



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Raphael Wildner Xavier

**ESTUDO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO FRESAMENTO DE  
FORMAS COMPLEXAS EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE USINAGEM**

Florianópolis

2023

Raphael Wildner Xavier

**ESTUDO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO FRESAMENTO DE  
FORMAS COMPLEXAS EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE USINAGEM**

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

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

Coorientador: Prof. Adriano Fagali de Souza, Dr.

Florianópolis

2023

### Ficha de identificação da obra

Xavier, Raphael Wildner

Estudo do consumo de energia elétrica no fresamento de formas complexas em diferentes condições de usinagem / Raphael Wildner Xavier ; orientador, João Carlos Espíndola Ferreira, coorientador, Adriano Fagali de Souza, 2023.  
84 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Estratégias de fresamento. 3. Consumo de energia elétrica. 4. Usinagem. 5. Manufatura sustentável. I. Espíndola Ferreira, João Carlos. II. Fagali de Souza, Adriano. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Raphael Wildner Xavier

**ESTUDO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO FRESAMENTO DE  
FORMAS COMPLEXAS EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE USINAGEM**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca  
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Amauri Hassui, Dr.

Universidade Estadual de Campinas

Prof. Antonio Carlos Valdiero, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Antônio Otaviano Dourado, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão  
que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em engenharia  
mecânica.

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. João Carlos Espindola Ferreira, Ph.D.

Orientador

Florianópolis, 2023.

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais e avós.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores João Carlos Espindola Ferreira pela orientação e Adriano Fagali de Souza pela coorientação.

Ao técnico em mecânica Rodrigo Voigt do campus de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina pela sua ajuda nos ensaios de usinagem.

Ao ex-estudante de mestrado Lucas Camargo pela sua ajuda na instalação do sensor para medição da corrente elétrica do motor do eixo-árvore da máquina-ferramenta.

## RESUMO

O estudo do consumo de energia elétrica durante a usinagem é relevante para: (a) obter o custo final de um lote de peças; (b) reduzir a potência elétrica consumida pela máquina-ferramenta durante a usinagem; (c) monitorar a vida da ferramenta. As estratégias de usinagem influenciam o consumo de energia elétrica da máquina e o tempo de usinagem. No presente trabalho efetua-se inicialmente uma revisão bibliográfica dos trabalhos realizados sobre a usinagem (fresamento) de superfícies com diferentes geometrias e o consumo de energia elétrica durante a usinagem. Poucos trabalhos foram encontrados na literatura que investigaram a influência de estratégias de fresamento no consumo de energia elétrica na usinagem de superfícies. Os parâmetros velocidade de corte, profundidade de corte e avanço influenciam o consumo de potência elétrica durante a usinagem nas diferentes estratégias, e buscou-se nesta pesquisa avaliar essa influência. Foi utilizada uma fresa de topo reto para o desbaste, o qual foi realizado em 2,5D. Para o acabamento foi utilizada uma fresa de topo esférico nas diferentes estratégias de usinagem, em corpos de prova com diferentes superfícies. As estratégias consideradas no acabamento foram zigue, ziguezague, ziguezague concêntrico e paralelo ao contorno. A variável disponível do CNC Fanuc chamada de carga S1 mostrou que é possível identificar o desgaste em condições mais severas de usinagem como o desbaste, mas não é sensível para condições de acabamento. O sinal de corrente do eixo árvore obtido com o sensor de potência demonstrou ser sensível para identificar diferentes condições de usinagem e também o nível de desgaste da ferramenta de corte no desbaste. Como parâmetro de saída na superfície da peça foi considerada a rugosidade média  $R_a$  e a potência elétrica consumida em cada caso. As estratégias foram geradas usando-se o software comercial NX, e os ensaios foram feitos utilizando-se uma fresadora CNC Romi de 4 eixos. Testes de usinagem sem corte também foram realizados para obter a energia elétrica gerada por outros dispositivos presentes na máquina.

**Palavras-chave:** Estratégias de fresamento. Consumo de energia elétrica. Usinagem. Superfícies. Manufatura sustentável. Rugosidade média.

## ABSTRACT

The study of electrical energy consumption during machining is relevant to: (a) obtain the final cost of a batch of parts; (b) reduce the electrical power consumed by the machine tool during machining; (c) monitor tool life. The machining strategies influence the electrical power consumption of the machine and the machining time. In the present work, a literature survey is initially carried out on the machining (milling) of surfaces with different geometries and the consumption of electrical energy during machining. Few works were found in the literature that investigated the influence of milling strategies on the consumption of electrical energy in the machining of surfaces. The cutting speed, cutting depth and feed parameters influence the consumption of electrical energy during machining in the different strategies, and this research sought to evaluate this influence. An end mill was used for roughing, which was performed in 2.5D axes. For finishing, a ball-nose end mill was used in different strategies to machine parts with different surfaces. The strategies considered in finishing were zig, zigzag, concentric zigzag and parallel to the contour. The variable available from the CNC Fanuc called load S1 showed that it is possible to identify wear in more severe machining conditions such as roughing, but it is not sensitive for finishing conditions. The spindle current signal obtained with the power sensor proved to be sensitive to identify different machining conditions and also the wear level of the cutting tool in roughing. As an output parameter on the surface of the part, the average roughness  $R_a$  and the electrical power consumed in each case were considered. Strategies were generated using the commercial software NX, and tests were performed using a 4-axis Romi CNC milling machine. No-cutting machining tests were also carried out in order to obtain the electrical power generated by other devices present in the machine.

**Keywords:** Milling strategies. Electric energy consumption. Machining. Surfaces. Sustainable manufacturing. Average surface roughness.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Descrição do mecanismo de corte .....	19
Figura 2 - Fresamento concordante e fresamento discordante .....	21
Figura 3 - (a) Estratégia de níveis planos ou 2,5 eixos e (b) estratégia <i>offset</i> ao contorno .....	21
Figura 4 - Entrada em Mergulho (A), em rampa (B) e em hélice (C).....	22
Figura 5 - (a) Trajetória Ziguezague e (b) Trajetória paralela ao contorno .....	23
Figura 6- Estratégias de usinagem 2,5 eixos utilizadas por Pervaiz et al. (2012) .....	23
Figura 7 – Raio de contato alterando ao longo do caminho $R1 < R2 < R3$ .....	24
Figura 8 - (a) Estratégia Ascendente, (b) Estratégia Descendente .....	25
Figura 9 – Comparação da Rugosidade Média ( $R_a$ ) nas regiões com fresamento ascendente e descendente .....	26
Figura 10 – Rugosidade Máxima ( $R_z$ ) no fresamento ascendente e descendente nas diferentes regiões da superfície (topo, centro e base) .....	27
Figura 11 - Consumo de energia elétrica do setor industrial de alguns países em comparação ao consumo total de energia elétrica .....	28
Figura 12- Consumo de Energia e tempo de usinagem em função das diferentes estratégias de usinagem e seus respectivos avanços com rotação = 4000 rpm.....	29
Figura 13- Consumo de Energia Elétrica de Máquinas-Ferramenta .....	29
Figura 14 - Consumo de energia específica na rotação do eixo-árvore seguida com os respectivos desgastes de ferramenta ( $w$ ) nos diferentes parâmetros de fresamento no aço AISI H13 .....	30
Figura 15 – Perfil de potência típico de usinagem de uma máquina ferramenta de 3 eixos.....	31
Figura 16 - Comparativo das curvas durante os processos de usinagem (em azul) e o consumo de potência sem remoção de material (em vermelho).....	32
Figura 17 – Regiões da curva de potência elétrica consumida como sendo em estado permanente ou estado transiente .....	33
Figura 18 – Geometria estudada em peça de aço AISI P20 .....	33
Figura 19 – Consumo de energia em função do tempo de usinagem .....	34
Figura 20 – Geometria estudada em peça de aço AISI P20 .....	34
Figura 21 - Circuito esquemático do sistema de aquisição/medição.....	35

Figura 22 – Tipos de desgaste em função da temperatura de corte .....	37
Figura 23 – Fluxograma das etapas contidas neste trabalho .....	39
Figura 24- Corpo de prova em aço AISI P20.....	40
Figura 25 – (a) Corpo de prova de uma biela para a usinagem de diferentes estratégias e (b) desenho do CAD .....	41
Figura 26 – Peça com superfície complexa (a) corpo de prova em aço AISI P20 e (b) geometria no CAD.....	41
Figura 27 – (a) Fresamento de um fuso e (b) geometria no CAD .....	42
Figura 28– (a) Sensor de corrente conectado em uma das fases do eixo-árvore e (b) computador instalado e conectado por cabo USB no sensor.....	43
Figura 29 – Alicate Amperímetro Digital.....	44
Figura 30 - Rugosímetro de bancada da marca Mitutoyo .....	44
Figura 31 - Curvas das potências elétricas em função das rotações do eixo-árvore em [rpm] .....	45
Figura 32 – Tela dos dados de usinagem mostrando a Carga [%], para o eixo árvore a carga S1 .....	46
Figura 33 – Curvas da potência elétrica do eixo-árvore em vermelho curva disponibilizada pela Romi e a curva em azul é a potência obtida das 12 medições de rotações diferentes.....	47
Figura 34 - Curva da Potência e da Carga em função das rotações do eixo-árvore sem remoção de material.....	48
Figura 35- Curvas da potência elétrica em função da profundidade de corte com (a) s=1653 rpm utilizando o sensor (b), s=4140 rpm utilizando o sensor, (c) s=6500 rpm utilizando o sensor. Curvas da potência elétrica e da carga do eixo-árvore (d) s=1653 rpm, (e) s=4140 rpm e (f) s=6500 rpm .....	50
Figura 36 – (a) Pastilha desgastada e (b) pastilha sem desgaste.....	51
Figura 37 – Gráficos da potência elétrica para as profundidades de corte 0,5 e 1,0mm com e sem desgaste da ferramenta e variável S1 (a) s=1653 rpm, (b) s=4140rpm, (c) s=6500 rpm, (d) s=1653 rpm, (e) s=4140 rpm e (f) s=6500 rpm .....	52
Figura 38 – (a) Trajetória da ferramenta na estratégia zigue, (b) Trajetória na estratégia ziguezague concêntrico, (c) Trajetória na estratégia paralela ao contorno e (d) Trajetória da ferramenta na estratégia ziguezague.....	53
Figura 39 – Potência Elétrica Média em função das 4 estratégias diferentes .....	54

Figura 40 – Curva da Potência Elétrica em função das estratégias de usinagem em vazio.....	55
Figura 41 – Potência Elétrica Média durante a usinagem de acabamento em função das estratégias.....	56
Figura 42 – (a) Estratégia zigue, (b) Estratégia zig-zague concêntrico, (c) Estratégia paralela ao contorno e (d) Estratégia zig-zague.....	58
Figura 43 – Regiões para a obtenção das 9 medições da rugosidade média ( $R_a$ )....	59
Figura 44 – Rugosidade média para cada estratégia utilizada.....	60
Figura 45 – Comparativo do consumo de potência elétrica média em função das estratégias.....	61
Figura 46 – Consumo de energia para cada estratégia de usinagem.....	62
Figura 47 – Desgaste da ferramenta de corte (a) ferramenta no início da usinagem e (b) ferramenta com desgaste.....	63
Figura 48 – Vista frontal do corpo de prova com superfície complexa e a trajetória da ferramenta.....	64
Figura 49 – Curvas da potência [W], rotação [rpm], avanço [mm/min] e a trajetória da ferramenta [mm].....	65
Figura 50 – Curvas da potência elétrica do CAMSpeed e do programa convencional.....	66
Figura 51 – Energia Elétrica em função dos programas CAMSpeed e Convencional.....	67
Figura 52 – Comparativo da Potência Elétrica em função das rotações do eixo-árvore usinando e em vazio.....	68
Figura 53 – (a) Gume com desgaste da pastilha e (b) Gume sem desgaste.....	69
Figura 54 - Gráfico comparativo entre as potências obtidas do sistema de monitoramento.....	70
Figura 55 – Interface do NX9 utilizando o CAMSpeed.....	71
Figura 56 – Curvas da potência elétrica em watt do software CAMSpeed e do programa convencional.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Programas de usinagem em função dos parâmetros de corte, tipo de trajetória, comprimento de usinagem e tempo previsto.....	35
Tabela 2 - Potência elétrica média consumida, desvio padrão, tempo real e programado em função das estratégias de usinagem em vazio e a carga em porcentagem .....	54
Tabela 3 - Potência elétrica média consumida, desvio padrão, tempo real em função das estratégias de usinagem de acabamento e a carga em porcentagem .....	56
Tabela 4 – Estratégias de usinagem com suas respectivas: potência consumida, rugosidade média e o desvio padrão da rugosidade média .....	59
Tabela 5 – Tempo e a Energia consumida pelas diferentes estratégias de fresamento .....	61
Tabela 6 – Potência média, rugosidade e a carga em função das estratégias com e sem desgaste da ferramenta.....	63
Tabela 7 – Potência elétrica, desvio padrão, carga, tempo e a energia em função dos programas utilizados usinando em vazio .....	66
Tabela 8 – Carga em vazio, carga usinando e carga usinando com desgaste na pastilha em função das rotações.....	69
Tabela 9 – Potência média em função das rotações.....	70
Tabela 10 – Potência, tempo e energia em função dos programas utilizados .....	73
Tabela 11 - Corrente elétrica média obtida em ampere e a carga em porcentagem em função das rotações .....	81
Tabela 12 - Corrente elétrica média, desvio padrão e carga em função das profundidades de corte para $V_c = 104$ [m/min] e $s = 1653$ rpm .....	82
Tabela 13 - Corrente elétrica média, desvio padrão e carga em função das profundidades de corte para $V_c = 260$ [m/min] e $s = 4140$ rpm.....	82
Tabela 14 - Corrente elétrica média, desvio padrão e carga em função das profundidades de corte para $V_c = 408$ [m/min] e $s = 6500$ rpm.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abinfer - Associação Brasileira da Indústria de Ferramentais

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – *American Iron and Steel Institute*

CAM - *Computed Aided Manufacturing*

DIN – *Deutsches Institut für Normung*

GPCAM - Grupo de Pesquisa em Manufatura Auxiliada por Computador

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\beta$  - ângulo entre o plano da face principal e o plano da superfície cortada
- $\eta$  - ângulo efetivo da velocidade de corte
- $\varphi$  - ângulo do movimento de avanço, ângulo entre a direção do avanço e a direção da velocidade de corte
- $a_p$  - profundidade de corte
- $a_e$  - penetração de trabalho
- D - diâmetro [mm]
- $f_z$  - avanço por dente [mm/dente]
- $F_{ax}$  - força axial
- $F_c$  - força de corte [N]
- $F_r$  - força radial
- HRc – Dureza Rockwell C
- $I_{max}$  - corrente elétrica
- n - número de rotações por minuto [rpm]
- $P_{ativa}$  - potência ativa;
- $P_c$  - potência de corte
- R - raio de contato
- $R_a$  – Rugosidade média
- $R_z$  - rugosidade total
- VB - desgaste de flanco da ferramenta
- $V_c$  - velocidade de corte [m/min]
- $V_e$  - velocidade efetiva de corte
- $V_f$  - velocidade de avanço [mm/min]
- $V_{fase-fase}$  - tensão de fase
- z - número de dentes

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>18</b>
2.1	GRANDEZAS DE CORTE E CINEMÁTICA DO FRESAMENTO .....	18
2.2	FRESAMENTO CONCORDANTE E DISCORDANTE .....	20
2.3	ESTRATÉGIAS DE USINAGEM .....	21
<b>2.3.1</b>	<b>Remoção de Cavaco em Níveis Planos .....</b>	<b>22</b>
2.4	FRESAMENTO DE ACABAMENTO EM SUPERFÍCIES COMPLEXAS ..	23
2.5	CONSUMO DE ENERGIA DAS MÁQUINAS-FERRAMENTA .....	27
2.6	DESGASTE DE FERRAMENTA NA USINAGEM .....	36
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....</b>	<b>39</b>
3.1	ETAPAS DO ESTUDO .....	40
3.2	SENSOR MEDIDOR DE CORRENTE ELÉTRICA .....	42
3.3	ANÁLISE DA RUGOSIDADE .....	44
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
4.1	MEDIÇÃO DE POTÊNCIA SEM REMOÇÃO DE MATERIAL .....	45
4.2	ETAPA 1: MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA NO DESBASTE .....	48
<b>4.2.1</b>	<b>Identificação do Desgaste de Ferramentas pelo Consumo de Potência.....</b>	<b>50</b>
4.3	ETAPA 2: MEDIÇÃO DE POTÊNCIA NAS DIFERENTES ESTRATÉGIAS NO ACABAMENTO.....	52
<b>4.3.1</b>	<b>Usinagem sem Remoção de Material nas Diferentes Estratégias.....</b>	<b>53</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Usinagem de Acabamento nas Diferentes Estratégias.....</b>	<b>55</b>
4.4	ETAPA 3: MEDIÇÃO DE POTÊNCIA UTILIZANDO O CAMSPEED SEM REMOÇÃO DE MATERIAL PARA UMA PEÇA COM GEOMETRIA COMPLEXA ....	63
<b>4.4.1</b>	<b>Medição de Potência Elétrica Durante a Usinagem <i>Offset</i> ao Contorno de uma Geometria Complexa.....</b>	<b>67</b>

4.4.2	<b>Medição de Potência Elétrica Durante a Usinagem <i>Offset</i> ao Contorno de uma Geometria Complexa com Desgaste na Ferramenta .....</b>	<b>68</b>
4.5	ETAPA 4: ESTUDO ADICIONAL DA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA UTILIZANDO O CAMSPEED EM UM CASO REAL .....	70
5	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>74</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	74
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>77</b>
	<b>APÊNDICE A – CORRENTE ELÉTRICA MÉDIA OBTIDA .....</b>	<b>81</b>
	<b>APÊNDICE B – TABELAS REFERENTE À ETAPA 1 DOS EXPERIMENTOS.....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em Joinville, norte do estado de Santa Catarina, estão instaladas muitas ferramentarias que fabricam moldes de injeção de termoplásticos. Segundo Geres (2018), Presidente da Associação Brasileira da Indústria de Ferramentais (ABINFER), desde o final do século passado Joinville é o município brasileiro com o maior adensamento de ferramentarias no Brasil. Segundo de Souza et al. (2019) vários produtos contendo geometria complexa podem ser encontrados atualmente no mercado: produtos eletrônicos, eletrodomésticos, indústria automotiva, indústria médica, brinquedos, entre outros.

Na indústria de ferramentarias um dos processos mais utilizados na fabricação de moldes de injeção é o fresamento, e as trajetórias de fresamento são constantemente estudadas na engenharia. González (2013) estudou diferentes trajetórias da ferramenta para o fresamento de desbaste de cavidades 2,5D (JACSO e SZALAY, 2020; AHMAD e PLAPPER, 2015; LEE e CHANG, 1995). Liu et al. (2016) e Pervaiz et al. (2012) mencionam que no fresamento a trajetória da ferramenta e os parâmetros de corte são importantes pois influenciam o tempo de usinagem, o consumo de energia elétrica da máquina-ferramenta e o desgaste da ferramenta. Solheid (2016) fez uma avaliação do consumo de energia durante o fresamento de cavidades 2,5 D nas diferentes trajetórias em aço AISI P20, e sugeriu otimizar os parâmetros de corte para a redução do consumo de energia elétrica. Amaral (2016) estudou o fresamento de aço endurecido, e sugeriu aplicar diferentes estratégias de fresamento com outras geometrias de peças. Santos (2019) investigou o consumo energético no fresamento em função da variação de trajetória e dos parâmetros de usinagem no aço AISI P20, e sugeriu avaliar a influência de diferentes geometrias da ferramenta de corte no consumo de energia. De Souza et al. (2019) estudaram a influência das estratégias de usinagem geradas por diferentes softwares CAM na qualidade superficial e no tempo de usinagem.

Pelegrino (2018) estudou o consumo de energia elétrica em máquinas-ferramentas. Kurukulasuriya, Gamage e Mangala (2018), Hong et al. (2017) e Budinoff, Bhinge e Dornfeld (2016) alertam para a importância da redução do consumo de energia elétrica de máquinas-ferramentas. Vardhan, Sankaraiah e

Yohan (2017) estudaram o efeito de diferentes parâmetros de corte no consumo de energia elétrica durante o fresamento do aço AISI P20.

Tendo em vista que o aço AISI P20 é frequentemente utilizado em moldes de injeção, ele é constantemente estudado (por exemplo, MECKLEY e EDWARDS, 2009). De Souza et al. (2014) estudou o fresamento de superfícies complexas no aço AISI P20.

Os moldes de injeção em seu processo de fabricação passam por fresamento de desbaste, fresamento de acabamento e, posteriormente, polimento. Segundo Bodziak et al. (2013), o fresamento é um dos processos mais importantes para a fabricação de moldes e matrizes.

### 1.1. OBJETIVO GERAL

Pretende-se neste trabalho conhecer a energia elétrica consumida durante a usinagem de fresamento e a rugosidade média  $R_a$  para diferentes estratégias de fresamento do aço AISI P20 no acabamento.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Monitorar a potência e a energia elétrica consumida durante a usinagem de desbaste e acabamento, com diferentes parâmetros de corte.
- Monitorar a potência e a energia elétrica consumida com desgaste na ferramenta durante a usinagem.
- Utilizar diferentes geometrias de peças para realizar o monitoramento da potência e da energia elétrica consumida.
- Comparar a potência e a energia elétrica consumida pelo eixo-árvore utilizando o condicionador de sinal com a carga S1 do CNC Fanuc.

Foi utilizado um condicionador de sinal para a medição da potência e da energia elétrica consumida no eixo-árvore e um sistema disponível na máquina no CNC Fanuc chamado de carga S1. A carga S1 mede o carregamento em relação ao

esforço de rotação no eixo-árvore de uma máquina-ferramenta em porcentagem. A máquina-ferramenta pode ser programada para avisar o operador quando o valor da carga  $S_1$  alcançar, durante a usinagem, um limite pré-definido para, então, o operador parar a usinagem e verificar as condições da ferramenta. Caso o desgaste for significativo, o operador realiza a troca da ferramenta.

Para as diferentes estratégias de usinagem são alterados os parâmetros de corte no desbaste e no acabamento, obtendo-se diferentes valores de consumo de energia elétrica. Desta maneira, é identificada a estratégia de usinagem com menor consumo de energia elétrica e que resulta em rugosidade média ( $R_a$ ) reduzida das peças usinadas.

Os parâmetros de corte na usinagem para o fresamento de desbaste e de acabamento de superfícies complexas foram gerados usando-se o software NX versão 9. Os parâmetros de corte foram utilizados para comparar o consumo de energia elétrica pela máquina-ferramenta com os parâmetros de corte gerados pelo software CAMSpeed, desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina no campus de Joinville pelo Grupo de Pesquisa em Manufatura Auxiliada por Computador (GPCAM) (KÄSEMODEL et al., 2019).

O software CAMSpeed atua no pós-processamento do programa em código G, alterando a velocidade de corte durante a usinagem e o avanço da ferramenta, pois, durante a usinagem de superfícies complexas, a velocidade de corte não é constante em toda a ferramenta de topo esférico, uma vez que o raio de contato entre a ferramenta e a superfície da peça varia de em função do contorno da geometria da peça durante a usinagem paralela ao contorno. Assim, o software CAMSpeed compensa esta variação do raio de contato com o aumento da rotação do eixo árvore da máquina-ferramenta.

No próximo capítulo será apresentada uma revisão da literatura sobre a usinagem de moldes de injeção de termoplásticos.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

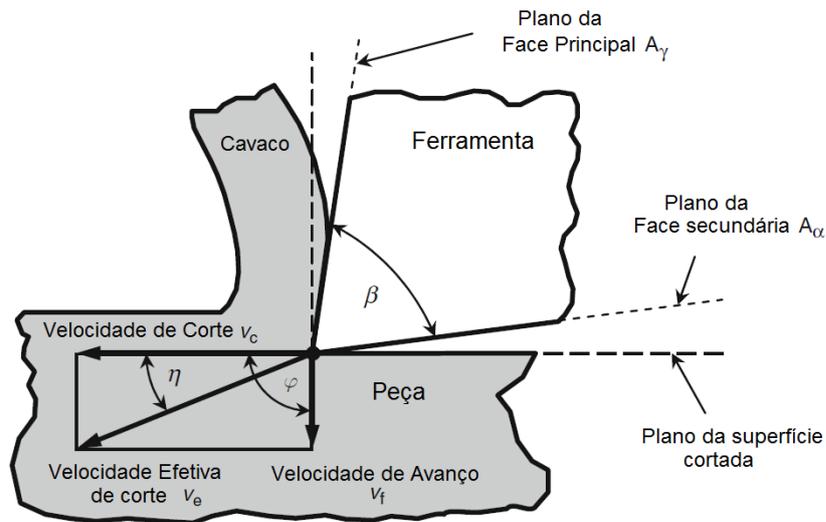
Este capítulo aborda assuntos referentes à usinagem de cavidades de moldes para injeção de termoplásticos. Discorre-se inicialmente sobre grandezas de corte e cinemática de fresamento, fresamento concordante e discordante, remoção de cavaco em níveis planos e algumas estratégias de usinagem. Descreve-se então o fresamento paralelo ao contorno e suas estratégias: ascendente e descendente. Apresentam-se também aspectos relacionados ao consumo de energia elétrica.

### 2.1 GRANDEZAS DE CORTE E CINEMÁTICA DO FRESAMENTO

Segundo Klocke (2013), o fresamento é um processo de fabricação de usinagem com geometria definida com movimento de corte circular da ferramenta, por meio da redução mecanicamente de material por camadas chamado de cavaco, possuindo geralmente a ferramenta mais de um gume de corte. A classificação dos processos de fresamento de acordo com a DIN 8589-3 depende: da superfície produzida, geometria da ferramenta e cinemática de corte.

A norma DIN 6581 contém os conceitos, designações e termos usados para descrever a geometria do corte, e o elemento que realiza o corte é o gume principal da ferramenta. A ferramenta possui duas faces (a principal e a secundária), e o ângulo entre essas duas faces é chamado de ângulo de cunha  $\beta$ , mostrado na Figura 1.

Figura 1- Descrição do mecanismo de corte



Fonte: Adaptado Klocke (2013)

Ainda na Figura 1 nota-se que o vetor velocidade efetiva de corte ( $V_e$ ) gera duas componentes: a velocidade de corte ( $V_c$ ) e velocidade de avanço ( $V_f$ ). O ângulo  $\eta$  é o ângulo efetivo da velocidade de corte, enquanto  $\varphi$  é o ângulo entre a direção do avanço e a direção da velocidade de corte.

De acordo com Machado et al. (2009), a velocidade de corte ( $V_c$ ) (em m/min) é dada pela Equação (1), e a velocidade de avanço ( $V_f$ ) (em mm/min) é dada pela Equação (2).

$$V_c = \pi D \frac{n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

- D é o diâmetro da ferramenta em [mm];
- n é o número de rotações por minuto [rpm].

$$V_f = f_z \cdot z \cdot n \left[ \frac{mm}{min} \right] \quad (2)$$

Onde:

- $f_z$  é o avanço por dente [mm/dente];

- $z$  é o número de dentes;
- $n$  é o número de rotações por minuto [rpm].

Segundo Diniz et al. (2006), a potência de corte ( $P_c$ ) (em kW) é dada pela Equação (3).

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^6} \quad (3)$$

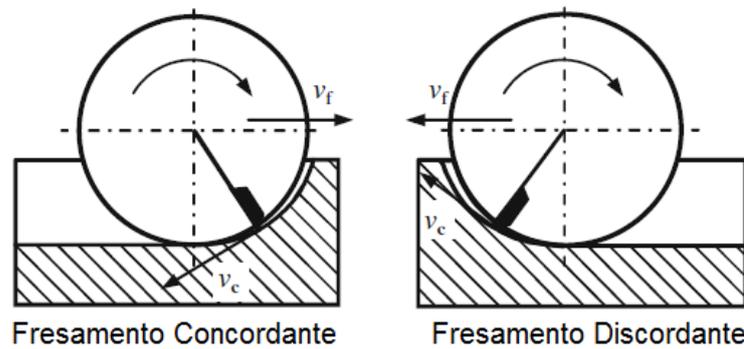
Onde:

- $F_c$  é a força de corte [N];
- $V_c$  é a velocidade de corte [m/min].

## 2.2 FRESAMENTO CONCORDANTE E DISCORDANTE

Segundo Klocke (2013), o corte no fresamento periférico é realizado pelo maior gume da ferramenta e, dependendo da direção do avanço e da rotação da ferramenta, pode ser concordante ou discordante. O fresamento concordante é aquele em que o vetor velocidade de corte no ponto de saída da superfície aponta na direção contrária à direção da velocidade de avanço. O cavaco no ponto de saída possui espessura  $h$  igual a zero, tendo a espessura máxima no início do corte. Por sua vez, no fresamento discordante o vetor da velocidade de corte e o vetor da direção de avanço apontam para a mesma direção. A Figura 2 ilustra os fresamentos concordante e discordante.

Figura 2 - Fresamento concordante e fresamento discordante

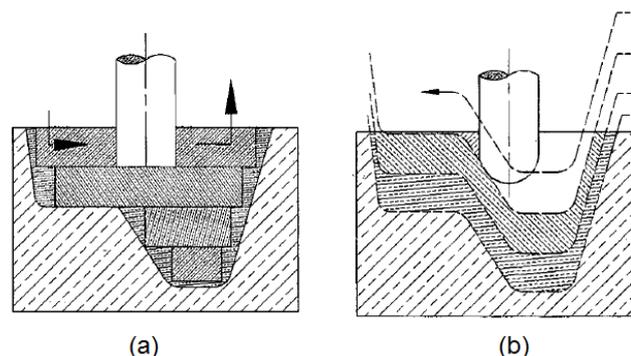


Fonte: Klocke (2011)

### 2.3 ESTRATÉGIAS DE USINAGEM

Segundo Gomes (2001), o fresamento de cavidades de moldes com centro de usinagem 3 eixos possui duas principais estratégias de usinagem: usinagem por níveis planos ou fresamento 2,5D, em que a remoção de cavaco ocorre pelo deslocamento do eixo  $x$  e/ou  $y$ , mantendo uma profundidade de corte ( $a_p$ ) constante, ou seja, ficando o eixo  $z$  constante. Na usinagem paralela (*offset*) ao contorno ocorre movimentação simultânea ao longo dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . A Figura 3 ilustra a diferença entre a estratégia de usinagem para cavidades de moldes por níveis planos (ou 2,5D), e a estratégia *offset* ao contorno.

Figura 3 - (a) Estratégia de níveis planos ou 2,5 eixos e (b) estratégia *offset* ao contorno

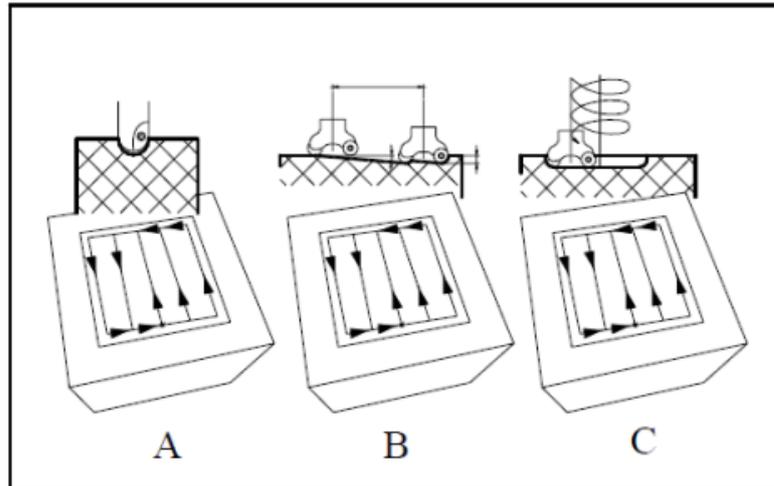


Fonte: Gomes (2001)

Segundo Andrade (2012) e Kopac e Roblek (2014), existem três tipos de entradas mais utilizados na estratégia de usinagem: em mergulho, em rampa e em

hélice (ver a Figura 4). De acordo com Andrade (2012), o ângulo da rampa deve estar de acordo com o tamanho e a geometria da ferramenta.

Figura 4 - Entrada em Mergulho (A), em rampa (B) e em hélice (C)



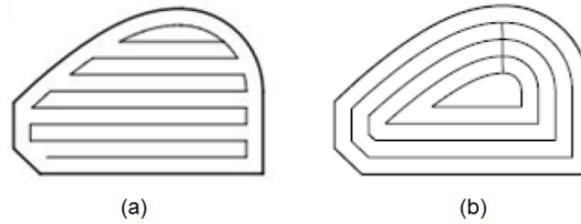
Fonte: Andrade (2012)

### 2.3.1 Remoção de Cavaco em Níveis Planos

Na usinagem em níveis planos a remoção de material ocorre em níveis paralelos à superfície superior da cavidade da peça. Segundo Chan e Choy (2002), a ferramenta pode remover o material da peça segundo diferentes estratégias, as quais incluem: zigue, ziguezague, paralela ao contorno e trocoidal.

De acordo com Chan e Choy (2002), na estratégia linear ziguezague a trajetória da ferramenta é constituída por linhas paralelas, e a usinagem alterna-se em concordante e discordante dependendo do sentido de trajetória que a ferramenta percorre. Na estratégia não linear paralela ao contorno, a trajetória da ferramenta é gerada a partir do contorno da cavidade a ser usinada, podendo incluir o fresamento concordante ou discordante. A Figura 5 mostra exemplos de trajetória ziguezague e paralela ao contorno.

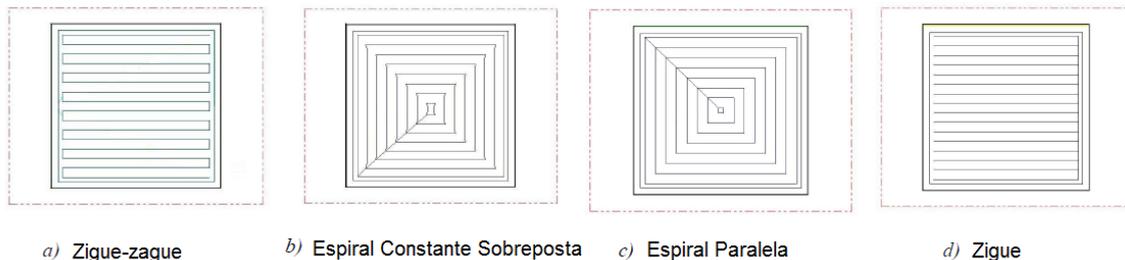
Figura 5 - (a) Trajetória Ziguezague e (b) Trajetória paralela ao contorno



Fonte: Solheid (2016)

Pervaiz et al. (2012) estudaram o consumo de energia elétrica durante as seguintes estratégias de usinagem 2,5 eixos da liga de alumínio Al 6061: ziguezague, zigue (*one way*), espiral constante sobreposta e espiral paralela conforme ilustrado na Figura 6. Estas estratégias são oferecidas no programa MasterCAM.

Figura 6- Estratégias de usinagem 2,5 eixos utilizadas por Pervaiz et al. (2012)



a) Zigue-zague

b) Espiral Constante Sobreposta

c) Espiral Paralela

d) Zigue

Fonte: Pervaiz et al. (2012)

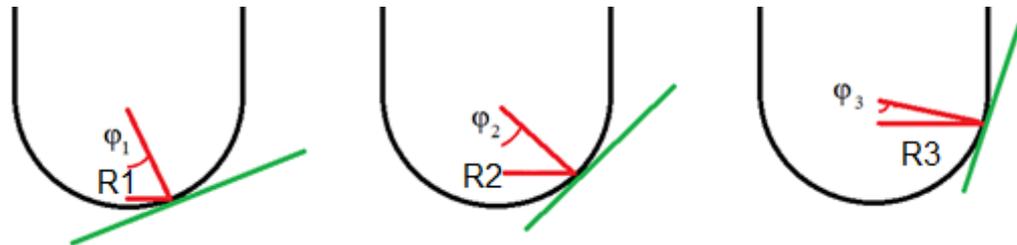
Jacso e Szalay (2020) propuseram um procedimento para gerar trajetórias de ferramentas de fresamento 2,5D, com o intuito de melhorar um método anterior de compensação de engajamento constante da ferramenta (JACSO, MATYASI e SZALAY, 2019). Os autores não consideraram o uso de fresas de topo esférico, nem o consumo de energia elétrica.

## 2.4 FRESAMENTO DE ACABAMENTO EM SUPERFÍCIES COMPLEXAS

Segundo de Souza et al. (2019), o fresamento de acabamento de superfícies de moldes complexos é desafiador, pois, utilizando-se uma fresa de topo esférica que se move em até 5 eixos, altera-se seu raio de contato ao longo do caminho,

como mostrado na Figura 7. Isto afeta a velocidade de corte, rugosidade e precisão dimensional.

Figura 7 – Raio de contato alterando ao longo do caminho  $R1 < R2 < R3$



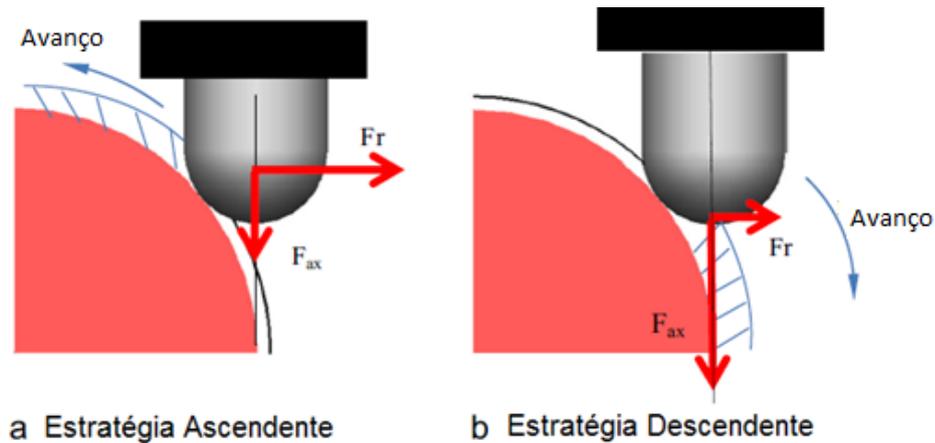
Fonte: Elaboração própria (2022)

No fresamento paralelo ao contorno com uma fresa de topo esférica, a ferramenta remove o material de maneira ascendente ou descendente conforme a estratégia definida.

Wojciechowski, Wiackiewicz e Krolczyk (2018) avaliaram as relações entre os deslocamentos instantâneos de uma fresa de topo esférica e a rugosidade da superfície plana inclinada em relação ao eixo da ferramenta. Não foram consideradas superfícies complexas, nem o consumo de potência elétrica.

Scandiffio, Diniz e de Souza (2017) estudaram o contato da ferramenta de topo esférico sobre uma superfície convexa alterando as estratégias de usinagem ascendente e descendente conforme ilustra a Figura 8. O material usinado foi aço D6 endurecido utilizando velocidade de corte constante de 160 m/min, profundidade de corte  $a_p = 0,2\text{mm}$ , e penetração de trabalho  $a_e = 0,3\text{mm}$ , e verificaram a influência na rugosidade.  $F_r$  é a força radial de contato, e  $F_{ax}$  é a força axial de contato entre a ferramenta de topo esférico e a peça.

Figura 8 - (a) Estratégia Ascendente, (b) Estratégia Descendente

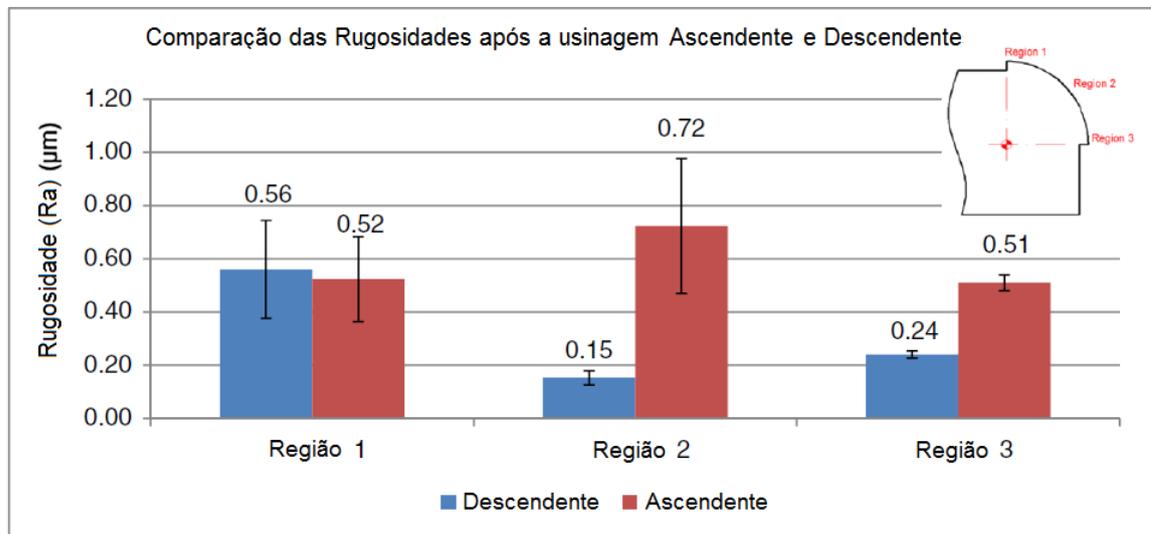


Fonte: Scandiffio, Diniz e Souza (2017)

Ainda segundo Scandiffio, Diniz e de Souza (2017), a deflexão da ferramenta foi maior com a estratégia de corte ascendente, em que a ferramenta sempre usinou com uma deflexão grande e constante. Como resultado ela penetrou mais profundamente no material, produzindo um perfil de rugosidade com picos mais altos e vales mais profundos e, conseqüentemente, obteve-se elevada rugosidade. Além disso, a força axial foi mais elevada na estratégia descendente a  $45^\circ$  da superfície. Já a força radial foi maior na estratégia ascendente a  $45^\circ$  da superfície.

Em outro estudo, Scandiffio, Diniz e de Souza (2016) avaliaram a rugosidade da peça em aço D6 com 60 HRC utilizando uma fresa de topo esférica com 16mm de diâmetro, velocidade de corte máxima igual a 360 m/min, avanço por dente  $f_z=0,1$  m/min,  $a_p=0,2$  mm e  $a_e=0,3$ mm, sem fluido de corte. A Figura 9 ilustra a rugosidade obtida no fresamento ascendente e descendente nas três regiões medidas.

Figura 9 – Comparação da Rugosidade Média ( $R_a$ ) nas regiões com fresamento ascendente e descendente

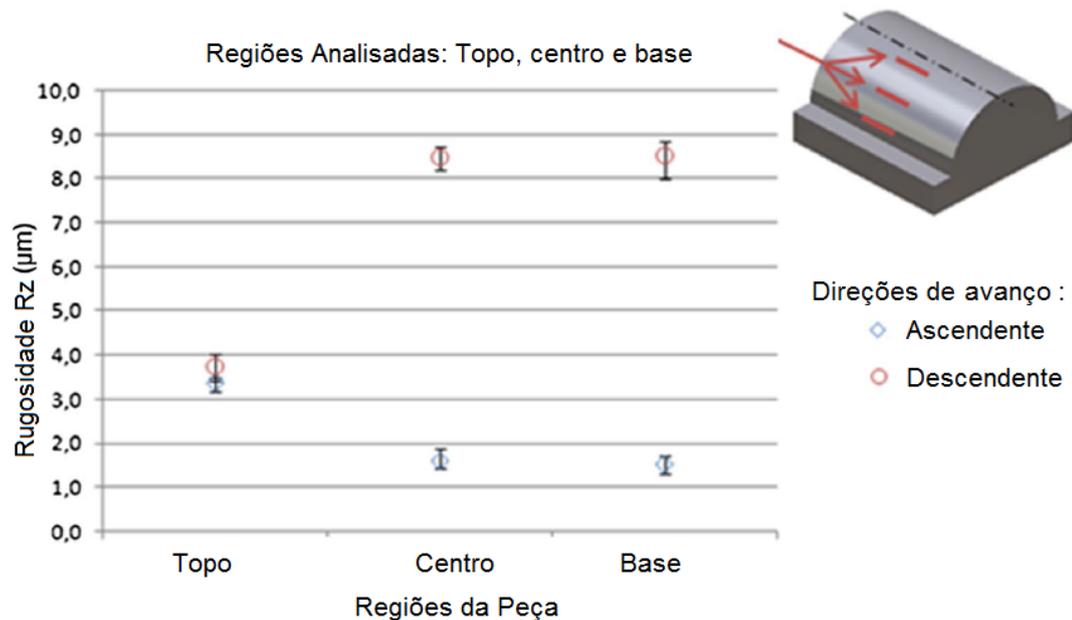


Fonte: Scandiffio, Diniz e Souza (2015)

Nota-se na Figura 9 que na estratégia de fresamento descendente a rugosidade média ( $R_a$ ) é menor do que na estratégia ascendente para o aço D6 com 60 HRC na região 2 (localizada na parte intermediária), pois, como é um aço com alta dureza, tem-se vibrações no corte intermitente. Na estratégia descendente tem-se uma força no eixo z evitando as vibrações da ferramenta, na região 2 e na região 3 (localizada na parte inferior) evitam-se vibrações, melhorando a qualidade superficial e aumentando a vida útil da ferramenta.

Magalhães et al. (2019) estudaram o fresamento de acabamento concordante ascendente e descendente no aço AISI H13 com 52 HRC, utilizando para o acabamento uma fresa de topo esférica com 6mm de diâmetro de metal-duro revestida com nitreto de titânio-alumínio (TiAlN);  $V_c = 130\text{m/min}$ ;  $V_f = 1931\text{ mm/min}$ ;  $a_p = 0,15\text{ mm}$ ;  $a_e = 0,1\text{ mm}$ . A Figura 10 mostra a rugosidade total  $R_z$  nas três diferentes regiões da peça.

Figura 10 – Rugosidade Máxima ( $R_z$ ) no fresamento ascendente e descendente nas diferentes regiões da superfície (topo, centro e base)



Fonte: Magalhães et al. (2019)

Nota-se que Magalhães et al. (2019) obtiveram uma rugosidade  $R_z$  melhor no fresamento de acabamento ascendente no centro e na base, pois o raio de contato da ferramenta nestes locais é suficientemente próximo ao raio da ferramenta, tendo assim velocidade de corte maior. No topo da peça o raio de contato da ferramenta é praticamente nulo, sendo a superfície esmagada pela ferramenta, não havendo remoção adequada de material.

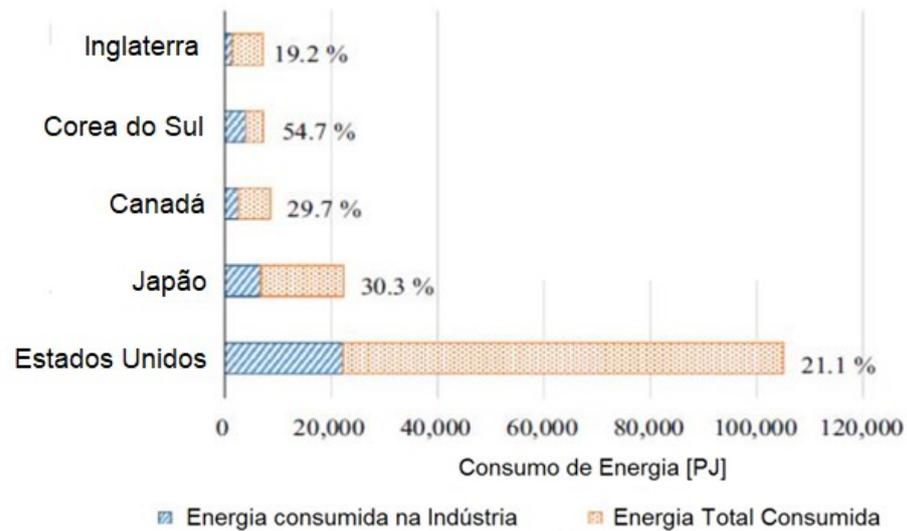
## 2.5 CONSUMO DE ENERGIA DAS MÁQUINAS-FERRAMENTA

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2020), responsável por estudar e desenvolver o planejamento do setor energético no Brasil, o setor industrial em 2019 foi responsável por consumir 35% da energia consumida em todo o país. Kurukulasuriya, Gamage e Mangala (2018), Hong et al. (2017) e Budinoff, Bhinge e Dornfeld (2016) alertam para a importância da redução do consumo de energia elétrica de máquinas-ferramenta visando a redução de danos ambientais.

Meng et al. (2017) afirmam que o setor industrial consome grande parcela da energia elétrica total consumida de vários países. A Figura 11 ilustra o consumo de

energia elétrica do setor industrial de alguns países em comparação ao consumo total de energia elétrica.

Figura 11 - Consumo de energia elétrica do setor industrial de alguns países em comparação ao consumo total de energia elétrica



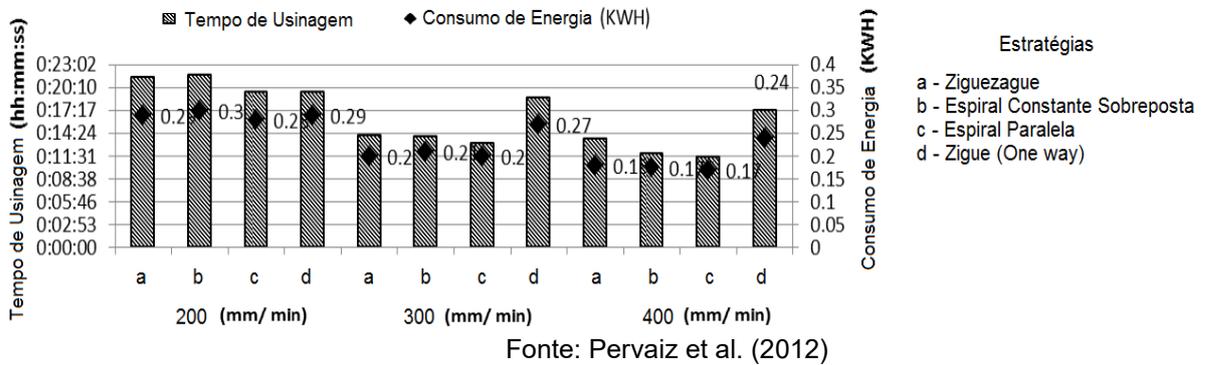
Fonte: Meng et al. (2017)

Segundo Dahmus e Gutowski (2004), as máquinas-ferramenta consomem uma quantidade significativa de energia elétrica durante a fase de uso, tendo grande impacto ambiental, havendo a necessidade de otimização do consumo de energia elétrica.

Vardhan, Sankaraiah e Yohan (2017) estudaram o efeito de diferentes parâmetros de corte no consumo de energia elétrica no fresamento do aço AISI P20 em uma fresadora CNC utilizando uma fresa de topo de metal-duro com diâmetro de 12mm e 4 dentes. Os valores dos parâmetros de usinagem que resultaram nos melhores resultados são os seguintes:  $v_c = 75\text{m/min}$ ;  $f_z = 0,10\text{ mm/dente}$ ;  $a_p = 0,5\text{ mm}$ .

Pervaiz et al. (2012) estudaram o consumo de energia durante a usinagem da liga de alumínio 6061 utilizando uma fresa de topo de aço rápido com diâmetro de 8mm, em diferentes estratégias de usinagem. Alguns resultados são mostrados na Figura 12.

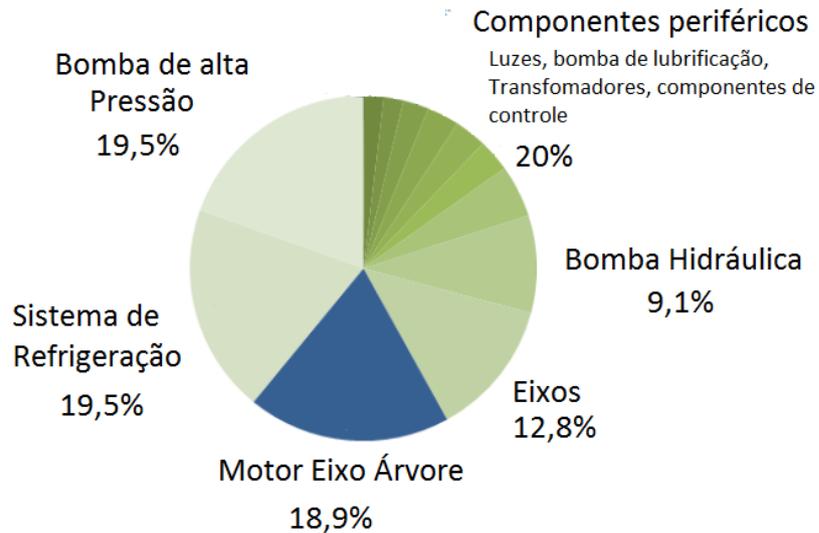
Figura 12- Consumo de Energia e tempo de usinagem em função das diferentes estratégias de usinagem e seus respectivos avanços com rotação = 4000 rpm



Nota-se que, para o avanço  $f = 400$  mm/min, tem-se um consumo reduzido de energia elétrica se comparado aos outros avanços para estratégias equivalentes, com uma redução média de 34% comparado ao avanço de 200 mm/min, e uma redução de 15% comparado ao avanço de 300 mm/min. Com este valor de avanço, as estratégias espiral constante sobreposta e espiral paralela resultaram em menor tempo de usinagem e menor consumo de energia elétrica.

De acordo com Schischke (2012), o consumo de energia elétrica de máquinas-ferramenta é subdividido conforme mostrado na Figura 13. Nota-se que aproximadamente 20% de todo o consumo de potência de uma fresadora de 3 eixos é destinado ao eixo-árvore.

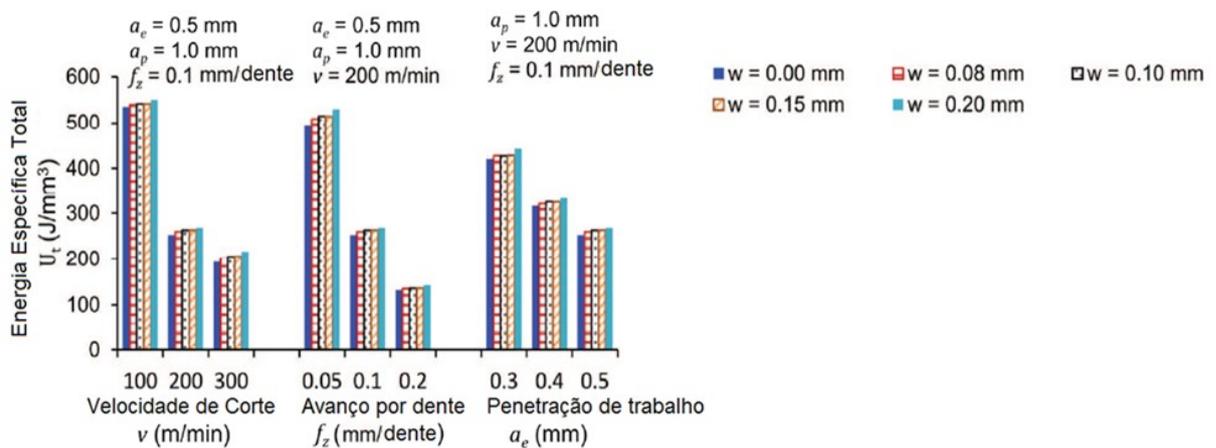
Figura 13- Consumo de Energia Elétrica de Máquinas-Ferramenta



Fonte: Schischke (2012)

Liu et al. (2016) investigaram o consumo de energia específica no centro de usinagem de 3 eixos Cincinnati Arrow 500 na usinagem a seco do aço AISI H13 com dureza = 50 HRC nos diversos parâmetros de corte, correlacionando com o desgaste de flanco da ferramenta (VB). A Figura 14 mostra o resultado obtido do consumo de energia específica na rotação do eixo-árvore, seguida dos respectivos desgastes de ferramenta (w) nos diferentes parâmetros de fresamento.

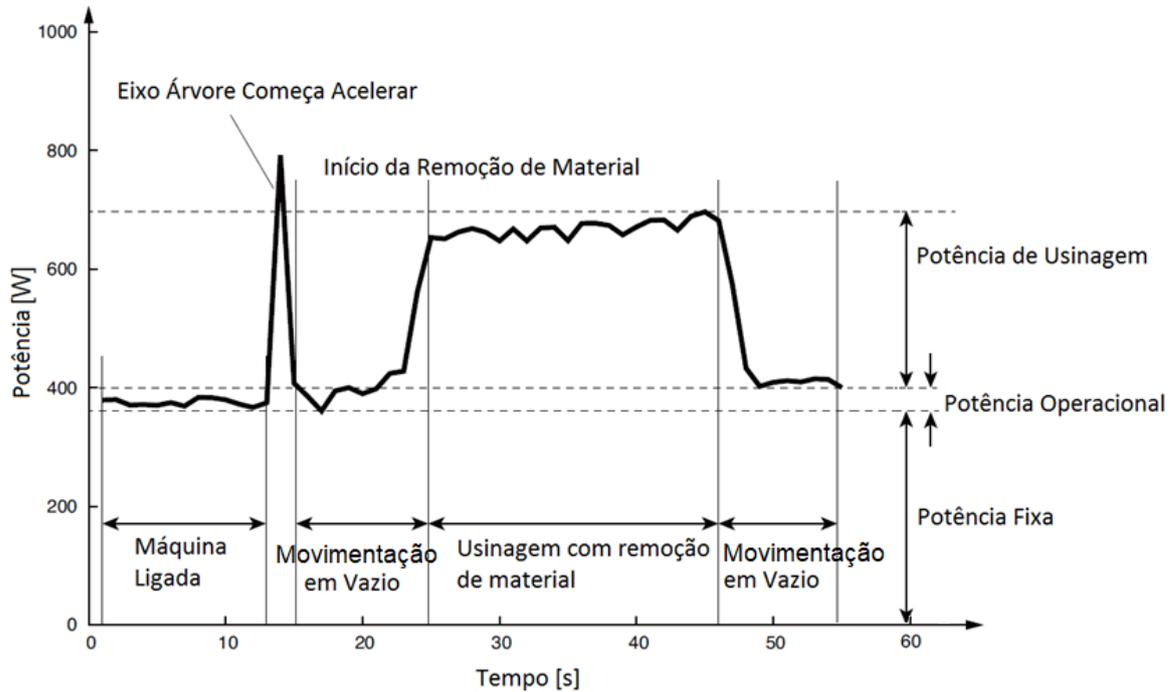
Figura 14 - Consumo de energia específica na rotação do eixo-árvore seguida com os respectivos desgastes de ferramenta (w) nos diferentes parâmetros de fresamento no aço AISI H13



Fonte: Liu et al. (2016)

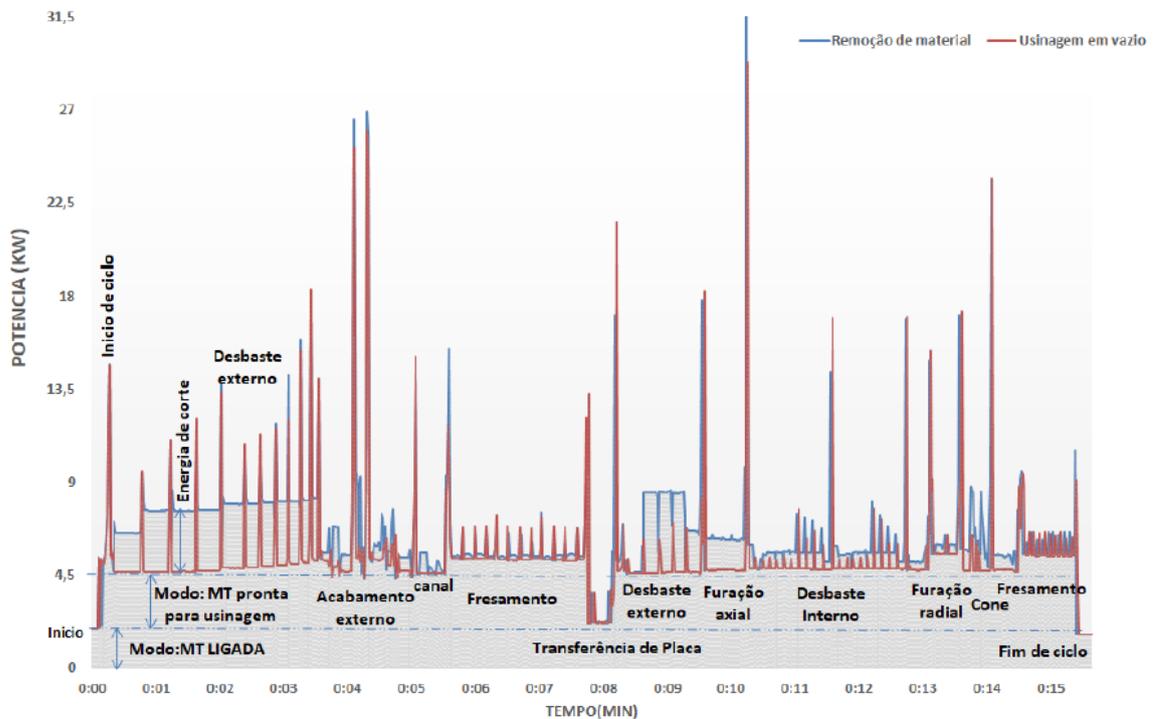
Samukawa e Suwa (2016) obtiveram um perfil de potência para uma máquina de 3 eixos durante a usinagem, o qual é mostrado na Figura 15. Há uma parte do gráfico em que a potência de trabalho da máquina é mínima, que é para a operação dos componentes da máquina chamada de potência fixa. Depois tem-se um pico de potência quando se liga o eixo-árvore da máquina e inicia-se a rotação, depois de um período de movimentação em vazio, quando a ferramenta não toca na peça, mas com o eixo-árvore girando tem-se o consumo de potência operacional. Em seguida ocorre a usinagem com remoção de material e, sendo consumida a potência de usinagem, por fim, ocorre o deslocamento dos eixos sem remoção de material chamado de movimentação em vazio.

Figura 15 – Perfil de potência típico de usinagem de uma máquina ferramenta de 3 eixos



Pelegriño (2018) apresenta a curva da potência elétrica pelo tempo de usinagem dos processos realizados na máquina-ferramenta. A Figura 16 contém um comparativo das curvas durante os processos de usinagem (em azul) e o consumo de potência elétrica sem remoção de material (em vermelho). Nota-se no gráfico que ocorre o aparecimento de alguns picos de consumo de potência elétrica durante o monitoramento da potência elétrica com a máquina-ferramenta usinando e, também, percorrendo a trajetória da ferramenta sem remoção de material.

Figura 16 - Comparativo das curvas durante os processos de usinagem (em azul) e o consumo de potência sem remoção de material (em vermelho)

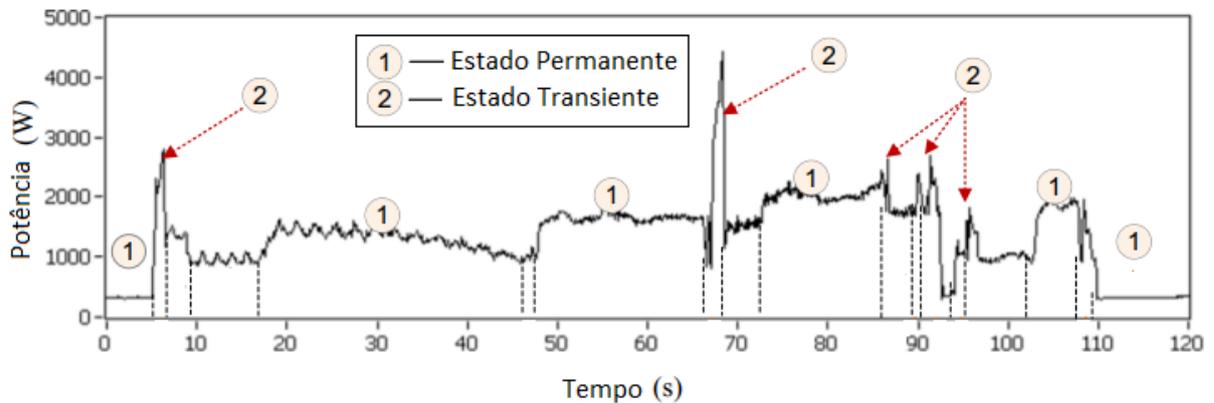


Fonte: Pelegrino (2018)

Gussoli (2018) faz uma análise de perdas energéticas no processo de usinagem e afirma que a potência elétrica consumida na entrada da máquina é igual as perdas da máquina mais a potência de corte.

Jia et al. (2017) estudaram o consumo de energia elétrica nos estados transitórios de usinagem. A Figura 17 identifica os picos de consumo de potência elétrica como estando estes picos no estado transiente, com variação do avanço durante a movimentação da ferramenta ou variação da rotação do eixo-árvore.

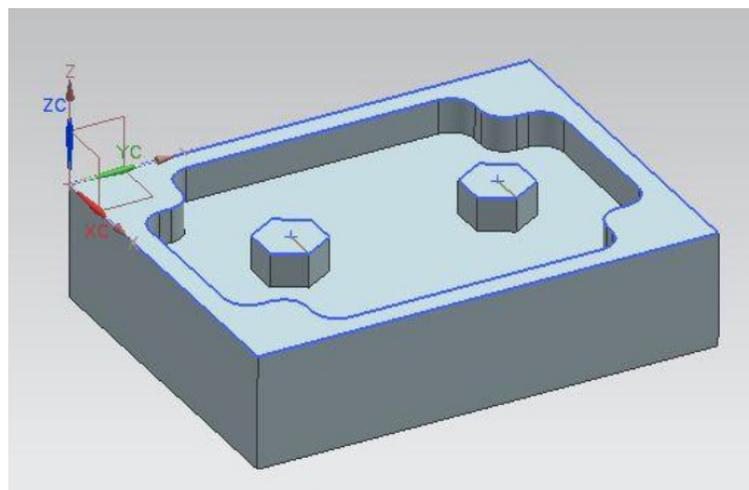
Figura 17 – Regiões da curva de potência elétrica consumida como sendo em estado permanente ou estado transiente



Fonte: Jia et al. (2017)

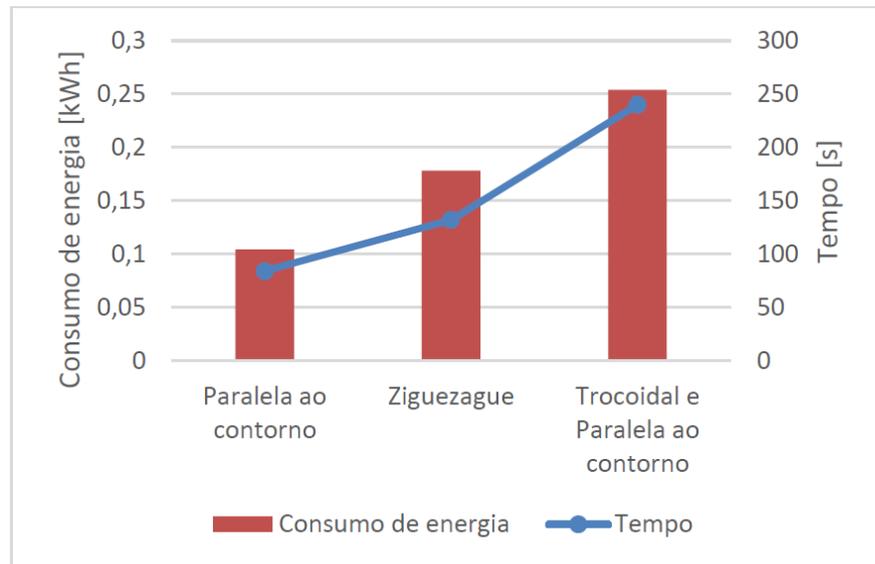
Solheid (2016) utilizou uma fresa de topo de 40 mm na usinagem de peças utilizando as seguintes estratégias: paralela ao contorno, ziguezague, trocoidal e paralela ao contorno (Figura 18). Solheid (2016) obteve os dados do consumo de energia elétrica durante a usinagem para cada uma das trajetórias e comparou com o tempo gasto durante a usinagem. A Figura 19 mostra o consumo de energia em função das trajetórias de usinagem, e nota-se que a trajetória paralela ao contorno resultou no menor consumo de energia se comparado tanto com a trajetória ziguezague como a trajetória combinada trocoidal e paralela ao contorno.

Figura 18 – Geometria estudada em peça de aço AISI P20



Fonte: Solheid (2016)

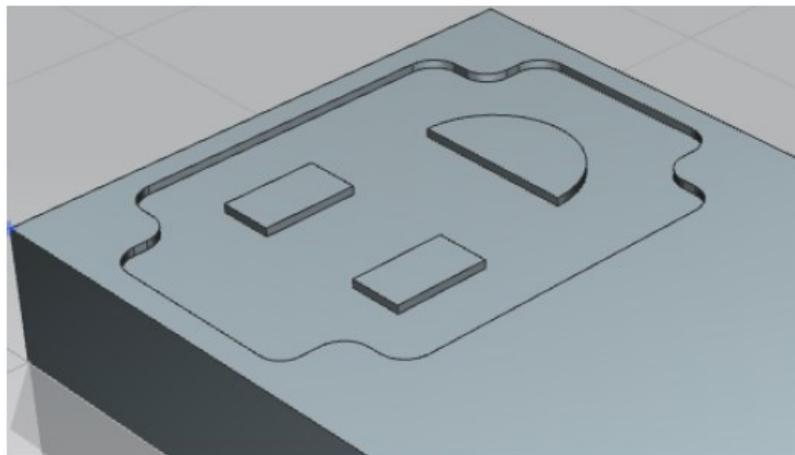
Figura 19 – Consumo de energia em função do tempo de usinagem



Fonte: Solheid (2016)

Santos (2019) investigou o consumo energético no fresamento da peça mostrada na Figura 20 em função da trajetória e parâmetros de usinagem utilizando uma ferramenta de topo reto com 20mm de diâmetro com três insertos de metal duro. A Tabela 1 contém os parâmetros de corte utilizados por Santos (2019) na investigação do consumo de energia na estratégia paralela ao contorno para as trajetórias geradas por três softwares CAM diferentes.

Figura 20 – Geometria estudada em peça de aço AISI P20



Fonte: Santos (2019)

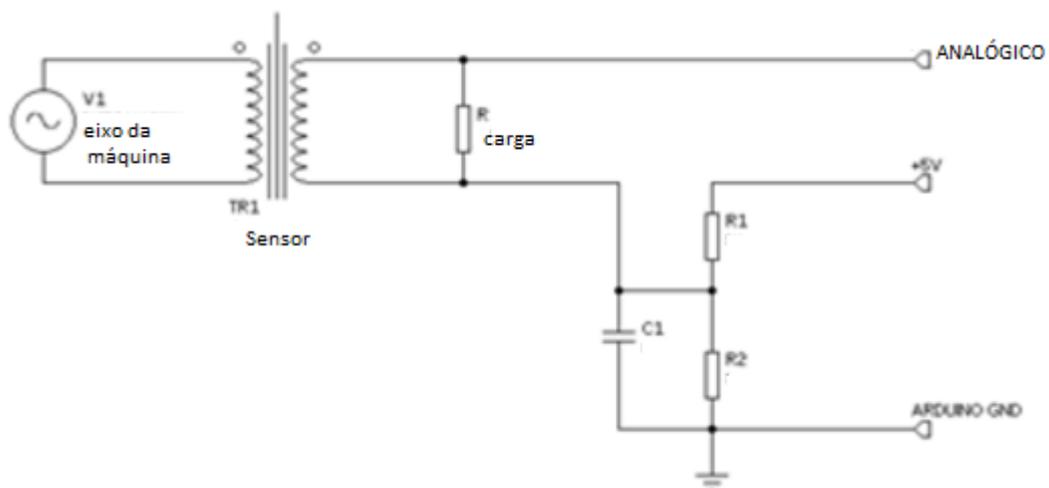
Tabela 1 – Programas de usinagem em função dos parâmetros de corte, tipo de trajetória, comprimento de usinagem e tempo previsto.

Software	Fusion	NX Parâmetros padrão	NX Otimizado
$v_c$ (m/min)	180	180	144
$v_f$ (mm/min)	1000	250	1200
$a_p$ (mm)	1,5	1,5	1,5
$a_e$ (mm)	20	10	20
Trajetoária	Paralela ao contorno	Paralela ao contorno	Paralela ao contorno
Comprimento de usinagem (m)	5,542	3,204	3,204
Tempo previsto (min)	06:11	12:50	02:50

Segundo Sousa et al. (2017), os estudos dos processos de fabricação concentram-se em estimar a potência elétrica exigida pelas máquinas. É importante considerar no processo de usinagem a estimativa de demanda de pico de energia que afeta o sistema de distribuição de energia elétrica. Sousa et al. (2017) propõem um sistema de baixo custo para aquisição, medição e monitoramento de sinais para estimar a demanda de potência elétrica ativa em função da variação dos parâmetros de corte durante a usinagem do aço ABNT 1045.

A Figura 21 (SOUSA et al., 2017) mostra diferentes componentes para a construção do sensor para medição de corrente elétrica: um sensor indutivo SCT-013-000; um resistor de carga 33  $\Omega$ ; dois resistores para dividir a tensão de 10 k $\Omega$ ; um capacitor de filtro de 10 nF. O sensor SCT-013-000 mede a corrente elétrica nas fases de modo a não ser invasivo, e não possui resistor de carga interno.

Figura 21 - Circuito esquemático do sistema de aquisição/medição



Fonte: Sousa et al. (2017)

Sousa et al. (2017) calcularam a potência ativa para a máquina-ferramenta Romi D600 usando a Equação (4) para a calibração do equipamento em função da tensão de fase e da potência.

$$P_{ativa} = \sqrt{3} * V_{fase-fase} * I_{max} * 0.85 \quad (4)$$

Onde:  $P_{ativa}$  é a potência ativa;

$V_{fase-fase}$  é a tensão de fase;

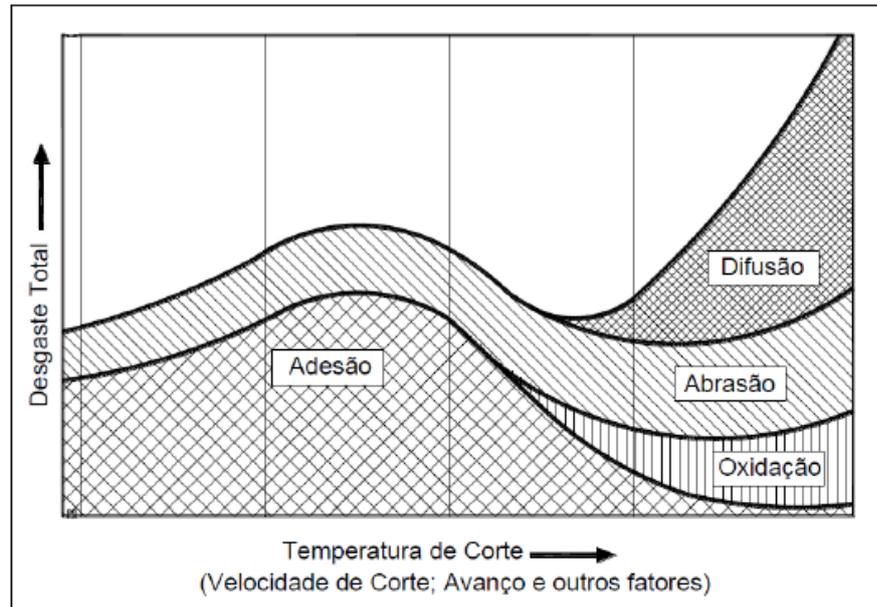
$I_{max}$  é a corrente elétrica.

Pelegriño (2018) apresenta uma lista de ações que podem ser adotadas para a diminuição do consumo de energia elétrica das máquinas-ferramenta, melhorando a eficiência energética. Dentre as ações estão citadas: (a) diminuição da massa movida, (b) redução de atrito, (c) otimização do projeto elétrico, (d) execução de vários processos de usinagem na mesma máquina-ferramenta, (e) aumento da produtividade, pois sem a utilização ou com baixa produção a eficiência energética é afetada, (f) parâmetros de controle para diferentes tipos de operação, criando um conjunto de parâmetros de corte para desbaste e outro para acabamento e (g) monitoramento do consumo de energia nos processos, permitir avaliar e tomar medidas para a redução do consumo de energia.

## 2.6 DESGASTE DE FERRAMENTA NA USINAGEM

Segundo Klocke (2013), a ferramenta de corte sofre desgaste causado por diferentes mecanismos. A Figura 22 mostra os mecanismos de desgaste que atuam em ferramentas de corte, que podem ser: abrasão, adesão, difusão e oxidação.

Figura 22 – Tipos de desgaste em função da temperatura de corte



Fonte: Klocke (2013)

De acordo com Klocke (2013):

- O desgaste abrasivo ocorre em baixas e em altas velocidades de corte, em que partículas duras do material se deslocam sobre a superfície do gume gerando ranhuras;
- No desgaste por adesão, partículas na peça se aderem à ferramenta, e ocorre em velocidades de corte baixas;
- O desgaste por difusão ocorre em altas velocidades de corte, havendo uma reação química reduzindo a dureza e a resistência ao desgaste da ferramenta;
- O desgaste por oxidação ocorre em altas velocidades de corte, em que uma película de óxido é formada nas ferramentas de metal duro.

Existem atualmente quatro maneiras para estabelecer o tempo de vida da ferramenta: tempo de usinagem; erro dimensional ou rugosidade das peças produzidas; quantidade de peças usinadas; avaria ou quebra da ferramenta. As três primeiras maneiras são determinadas estatisticamente, as quais são atualmente estudadas para a redução do custo de produção. Em um cenário bastante

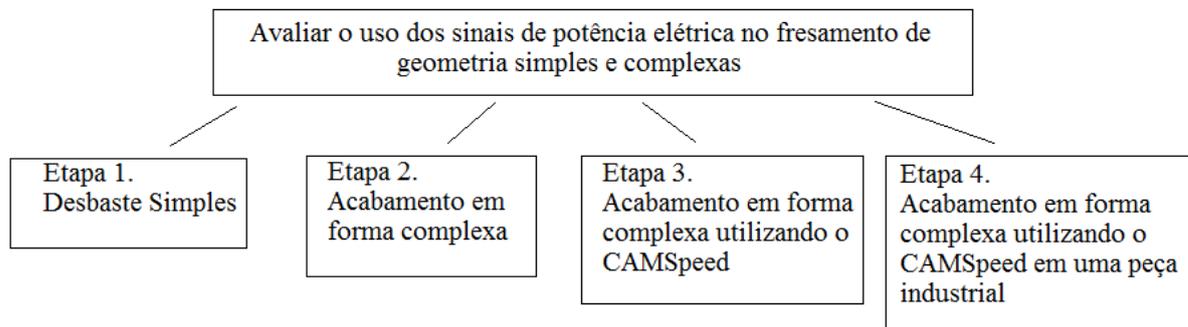
competitivo como o atual, são almejadas alternativas determinísticas para identificar o fim de vida das ferramentas de usinagem.

De Souza e Coelho (2007) utilizaram o sinal direto do CNC que indica a porcentagem de potência elétrica consumida pelo eixo-árvore para identificar a sensibilidade dos sinais de carregamento informado pelo CNC com níveis de desgaste da ferramenta. O resultado apresentado por de Souza e Coelho (2007) mostra a relação entre este parâmetro do CNC (*load*) com o nível de desgaste da ferramenta. Contudo, os autores utilizaram trajetórias lineares para o desbaste de geometria simples. Assim, com o objetivo de aprofundar no tema de pesquisa, o presente trabalho tem por objetivo identificar em tempo real, possíveis alterações nas condições de usinagem, empregando o fresamento de formas complexas, diferentes condições de corte e diferentes materiais. Empregando sensores instalados na máquina, foram obtidos sinais de potência elétrica durante experimentos de usinagem, além de observar a variável disponibilizada pelo CNC FANUC denominada Carga (S1) que, segundo o fornecedor do comando numérico, está relacionada à potência necessária para realizar a usinagem. A relação da variável carga (S1) será correlacionada com a potência obtida pelo sensor em função da condição de usinagem.

### 3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Neste capítulo descrevem-se os materiais e equipamentos utilizados na pesquisa e as etapas dos ensaios. Para se estudar diferentes condições de fresamento, a matriz de experimentos foi dividida em 4 etapas, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Fluxograma das etapas contidas neste trabalho



Fonte: Elaboração Própria

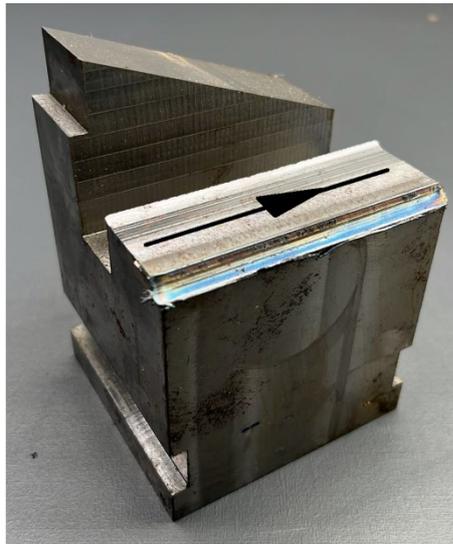
Busca-se avaliar o consumo da potência elétrica e da energia elétrica obtidas do CNC para identificar as estratégias de usinagem com menor consumo de energia elétrica, garantindo a qualidade das peças usinadas em termos da rugosidade média ( $R_a$ ). Na etapa 1 foi feito um estudo preliminar sobre a aquisição da potência elétrica no desbaste, usinando em passes retos nos diferentes parâmetros de corte. Na etapa 2 foi realizado o fresamento paralelo ao contorno de acabamento nas diferentes estratégias de usinagem para a obtenção do consumo de potência elétrica. Na etapa 3 fez-se um estudo em uma superfície complexa de uma peça alterando o programa convencional pelo CAMSpeed. Na etapa 4 foi realizado o fresamento paralelo ao contorno de um fuso obtendo-se a energia elétrica consumida.

Os ensaios foram realizados no laboratório do Grupo de Pesquisa em Manufatura Auxiliada por Computador (GPCAM) no campus de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina, utilizando os materiais e as ferramentas cedidas pelo GPCAM.

### 3.1 ETAPAS DO ESTUDO

Na etapa 1 do trabalho houve um estudo preliminar simplificado para identificar o funcionamento do sistema de aquisição de dados durante a usinagem e verificar a sensibilidade dos valores obtidos. Para a realização dos primeiros ensaios para a obtenção da potência elétrica, foi utilizado um corpo de prova em aço AISI P20. Foram realizados passes retos nas diferentes profundidades de corte (0,5 mm, 1,0 mm, 2,0 mm, 3,0 mm) e nas diferentes velocidades de corte (104 m/min, 260 m/min, 408 m/min). Na Figura 24, a linha em preto com a flecha indica o trajeto da ferramenta. A geometria é de um corpo de prova em aço AISI P20. Para este estudo, foi utilizada uma fresa de topo reto com suporte para duas pastilhas de corte modelo 490R-08T308M-PM 1030 COROKEY da marca Sandvik.

Figura 24- Corpo de prova em aço AISI P20

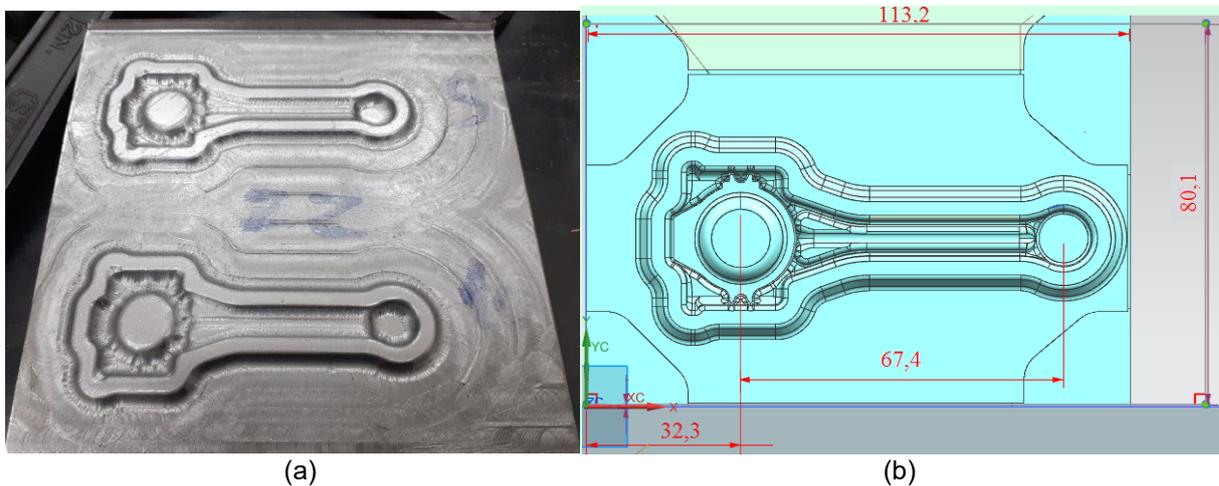


Fonte: Elaboração própria

A etapa 2 consiste em um estudo para identificar a energia elétrica consumida em função das estratégias de usinagem de acabamento. Para a obtenção da potência elétrica e da energia elétrica utilizando o programa NX 9.0 com diferentes estratégias de usinagem, foi usinado um molde em aço P20 de uma biela, conforme a figura 25. As seguintes estratégias foram utilizadas: ziguezague, paralela ao contorno, zigue e ziguezague concêntrica. Uma ferramenta de corte de

ponta esférica foi utilizada para a usinagem de acabamento, a ferramenta tem raio 3 mm, comprimento 50 mm, com dois gumes de corte, metal duro e dureza 45 HRC.

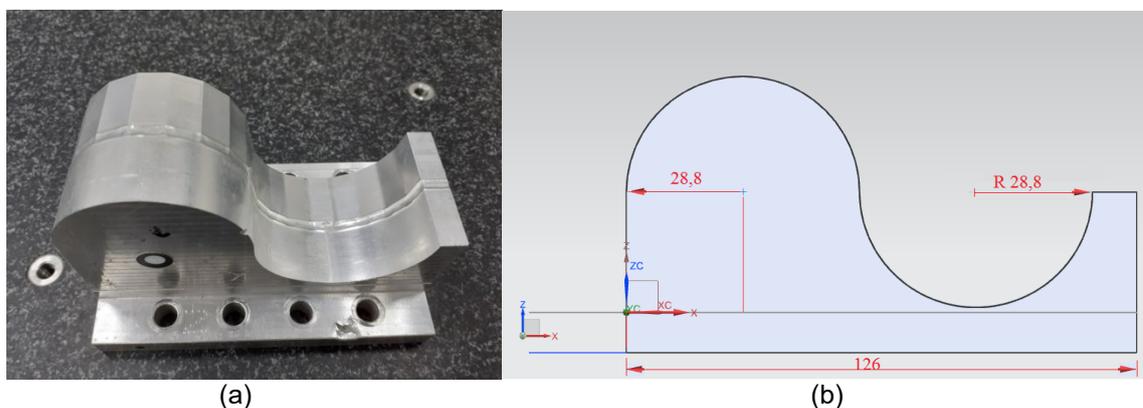
Figura 25 – (a) Corpo de prova de uma biela para a usinagem de diferentes estratégias e (b) desenho do CAD



Fonte: Elaboração própria

Na etapa 3 fez-se um estudo usinando-se a superfície complexa na peça em aço AISI P20 ilustrada na Figura 26. Foi utilizado o software NX versão 9.0, bem como o programa convencional e o programa modificado pelo software CAMSpeed. Os parâmetros de corte iniciais para os dois programas são: velocidade de rotação do eixo-árvore = 3980 rpm, avanço = 796 mm/min. Foi utilizada uma fresa de topo esférico com suporte para pastilha. A pastilha de corte utilizada é da marca Sandvik, modelo WRHS016 PM3225 de metal duro revestido com diâmetro de 16 mm.

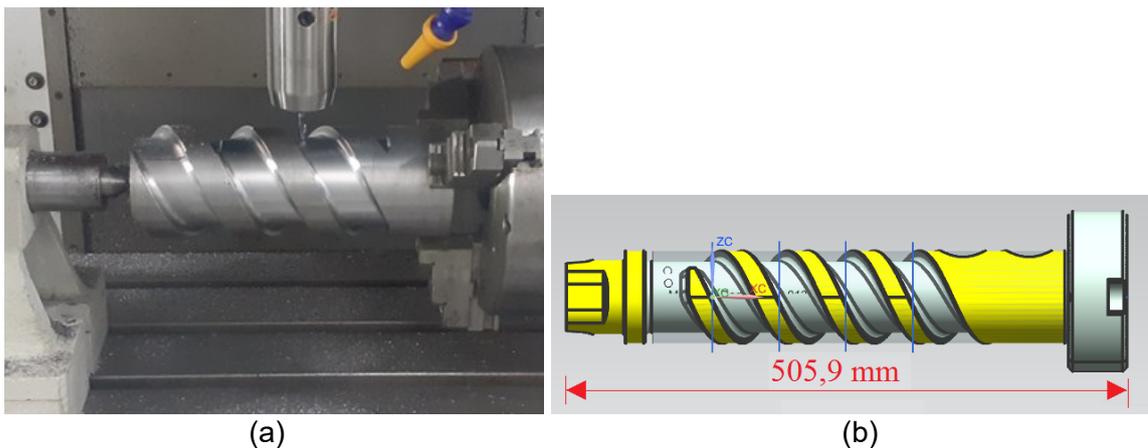
Figura 26 – Peça com superfície complexa (a) corpo de prova em aço AISI P20 e (b) geometria no CAD



Fonte: Elaboração Própria

Na etapa 4 foi feito um estudo para obter a energia elétrica consumida utilizando-se o software CAMSpeed, para o qual foi gerada uma trajetória de fresamento paralelo ao contorno realizando-se alguns passes em um fuso de aço AISI 8550, como mostrado na Figura 27. Foi comparada a usinagem utilizando-se o software CAMSpeed com a usinagem feita usando-se o programa convencional. O CAMSpeed busca manter a velocidade de corte constante e, para isso, ele compensa o raio de contato da ferramenta na peça com a variação da rotação do eixo-árvore, melhorando a rugosidade da peça. Uma ferramenta de corte de ponta esférica foi utilizada para a usinagem de acabamento, a ferramenta tem raio 3 mm, comprimento 50 mm, com dois gumes de corte, metal duro e dureza 45 HRC.

Figura 27 – (a) Fresamento de um fuso e (b) geometria no CAD



Fonte: Elaboração própria

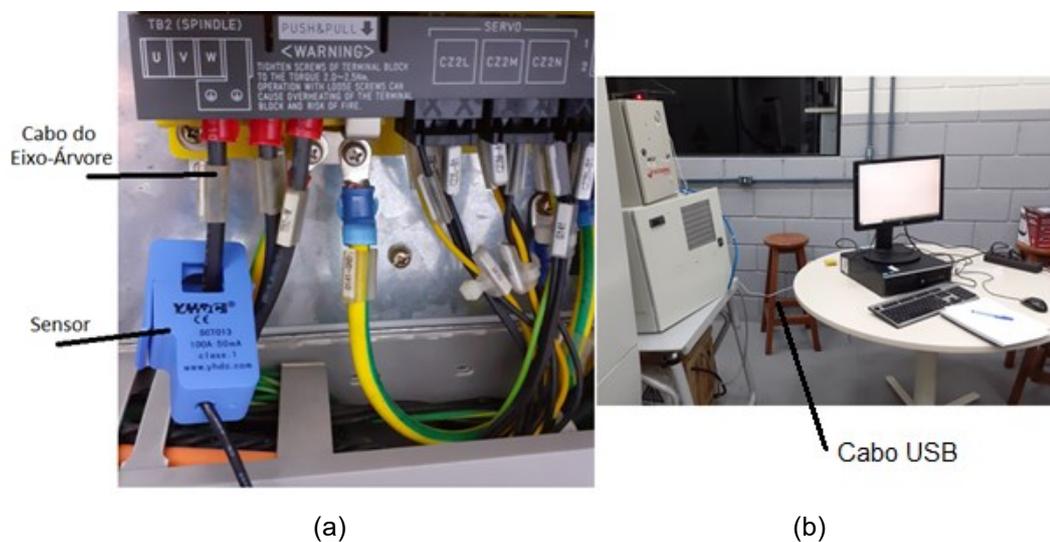
A máquina-ferramenta utilizada é uma fresadora 4 eixos ROMI D 600 e comando numérico FANUC 0iMC, possui rotação de eixo-árvore de 750 [rpm], potência do motor principal ca 15kW e potência total instalada de 30kVA.

### 3.2 SENSOR MEDIDOR DE CORRENTE ELÉTRICA

O sensor para medir a corrente elétrica (sensor sct 013 000) é da marca YHDC, com capacidade de corrente 100A:50mA. Este medidor de corrente elétrica é conectado em um condicionador de sinal junto à placa Arduino. Na Figura 28(a) é ilustrado a conexão do medidor de corrente elétrica no cabo de alimentação do eixo-

árvore da máquina-ferramenta. O aparelho de condicionamento de sinal com o Arduino é conectado ao computador por meio de um cabo USB em uma ponta e micro USB em outra ponta, como ilustrado na Figura 28(b). A frequência de aquisição de dados é igual a 6,4Hz. Para a medição da potência elétrica e da energia elétrica assumisse como sendo a tensão elétrica do motor elétrico durante a usinagem constante igual a 380 Volts.

Figura 28– (a) Sensor de corrente conectado em uma das fases do eixo-árvore e (b) computador instalado e conectado por cabo USB no sensor



Fonte: Elaboração Própria

Foi utilizado um alicate amperímetro digital da marca Minipa para a calibração do sistema conforme a Figura 29. A medição da corrente do alicate amperímetro digital foi igual à medição do sensor medidor de corrente. Para a medição da potência elétrica consumida foi assumido como hipótese a tensão do motor elétrico constante e uma eficiência de 85% do motor.

Figura 29 – Alicate Amperímetro Digital

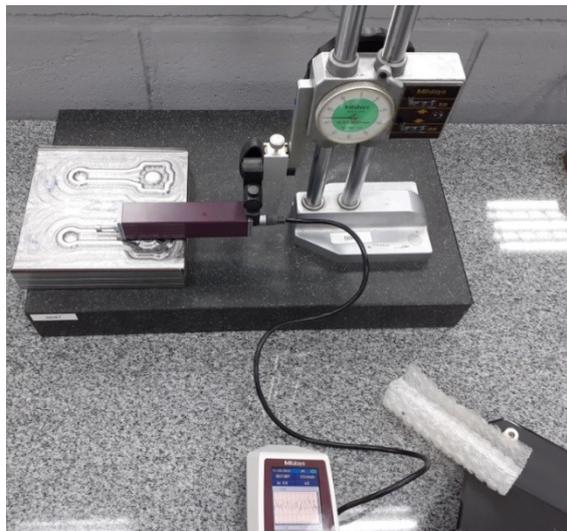


Fonte: Minipa (2022)

### 3.3 ANÁLISE DA RUGOSIDADE

Foi utilizado um rugosímetro de bancada da marca Mitutoyo (ver Figura 30) para a medição da rugosidade na superfície do molde da biela após realizadas as diferentes estratégias de usinagem. Foram realizadas as medições de rugosidade perpendicularmente às ranhuras na superfície utilizando um *cut off* de 0,8 mm. Com os resultados das rugosidades obtidas para cada estratégia de usinagem de acabamento, pode-se mostrar a melhor estratégia de usinagem para obter uma menor rugosidade média e menor consumo de energia elétrica.

Figura 30 - Rugosímetro de bancada da marca Mitutoyo



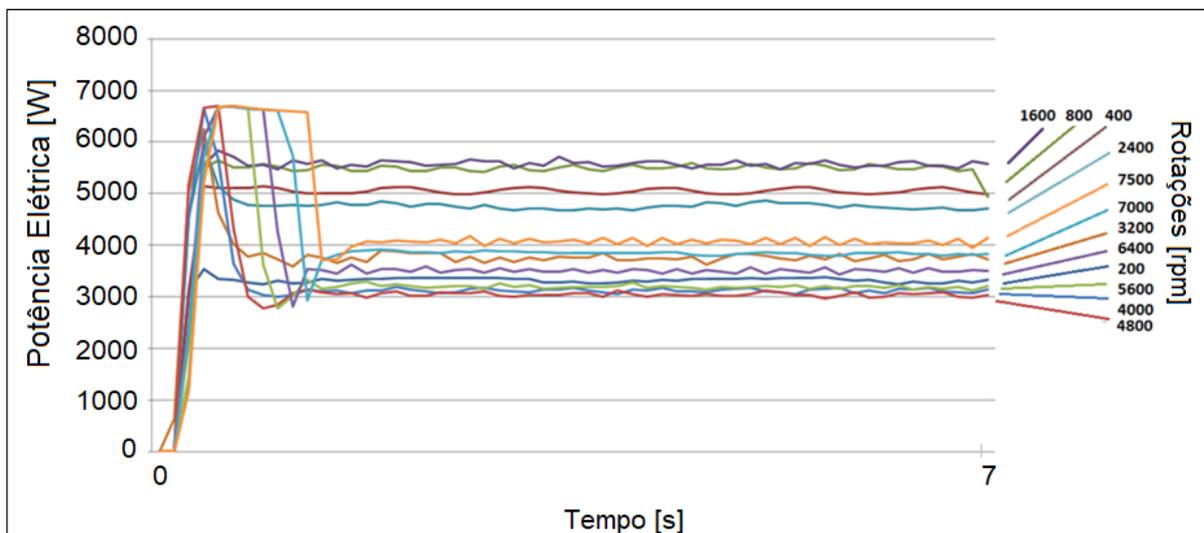
Fonte: Elaboração Própria

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA SEM REMOÇÃO DE MATERIAL

Primeiramente foram realizados ensaios com o eixo-árvore girando em vazio para a obtenção da potência elétrica e a verificação do funcionamento do equipamento de medição em várias rotações. Para a obtenção da potência elétrica foi assumido a tensão elétrica do motor do eixo-árvore como sendo constante. Foi obtido o consumo de potência elétrica para cada faixa de rotação em um intervalo de tempo de 7 segundos, construindo-se assim as curvas da potência elétrica em função das rotações do eixo-árvore em rpm, conforme mostrado na Figura 31. Para gerar o gráfico da potência consumida foi utilizado a equação (4) com 380V para tensão de fase e 0,85% para a eficiência do motor.

Figura 31 - Curvas das potências elétricas em função das rotações do eixo-árvore em [rpm]

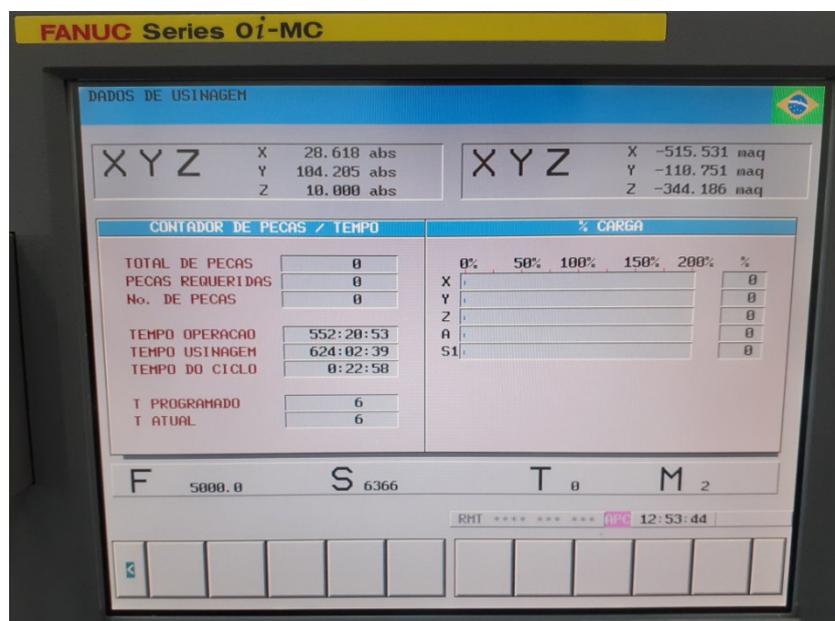


Fonte: Elaboração Própria

Nota-se no gráfico a ocorrência de um pico de potência elétrica, alcançando 6500W quando é ligado o motor do eixo-árvore e o eixo começa a girar. Após este pico de potência elétrica o motor se estabiliza para cada faixa de rotação. Percebe-se que não é diretamente proporcional à rotação do motor com a potência elétrica consumida, pois a rotação que mais consumiu potência correspondeu a 1600 rpm.

Uma captura de tela do CNC da máquina-ferramenta utilizada é mostrada na Figura 32. A carga S1 oferece a informação do carregamento solicitada à máquina durante a usinagem. A carga S1 mede-se em porcentagem do esforço do eixo. A máquina-ferramenta pode ser programada para avisar o operador durante a usinagem quando a carga S1 chegar a um determinado valor e, assim, o operador pode verificar o desgaste na ferramenta e determinar a troca da mesma.

Figura 32 – Tela dos dados de usinagem mostrando a Carga [%], para o eixo árvore a carga S1



Fonte: Elaboração Própria

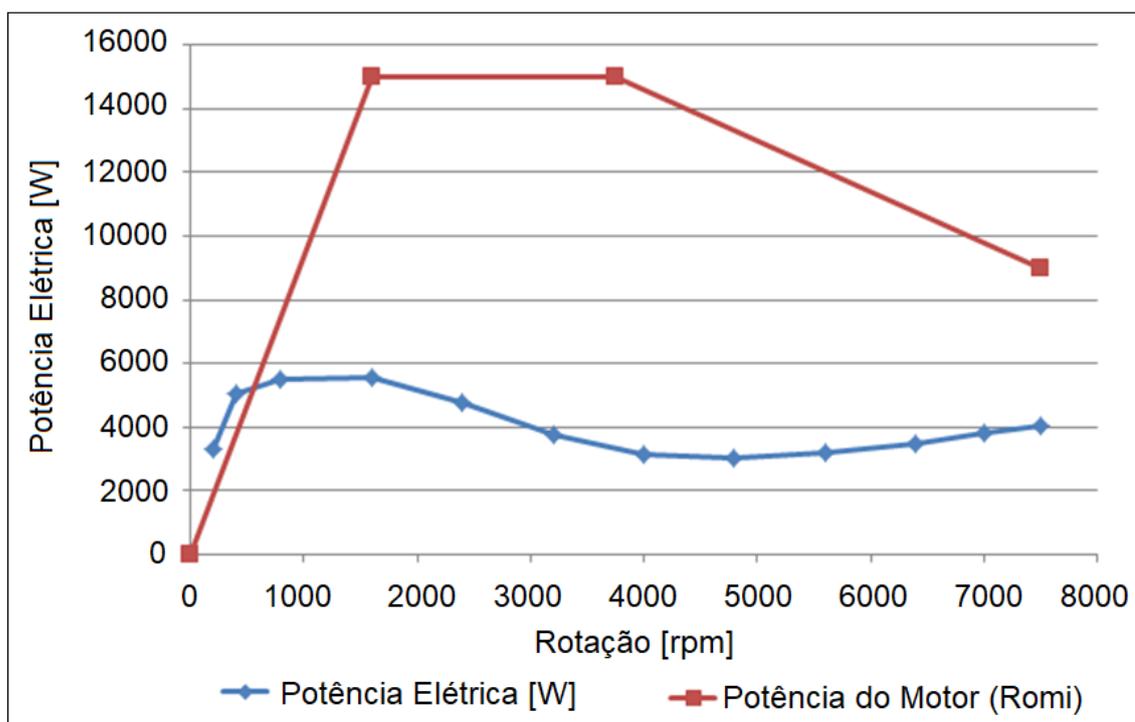
Esta informação pode ser utilizada para identificar a solicitação da máquina e, possivelmente, identificar o desgaste da ferramenta. O operador pode programar um aviso quando o valor da carga alcançar um valor determinado. Esta informação, disponibilizada pelo CNC, será utilizada para compreender melhor os dados obtidos com o sensor instalado na máquina neste trabalho.

A curva em vermelho na Figura 33 descreve o comportamento da potência do motor segundo a Romi (2022). A parte linear inicial possui um torque de 87 Nm até a rotação de 1600 rpm, depois o motor mantém uma potência de 15kW até a rotação de 3750 rpm, terminando com 9kW na rotação de 7500 rpm.

A curva em azul ilustra a potência elétrica consumida nos ensaios realizados sem remoção de material para 12 rotações diferentes. Percebe-se na curva azul que

no início há um aumento de potência consumida de 200 rpm para 400 rpm e, depois, a taxa de aumento diminui até o valor próximo de 1600 rpm quando a potência consumida está na faixa de 5500W. Após 1600 rpm o valor da potência começa a diminuir, chegando ao valor próximo de 3000W para uma rotação de 4500 rpm, após este valor o motor começa a consumir mais potência chegando a 4000W, onde a rotação é de 7500 rpm. O Apêndice A ilustra na Tabela 11 as 12 medições de corrente elétrica com seus desvios padrão e suas respectivas cargas.

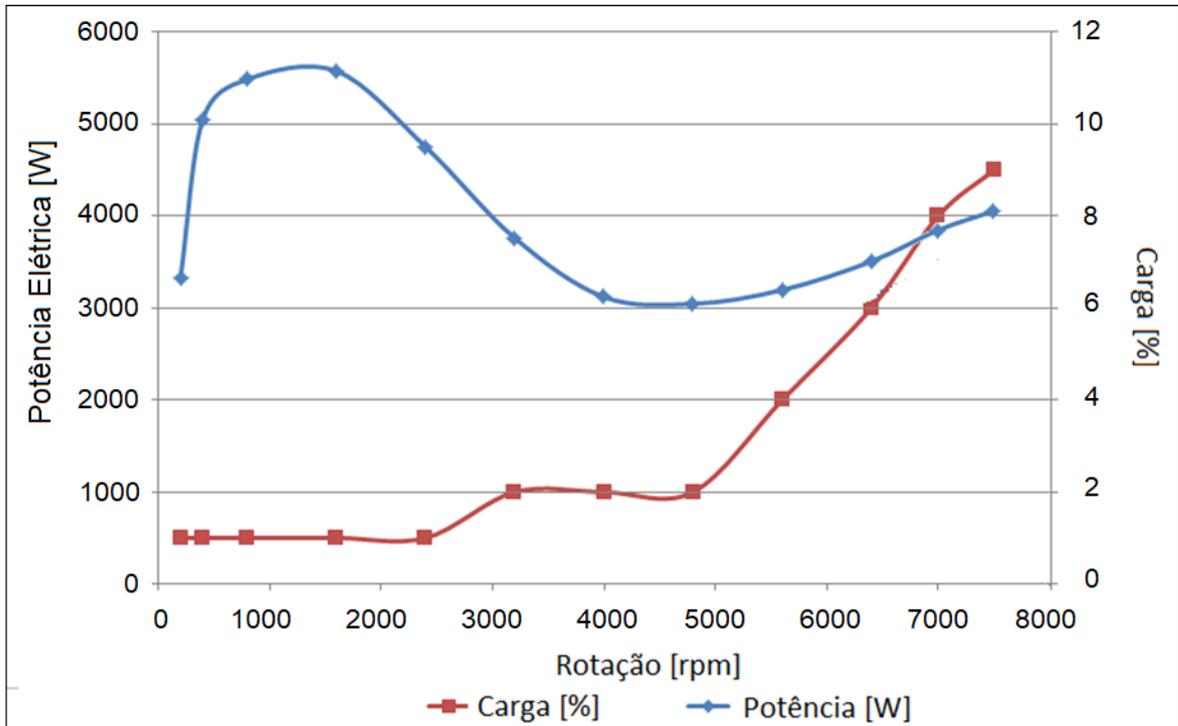
Figura 33 – Curvas da potência elétrica do eixo-árvore em vermelho curva disponibilizada pela Romi e a curva em azul é a potência obtida das 12 medições de rotações diferentes



Fonte: Elaboração Própria

A Figura 34 mostra o comportamento da curva da potência em watt (em azul) e da carga em porcentagem (em vermelho) para diferentes rotações do motor do eixo-árvore (em vazio). Nota-se que houve um comportamento oposto das curvas na faixa entre 1600 rpm até 4000 rpm, isto é, nesta faixa de valores houve uma redução da potência e um aumento da carga com o eixo árvore girando em vazio.

Figura 34 - Curva da Potência e da Carga em função das rotações do eixo-árvore sem remoção de material



Fonte: Elaboração Própria

#### 4.2 ETAPA 1: MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA NO DESBASTE

A potência elétrica foi obtida durante a usinagem utilizando uma fresa de topo reto com diâmetro de 20mm com dois gumes de corte utilizando pastilhas de metal duro revestidas pelo processo de deposição física de vapor com AlTiCrN. Os parâmetros de corte utilizados foram: (a) profundidade de corte: 0,5 mm, 1,0 mm, 2,0 mm e 3,0 mm; (b) penetração de trabalho  $a_e = 20\text{mm}$ ; (c) velocidade de corte: 104 m/min, 260 m/min e 408 m/min.

No primeiro ensaio foi utilizada uma fresa de topo reto com diâmetro igual a 20 mm, com os seguintes parâmetros de corte:  $V_c = 104\text{m/min}$ ,  $s = 1653\text{ rpm}$ ,  $V_f = 400\text{mm/min}$ ,  $f_z = 0,121\text{mm/dente}$ . Para a obtenção da potência média foram feitas 88 repetições. Para esta velocidade de corte não houve diferença significativa na potência obtida. Um dos motivos para este resultado é a região de trabalho do motor não ser ótima.

A Figura 35(a) mostra as curvas de potência para diferentes profundidades de corte. Nota-se que as curvas estão praticamente na mesma faixa de valores, mas, para a profundidade de corte igual a 3 mm, tem-se uma potência média de 5750 W.

As respectivas cargas para as correntes elétricas com várias profundidades de corte estão na Tabela 12 no Apêndice B.

As correntes elétricas médias, desvio padrão e a carga (variável do CNC S1) para suas respectivas profundidades de corte são mostradas na Tabela 13 no Apêndice B. Para obter-se a potência média foram obtidos os dados de potência elétrica estáveis, com 20 repetições. Para a obtenção dos dados foi utilizada uma fresa de topo reto com pastilhas de metal duro com diâmetro de 20 mm. Os parâmetros de corte foram os seguintes:  $V_c = 260\text{m/min}$ ,  $s = 4140\text{ rpm}$ ,  $V_f = 1000\text{mm/min}$ .

A Figura 35(b) ilustra as curvas das potências obtidas mediante o sistema de monitoramento para as diferentes profundidades de corte. Percebe-se que com o aumento da profundidade de corte há um aumento no consumo de potência elétrica chegando a 6000W para  $a_p = 3\text{ mm}$  e ocorre uma distinção visível entre o consumo de potência elétrica para cada profundidade de corte se comparado com a rotação de 1653 rpm.

Utilizou-se uma ferramenta com pastilhas de metal duro com diâmetro 20 mm. Os parâmetros de corte foram os seguintes:  $V_c = 408\text{ m/min}$ ,  $s = 6500\text{ rpm}$ ,  $V_f = 1600\text{ mm/min}$ . Os valores da corrente média obtida no instrumento de medição com o respectivo desvio padrão, e a carga do eixo-árvore para as diferentes profundidades de corte são mostrados na Tabela 14 no Apêndice B.

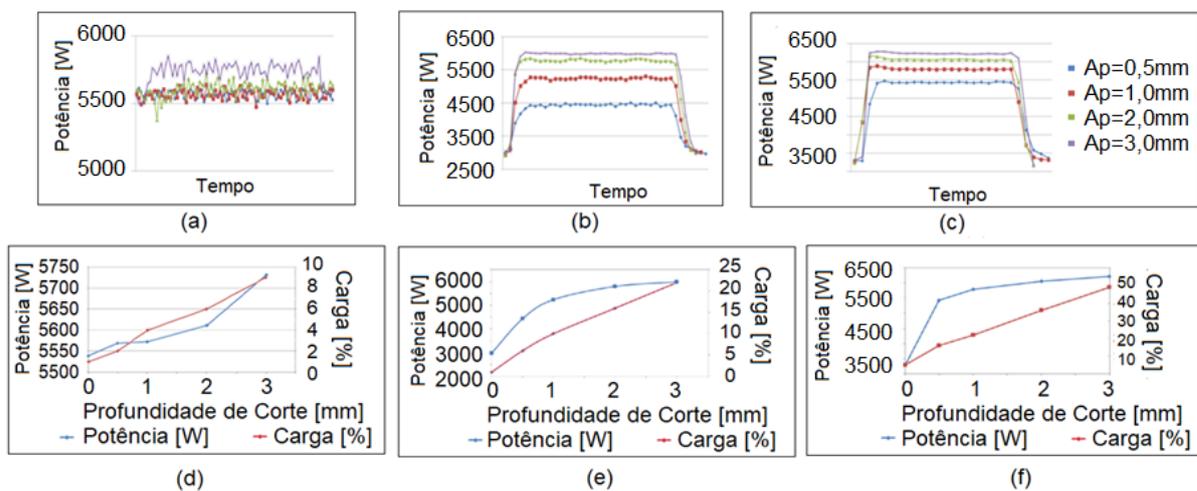
A Figura 35(c) foi obtida para os seguintes parâmetros de corte:  $V_c = 408\text{ m/min}$ ,  $s = 6500\text{ rpm}$ ,  $V_f = 1600\text{ mm/min}$ . Nota-se que com o aumento da rotação do eixo-árvore para 6500 rpm há um aumento do consumo de potência elétrica pelo eixo-árvore para as mesmas profundidades de corte se comparado a Figura 35(b), chegando a 6300W para a profundidade de corte de 3 mm.

A Figura 35(d) mostra uma curva de potência em watts (em azul) e outra curva da carga do eixo-árvore em porcentagem (em vermelho) para uma rotação de 1653 rpm. Nota-se que, aumentando a carga do eixo-árvore, a potência obtida do instrumento de medição aumenta também em função da profundidade de corte.

A Figura 35(e) mostra a curva da potência e a curva da carga S1 no eixo-árvore para uma rotação de 4140 rpm. Nota-se que com o aumento da potência elétrica consumida ocorre um aumento da carga praticamente linear.

A Figura 35(f) ilustra a curva da carga S1 (em vermelho) e da potência (em azul) para a rotação de 6500 rpm. Nota-se que, semelhantemente ao resultado obtido na Figura 35(e), o comportamento da curva de carga tem um comportamento praticamente linear.

Figura 35- Curvas da potência elétrica em função da profundidade de corte com (a)  $s=1653$  rpm utilizando o sensor (b),  $s=4140$  rpm utilizando o sensor, (c)  $s=6500$  rpm utilizando o sensor. Curvas da potência elétrica e da carga do eixo-árvore (d)  $s=1653$  rpm, (e)  $s=4140$  rpm e (f)  $s=6500$  rpm

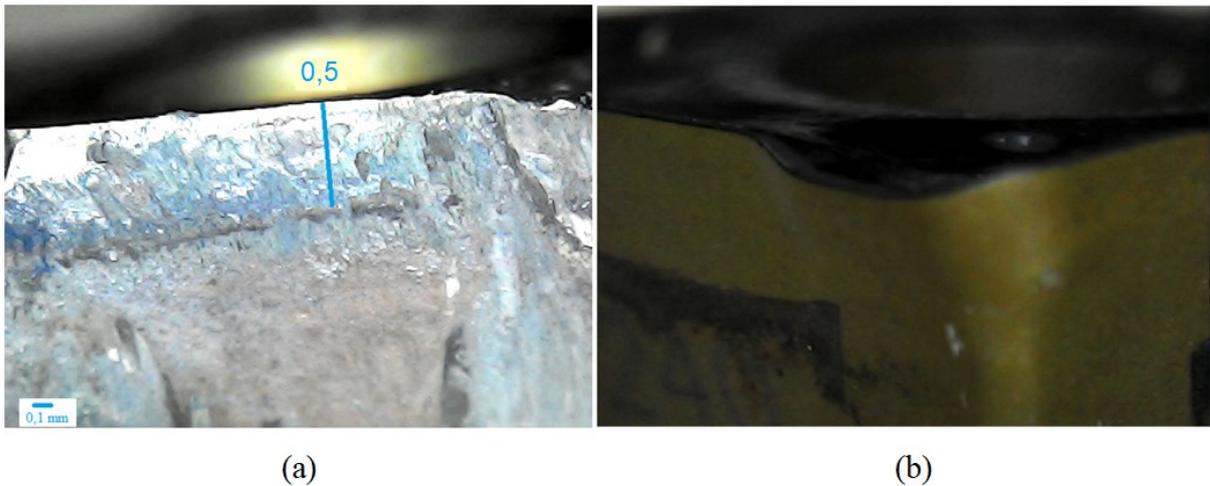


Fonte: Elaboração Própria

#### 4.2.1 Identificação do desgaste de ferramentas pelo consumo de potência

Neste trabalho também foram feitos ensaios de desbaste para identificar alterações no consumo de energia com o desgaste das ferramentas de corte. Foi utilizada uma ferramenta com diâmetro de 20 mm, com dois gumes de corte. A ferramenta com desgaste utilizada é apresentada na Figura 36(a), percebe-se que o revestimento já foi removido da pastilha, e há a presença de um desgaste de flanco  $VB = 0,5$  mm. Na Figura 36(b) é ilustrada uma pastilha nova.

Figura 36 – (a) Pastilha desgastada e (b) pastilha sem desgaste

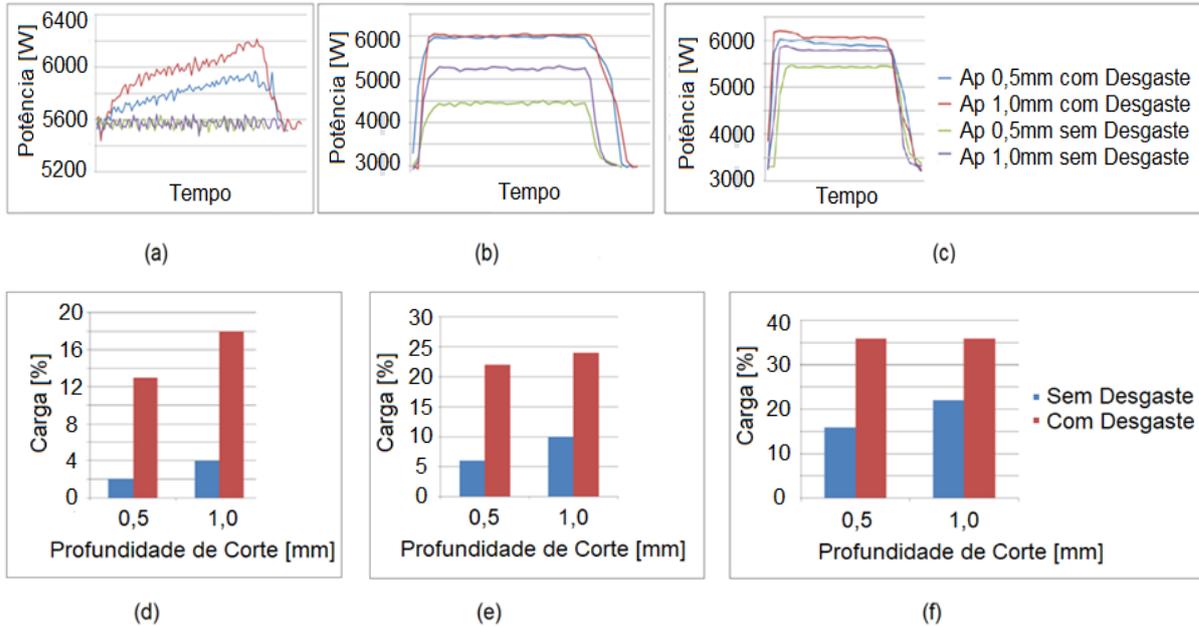


Fonte: Elaboração Própria

A Figura 37 mostra os gráficos de potência elétrica em função das diferentes profundidades de corte para os seguintes parâmetros de corte:  $v_f = 400$  mm/min,  $f_z = 0,121$  mm/dente. Foi efetuado o fresamento somente com as profundidades de corte 0,5 mm e 1,0 mm para preservar a ferramenta, pois para estas profundidades com o desgaste da ferramenta já formavam cavacos incandescentes.

Observa-se na Figura 37(a) que para as ferramentas novas, as influências das profundidades de corte não foram perceptíveis aos sinais de potência. Mas o valor da variável carga S1 foi sensível a esta alteração Figura 37(d). Assim, a carga S1 demonstrou-se eficiente para esta rotação (1653 rpm). Observa-se na Figura 37(b) e na Figura 37(e), rotação de 4140 rpm, percebe-se que, tanto o sinal de potência como a variável carga S1 foram sensíveis para se detectar as diferentes profundidades de corte ( $a_p$ ) com a ferramenta nova. Contudo, embora o valor de potência aumentou com as ferramentas desgastadas, sendo sensível ao desgaste da ferramenta, a potência não foi sensível para identificar a profundidade de corte, ao passo que a variável carga S1 na Figura 37(e) foi capaz de identificar ambos os casos ( $a_p$  e desgaste da ferramenta). Para a rotação de 6500 rpm, tanto a potência na Figura 37(c) quanto a variável carga S1 demonstraram serem sensíveis para identificar tanto a profundidade de corte quanto o desgaste da ferramenta além da correlação entre elas.

Figura 37 – Gráficos da potência elétrica para as profundidades de corte 0,5 e 1,0mm com e sem desgaste da ferramenta e variável S1 (a)  $s=1653$  rpm, (b)  $s=4140$ rpm, (c)  $s=6500$  rpm, (d)  $s=1653$  rpm, (e)  $s=4140$  rpm e (f)  $s=6500$  rpm

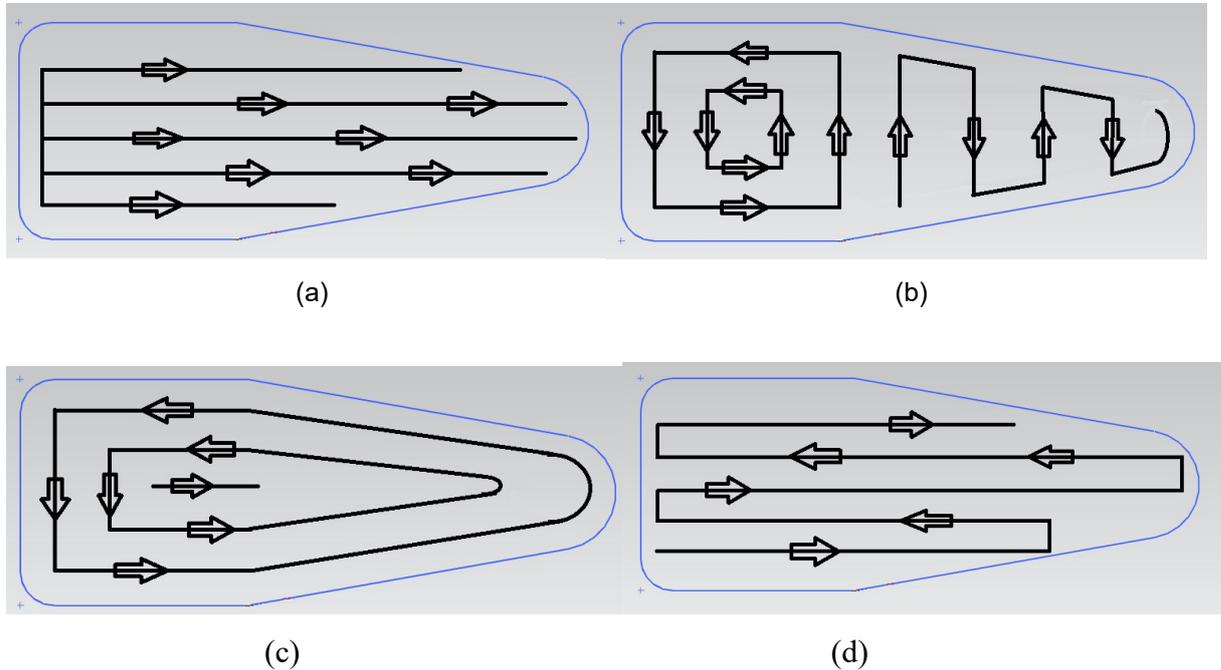


Fonte: Elaboração Própria

#### 4.3 ETAPA 2: MEDIÇÃO DE POTÊNCIA NAS DIFERENTES ESTRATÉGIAS NO ACABAMENTO

Para a medição de potência nas diferentes estratégias utilizou-se quatro principais estratégias do software NX 9.0: zigue, ziguezague concêntrico, paralela ao contorno e ziguezague. Na interface do software, na opção de usinagem da biela (“*method drive*”) escolhe-se fresamento de área (“*area milling*”), e escolhe-se a opção tipos de passes para usinagem (“*non-steep cut pattern*”), onde se define a estratégia de usinagem. A Figura 38(a) mostra a trajetória da ferramenta na estratégia zigue. A Figura 38(b) ilustra a trajetória da ferramenta na estratégia ziguezague concêntrico. A Figura 38(c) ilustra a trajetória da ferramenta na estratégia paralela ao contorno. A Figura 38(d) ilustra a trajetória da ferramenta na estratégia ziguezague.

Figura 38 – (a) Trajetória da ferramenta na estratégia zigue, (b) Trajetória na estratégia ziguezague concêntrico, (c) Trajetória na estratégia paralela ao contorno e (d) Trajetória da ferramenta na estratégia ziguezague



Fonte: Elaboração Própria

#### 4.3.1 Usinagem sem Remoção de Material nas Diferentes Estratégias

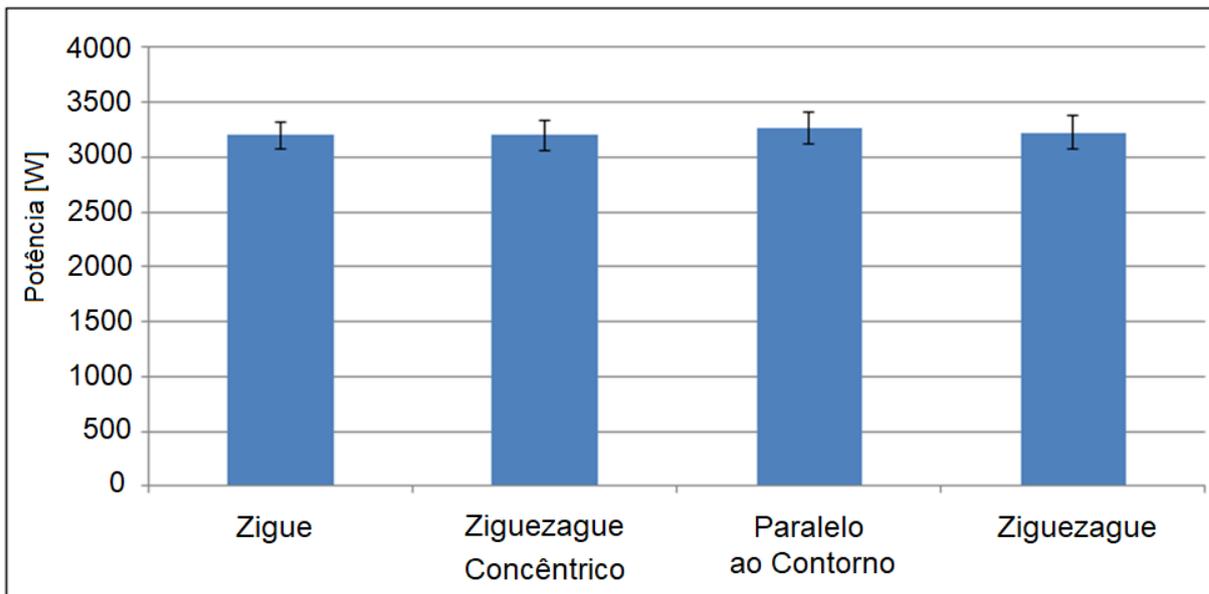
Inicialmente foi rodado o programa na máquina para a trajetória da ferramenta sem remoção de material para a aquisição dos dados nas diferentes estratégias do software NX 9.0 usinando um molde de uma biela. As estratégias utilizadas foram: zigue, ziguezague concêntrico, paralela ao contorno e ziguezague. Foram utilizados os seguintes parâmetros de corte:  $V_c = 120$  m/min,  $s = 6366$  rpm,  $V_f = 1900$  mm/min,  $f_z = 0,15$  mm/dente,  $a_p = 0,5$  mm e  $a_e = 0,1$  mm. A Tabela 2 contém a potência elétrica média e o desvio padrão para os programas rodando em vazio nas diferentes estratégias.

Tabela 2 - Potência elétrica média consumida, desvio padrão, tempo real e programado em função das estratégias de usinagem em vazio e a carga em porcentagem

Estratégias de Usinagem em Vazio	Potência Elétrica Média [W]	Desvio padrão	Tempo Real	Tempo Programado	Carga [%]
Zigue	3196	120	28min. 15s	24min. 08s	6
Ziguezague Concêntrico	3199	136	22min. 19s	17min. 23s	6
Paralela ao Contorno	3259	147	17min. 38s	16min. 21s	6
Ziguezague	3225	155	19min. 8s	17min. 15s	6

A Figura 39 mostra a potência elétrica média em watt para cada estratégia utilizada. Percebe-se que as quatro estratégias têm consumo de potência elétrica praticamente igual, e o desvio padrão está na mesma faixa de valores.

Figura 39 – Potência Elétrica Média em função das 4 estratégias diferentes

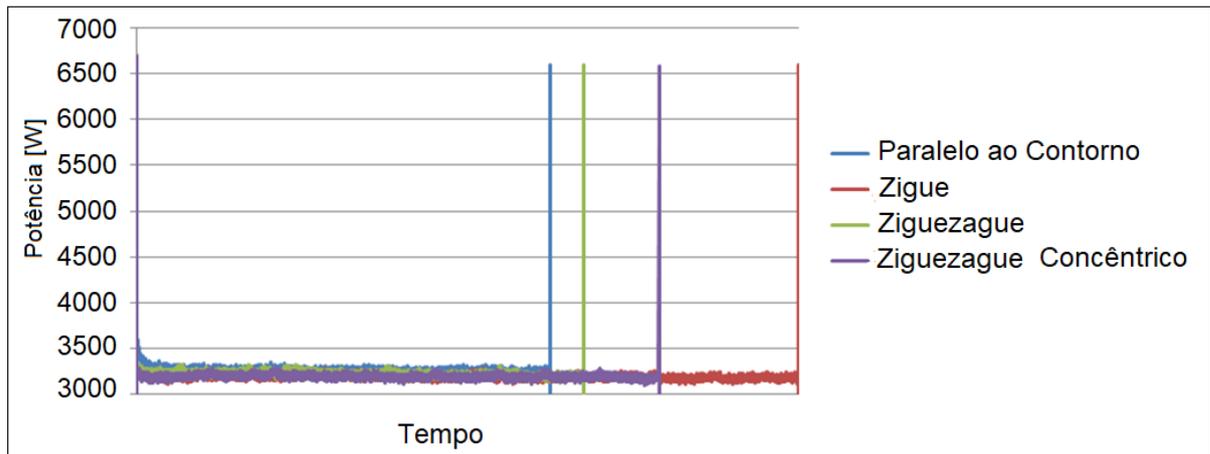


Fonte: Elaboração Própria

A Figura 40 mostra as curvas de potência elétrica em função das estratégias de usinagem. Percebe-se que há um pico inicial de 6600 W devido ao início de

rotação do eixo-árvore para todas as estratégias, depois a potência se estabiliza em aproximadamente 3300 W e, no final de cada estratégia, tem-se outro pico de potência até cerca de 6600 W, quando o motor desliga.

Figura 40 – Curva da Potência Elétrica em função das estratégias de usinagem em vazio



Fonte: Elaboração Própria

#### 4.3.2 Usinagem de Acabamento nas Diferentes Estratégias

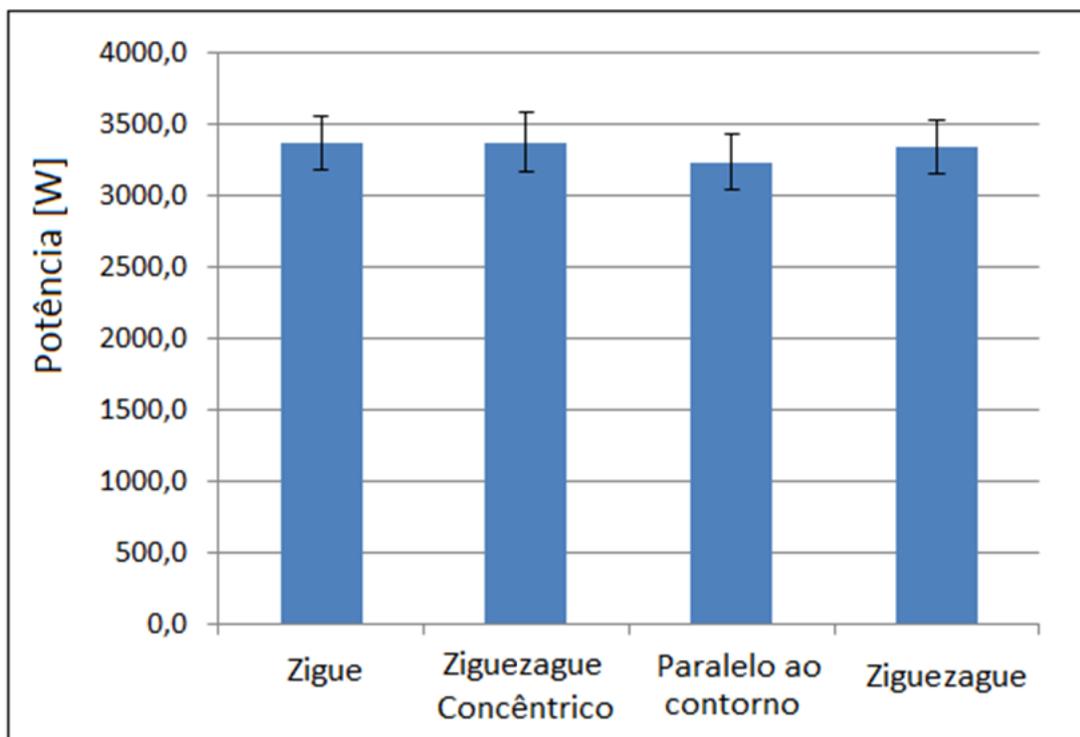
Na usinagem de acabamento a seco para a aquisição dos dados nas diferentes estratégias do software NX 9.0 durante a usinagem do molde de uma biela, foram utilizadas as seguintes estratégias: zigue, ziguezague concêntrico, paralela ao contorno e ziguezague. Os programas utilizaram os seguintes parâmetros de corte para a usinagem a seco:  $V_c = 120$  m/min,  $s = 6366$  rpm,  $V_f = 1900$  mm/min,  $f_z = 0,15$  mm/dente, profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,5 mm e penetração de trabalho ( $a_e$ ) de 0,1 mm. Foi utilizada uma ferramenta sem desgaste para a usinagem de acabamento, depois a ferramenta foi trocada a cada dois ensaios para eliminar a influência do desgaste. A Tabela 3 contém a potência elétrica média, o desvio padrão, o tempo real para a usinagem e a carga em porcentagem para os programas de usinagem de acabamento nas diferentes estratégias.

Tabela 3 - Potência elétrica média consumida, desvio padrão, tempo real em função das estratégias de usinagem de acabamento e a carga em porcentagem

Estratégias de Usinagem	Potência Elétrica Média [W]	Desvio padrão	Tempo Real	Carga [%]
Zigue	3371	183	28min. 32s	6
Ziguezague Concêntrico	3379	211	22min. 46s	6
Paralela ao Contorno	3238	190	17min. 59s	6
Ziguezague	3346	189	19min. 12s	6

A Figura 41 ilustra o gráfico da potência elétrica média durante a usinagem de acabamento em função de cada estratégia de usinagem. Percebe-se que os valores são praticamente iguais, e o desvio padrão para os valores estão na mesma faixa de valores para todas as estratégias.

Figura 41 – Potência Elétrica Média durante a usinagem de acabamento em função das estratégias



Fonte: Elaboração Própria

A Figura 42(a) ilustra a curva de potência elétrica em função da estratégia zigue. Percebe-se que há um pico inicial de 6700 W devido ao início de rotação do eixo-árvore e, logo depois, há outro pico de 5300 W com uma sequência constante

de 3500 W até outro pico com 4100 W. Depois ocorre um pico de 4600 W seguido de outro com 5300 W. O consumo permanece constante em 3500 W, com variações leves chegando a 3900 W.

Na metade do programa ocorre um pico de 4700 W, e outros picos ocorrem, mas de 4300 W. Na região próxima ao final do programa nota-se um aumento de consumo de potência elétrica, chegando a cerca de 4100 W de consumo de potência elétrica e, depois, ficando entre 3600 W de consumo. Por fim, tem-se um pico de 6600 W no desligamento do motor.

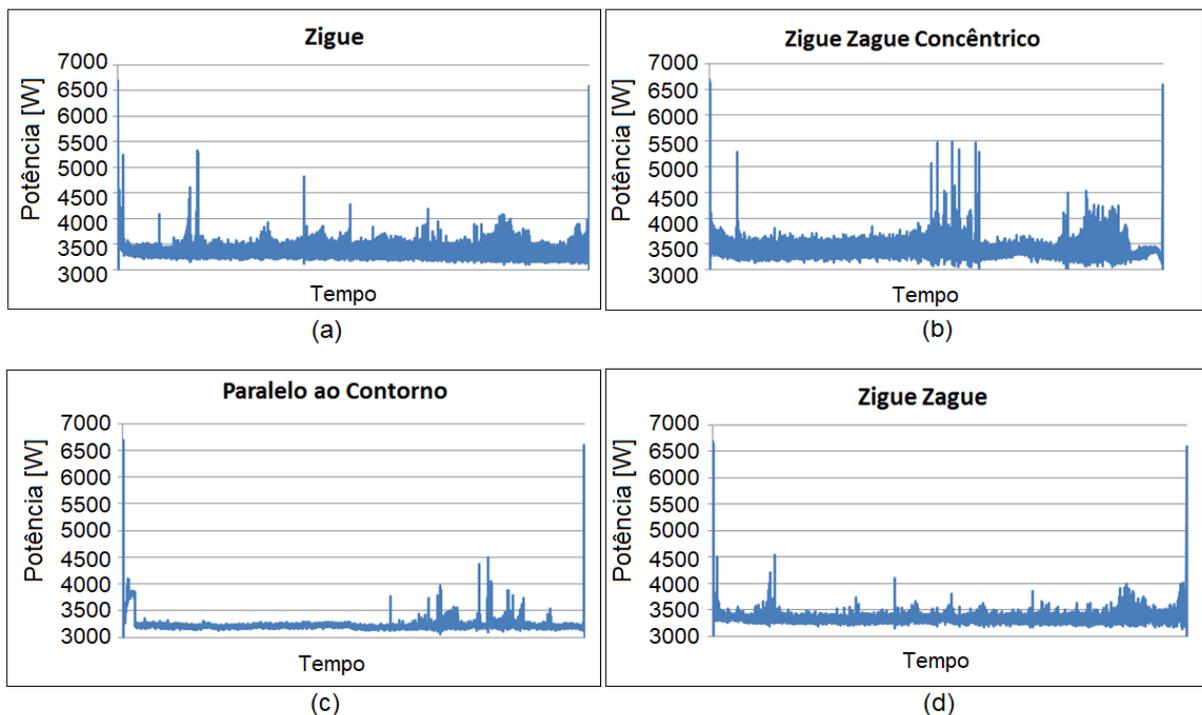
Antes da usinagem, a ferramenta foi analisada em um microscópio ótico, e não foi verificado desgaste na ferramenta. A Figura 42(b) mostra a curva de potência elétrica em função da estratégia ziguezague concêntrico. Percebe-se que há um pico inicial de 6600 W devido ao início de rotação do eixo-árvore e, logo depois, há outro pico de 5300 W com uma sequência constante de 3500 W, até uma grande variação na metade do programa, obtendo-se picos de aproximadamente 5500 W, ficando outra vez constante o consumo com 3500 W até próximo do final do programa. Na região próxima ao final do programa ocorre elevada variação, chegando a 4500 W e, depois, tendo o consumo reduzido a 3400 W até o fim do programa, com um pico de 6600 W no desligamento do motor do eixo-árvore.

Para a realização dos dois últimos ensaios, a ferramenta foi substituída por uma ferramenta nova sem desgaste, eliminando-se a influência do desgaste no consumo de potência elétrica. A Figura 42(c) mostra a curva de potência elétrica em função da estratégia paralela ao contorno. Percebe-se que há um pico inicial de 6600 W devido ao início de rotação do eixo-árvore e, logo depois, há um patamar de aproximadamente 4000 W. O consumo de potência elétrica se mantém constante (3300 W) até aproximadamente a metade do programa. Na segunda metade do programa há um aumento de consumo de potência elétrica, chegando a ocorrer a presença de alguns picos de potência de cerca de 4500 W, e há também vários picos de 4000 W. Próximo ao final se mantém constante o consumo em 3300 W, até outro pico de 6600 W ao finalizar o programa, e parar de girar o motor do eixo-árvore.

O gume da ferramenta foi visualizado no microscópio ótico, e não foi encontrado desgaste. A Figura 42(d) mostra a curva de potência elétrica na estratégia ziguezague. Percebe-se que há um pico inicial de 6600 W devido ao início

de rotação do eixo-árvore e, logo depois, há um pico de consumo de potência até 4500 W. Após este pico o consumo de potência elétrica fica em 3400 W aproximadamente até outro pico de 4500 W novamente. Depois o consumo se mantém em 3400 W até a metade do programa, onde ocorre um pico de consumo de potência elétrica de 4100 W. Na região final do programa percebe-se um consumo de potência elétrica acima da média, próximo a 4000 W. No final do programa ocorre outro pico de 6500 W ao finalizar o programa e parar de girar o motor do eixo-árvore.

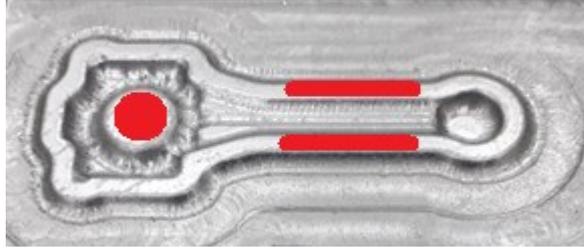
Figura 42 – (a) Estratégia zigue, (b) Estratégia ziguezague concêntrico, (c) Estratégia paralela ao contorno e (d) Estratégia ziguezague



Fonte: Elaboração Própria

Para o cálculo da rugosidade média foram feitas 9 medições de rugosidade na direção perpendicular as ranhuras na superfície com o rugosímetro de bancada. As regiões de medição estão ilustradas na Figura 43. Foram feitas 3 medições do círculo e 3 medições em cada haste lateral da biela.

Figura 43 – Regiões para a obtenção das 9 medições da rugosidade média ( $R_a$ )



Fonte: Elaboração Própria

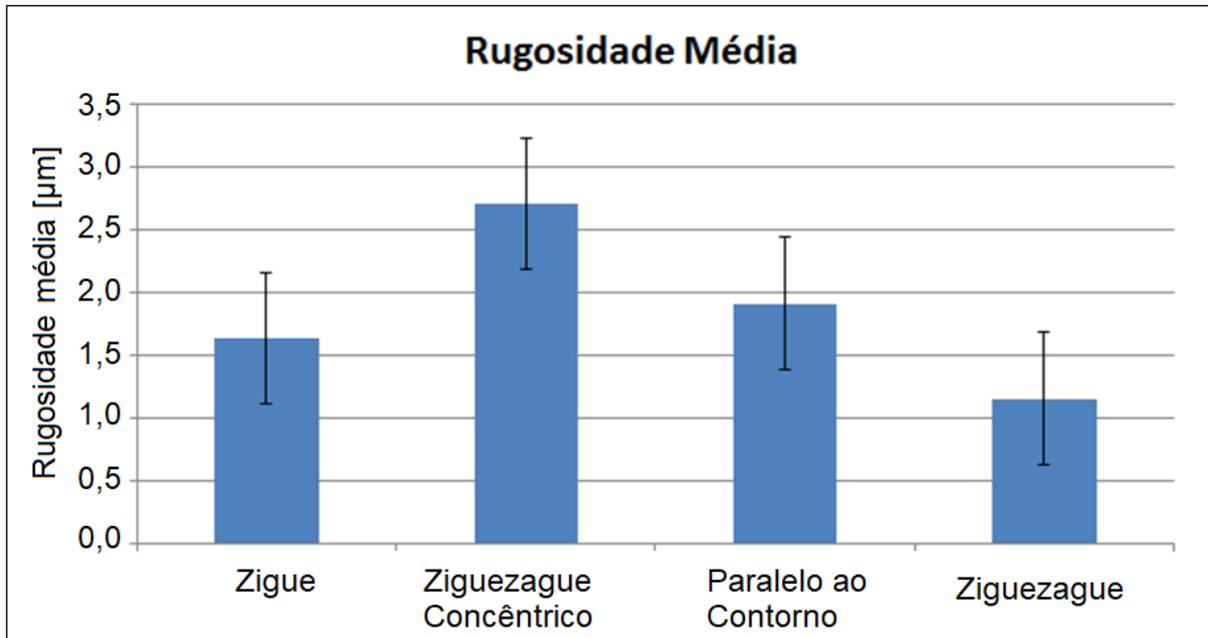
A Tabela 4 mostra: (a) a potência elétrica consumida durante o fresamento de acabamento; (b) a rugosidade média ( $R_a$ ); e (c) o desvio padrão da rugosidade média em função das estratégias de usinagem de acabamento. Percebe-se que a maior rugosidade média foi obtida na estratégia ziguezague concêntrico, igual a  $2,7\mu\text{m}$ .

Tabela 4 – Estratégias de usinagem com suas respectivas: potência consumida, rugosidade média e o desvio padrão da rugosidade média

<b>Estratégias de Usinagem</b>	<b>Potência [W]</b>	<b>Ra [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Zigue	3371	1,6	0,5
Ziguezague Concêntrico	3379	2,7	0,5
Paralela ao Contorno	3238	1,9	0,6
Ziguezague	3346	1,2	0,7

O gráfico na Figura 44 ilustra a rugosidade média para cada estratégia utilizada. Percebe-se que a estratégia ziguezague concêntrico foi a estratégia que resultou na maior rugosidade média.

Figura 44 – Rugosidade média para cada estratégia utilizada

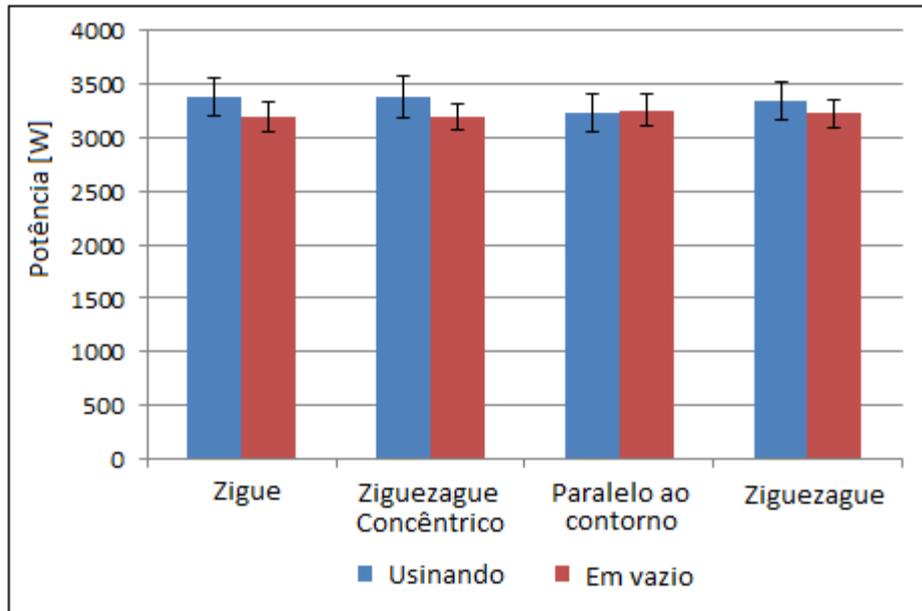


Fonte: Elaboração Própria

A Figura 45 compara a potência elétrica em watt em função das estratégias na usinagem em vazio e na usinagem de acabamento paralelo ao contorno da biela, com o desvio padrão. Percebe-se que a estratégia zigue resultou em um consumo de potência elétrica maior quando está fresando a biela, aproximadamente 5,5% a mais de consumo de potência elétrica quando está usinando. A estratégia ziguezague concêntrico obteve maior consumo de potência elétrica na usinagem de acabamento, aproximadamente 5,5% se comparada à movimentação em vazio.

Nota-se que a estratégia paralela ao contorno teve praticamente igual consumo de potência elétrica na usinagem em vazio se comparado com o resultado obtido no fresamento paralelo de acabamento. Este é o segundo resultado da obtenção de potência elétrica para esta estratégia, pois o resultado anterior já tinha sido com essa mesma característica. Por fim, a estratégia ziguezague obteve maior consumo de potência elétrica durante a usinagem de acabamento, com 3,5% de aumento se comparada à movimentação em vazio.

Figura 45 – Comparativo do consumo de potência elétrica média em função das estratégias



Fonte: Elaboração Própria

No caso de grandes lotes de peças, é importante identificar a estratégia que consome menos energia. A Tabela 5 contém as estratégias com seus respectivos tempos de fresamento de acabamento e o consumo de energia.

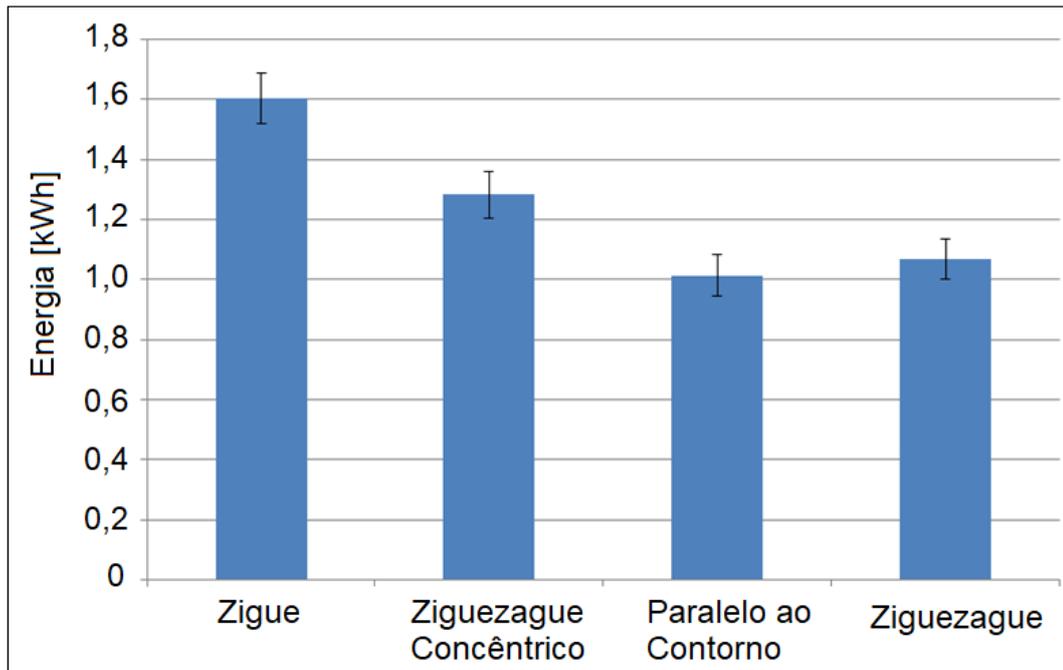
Tabela 5 – Tempo e a Energia consumida pelas diferentes estratégias de fresamento

<b>Estratégias de Usinagem</b>	<b>Tempo [h]</b>	<b>Energia [kWh]</b>
Zigue	0,4755	1,603
Ziguezague Concêntrico	0,37944	1,282
Paralela ao Contorno	0,29972	0,970
Ziguezague	0,32	1,071

A Figura 46 mostra a energia média consumida por cada estratégia de usinagem. Percebe-se que a estratégia zigue foi a estratégia que mais consumiu energia, que foi 65% a mais que a estratégia paralela ao contorno. A estratégia ziguezague concêntrico foi a segunda estratégia que mais consumiu energia, consumindo 32% de energia a mais que a estratégia paralela ao contorno. A estratégia paralela ao contorno foi a estratégia que menos consumiu energia. Por fim, a estratégia ziguezague foi a terceira estratégia que mais consumiu energia,

10% a mais de energia elétrica que a estratégia paralela ao contorno, mas estatisticamente estão na mesma faixa de desvio padrão a estratégia ziguezague e a estratégia paralela ao contorno.

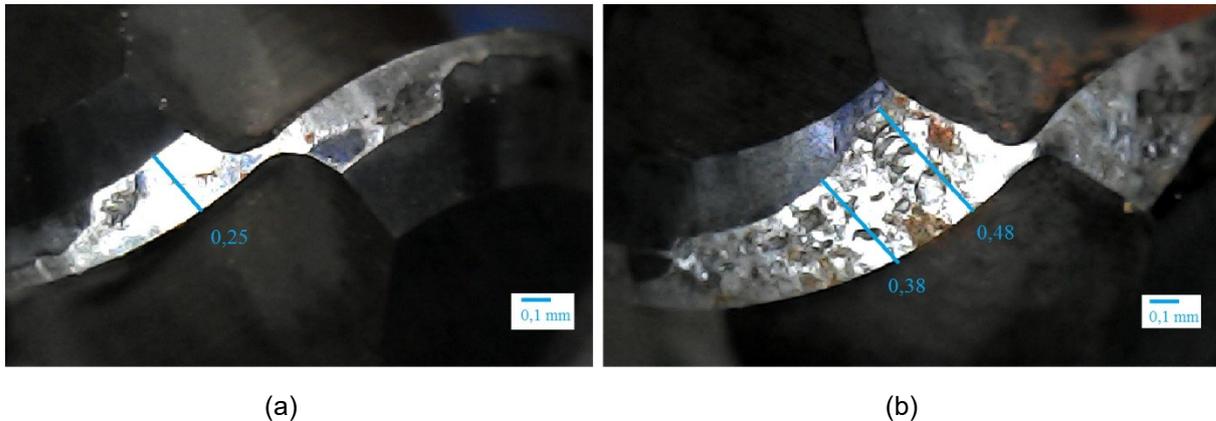
Figura 46 – Consumo de energia para cada estratégia de usinagem



Fonte: Elaboração Própria

Posteriormente, foi feita a usinagem de acabamento paralelo ao contorno na estratégia ziguezague com a presença de desgaste na ferramenta. A Figura 47 mostra o desgaste na ferramenta de corte após 4 ensaios de usinagem nas diferentes estratégias de corte. Os parâmetros de corte no fresamento de acabamento foram:  $V_c = 120$  m/min,  $f_z = 0,15$  mm/dente, profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,5 mm e penetração de trabalho ( $a_e$ ) de 0,1 mm. Usando-se as imagens obtidas usando-se o microscópio ótico, foi determinado que o desgaste de flanco VB da ferramenta utilizada é igual a 0,18 mm.

Figura 47 – Desgaste da ferramenta de corte (a) ferramenta no início da usinagem e (b) ferramenta com desgaste



Fonte: Elaboração Própria

Verifica-se na Tabela 6 que o desgaste só é notado nos valores obtidos de rugosidade média. Com os dados da carga gerados pelo CNC não consegue-se perceber o desgaste, e o mesmo ocorre com a potência elétrica consumida pelo motor do eixo-árvore.

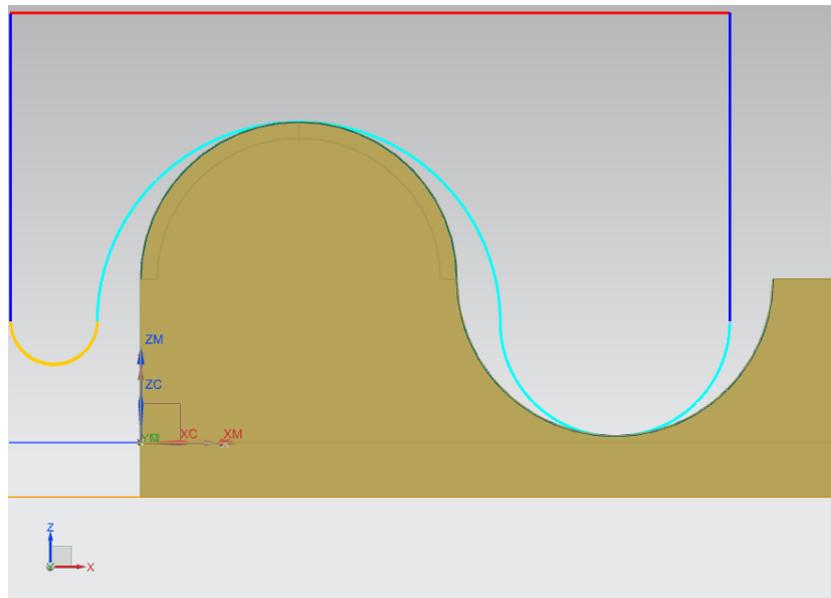
Tabela 6 – Potência média, rugosidade e a carga em função das estratégias com e sem desgaste da ferramenta.

Estratégias de Usinagem	Potência Média [W]	Desvio Padrão	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Carga [%]
Ziguezague	3346	189	1,2	6
Ziguezague com Desgaste	3342	207	3,2	6

#### 4.4 ETAPA 3: MEDIÇÃO DE POTÊNCIA UTILIZANDO O CAMSPEED SEM REMOÇÃO DE MATERIAL PARA UMA PEÇA COM GEOMETRIA COMPLEXA

Foi utilizado o software NX (versão 9) e o programa convencional e o programa modificado pelo CAMSpeed. Os parâmetros de corte iniciais para os dois programas são: velocidade de rotação do eixo-árvore = 3980 rpm, avanço = 796 mm/min. A Figura 48 mostra a vista lateral da peça e a trajetória da ferramenta de ponta esférica para a usinagem de acabamento da superfície (em azul claro).

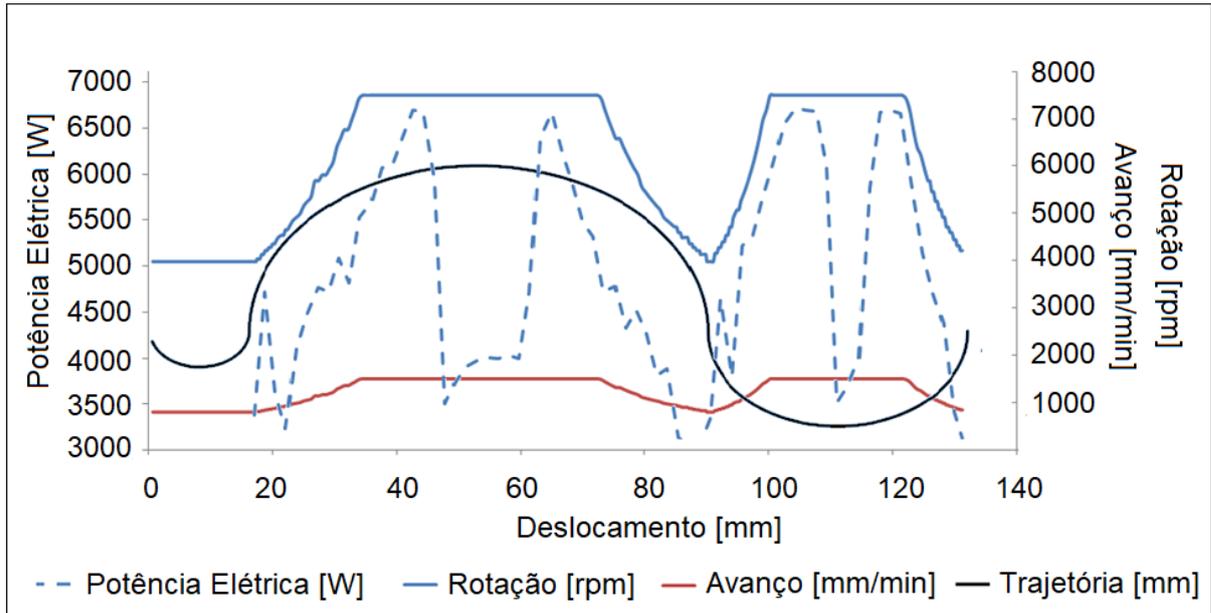
Figura 48 – Vista frontal do corpo de prova com superfície complexa e a trajetória da ferramenta



Fonte: Elaboração Própria

A Figura 49 mostra a trajetória da ferramenta e, na mesma distância de deslocamento, a curva de rotação, a curva de avanço da ferramenta e a potência elétrica consumida. Percebe-se que a curva de rotação e a curva de avanço têm comportamentos semelhantes. Quando a ferramenta está na parte ascendente no primeiro estágio de deslocamento ocorre um aumento gradativo de rotação do eixo-árvore, bem como um aumento gradativo do avanço da ferramenta até uma rotação de 7500 rpm e um avanço de 1500 mm/min. Após esse estágio a ferramenta está no topo da superfície complexa e, nesse instante, a potência consumida é de 3700 W, e começa a ocorrer deslocamento descendente da ferramenta, havendo assim uma diminuição gradativa da rotação do eixo-árvore e uma redução do avanço da ferramenta até os valores de  $s = 4131$  rpm e  $f = 826$  mm/min. Nesse instante a ferramenta está com o raio de contato máximo entre a peça e a ferramenta, igual a 3 mm. Depois ela continua o deslocamento descendente da ferramenta até o ponto mais baixo da superfície côncava e, neste instante, a rotação é de 7500 rpm, e o avanço é igual a 1500 mm/min. Por fim, a ferramenta percorre o último trajeto côncavo de maneira ascendente, com a redução gradativa da rotação e do avanço até os valores de 4131 rpm e avanço igual a 826 mm/min.

Figura 49 – Curvas da potência [W], rotação [rpm], avanço [mm/min] e a trajetória da ferramenta [mm]



Fonte: Elaboração Própria

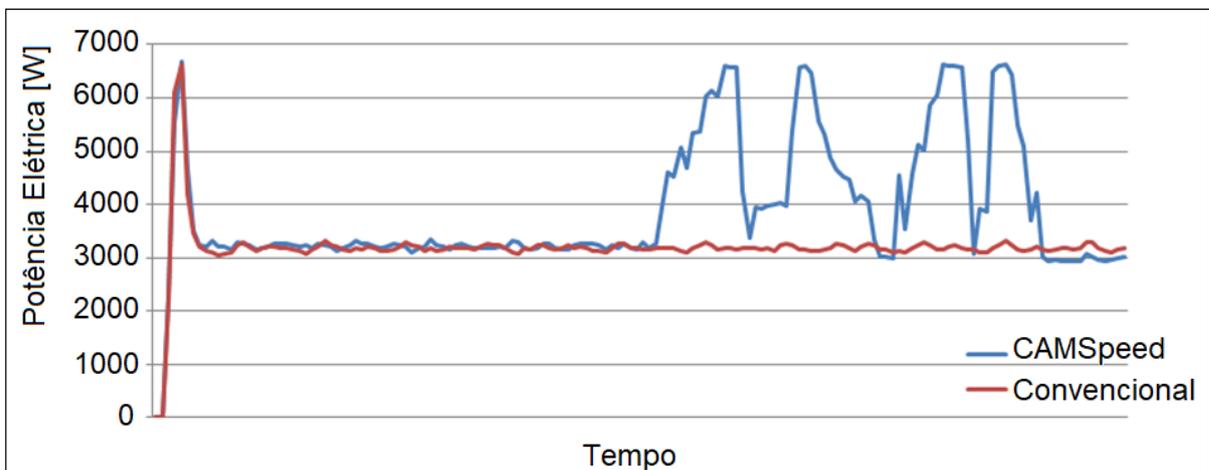
Para a elaboração da Figura 49 foi calculada a média das potências elétricas obtidas nos 11 primeiros passes no fresamento de acabamento utilizando o software CAMSpeed. Observa-se que o consumo de potência elétrica varia no início do fresamento, com um pico de 4700 W, e depois ocorre a redução do consumo para cerca de 3300 W e, neste instante, a ferramenta começa a diminuir seu raio de contato. Quando a ferramenta está contornando a superfície convexa ocorre o aumento progressivo do consumo até cerca de 6700 W e, neste consumo, a ferramenta está chegando no topo da superfície convexa com raio de contato próximo a zero. Próximo ao topo da superfície convexa, quando o motor aumenta a rotação para 7500 rpm, ocorre uma redução do consumo de potência elétrica, alcançando o valor de 3500 watts.

Após chegar ao topo, a ferramenta começa a descer ao longo da superfície convexa e, com isso, o consumo de potência aumenta, chegando a outro pico de potência com 6600 W, diminuindo progressivamente até o valor de cerca de 3300 W. Neste valor a ferramenta está quase com o raio de contato completo à superfície. Quando a ferramenta fica com o raio de contato completo, há um pequeno pico de potência de 4500 W e, depois, o motor aumenta progressivamente o consumo de potência até chegar a 6600 W, quando a ferramenta está com raio de contato

próximo a zero na superfície côncava. Quando a ferramenta está com raio de contato zero ocorre uma brusca queda de consumo de potência elétrica, chegando a 3300 W e, depois, ocorre um rápido aumento de consumo até 6600 W novamente. Quando o raio de contato da ferramenta começa a aumentar, há uma redução do consumo de potência elétrica até o valor de aproximadamente 3300 W.

A Figura 50 ilustra a potência elétrica em função do programa utilizado para um passe de acabamento em código G. Nota-se que na curva utilizando o software CAMSpeed há a presença de 4 picos de potência elétrica na faixa de 6500 W.

Figura 50 – Curvas da potência elétrica do CAMSpeed e do programa convencional



Fonte: Elaboração Própria

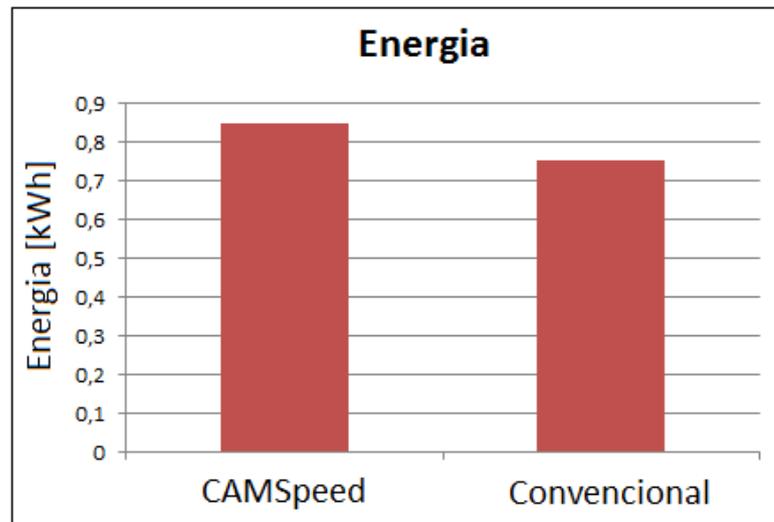
A Tabela 7 ilustra: a potência elétrica, desvio padrão, carga em porcentagem e o tempo em função dos programas escolhidos. Utilizando-se o software CAMSpeed percebe-se que a carga varia entre 2% e 150% para a usinagem em vazio. Nota-se também que houve um aumento de 38% de consumo de potência elétrica utilizando o software CAMSpeed, e o tempo foi reduzido em aproximadamente 18%.

Tabela 7 – Potência elétrica, desvio padrão, carga, tempo e a energia em função dos programas utilizados usinando em vazio

<b>Programa</b>	<b>Potência Elétrica [W]</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Carga [%]</b>	<b>Tempo</b>	<b>Energia [kWh]</b>
CAMSpeed	4398	1326	2 - 150	11min. 33s	0,8466
Convencional	3184	124	2	14min. 08s	0,750

A Figura 51 mostra o consumo de energia elétrica em função dos softwares utilizados para o ensaio de usinagem em vazio. Percebe-se que o programa utilizando o software CAMSpeed teve um consumo maior, aproximadamente 13% em relação ao programa convencional. A redução de tempo de usinagem foi de aproximadamente 18%.

Figura 51 – Energia Elétrica em função dos programas CAMSpeed e Convencional



Fonte: Elaboração Própria

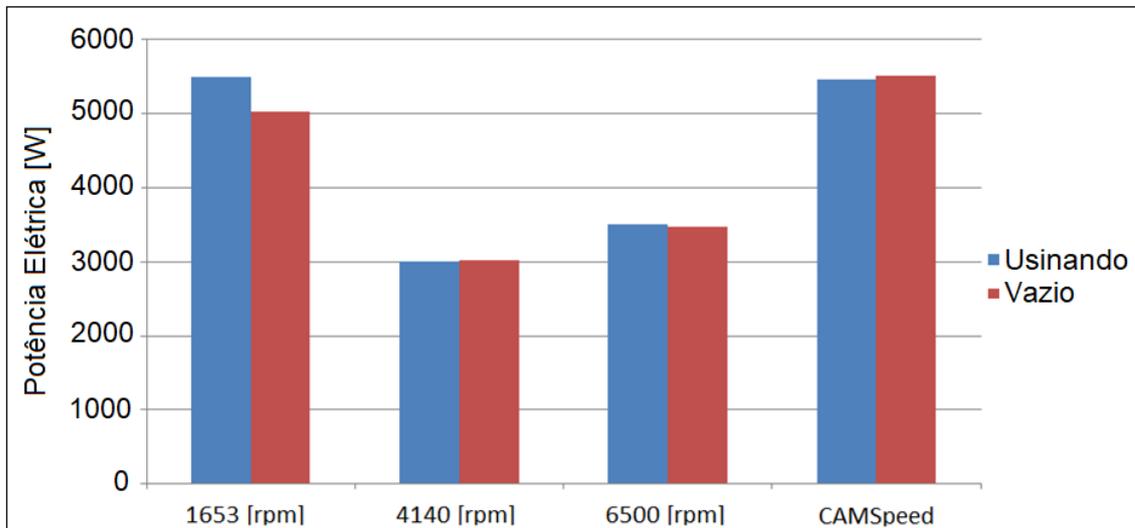
#### 4.4.1 Medição de Potência Elétrica durante a Usinagem *Offset* ao Contorno de uma geometria complexa

Para obter a potência elétrica durante a usinagem paralela ao contorno de acabamento de uma geometria complexa foi utilizada uma fresa de topo esférico com 16mm de diâmetro. A Figura 63 mostra a potência elétrica obtida durante a usinagem (em azul) pelo sistema de aquisição de sinais. Percebe-se que, para uma rotação do eixo-árvore de 1653 rpm, tem-se um consumo de aproximadamente 5500 W de potência elétrica, e o mesmo consumo ocorre utilizando o software CAMSpeed. Para uma rotação de 4140 rpm tem-se um consumo de 3000 W de potência elétrica, e para uma rotação de 6500 rpm tem-se um consumo de 3500 W.

A Figura 52 também compara os valores da potência elétrica usinando e sem remoção de material com a mesma ferramenta que foi utilizada para o

fresamento paralelo ao contorno (diâmetro de 16 mm). Percebe-se que, somente para a rotação de 1653 rpm houve diferença efetiva de média de consumo entre usinando e não usinando.

Figura 52 – Comparativo da Potência Elétrica em função das rotações do eixo-árvore usinando e em vazio

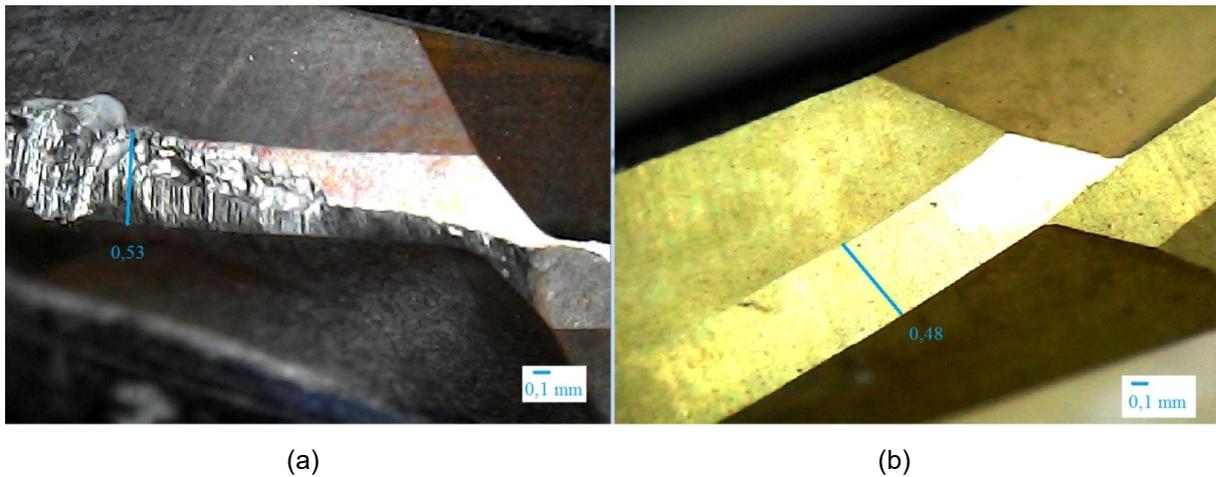


Fonte: Elaboração Própria

#### 4.4.2 Medição de Potência Elétrica durante a Usinagem *Offset* ao Contorno de uma geometria complexa com desgaste na ferramenta

Nesta seção serão apresentados resultados obtidos para a potência elétrica usando-se ferramenta com desgaste. Na Figura 53(a) é ilustrado o gume com desgaste de flanco  $VB = 0,05$  mm, e desgaste de cratera, e na Figura 53(b) é mostrada a ferramenta sem desgaste.

Figura 53 – (a) Gume com desgaste da pastilha e (b) Gume sem desgaste



Fonte: Elaboração Própria

As colunas da Tabela 8 mostram as cargas obtidas: (a) na usinagem em vazio; (b) quando a ferramenta sem desgaste estava usinando; (c) quando a ferramenta com desgaste estava usinando. Percebe-se não houve sensibilidade do sistema para distinguir as usinagens em vazio e usinando com e sem desgaste nos gumes das pastilhas.

Tabela 8 – Carga em vazio, carga usinando e carga usinando com desgaste na pastilha em função das rotações

Rotação [rpm]	Carga Vazio [%]	Carga Usinando [%]	Carga Usinando com Desgaste [%]
1653	1	1	1
4140	2	2	2
6500	5	5	5
CAMSpeed	2-150	2-150	2-150

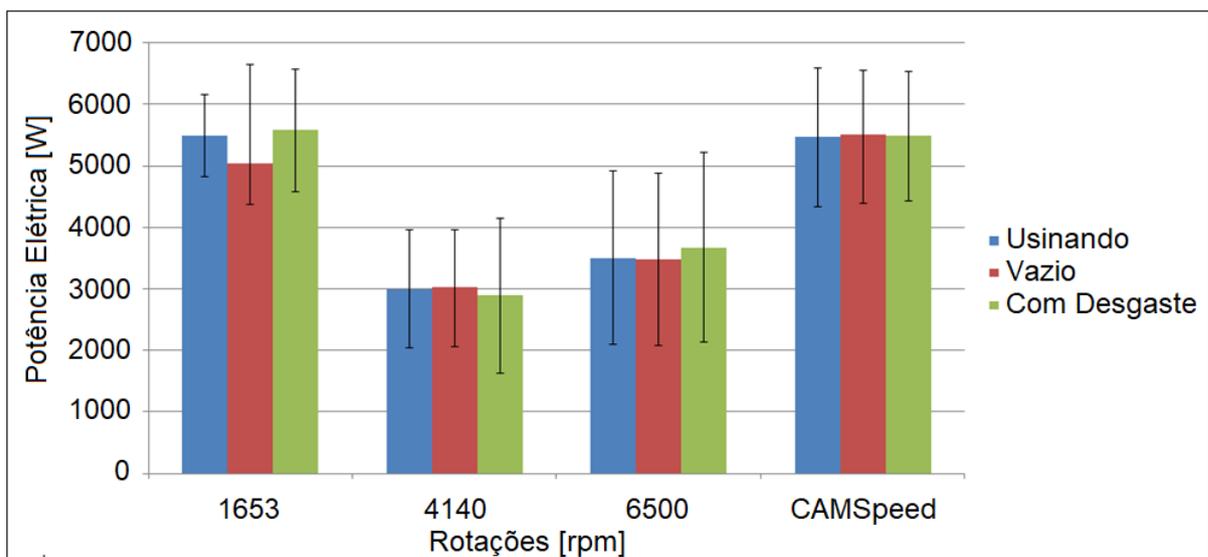
A Tabela 9 contém a potência média consumida e as cargas em porcentagem para os diferentes parâmetros de corte. Nestes ensaios foram utilizados os seguintes parâmetros:  $a_e = 0,2$  mm,  $f_z = 0,1$  mm/dente e o diâmetro da ferramenta igual a 16mm.

Tabela 9 – Potência média em função das rotações

Rotação [rpm]	Potência Média [W]
1653	5577
4140	2890
6500	3674
CAMSpeed	5488

A Figura 54 mostra um comparativo entre as potências elétricas obtidas. Percebe-se que o sistema de aquisição de potência não consegue distinguir a usinagem com e sem a presença de desgaste na ferramenta, e também não consegue distinguir se está usinando sem remoção de material ou está usinando em acabamento paralelo ao contorno.

Figura 54 - Gráfico comparativo entre as potências obtidas do sistema de monitoramento



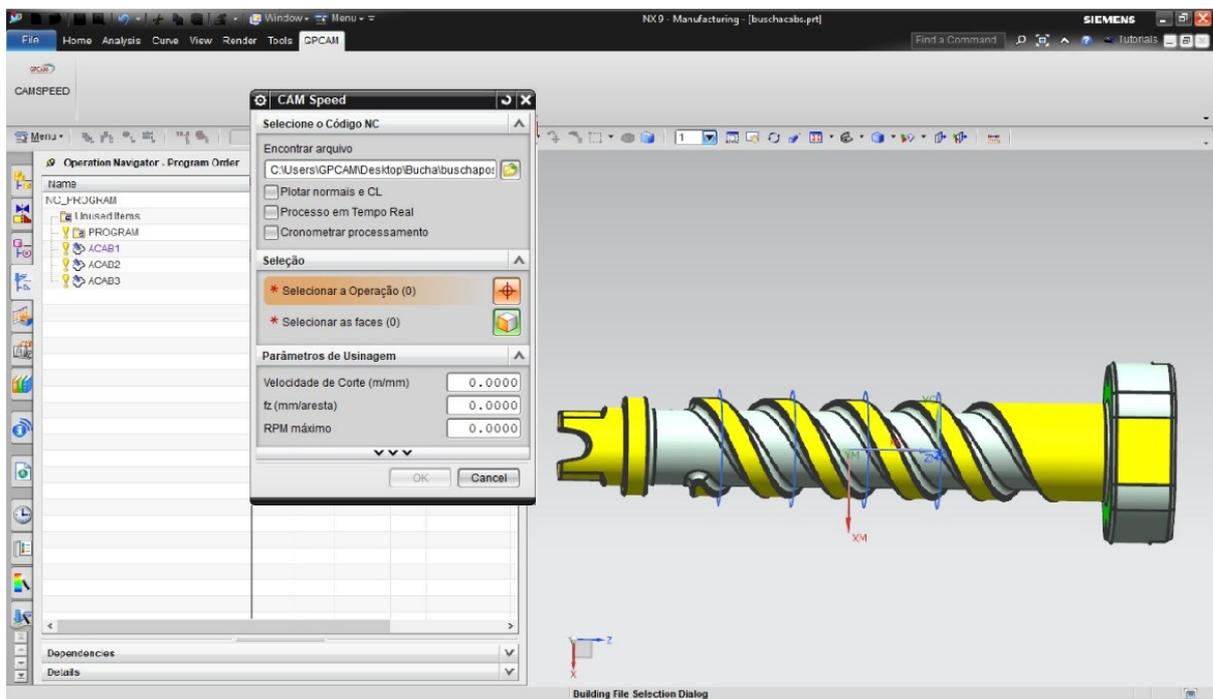
Fonte: Elaboração Própria

#### 4.5 ETAPA 4: ESTUDO ADICIONAL DA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA UTILIZANDO O CAMSPEED EM UM CASO REAL

O software CAMSpeed foi utilizado para gerar o programa NC (código G) para a usinagem de acabamento paralelo do fuso ilustrado na Figura 27. Para otimizar o software convencional, o CAMSpeed ajusta a velocidade de rotação do eixo-árvore

conforme altera o ponto de contato entre a peça e a ferramenta de ponta esférica, mantendo o valor da velocidade de corte constante teoricamente. O software CAMSpeed atua no pós-processamento do código G no programa NX 9.0 da Siemens e, para ter acesso a ele após ser instalado, deve-se clicar na aba GP CAM que está na parte de cima da tela e, depois, na logomarca do software, como mostrado na Figura 55. Na janela do CAMSpeed escolhe-se o local para salvar o arquivo .txt, pede-se para selecionar a operação e as faces da peças, e também pede-se para determinar os parâmetros de corte: velocidade de corte [m/min], avanço por dente [mm/dente] e a rotação máxima do eixo-árvore [rpm].

Figura 55 – Interface do NX9 utilizando o CAMSpeed



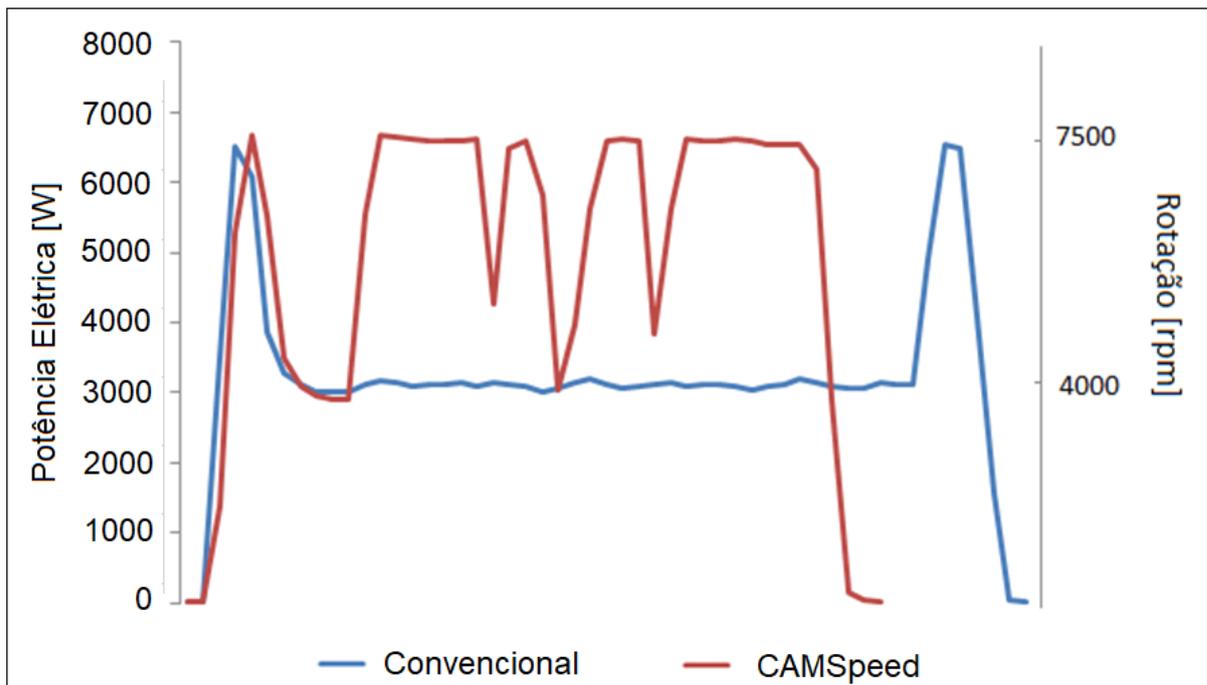
Fonte: Elaboração Própria

Os parâmetros de corte foram os seguintes:  $V_c = 80$  m/min,  $f_z = 0,1$  mm/dente, a ferramenta possui 2 gumes de corte e diâmetro = 6 mm.

No início do gráfico da Figura 56, na curva do software CAMSpeed (em vermelho), tem-se uma maior potência elétrica que resulta de uma maior rotação do eixo-árvore em comparação com o programa convencional. Depois da parte inicial, os picos de potência que o software CAMSpeed gera chegam a 6500W quando a velocidade de rotação do eixo-árvore está em 7500 rpm. Os picos de potência são

causados pela variação da rotação no eixo-árvore da máquina-ferramenta para manter constante a velocidade de corte, consumindo assim mais potência elétrica para usinar em vazio do que o programa convencional. O programa convencional tem uma rotação constante do eixo-árvore  $s = 3980$  rpm, consumindo aproximadamente 3000 W de potência elétrica. Ao iniciar e ao desligar o motor do eixo-árvore atinge-se picos de 6500 W. O tempo que o programa convencional levou para executar um passe foi de 7s, enquanto o CAMSpeed levou 5s, uma redução de aproximadamente 28% no tempo de usinagem.

Figura 56 – Curvas da potência elétrica em watt do software CAMSpeed e do programa convencional



Fonte: Elaboração Própria

A Tabela 10 mostra a potência média consumida em watts, os tempos gastos para usinar um passe e a energia consumida por cada programa para fresar um passe. Nota-se que a energia consumida pelo software CAMSpeed é aproximadamente 9% maior do que a energia consumida pelo programa convencional.

Tabela 10 – Potência, tempo e energia em função dos programas utilizados

<b>Programa</b>	<b>Potência [W]</b>	<b>Tempo [s]</b>	<b>Energia [Wh]</b>
CAMSpeed	4841	5	6,72
Convencional	3170	7	6,16

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

Os ensaios para identificar o funcionamento do sistema de monitoramento de baixo custo na etapa 1 tiveram para a faixa de rotação de 1653 rpm curvas do consumo de potência elétrica na mesma faixa de valores para as diferentes profundidades de corte no desgaste, pois, para esta faixa de rotação, o motor elétrico consome a mesma faixa de potência elétrica, gerando calor e perdas, resultando no aumento da carga e do consumo da potência elétrica. Ainda na etapa 1 dos ensaios, para a faixa de valores de rotação 4140 rpm, percebeu-se que o consumo da potência elétrica aumenta com o aumento da profundidade de corte, e a carga aumenta com o consumo de potência elétrica. Na última faixa de valores de rotação (6500 rpm) o motor consome mais potência elétrica, e percebe-se que os valores de consumo de potência elétrica em função das diferentes profundidades de corte são bem definidos.

No desgaste verificou-se a sensibilidade do sistema de aquisição de potência na presença de desgaste do gume da pastilha. O sistema reconheceu a presença do desgaste no gume, mostrando diferença entre as potências obtidas com e sem desgaste. A carga obtida do CNC Fanuc também indicou que o sistema reconheceu a presença de desgaste nos gumes.

A etapa 2 refere-se ao fresamento de acabamento da biela nas diferentes estratégias de usinagem. O consumo de potência elétrica na usinagem em vazio foi aproximadamente igual em todas as estratégias. Durante a usinagem de acabamento o consumo de potência elétrica foi menor na estratégia paralelo ao contorno, e nesta mesma estratégia obteve-se a média do consumo de energia igual durante a usinagem em vazio e durante a usinagem de acabamento. Nos dois ensaios realizados repetiu-se duas vezes para confirmar que o consumo de potência obtido pelo sistema de monitoramento para a estratégia paralela ao contorno foi igual para a usinagem em vazio e na usinagem de acabamento paralelo ao contorno. Na estratégia ziguezague concêntrico ocorreram vários picos de consumo de potência elétrica e, no final do programa, houve a presença de faixas com maior variação de potência elétrica. As estratégias zigue e ziguezague resultaram em picos

de potência elétrica no início dos programas. A estratégia que menos consumiu potência elétrica foi a estratégia paralela ao contorno, em que, no início do programa, apresentou um pico de aproximadamente 4100 W e, após este pico, o consumo de potência manteve-se constante, tendo mais variação de potência elétrica no final do programa, obtendo-se três picos de potência elétrica acima de 4000 W e mais picos acima de 3500 W no final do programa. Em termos da qualidade superficial mais especificamente sobre a rugosidade média obtida, a estratégia ziguezague foi a estratégia que obteve menor rugosidade média entre as estratégias estudadas.

A estratégia paralela ao contorno foi a estratégia que resultou menor consumo de energia elétrica. O custo de energia elétrica para um lote de peças semelhante à geometria da biela estudada produzida por meio da estratégia paralela ao contorno pode levar a uma economia de energia elétrica de 65% se comparada com a estratégia zigue. Este valor pode ser bastante significativo se comparado à produção em uma ferramentaria ou em um setor de usinagem fabril de um lote de peças produzido pela estratégia zigue.

Ainda na etapa 2, verificou-se que o desgaste no gume da pastilha de corte não é reconhecido pelo sistema de aquisição de potência elétrica. A carga S1 na tela do CNC Fanuc também não reconhece o desgaste da ferramenta para fresamento de acabamento.

Na etapa 3 dos ensaios para o fresamento de acabamento paralelo ao contorno da peça com geometria complexa fresando com o software CAMSpeed e com o programa convencional, obteve-se menor tempo de usinagem utilizando o software CAMSpeed, mas teve-se um maior consumo de potência elétrica. O consumo de potência elétrica diminuiu quando a ferramenta percorria a geometria complexa na região onde o raio de contato da ferramenta é zero.

Ainda na etapa 3, para a verificação da sensibilidade do sistema de monitoramento da potência elétrica, usinou-se com e sem desgaste nos gumes da pastilha de corte, constatando-se que o sistema não distingue quando se tem ou não desgaste nos gumes para as operações de fresamento de acabamento paralelo ao contorno. As cargas S1 obtidas também apontam para a falta de sensibilidade de distinguir o desgaste nos gumes de corte em processos de fresamento de acabamento paralelo ao contorno.

Na etapa 4 dos ensaios, utilizando-se o software CAMSpeed para o fresamento de acabamento paralelo ao contorno de um fuso, obteve-se maior consumo de potência elétrica quando foi utilizado o software CAMSpeed, com um aumento de consumo de energia elétrica de 9% pois o programa aumenta a rotação do eixo-árvore e o avanço para teoricamente deixar a velocidade de corte constante, mas obteve redução do tempo de usinagem em 28%.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em trabalhos futuros sugere-se realizar o fresamento com outros valores dos parâmetros de corte (avanço, penetração de trabalho, velocidade de corte e profundidade de corte), e monitorar o consumo de corrente elétrica e a tensão elétrica do eixo-árvore da máquina-ferramenta em diferentes níveis de desgaste da ferramenta de corte no desbaste.

Sugere-se também a medição da potência elétrica do eixo-árvore da máquina-ferramenta junto com a medição de força utilizando um dinamômetro no desbaste 2,5D.

Por fim, sugere-se realizar um desbaste com raios de canto com acúmulos de tensão para verificar se o sistema de aquisição de potência elétrica e a carga disponível pelo CNC conseguem distinguir entre os raios de canto e o desgaste da ferramenta.

## REFERÊNCIAS

- AHMAD R, PLAPPER P. Generation of safe tool-path for 2.5 D milling/drilling machine-tool using 3D ToF sensor. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**. 2015;10:84-91.
- AMARAL G. F. **Avaliação do fresamento de aço endurecido considerando-se aspectos econômicos, sociais e ambientais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.
- ANDRADE R. R. **Estudo da relação entre as principais estratégias de fresamento de cavidades na usinagem de moldes termoplásticos**. Trabalho de Conclusão de Curso, Escola de Engenharia de Piracicaba, Piracicaba, SP, 2012.
- BODZIAK S., DE SOUZA A. F., RODRIGUES A. R., DINIZ A. E., COELHO R. T. Surface integrity of moulds for microcomponents manufactured by micromilling and electro-discharge machining. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. 2014;36(3):623-635.
- BUDINOFF H., BHINGE R., DORNFELD D. A material-general energy prediction model for milling machine tools. Em: **International Symposium on Flexible Automation (ISFA) 2016** (161-164).
- CHAN K. W., CHOY H. S. Machining tactics for interior corners of pockets. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 2002;20(10):741-8.
- DAHMUS J. B., GUTOWSKI T. G. An environmental analysis of machining. Em: **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**. 2004 (Vol. 47136, pp. 643-652).
- DE SOUZA A. F., COELHO R. T. Experimental investigation of feed rate limitations on high speed milling aimed at industrial applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 2007;32(11):1104-1114.
- DE SOUZA A. F., DINIZ A. E., RODRIGUES A. R., COELHO R. T. 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**. 2014, 71(9):1565-1577.
- DE SOUZA A. F., KÄSEMODEL R. B., ARIAS M., MARIN F., RODRIGUES A. R. Study of tool paths calculated by different commercial CAM systems and influences on the real machining time and surface roughness for milling free-form geometries. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. 2019, 41(9):1-2.

DIN 6581 - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Begriffe der Zerspantechnik. Bezugssysteme und Winkel am Schneidteil des Werkzeuges** (6581). Beuth, Berlin, 1985.

DIN 8589-3 - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Fertigungsverfahren Spanen – Teil 3: Fräsen**; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin, 2003.

DINIZ A. E., MARCONDES F. C., COPINI N. L. **Tecnologia de usinagem dos materiais**. Artliber Editora, 2006.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Disponível em: <  
<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 29 de março de 2020.

GERES M. A Cidade dos Moldes. **Indústria & Competitividade**. FIESC, Santa Catarina. Nº 16. Julho, 2018, 18-25.

GOMES J. O. **Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado ABNT 420, na liga de alumínio AMP 8000 e na liga de cobre Cu-Be**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

GONZÁLEZ D. M. O. **Método de geração de trajetórias trocoidais e espirais combinadas para o fresamento de desbaste de cavidades 2,5d com múltiplas ferramentas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

GUSSOLI K. M. **ANÁLISE DAS PERDAS ENERGÉTICAS NO PROCESSO DE TORNEAMENTO E LEVANTAMENTO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Paraná, 2018.

HONG H., ZHANG C., MENG L., TIAN G, YU J. Characterising energy efficiency in machining processes: a milling case. Em: **International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS) 2017** (83-88).

JACSO A., SZALAY T. Optimizing the numerical algorithm in Fast Constant Engagement Offsetting Method for generating 2.5 D milling tool paths. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 2020;108(7):2285-2300.

JACSO A., MATYASI G., SZALAY T. The fast constant engagement offsetting method for generating milling tool paths. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 2019;103(9):4293-4305.

JIA S., TANG R., LV J., YUAN Q. PENG T. Energy consumption modeling of machining transient states based on finite state machine. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 2017, 88:2305–2320

KÄSEMODEL R. B., VOIGT R., MARIN F., DE SOUZA, A. F. Estudo do tempo de fresamento de formas complexas mantendo a velocidade de corte e avanço por

aresta constante. **10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)**, agosto de 2019, São Carlos, SP, Brasil.

KLOCKE F. **Manufacturing Processes 1: Cutting**. Ed.: Springer. RWTH Aachen, 2013.

KOPAC J., ROBLEK T. Tool path optimization by HS machining. Em: **AMST'02 Advanced Manufacturing Systems and Technology: Proceedings of the Sixth International Conference 2014** (Vol. 437, p. 299). Springer.

KURUKULASURIYA M., GAMAGE J., MANGALA J. A review on the impact of process energy on the environmental performance of milling. Em: **International Conference on Production and Operations Management Society (POMS) 2018** (1-6).

LEE Y. S., CHANG T. C. Application of computational geometry in optimizing 2.5D and 3D NC surface machining. **Computers in Industry**. 1995;26(1):41-59.

LIU Z. Y., SEALY M. P., GUO Y. B., LIU Z. Q. Real-time monitoring and prognosis of energy consumption in hard milling. Em: 2016 **International Symposium on Flexible Automation (ISFA) 2016**, (422-427).

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

MAGALHÃES L. C., FERREIRA J. C., DE CASTRO BEZERRA A. L., SOMBRA S. C. Influence of feed direction on finishing milling cylindrical surfaces in H13 hardened steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. 2019;41(4):1-8.

MECKLEY J., EDWARDS R. A study on the design and effectiveness of conformal cooling channels in rapid tooling inserts. **The Technology Interface Journal**. 2009;10(1):1-28.

MENG L., ZHANG C., REN Y., LUO M., TIAN G. Study on the power consumption of different milling modes and number of inserts in face milling processes. Em: **13<sup>th</sup> IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)**. 2017 (1475-1480).

MINIPA. Disponível em: < <https://www.minipa.com.br/images/Manual/ET-3200A-1107-BR.pdf> >. Acesso em: 8 de novembro de 2022.

PELEGRINO D. H. **Estudo do consumo de energia elétrica em máquinas-ferramentas**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2018.

PERVAIZ S., DEIAB I., RASHID A., NICOLESCU M. An experimental analysis of energy consumption in milling strategies. Em: **International Conference on Computer Systems and Industrial Informatics 2012** (1-6).

ROMI. Manual de programação e operação linha Centur CNC Siemens 802D. Disponível em: < <http://siaibib01.univali.br/pdf/T22909E.pdf>>. Acesso em: 17 de novembro de 2022.

SAMUKAWA T., SUWA H. An optimization of energy-efficiency in machining manufacturing systems based on a framework of multi-mode RCPSP. **International Journal of Automation Technology**. 2016;10(6):985-992.

SANTOS R. C. **Investigação do consumo energético no fresamento em função da variação de trajetória e dos parâmetros de usinagem**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2019.

SCANDIFFIO I., DINIZ A. E., DE SOUZA A. F. 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**. 2016;82(9):2075-2086.

SCANDIFFIO I., DINIZ A. E., DE SOUZA A. F. The influence of tool-surface contact on tool life and surface roughness when milling free-form geometries in hardened steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. 2017;92(1):615-626.

SCHISCHKE D. I. Machine tools and related machinery. **Fraunhofer Institute for Reliability and Microintegration, IZM**. 2012.

SOLHEID J. S. **Avaliação do consumo de energia no processo de fresamento de cavidades 2½D para diferentes tipos de trajetórias**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

SOUSA D. B., DA SILVA R. G., DOS SANTOS OLIVEIRA D., OLIVEIRA J. H., PAULINO E. D., FERNANDES L. F., VIANA R. Monitoramento da potência ativa na usinagem utilizando um sistema de baixo custo. **9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)**. Joinville, 2017.

VARDHAN M. V., SANKARAIHAH G., YOHAN M. Effect of process parameters on power consumption in machining of P20 steel in CNC milling. Em: **International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)**. 2017 (3217-3220).

WOJCIECHOWSKI S., WIACKIEWICZ M., KROLCZYK G. M. Study on metrological relations between instant tool displacements and surface roughness during precise ball end milling. **Measurement**. 2018;129:686-694.

## APÊNDICE A – Corrente Elétrica Média Obtida

A Tabela 11 contém a corrente elétrica média obtida (com o respectivo desvio padrão) e a carga em função das rotações.

Tabela 11 - Corrente elétrica média obtida em ampere e a carga em porcentagem em função das rotações

<b>n (rotação) [rpm]</b>	<b>Corrente Média (A)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>S1 Carga [%]</b>
200	5,9	0,07	1
400	9,0	0,09	1
800	9,8	0,17	1
1600	10,0	0,10	1
2400	8,5	0,09	1
3200	6,7	0,11	2
4000	5,6	0,06	2
4800	5,4	0,07	2
5600	5,7	0,06	4
6400	6,3	0,08	6
7000	6,9	0,07	8
7500	7,2	0,16	9

## APÊNDICE B – Tabelas referente à etapa 1 dos experimentos

As Tabelas 12, 13, 14 referem-se à etapa 1 dos experimentos na usinagem de desbaste.

Tabela 12 - Corrente elétrica média, desvio padrão e carga em função das profundidades de corte para  $V_c = 104$ [m/min] e  $s = 1653$  rpm

$a_p$ [mm]	Corrente Média [A]	Desvio Padrão	S1 Carga (%)
Vazio	9,9	0,06	1
0,5	10,0	0,06	2
1,0	10,0	0,06	4
2,0	10,0	0,10	6
3,0	10,2	0,14	9

Tabela 13 - Corrente elétrica média, desvio padrão e carga em função das profundidades de corte para  $V_c = 260$  [m/min] e  $s = 4140$  rpm

$a_p$ [mm]	Corrente Média [A]	Desvio Padrão	S1 Carga (%)
Vazio	5,3	0,07	1
0,5	7,9	0,12	6
1,0	9,4	0,09	10
2,0	10,4	0,07	16
3,0	10,7	0,04	22

Tabela 14 - Corrente elétrica média, desvio padrão e carga em função das profundidades de corte para  $V_c = 408$ [m/min] e  $s = 6500$  rpm

$a_p$ [mm]	Corrente Média [A]	Desvio Padrão	S1 Carga (%)
Vazio	5,9	0,05	5
0,5	9,7	0,03	16
1,0	10,4	0,04	22
2,0	10,8	0,04	36
3,0	11,1	0,04	49