculada pela equação da corrente alternada. Isso porque, estes circuitos apresentam componentes eletrônicos tanto resistivos, como capacitivos e indutivos (CHAPMAN, 2013). A Figura 16 mostra o esquema simplificado de um circuito que possui uma fonte de tensão e uma carga que é conhecida como impedância.



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Em um circuito de corrente alternada há três tipos de potências: ativa (P), reativa (Q) e aparente (S). Há uma relação entre as potências através da representação de um triângulo de potência mostrado na Figura 17, onde se conclui que a potência que é produzida no sistema elétrico é uma representante vetorial de outras duas partes da equação (CHAPMAN, 2013). O ângulo formado pelos vetores S e P é conhecido como ângulo de impedância.



Fonte: (CHAPMAN, 2013)

Para a análise vetorial das potências, o triângulo das potências fornece um modo simplificado e conveniente para calcular qualquer valor a partir de dois parâmetros pré-estabelecidos (BOYLESTAD, 2012).

2.2.4 Fator de Potência

O fator de potência é considerado como sendo um índice que representa a real utilização do circuito elétrico. Segundo Chapmam (2013), o fator de potência é definido como a fração da potência aparente que está verdadeiramente fornecendo potência ativa a uma carga. A equação 13 mostra a relação entre essas potências. O fator de potência assume quaisquer valores entre 0 a 1. Sendo 0, toda a energia que chega a carga será devolvida à fonte e, sendo 1, toda a energia enviada pela fonte é consumida pela carga.

$$FP = \frac{P}{s} = \cos\theta \tag{13}$$

2.2.1 Potência Aparente

A potência aparente (S) é a potência total do sistema presente em um circuito quando a tensão e a corrente são medidas separadamente. A potência aparente é o produto da tensão e da corrente, independente do ângulo de fase entre elas, conforme a equação 14. Num circuito contendo resistência e reatância, a potência aparente é sempre maior que a potência ativa.

$$S = V . I \tag{14}$$

2.2.2 Potência Ativa

A potência ativa (P) é a potência realmente consumida em sistemas que oferecem resistência, no circuito resistivo a tensão anda em fase com a corrente e sua unidade é o watt (W) ou quilowatt (kW). A potência ativa nunca poderá ter valores negativos, pois não é possível extrair essa potência de sistemas puramente resistivos, isso porque os sistemas resistivos dissipam calor para o meio alterando valores de tensão e corrente (NILSSON e RIEDEL, 2009).

Para se calcular a potência ativa utiliza-se a equação 15, porém pode-se obter os valores da potência ativa integrando a curva senoidal, conforme a equação 16.

$$P = V . I . \cos\theta \tag{15}$$

$$P = \frac{1}{t} \int_0^t V \cdot I \cdot \Delta t \tag{16}$$

Na Figura 18 é possível observar as equações senoidais da tensão e da corrente que se sobrepõem para o mesmo período de tempo analisado. Diz-se que a tensão e a corrente estão em fase, FP = 1 resistivo, sendo o ângulo de fase θ = 0°.





Fonte: (GUSSOW, 2009)

2.2.3 Potência Reativa

A potência reativa (Q) é aquela que vai e vem entre a fonte e a carga. Ela representa a energia que é primeiro armazenada e em seguida liberada do campo magnético de um indutor ou do campo elétrico de um capacitor (CHAPMAN, 2013). A potência reativa de qualquer carga pode ser calculada pela equação 17. Por convenção, a potência reativa é positiva para cargas indutivas e negativa para cargas capacitivas. A unidade da potência reativa é o volt-ampère reativo (var). Embora as unidades da equação sejam as mesmas dos watts, essa denominação é atribuída à potência reativa para se diferenciar da potência que é realmente fornecida a uma carga.

$$P = V . I . sen\theta \tag{17}$$

Apesar da potência reativa ser capaz de magnetizar as bobinas dos equipamentos elétricos, como motores de indução, ela não realiza trabalho no sistema. Isso faz com que haja uma preocupação com relação ao seu uso nas residências ou indústrias (ANEEL, 2012).

Em termos de cargas reativas têm-se as chamadas cargas indutivas, que são cargas que produzem potência reativa com atraso de corrente em relação à tensão, e as cargas capacitivas, que são cargas que produzem potência reativa com a corrente adiantada em relação à tensão. Na Figura 19 temos a representação da onda senoidal da tensão e corrente para sistemas indutivos e, na Figura 20 temos a representação de onda senoidal da tensão e corrente para sistemas capacitivos.

Figura 19 – Representação da onda senoidal para sistemas indutivos



Fonte: (GUSSOW, 2009)

Figura 20 - Representação da onda senoidal para sistemas capacitivos



Fonte: (GUSSOW, 2009)

2.2.4 Cálculo de Consumo de Energia

O consumo de energia elétrica é calculado utilizando a potência ativa. Quando uma atividade é realizada e essa potência ativa apresenta variações cíclicas deve-se utilizar a potência ativa média para se determinar o consumo (CARVALHO JUNIOR, 2013). A equação 18 apresenta o cálculo para o consumo de energia onde, deve-se obter a unidade em kWh (quilowatt-hora).

$$Consumo = P . tempo de uso$$
(18)

Onde "P" é a Potência Ativa e deve ser em kW e o tempo de uso deve ser informado em horas.

2.3 Consumo de Energia em Usinagem

Existem alguns trabalhos que estudaram o consumo de energia durante a usinagem e, todos eles visam sua redução. Segundo Oda; Kawamura; Fujishima (2012), a redução de energia de uma linha de fabricação com várias máquinas pode ser reduzindo o tempo de ciclo e, dentre os equipamentos periféricos, o grande vilão de consumo são as bombas de refrigeração das máquinas no qual o autor sugere a redução do número dessas bombas, dentro do possível.

No conceito de desperdício, Luoke Hu et al (2017) citam que, durante a usinagem, a redução do consumo de energia não cortante de uma máquinaferramenta pode chegar a 8% de economia, dependendo das características da peça. A energia não cortante é toda a energia que é consumida pela máquina-ferramenta que não vai para o corte em si, por exemplo, aceleração e desaceleração da rotação do eixo árvore, posicionamentos e movimentos desnecessários, entre outros.

Conforme estudo realizado por Solheid (2016), o consumo de energia pode ser reduzido através de estratégias de usinagem para diferentes regiões da cavidade, a autora analisou uma região central, na qual a estratégia linear zigue-zague foi a mais econômica, e uma região nos cantos da cavidade, onde a passagem da ferramenta é mais estreita, a estratégia paralela ao contorno foi a que consumiu menor energia. A autora cita ainda que essas duas regiões devem ser usinadas com ferramentas de

diâmetro diferentes, sendo a ferramenta menor para os cantos e a maior para a região central, visando a redução de tempo.

Uma máquina-ferramenta, mais precisamente um centro de torneamento, foi analisado o consumo de energia durante a usinagem de um processo específico. Pelegrino (2018) constatou que a energia dos periféricos (sistema hidráulico, bombas de refrigeração, entre outros) chegou a cerca de 40% de toda a energia consumida pela máquina, enquanto o corte consumiu cerca de 20%. O autor cita que medidas como, acionamento do sistema hidráulico e das bombas de refrigeração de alta pressão somente no momento de usar pois, mesmo não sendo usadas, permanecem ligadas.

De acordo com Zanuto (2016), a utilização de fresa de metal duro ao invés de aço rápido e uma broca de aço rápido reforçado com cobalto ao invés de aço rápido convencional proporcionaram uma economia de energia bastante significativa (94 e 40%, respectivamente) devido ao aumento das velocidades de corte, ou seja, a escolha correta do material da ferramenta pode gerar uma redução no consumo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais e os procedimentos utilizados para analisar o consumo de energia em diferentes estratégias de desbaste e acabamento de uma cavidade típica de molde de injeção de plásticos.

3.1 Máquina-Ferramenta

A máquina utilizada para os ensaios foi um Centro de Usinagem com tecnologia 5 eixos, comando Heidenhain versão iTNC 530. A máquina possui rotação máxima de 10000 rpm. Os limites dos cursos dos eixos lineares são de 885 em X, 800 em Y e 500 em Z e para os eixos rotativos são de -30° a 120° no eixo A e 360° no eixo C. Na Figura 21 vemos a máquina-ferramenta que foi utilizada (BRIDGEPORT, 2008).



Figura 21 – Centro de usinagem utilizado nos ensaios

Fonte: (Elaborado pelo autor)

3.2 Ferramentas Utilizadas

A usinagem foi dividida em desbaste e acabamento da cavidade do molde sendo que, para a usinagem do desbaste foi utilizada uma fresa de diâmetro de 20 mm com pastilhas redondas de 10mm (código do suporte do fabricante Sandvik R300-020A25L-10L e da pastilha R300-1032M-PM 4230) ilustrada na Figura 22, e para o acabamento foram utilizadas uma fresa esférica de diâmetro de 20mm (código do fabricante Walter MC416-20.0A4L-WJ30TF), uma fresa toroidal de 10mm com raio de ponta 3mm com 4 cortes (código do fabricante Walter H2038217-10-3) e um suporte diâmetro de 12mm com pastilhas redondas de 5mm com 3 cortes (código do fabricante Iscar ER D07A12-3-C12-05), ilustrada na Figura 23.

A escolha, por estas ferramentas de acabamento, foi baseada na geometria do corpo de prova e por serem de uso comum em empresas. Durante a execução das provas e conforme a estratégia adotada, elas foram sendo alternadas.



Figura 22 - Fresa diâmetro de 20mm utilizada no desbaste

Fonte: (SANDVIK, 2018)



Figura 23 – Ferramentas utilizadas para acabamento

Fonte: (Elaborado pelo autor)

3.2.1 Parâmetros de Corte

Os parâmetros de corte controlados nos ensaios foram a velocidade de corte (v_c) , o avanço por dente (f_z) e a profundidade de corte (a_p) .

Considerando que a usinagem de uma cavidade de molde não é uma produção em série porque se trata de um produto único, tanto na velocidade de corte máxima quanto na velocidade de corte mínima foi utilizada a recomendação feita pelo fabricante *Sandvik*. O critério desta escolha, das velocidades de corte serem as recomendadas pelo fabricante, se deu pelo motivo da fixação da peça e do corpo de prova serem bastante estáveis.

Para o desbaste foram utilizados avanços de 0,12mm/dente e 0,28mm/dente, ambos recomendados como avanço mínimo e máximo pelo fabricante.

A penetração de trabalho, identificada como a_e, foi utilizada a 70% do diâmetro do topo da fresa, ou seja, do diâmetro paralelo do topo da mesma.

A profundidade de corte utilizada no desbaste foi de 0,67mm e 1,17mm. Foram utilizadas essas profundidades visando manter o ângulo de posição da fresa com 30° e 40°, respectivamente. Essas profundidades foram escolhidas de acordo com a recomendação do fabricante sugerindo a aplicação com ângulos de posição menores que 45°.

Os parâmetros de corte para o acabamento seguiram o mesmo critério usado no desbaste, considerando a mínima e a máxima recomendada pelo fabricante de cada ferramenta. Por se tratar de superfície complexa, a profundidade de corte foi o sobremetal deixado pelo desbaste (em torno de 0,3 a 0,4mm) e a penetração de trabalho (a_e) foi constante em 0,3mm. O avanço (f_z) para o acabamento foi selecionado conforme descrito no item 3.5 Procedimentos Experimentais deste trabalho.

As combinações dos parâmetros de corte para o desbaste e para o acabamento estão descritos nas Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente. A descrição dos ensaios de desbaste foi dada de forma sequencial, mas os gráficos de resultados serão descritos as condições para facilitar a interpretação. O mesmo se aplica aos ensaios de acabamento, ou seja, nomenclatura contendo as condições visando facilitar a interpretação.

Descrição	Condição	a _p (mm)	a _e (mm)	v _c (m/min)	fz (mm/dente)
Desbaste 1	a _p 0,67; v _c 150; f 0,12			150	0.12
Desbaste 2	a _p 0,67; v _c 210; f 0,12	0.67		210	0,12
Desbaste 3	a _p 0,67; v _c 150; f 0,28	0,01		150	0.28
Desbaste 4	a _p 0,67; v _c 210; f 0,28		7	210	0,20
Desbaste 5	a _p 1,17; v _c 150; f 0,12			150	0 12
Desbaste 6	a _p 1,17; v _c 210; f 0,12	1.17		210	0,12
Desbaste 7	a _p 1,17; v _c 150; f 0,28	.,		150	0.28
Desbaste 8	a _p 1,17; v _c 210; f 0,28			210	-,-•

Tabela 2 - Combinação de parâmetros de corte para o desbaste

Fonte: (Elaborado pelo autor)

Tabela 3 – Combinação de parâmetros de corte para o acabamento

Condição	Ferramenta	a _e (mm)	v _c (m/min)	fz (mm/dente)		
5 Eixos vc maior	Ø10 R3 / Esférica		314 / 256	0 10 / 0 19		
5 Eixos v _c menor	Ø20mm		194 / 125			
Radial Ø10 vc 314			314			
Z Cons Ø10 v _c 314	Ø10 B3mm		011			
Radial Ø10 vc 194		0.3	194			
Z Cons Ø10 v _c 194		0,0		0 10		
Radial Ø12 vc 300			300	0,10		
Z Cons Ø12 v _c 300	Ø12 B2 5mm		000			
Radial Ø12 vc 120			120			
Z Cons Ø12 vc 120			0			

Fonte: (Elaborado pelo autor)

3.3 Geometria do Corpo de Prova

O corpo de prova utilizado nos ensaios foi desenvolvido num bloco de aço AISI P20 com dimensões de 140x140x50mm. Esse material foi escolhido devido às suas características serem apropriadas para a aplicação em moldes de injeção de plásticos, por exemplo, boa polibilidade e resistência a compressão. Segue na Tabela 4 a composição química do P20.

C %	Mn %	Cr %	Mo %	Ni %	V %	Outros %
0,36	1,60	1,85	0,20	0,75	-	-
Easter (VIII ADES METALS 2010)						

Tabela 4 - Composição química do P20

Fonte: (VILLARES METALS, 2019)

A geometria da cavidade, conforme a Figura 24, foi desenvolvida de acordo com as características comuns de uma cavidade de molde, com 20mm de profundidade, 165,4cm³ de volume, com as paredes internas inclinadas em 3° e chanfro superior de 2mm.



Fonte: (Elaborado pelo autor)

3.4 Analisador de Energia

Para realizar as medições de energia e posteriormente calcular a energia específica e as potências consumidas durante o processo de usinagem, foi utilizado um analisador de energia da marca Embrasul, modelo RE 4001 (Figura 25), que confere uma precisão de 0,7% para análises das potências elétricas. Além disso, o analisador tem um tempo mínimo de integração de 200 milissegundos, conferindo uma ótima precisão com amostras bem curtas entre si, possibilitando a medição de picos rápidos de potência.



Figura 25 – Analisador de energia

Fonte: (Elaborado pelo autor)

3.5 Procedimentos Experimentais

Os ensaios foram divididos em três fases: preparação do corpo de provas, desbaste e acabamento.

Na preparação do corpo de provas, para garantir a padronização e a repetibilidade de posicionamento dos ensaios, as peças foram esquadrejadas em máquina CNC.

Para a fase de desbaste foi utilizada a estratégia denominada de "desbaste do modelo", na qual a ferramenta penetra no material por movimentos em hélice até uma determinada profundidade; após atingir essa profundidade, a ferramenta usina removendo o material até que alcance a extremidade da cavidade, para então iniciar a próxima passada. Ao todo serão ensaiadas oito combinações de parâmetros de desbaste e, em cada ensaio será realizada uma réplica. Nos ensaios do desbaste também foi realizada uma operação sem a peça, denominado como usinagem em vazio, com o proposto de se obter a potência de energia consumida com o corte.

Na fase de acabamento, além dos parâmetros já apresentados anteriormente, foram ensaiadas estratégias de usinagem diferentes. Todas as estratégias foram separadas em três grupos, o primeiro destinado a usinagem com tecnologia de 5 eixos, no qual foram utilizadas duas ferramentas com as velocidades de corte na condição máxima e no outro ensaio, as mesmas ferramentas e estratégias com a velocidade de corte na condição mínima.

Para usinar a superfície toda, cada ensaio desse grupo, foi composto pela combinação de três estratégias, sendo uma para acabar o fundo, outra para o chanfro, ambas com a ferramenta Ø10mm com raio de 3mm, e por último o acabamento das paredes inclinadas com a ferramenta esférica de Ø16mm. As operações dessas estratégias estão representadas na Figura 26 e foram extraídas do *software Autodesk PowerMill*, onde a Figura 26a é o caminho da ferramenta para o acabamento do fundo, a Figura 26b é do chanfro e a Figura 26c é do acabamento das paredes. Para as estratégias de acabamento não foram realizadas usinagens em vazio pois se trata de uma comparação de consumo de energia entre estratégias.



Figura 26 - Caminho da ferramenta das operações de acabamento do 1º grupo

Fonte: (Elaborado pelo autor)

O segundo e o terceiro grupos foram destinados à usinagem com tecnologia 3 eixos, sendo que o segundo grupo utilizou uma ferramenta de Ø10mm com raio de ponta de 3mm e o terceiro grupo uma ferramenta Ø12mm com raio de ponta de 2,5mm. Em ambos grupos foram utilizadas duas estratégias, a "Z Constante e Otimizado" e a "Radial", nomes conforme o *software Autodesk PowerMill*. Suas escolhas ocorreram porque nessas estratégias a ferramenta não perde o contato com a peça durante a varredura de toda a superfície. Na Figura 27 pode-se observar a trajetória da ferramenta nas duas estratégias de acabamento do grupo 2 e 3 que totalizaram 10 ensaios e em todos foi realizada uma réplica. Na Tabela 5 segue a relação de todas as variáveis dos ensaios de acabamento.

Grupo	Ensaio	Condição	Ferramenta	a _e (mm)	v _c (m/min)	f _z (mm/dente)	Estratégia
1° Grupo	1	5 Eixos v₀ maior	Ø10 R3mm	0,3	314	0,10	Fundo plano
							Chanfro c/ lateral de ferramenta
			Esférica Ø20mm		256	0,19	Paredes c/ lateral de ferramenta
		5 Eixos v _c menor	Ø10 R3mm		194	0,10	Fundo plano
	2			0,3			Chanfro c/ lateral de ferramenta
			Esférica Ø20mm		125	0,19	Paredes c/ lateral de ferramenta
2° Grupo	3	Radial Ø10 v₀ 314		0,3	314	0,10	Radial
	4	Z Cons Ø10 v _c 314	Ø10 D2mm	0,3			Z Constante e Otimizado
	5	Radial Ø10 v₀ 194	Ø IU R3mm	0,3	194		Radial
	6	Z Cons Ø10 v _c 194		0,3			Z Constante e Otimizado
3° Grupo	7	Radial Ø12 v _c 300	(11) D2 5mm	0,3	300		Radial
	8	Z Cons Ø12 v _c 300		0,3			Z Constante e Otimizado
	9	Radial Ø12 v _c 120	שוב הב,טווווו	0,3	120		Radial
	10	Z Cons Ø12 v _c 120		0,3	120		Z Constante e Otimizado

Tabela 5 – Estratégias e parâmetros de corte para o acabamento

Fonte: (Elaborado pelo autor)

Os ensaios do 2° e 3° grupo foram com estratégias iguais, porém, com ferramentas diferentes. As duas ferramentas, para o acabamento, em 3 eixos foram escolhidas por serem bastante comuns nas empresas de fabricação de moldes e por possuírem características diferentes. Uma é de metal duro inteiriça, o que facilita o batimento das arestas de corte, a outra é com pastilhas redondas, o que facilita a substituição quando ocorre desgastes na produção. Ambas ferramentas são indicadas para essa usinagem pois a região de contato entre a ferramenta e a peça é mais intensa no raio de ponta da fresa.



Figura 27 – Caminho da ferramenta na estratégia radial (a) e Z constante e otimizado (b)

Fonte: (Elaborado pelo autor)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O capítulo a seguir descreve os resultados obtidos nos ensaios apresentados anteriormente mantendo duas etapas de análises, sendo o desbaste, que contempla as variações dos parâmetros de corte em uma estratégia de desbaste da cavidade e acabamento, que contempla as variações de parâmetros de corte e de estratégias de acabamento realizadas na cavidade.

4.1 Desbaste

Durante os ensaios foi monitorada a potência consumida da máquina em duas situações, usinando o corpo de provas conforme a Figura 28 e medições não usinando, ou seja, deslocamento em vazio (sem peça na morsa). Isso foi feito para que fosse possível avaliar a potência de corte efetiva dos ensaios.



Figura 28 – Fixação do corpo de provas na morsa

Fonte: (Elaborado pelo autor)

A Figura 29 apresenta o caminho da ferramenta no desbaste correspondente à uma passada completa realizado no *software Autodesk PowerMill*. Como o material a ser removido está maciço, a entrada no material em cada altura se dá por uma trajetória circular e em hélice, ao atingir a altura desejada a ferramenta se desloca lateralmente contornando o perfil e incrementando o valor da penetração de corte (ae de 7mm).



Figura 29 - Caminho da ferramenta no desbaste

Fonte: (Elaborado pelo autor)

Segue na Figura 30 os gráficos da Potência consumida durante as usinagens. Nota-se que, à medida que as velocidades de corte e avanços vão aumentando (do Desbaste 1 ao 8) a amplitude da potência medida também aumenta, representando assim a variação gráfica na potência de corte de acordo com os parâmetros adotados. Nota-se também alguns picos de potência ao longo da usinagem que se repetem frequentemente durante toda a usinagem. Esses picos são característicos da entrada da ferramenta na peça, pois a entrada é dada em movimentos de hélice e a área de contato entre a ferramenta e a peça é maior nesse momento, gerando assim um consumo de potência maior.



















Fonte: (Elaborado pelo autor)

Na Figura 31 tem-se um gráfico de sinal ampliado ilustrando as etapas da usinagem de uma passada. Cada ensaio possui suas características de acordo com os parâmetros utilizados, mas a entrada em hélice, início da usinagem e a usinagem em si são característicos do processo utilizado e comum a todos os ensaios. Nota-se que durante a usinagem ocorreu vários picos, estes são referente à geometria do corpo de provas, no qual possuem alguns cantos no perfil em que o ângulo de abraçamento do contato ferramenta/peça aumenta.



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Com o propósito de se obter a potência consumida com o corte, foram realizadas medições na máquina utilizando a mesma programação dos ensaios de desbastes apresentados anteriormente, porém sem o corpo de prova, operação denominada como usinagem no vazio. Esta operação possibilita verificar a potência consumida com rotação do *spindle*, a movimentação dos eixos, entre outras medições, ou seja, tudo menos o corte propriamente dito. Segue na Figura 32 os gráficos dos sinais de potência das usinagens no vazio.



Figura 32 – Potência consumida durante as usinagens no vazio











Fonte: (Elaborado pelo autor)

Através das medições usinando, tanto no 1º ensaio quanto no 2º (réplica), e no vazio foi possível de se obter a potência consumida com o corte, para isso, foi calculada a média de potência consumida usinando nos dois ensaios e subtraindo a potência consumida no vazio, apresentada na Figura 33. As barras de erros representam as variações dos ensaios juntamente com a incerteza do analisador de energia de 0,7%, citado na seção 3.4.



Figura 33 – Potência consumida com o corte

Foram realizadas ainda medições com a máquina somente ligada, o que foi denominado como "*stand by*", assim possibilitou a divisão da potência consumida pela máquina em 3 grupos: potência para mantê-la ligada (*stand by*), potência de corte (obtida anteriormente) e a potência consumida com rotação e movimentações dos eixos da máquina. Houve uma pequena variação nesse último grupo, isso ocorreu porque os ensaios ocorreram com velocidades de cortes e percursos diferentes, pois, há duas profundidades de corte ensaiadas.

Observou-se que, para as mesmas velocidades e profundidades de corte, houve um aumento no consumo de potência ao passar o avanço de 0,12mm para 0,28mm. Pode-se dizer então que esse aumento de potência é caracterizado pelo aumento da força de avanço (Figura 34).

Outro fator relevante nessa análise é que a máquina consome muita potência somente para permanecer ligada, nota-se uma parcela que variou entre 55 e 48% (primeira e última condição, respectivamente) de toda a potência consumida durante a usinagem somente para a máquina em si. Esse dado reafirma o estudo de Delgado Montes (2012), no qual a autora chegou à conclusão de que cerca de 50% da energia consumida é somente para a máquina e os outros 50% é para o processo, embora as máquinas não sejam iguais, apresentaram resultados similares.

Fonte: (Elaborado pelo autor)



Figura 34 - Composição da potência consumida

Fonte: (Elaborado pelo autor)

A Figura 35 mostra um comparativo das potências de corte consumidas entre os ensaios de acordo com os parâmetros de profundidade de corte, velocidade de corte e avanço. Observa-se na Figura 35a que a variação de potência consumida se relaciona com o tamanho da área de corte maior. Porém, quando comparado com as velocidades de corte (Figura 35b) e o avanço (Figura 35c) nota-se que há uma faixa entre os parâmetros de corte utilizados nestes ensaios em que não há variação significativa no consumo de potência.



Figura 35 - Comparativo entre as potências de acordo com cada parâmetro

Fonte: (Elaborado pelo autor)



Fonte: (Elaborado pelo autor)



Figura 37 – Gráfico de interação para potência (kW)

Fonte: (Elaborado pelo autor)

Nota-se que as maiores variações de potência se deram na alteração de profundidade de corte (Figura 36) e na Figura 37 certifica-se que a profundidade de corte é o parâmetro que mais altera o consumo de potência, no qual, para a mesma velocidade de corte obteve a maior variação.

De acordo com a equação 19, do cálculo de potência, observa-se que os parâmetros de profundidade de corte (a_p) , avanço (f_z) e a velocidade de corte (v_c) , usadas no cálculo da rotação (n), possuem relação direta no cálculo da potência de

corte, porém, essa relação não é proporcional, pois cada um desses parâmetros influencia de maneira diferente na pressão específica do material (Ks_m).

$$Pc = \frac{Ks_m \cdot a_e \cdot a_p \cdot f_z \cdot z \cdot n}{60 \cdot 10^6}$$
(19)



Fonte: (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014)

Na Figura 38, apresentada anteriormente como Figura 5, é possível notar que a profundidade de corte possui baixa influência na pressão específica (Figura 38a), no qual, comparanda as profundidades usadas nos ensaios com as profundidade usadas no gráfico, a variação do K_s está em torno de 10% aproximadamente. A velocidade de corte apresentou uma influência mais significativa no K_s quando utilizada com a profundidade de corte menor (0,67mm), pois a potência de corte se manteve estável para a_p de 0,67mm e f de 0,28mm (Figura 35b – Desbaste3/4), ou seja, alterando a velocidade de corte praticamente não se alterou a potência de corte. Para a profundidade de corte de 1,17mm, a potência não permaneceu estável, alterou cerca de 30%, isso ocorre por causa do aumento da profundidade de corte não influenciar significativamente K_s. O avanço, parâmetro analisado na Figura 35c, possui uma maior influência no K_s demonstrado na Figura 38c, onde, para a faixa de avanço usada nos ensaios (0,12 e 0,28mm/dente) observa-se que, quanto maior a dureza dos materiais ensaiados, maior é a variação do K_s, podendo chegar a variações de até 60%, aproximadamente.

Baseado no conjunto de opções entre os limites de cada parâmetro utilizado apresenta-se na Figura 39 um gráfico cubo com uma visão tridimensional das três variáveis ensaiadas nesse trabalho. A partir deste gráfico pode-se estimar o consumo de potência dentro dos limites de cada parâmetro.



Figura 39 – Gráfico cubo para potência (kW)

Fonte: (Elaborado pelo autor)

A Figura 40 mostra o tempo gasto com as usinagens, sendo possível observar que a medida em que os parâmetros de usinagem aumentam o tempo diminui.



Figura 40 – Tempo de usinagem das estratégias de desbaste

Sabe-se que o tempo é um fator que influencia diretamente o consumo de energia, porém como houve variação de consumo e variação de tempo entre os ensaios, buscou-se uma relação entre o volume de material removido por guilowatthora consumido. Na Figura 415 nota-se que, entre as condições de desbaste, o desbaste 8 (a_p 1,17mm; v_c 210m/min; f 0,28mm) é o que remove mais material por

Fonte: (Elaborado pelo autor)

quilowatt-hora gasto e, consequentemente, é a condição mais econômica em relação ao consumo de energia.



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Como segunda opção de parâmetros a ser utilizado no desbaste foi realizado um critério de escolha por meio de comparação entre os parâmetros de tempo e volume de material removido, tendo como referência o desbaste 8 (a_p 1,17mm; v_c 210m/min; f 0,28mm). A Figura 42 apresenta essa comparação, no qual o desbaste 8 foi considerado em 0% e as demais condições apresentam as diferenças em porcentagem relacionadas a essa condição. Nota-se que o desbaste 7 é a condição que apresenta a menor diferença em relação ao desbaste 8 com cerca de 22% a menos de volume de cavaco por quilowatt-hora e 36% a mais de tempo de usinagem.



Fonte: (Elaborado pelo autor)

Além do consumo de energia, é comum em usinagem se preocupar com os desgastes das ferramentas. Na Figura 44 é possível observar as imagens extraídas em microscópio Olympus GX41 através do *software Analysis Starter*. Nota-se que as estratégias que possuem as maiores velocidades de corte e avanços são as que obtiveram menores desgaste da aresta de corte, o que caracteriza que, durante a entrada da ferramenta na peça por hélice o diâmetro efetivo de contato é menor que o diâmetro da fresa, portanto, a rotação do *spindle* menor causou avarias na pastilha devido ao fato de atuar efetivamente com velocidade de corte fora do especificado. Outro ponto relevante a ser observado é que a usinagem com profundidade menor executa a usinagem com mais passadas e, portanto, com mais entradas em hélice. Como a entrada é uma usinagem onde a potência de corte fica maior devido a área de contato entre a ferramenta e a peça ser maior, isso justifica os desgastes maiores nas profundidades de corte menores. Os desgastes apresentados nas pastilhas foram da usinagem de uma cavidade e a região desgastada está demonstrada na Figura 43, que é a região analisada no microscópio.





Fonte: (Elaborado pelo autor)



Figura 44 – Desgaste das pastilhas nas estratégias de desbaste

Fonte: (Elaborado pelo autor)

4.2 Acabamento

As estratégias de acabamento foram divididas em grupos, sendo "Acabamento do 1º Grupo" com as estratégias de 5 eixos acionado, "Acabamento do 2º Grupo" com a ferramenta toroidal ø 10mm raio 3mm e "Acabamento do 3º Grupo" com a ferramenta toroidal ø 12mm raio 2,5mm. Segue, nas próximas seções, os resultados dos acabamentos separados por grupo.

4.2.1 Acabamento do 1º Grupo

As estratégias de acabamento do primeiro grupo possuem características que só podem ser realizadas em máquina com 5 eixos e, portanto, necessitam de uma combinação de operações para concluir a usinagem da cavidade toda, ou seja, uma estratégia para o fundo, uma para o chanfro e outra para as paredes, conforme citado no capítulo 3. Segue na Figura 45 os gráficos da potência consumida durante as usinagens do 1° grupo de acabamento. Os dois gráficos são iguais, somente foi alterado a escala para possibilitar melhor visualização desses picos.



Figura 45 – Potência consumida durante as usinagens de acabamento do 1º grupo

Fonte: (Elaborado pelo autor)

Por se tratar de uma usinagem consideravelmente rápida, a diferença entre as velocidades de corte dos dois ensaios não resultou em grandes ganhos de tempo de usinagem, totalizando uma diferença de 10,5% de acréscimo no tempo de usinagem para a estratégia com velocidade de corte menor. O mesmo se mostrou no consumo de potência, a estratégia com v_c menor consumiu 5,7% menos potência do que a com v_c maior. Já o consumo de energia em quilowatt-hora apresentou um aumento de apenas 4% na estratégia de v_c menor em relação a v_c maior (0,465 p/ 0,447kWh). Isso mostra que, embora a usinagem das estratégias serem relativamente rápidas, o aumento de produtividade esperado pelo aumento de velocidade de corte não foi representativo nesse ensaio, pois, uma variação de 60 e 100% nas velocidades de corte de cada ferramenta, além de não representar ganhos significativos de tempo para a v_c maior, a estratégia de v_c menor praticamente equilibrou o consumo de energia devido a relação tempo/potência de cada estratégia. Outro fator importante observado é que na usinagem em 5 eixos a máquina precisa se posicionar, através dos eixos simultâneos, em cada ângulo da geometria da peça. Pode-se observar que durante a usinagem do fundo da cavidade a potência se manteve estável pois, nesse momento, a máquina se desloca somente nos eixos X e Y permanecendo os demais eixos parados, enquanto a usinagem do chanfro e das paredes os picos de consumo de potência são claros, no qual são causados pelos movimentos dos eixos que se movimentam simultaneamente para se obter os ângulos desejados em cada momento da usinagem.

Segue na Figura 46 os comparativos entre as estratégias. Nesse grupo as rugosidades se mantiveram estáveis.



Figura 46 - Comparativo das estratégias de acabamento do 1° grupo

Fonte: (Elaborado pelo autor)

4.2.2 Acabamento do 2º Grupo

As estratégias de acabamento do 2º grupo analisadas nessa seção correspondem aos ensaios realizados com a ferramenta toroidal de 10mm com raio de ponta 3mm e 4 cortes (código do fabricante Walter H2038217-10-3). Foram ensaiadas duas velocidades de corte e duas estratégias, totalizando 4 ensaios e foram usinadas duas vezes cada estratégia.

As características dessas estratégias é que ambas são de usinagem em 3 eixos, ou seja, o eixo da ferramenta permanece na posição vertical perpendicular ao plano do fundo da cavidade e a usinagem se dá por uma varredura da ferramenta na superfície da peça seguindo o percurso característico da estratégia. No acabamento radial a ferramenta inicia na extremidade superior da superfície a ser usinada e se desloca para o centro seguindo pela superfície e depois volta para a extremidade, desloca lateralmente o valor do a_e, volta ao centro e segue dessa maneira até o término da varredura da superfície. No acabamento Z constante e otimizado a ferramenta inicia a varredura de cima para baixo e vai descendo de forma espiral o valor do a_e contornando a superfície por meio de voltas até chegar ao centro da cavidade.
A Figura 47 apresenta o gráfico total das estratégias de acabamento do 2° grupo. O consumo médio de potência foi bastante similar (praticamente iguais) nas estratégias que possuem as mesmas velocidades de corte, em torno de 7100 W para as estratégias Radial e Z Constante e Otimizado com v_c de 314m/min e 5900 W para as estratégias Radial e Z Constante e Otimizado com v_c de 194m/min, isso ocorreu devido ao fator predominante para o aumento de consumo de potência nesses ensaios ser a rotação do *spindle*, no qual foram usadas 9995 rpm e 6175 rpm respectivamente.











Fonte: (Elaborado pelo autor)

Nota-se na Figura 47 que os dois ensaios com a estratégia radial, apresentaram uma amplitude de consumo de potência maior que a estratégia Z Constante e Otimizado, embora as médias de potência consumida tenham sido similares seguindo a velocidade de corte. Isso se deu devido à trajetória da própria estratégia, ou seja, em ambas estratégias as ferramentas se deslocam simultaneamente em 3 eixos, porém, o deslocamento da ferramenta na estratégia radial se dá de forma mais constante e significativa no eixo Z, chegando-se à conclusão que os deslocamentos do eixo Z foram os causadores de tal amplitude. Na Figura 48 têm-se os gráficos ampliados para análise do percurso gerado no acabamento radial no qual, em cada pico do gráfico a ferramenta está na superfície superior da cavidade e em cada vale a ferramenta está no fundo da cavidade, ou seja, há um consumo de potência maior quando o eixo Z Constante e Otimizado isso não acontece, pois, a ferramenta se desloca mais significativamente pelos eixos X e Y descendo o eixo Z em trajetória espiral com cerca de 0,3mm em cada volta no perfil da cavidade.



Figura 48 – Comparativo gráfico entre as estratégias Radial e Z Constante e Otimizado

Fonte: (Elaborado pelo autor)

O resumo dos resultados desses ensaios pode ser observado na Figura 49 onde há os comparativos das estratégias testadas nesta seção. Nota-se que os tempos das estratégias Radial são mais elevados em relação à estratégia Z Constante

e Otimizado devido a estratégia Radial necessitar de uma distância maior a ser percorrida pela ferramenta para realizar a varredura da superfície toda, uma vez que a penetração de trabalho (ae) de 0,3mm se dá na extremidade da cavidade e, ao se deslocar ao centro essa penetração de trabalho vai diminuindo até chegar a zero no centro da peça. O consumo em quilowatt-hora se mostrou mais econômico na estratégia Z Constante e Otimizado justamente devido ao tempo de usinagem ser o fator predominante no consumo. E entre as duas estratégias Z Constante e Otimizado ensaiadas (vc 314 e 194m/min), uma diminuição na velocidade de corte de 38,2% representou um aumento no tempo de usinagem de 18%. Em termos de consumo de energia, a escolha entre a velocidade de corte de máxima produção e a velocidade de mínimo custo deve-se optar pela estratégia Z Constante e Otimizado com vc de 194m/min, que possui a velocidade de corte menor pois, de acordo com Diniz (2014), o parâmetro que mais influencia o desgaste da ferramenta é a velocidade de corte e, por se tratar de uma usinagem não seriada o acréscimo de 18% no tempo não deve ser relevante em termos de produtividade, conservando assim o desgaste da ferramenta permitindo uma gualidade maior do início ao fim da cavidade. Além disso, o consumo de energia em quilowatt-hora se equilibrou entre as velocidades de corte ensaiadas, ou seja, a estratégia Z Constante e Otimizado gastou mais tempo de usinagem, porém, consumiu menos potência, o que resultou em um consumo de energia praticamente igual à mesma estratégia com velocidade de corte maior. A rugosidade se mostrou instável com uma melhor condição na estratégia Z Constante e Otimizado com v_c de 194m/min. Essa estratégia tem uma tendência de deixar a rugosidade melhor em relação à radial pois, a ferramenta permanece em corte concordante por toda a usinagem, enquanto na estratégia Radial, a ferramenta executa trajetória em zigue-zague do centro para a extremidade da superfície no qual, uma passada usina em corte concordante e na volta com corte discordante.



Figura 49 – Comparativo das estratégias de acabamento do 2º grupo

Fonte: (Elaborado pelo autor)

4.2.3 Acabamento do 3º Grupo

As estratégias de acabamento do 3º grupo analisadas nesta seção correspondem aos ensaios realizados com a ferramenta toroidal de 12 mm com raio de ponta 2,5mm e 3 cortes (código do fabricante Iscar ER D07A12-3-C12-05). Foram ensaiadas duas velocidades de corte e duas estratégias, totalizando 4 ensaios e foram usinadas duas vezes cada estratégia. As estratégias de acabamento do 3º grupo correspondem às mesmas do acabamento do 2º grupo somente com a utilização de ferramenta diferente, justificada a escolha no item 3.5 Procedimentos Experimentais.

As estratégias Radial e Z Constante e Otimizado são as mesmas descritas no capítulo anterior ficando assim, para este momento, um comparativo entre as estratégias e entre as ferramentas. As velocidades de corte recomendadas para essa ferramenta foram de 300 e 120m/min o que gerou uma rotação do *spindle* de 7958 e 3183 rpm respectivamente. Segue na Figura 50 o gráfico total de potência consumida das estratégias de acabamento do 3° grupo. O consumo médio de potência se mostrou bastante similar (praticamente iguais) nas estratégias que possuem as mesmas velocidades de corte, em torno de 6400 W para as estratégias Radial e Z Constante e Otimizado com v_c de 300m/min e 5400 W para as estratégias Radial e Z

Constante e Otimizado com v_c de 120m/min, isso ocorreu devido ao fator predominante para o aumento de consumo de potência média nesses ensaios ser a rotação do *spindle*.



Figura 50 – Potência consumida durante as usinagens de acabamento do 3º grupo

Fonte: (Elaborado pelo autor)

Embora as potências médias sejam similares nas estratégias de acabamento com a mesma velocidade de corte, os gráficos de consumo, demonstraram o mesmo comportamento apresentado na seção anterior, ou seja, uma amplitude de consumo de potência maior na estratégia Radial devido aos movimentos no eixo Z serem predominantes nesse caso.

O resumo dos resultados desses ensaios pode ser observado na Figura 51 onde há os comparativos das estratégias ensaiadas nessa seção. Nota-se que os tempos dos ensaios que correspondem a estratégia Radial são mais elevados em relação a estratégia Z Constante e Otimizado pelo mesmo motivo descrito na seção anterior, ou seja, a estratégia Radial necessitar de uma distância maior a ser percorrida pela ferramenta para realizar a varredura da superfície toda. O consumo em quilowatt-hora se mostrou mais econômico na estratégia Z Constante e Otimizado justamente ao fato de o tempo de usinagem ser fator predominante no consumo de energia. E entre as duas estratégias Z Constante e Otimizado ensaiadas neste grupo, observa-se que uma diminuição na velocidade de corte de 60% representou um aumento no tempo de usinagem de 126%. Em termos de consumo de energia a escolha entre a velocidade de corte de máxima produção e a de mínimo custo devese escolher a velocidade de corte maior pois, embora tenha um desgaste maior na ferramenta, a diferença de tempo é bastante significativa o que, por sua vez, representou um consumo em quilowatt-hora de cerca de metade do consumo da estratégia com velocidade de corte menor. A rugosidade nestes casos também se mostrou instável com uma condição melhor para as duas estratégias com velocidade de cortes maiores.



Figura 51 – Comparativo das estratégias de acabamento do 3° grupo

Fonte: (Elaborado pelo autor)

5 CONCLUSÕES

No desbaste, utilizar os parâmetros de corte que consumam maior potência, pois, esse aumento de potência não se demonstrou significativo no consumo de energia, dando preferência em aumentar os avanços;

O parâmetro que mais afetou o consumo de energia foi a profundidade de corte devido à baixa influência que possui na pressão específica;

A estratégia de acabamento deve ser escolhida levando em consideração o comprimento da trajetória da ferramenta;

Para os casos em que as velocidades de corte recomendadas possuírem uma diferença de aproximadamente 60% entre elas, deve-se escolher a velocidade menor, pois o aumento de tempo na velocidade menor não gerou um consumo de energia maior;

Logo, a combinação adequada para a usinagem de uma cavidade de molde deve possuir: um desbaste em que se convém direcionar a maior parcela de potência consumida pela máquina para o corte e um acabamento com comprimento da trajetória da ferramenta menor evitando as estratégias com deslocamentos significativos no eixo Z.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Na operação de desbaste houve alguns lascamentos na pastilha devido ao diâmetro efetivo de contato ser menor que o diâmetro da ferramenta (pastilhas redondas). Uma sugestão para trabalhos futuros é de testar velocidades de corte diferentes para a entrada em hélice, visando a redução desses lascamentos.

Realizar ensaios mais detalhados em estratégias de acabamentos com deslocamentos no eixo Z onde será possível avaliar melhor o comportamento do consumo de potência com o eixo subindo e descendo.

Testar estratégias de acabamento em que as o sentido de corte concordante e discordante não se alternam visando um acabamento mais estável.

REFERÊNCIAS

AMORIN, J. R.; VOLPATO, N. Um estudo visando ampliar o campo de aplicação do ferramental rápido usinado. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E FABRICAÇÃO, 5., 2005, Joinville. **Anais** [...]. Joinville: COBEF, 2005. Disponível em: http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2005/COF_131005316.pdf. Acesso em: 02 maio 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Nota Técnica Nº 0083/2012-SRD/ANEEL. Junho de 2012. Disponível em http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/065/documento/nota_tec nica_0083_daniel_dir.pdf. Acessado em: 08 jun. 2019.

AXINTE, D.; DEWES, R. Surface integrity of hot work tool steel after high speed milling experimental data and empirical models. **Journal of Materials Processing Technology**, Grécia, v. 127, n. 3, p. 325-335, 2002.

BENARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G. C. Predicting surface roughness in machining: a review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 8, p. 833–844, maio 2003. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00059-2. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/222668694_Predicting_Surface_Roughnes s_in_Machining_a_Review. Acesso em: 07 jun. 2019.

BOYLESTAD, Robert L. Introdução à análise de circuitos. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2012.

BRIDGEPORT. **Operating manual heidenhain iTNC 530 XR300 5AX, XR600 5AX**. Connecticut (USA): Bridgeport, 2008.

CARVALHO JUNIOR, R. de. Instalações elétricas e o projeto de arquitetura. São Paulo: Blucher, 2013.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CHOY, H. S.; CHAN, K. W. Machining tactics for interior corners of pockets. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 20, n. 10, p. 741-748, nov. 2002. DOI: https://doi.org/10.1007/s001700200. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s001700200232. Acesso em: 02 set. 2019

COSTA, A. R. Otimização do processo de fresamento de cavidades com fresas de inserto intercambiáveis. 2003. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia de Fabricação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

DELGADO MONTES, Mary Laura. **Mapeamento e avaliação do consumo de energia na fase de uso de uma máquina-ferramenta visando a sustentabilidade**. 2012. Dissertação (Mestrado em Processos e Gestão de Operações) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. doi:10.11606/D.18.2012.tde-15012013-092748. Acesso em: 27 ago. 2019.

DINIZ, A. D.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber, 2014.

FERRARESI, D. **Fundamento da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

FOWLER, R. J. Eletricidade: princípios e aplicações. São Paulo: Makron, 1992.

GUSSOW, M. Eletricidade básica. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HU, Luoke. *et al.* Sequencing the features to minimise the non-cutting energy consumption in machining considering the change of spindle rotation speed. **Energy**, v. 139, p. 935-946, 15 nov. 2017. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421731410X. Acesso em: 29 ago. 2019.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology**: friction and wear of engineering materials. Londres: Edward Arnold, 1992.

LANZER, E.; STEFFANI, G.; GONÇALVES, T. Previsão de custos de fabricação de moldes para injeção de termoplásticos. **Produção em foco**, v.3, n.8, p. 406-425, 2018. DOU: https://doi.org/10.14521/P2237-5163.2018.0016.0001. Disponível em: http://producaoemfoco.org/producaoemfoco/article/view/641. Acesso em: 29 ago. 2019.

LU, Chen. Study on prediction of surface quality in machining process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 205, n. 1-3, p. 439-450, ago. 2008. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.270. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/222789291_Study_on_prediction_of_surfac e_quality_in_machining_process. Acesso em: 29 ago. 2019.

MAMEDE FILHO, J. Instalações elétricas industriais. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

MATUMOTO, B. H. **Análise da eficiência energética em processos de usinagem**: comparação de tempo e potência entre torno convencional e CNC. 2016. 17 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

MITUTOYO. **Rugosidade superficial**: uma abordagem prática. São Paulo: Mitutoyo, [2009].

MONREAL, M.; RODRIGUEZ, C. A. Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling. **Computer-Aided Design**. v. 35, n.4, p. 395-401, mar. 2003. DOI: 10.1016/S0010-4485(02)00060-X. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/223419411_Influence_of_tool_path_strateg y_on_the_cycle_time_of_high-speed_milling. Acesso em: 06 set. 2019

NASCIMENTO, Leandro da Silva. Uma reflexão acerca da relação entre sustentabilidade e estratégia organizacional. *In*: Encontro Internacional sobre Gestão Ambiental e Meio Ambiente, 19., 2017, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ENGEMA, 2017. Disponível em: http://engemausp.submissao.com.br/19/anais/arquivos/92.pdf. Acesso em: 20 nov. 2019.

NEUMANN, C. Gestão de sistemas de produção e operações: produtividade, lucratividade e competitividade. São Paulo: Elsevier, 2013.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. **Circuitos elétricos**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

ODA, Yohei; KAWAMURA, Yoshikazu; FUJISHIMA, Makoto. Energy consumption reduction by machining process improvement. **Procedia CIRP**, v. 4, p. 120-124, 2012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/journal/procedia-cirp/vol/4/suppl/C. Acesso em: 02 set. 2019.

OLIVEIRA, J. M. Caracterização da integridade de superfícies usinadas para produção de moldes e matrizes. 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2006.

PELEGRINO, D. H. **Estudo do consumo de energia elétrica em máquinasferramentas**, 2018. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-06082018-

112106/publico/DaniloHenriquePelegrinoDEFINITIVO.pdf . Acesso em: 26 out. 2019.

QUINSAT, Yann; LAVERNHE, Sylvain; LARTIGUE, Claire. Characterization of 3D surface topography in 5 axis milling. **Wear**, v. 271, n. 3-4, p. 590-595, jun. 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.05.014. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164810002231?via%3Di hub. Acesso em: 02 out. 2019.

REINKE, G. *et al.* Trajetória da ferramenta no acabamento superficial e no tempo de usinagem para o fresamento do aço VP100. **Máquinas e Metais**, 26 jul. 2017. Disponível em:

http://www.arandanet.com.br/revista/mm/materia/2017/07/04/trajetoria_da_ferrament a.html. Acesso em: 02 maio 2018.

SAFAROV, D. T. *et al.* Energy planning in production shop with numerically controlled machine tools. **Russian engineering research**, v. 37, n. 9, p. 827-834, 25 set. 2017. DOI: https://doi.org/10.3103/S1068798X17090209. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068798X17090209. Acesso em: 25 out. 2019.

SANDVIK COROMANT. **Application guide:** Die and Mould Making. Sweden: Sandvik Coromant, 1999.

SANDVIK COROMANT. Fabricação de moldes e matrizes, ferramentas e métodos, C H 02, 2. Jundiaí: Sandvik Coromant, 2002, p. 258.

SANDVIK COROMANT. **Manual de treinamento**: rotativos. Jundiaí: Sandvik Coromant, [2017]. p. D35.

SANDVIK COROMANT. **Informações do produto**. Jundiaí: Sandvik Coromant, 2018. Disponível em: https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/productdetails.aspx?c=r300-020a25I-10I. Acesso em: 14 jun. 2018.

SCANDIFFIO, Innocenzo; DINIZ, Anselmo E.; FAGALI, Adriano. Evaluating surface roughness, tool life, and machining force when milling free-form shapes on hardened AISI D6 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.82, n.9-12, p. 2075-2086, fev. 2016. DOI 10.1007/s00170-015-75250. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-7525-0. Acesso em: 02 out. 2019

SENAI. **Rugosidade superficial nas operações de torneamento**. Santa Bárbara d'Oeste: Senai/Romi, 2002. Formação Romi - formação de formadores.

SHEEN, Bor-Tyng; YOU, Chun-Fong. Tool path generation for arbitrary pockets with islands. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 17, n.3, p. 275-283, jun. 2006. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10845-005-0006-9. Acesso em: 25 out. 2019.

SOLHEID, J. S. **Avaliação do consumo de energia no processo de fresamento de cavidades 21/2D para diferentes tipos de trajetórias**. 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em:

https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/174449. Acesso em: 25 out. 2019.

SOUZA, A. F. de; ULBRICH, C. B. L. Engenharia integrada por computador e sistemas CAD/CAM/CNC. São Paulo: Artliber, 2009.

SOUZA, A. F.; DINIZ, A. E.; RODRIGUES. Investigating the cutting phenomena in free-form milling using a ball-end cutting tool for die and mold manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 71, mar. 2014. DOI: 10.1007/s00170-013-5579-4. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/259979463. Acesso em: 02 out. 2019

—

VILLARES METALS. **Aço ferramenta para moldes plásticos.** Disponível em: http://www.villaresmetals.com.br/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Moldes-Plasticos/VP20ISO. Sumaré: Villares Metals, 2019. Acesso em: 31 out. 2019.

WEISS, A. Processo de fabricação mecânica. Curitiba: Livro Técnico, 2012.

YAN, J.; LI, L. Multi-objective optimization of milling parameters: the trade-offs between energy, production rate and cutting quality. **Journal of Cleaner Production**, v. 52, p. 462-471, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.030. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613001017. Acesso em 25 out. 2019.

ZANUTO, Rodolfo de Souza. **Avaliação de parâmetros de sustentabilidade de processos de usinagem**. 2016. 101 p. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2016. Disponível em: http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/321239. Acesso em: 31 ago. 2018.