

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

MAYTHER FREIRE GIMENEZ

**MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO DA CORRENTE
ELÉTRICA NO PROCESSO DE FRESAMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2020

MAYTHER FREIRE GIMENEZ

**MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO DA CORRENTE
ELÉTRICA NO PROCESSO DE FRESAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Roger Nabeyama Michels

LONDRINA

2020



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Diretoria de Graduação
Coordenação de Engenharia Mecânica
Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO DA CORRENTE ELÉTRICA DURANTE O PROCESSO DE FRESAMENTO

por

MAYTHER FREIRE GIMENEZ

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 19 de outubro de 2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Roger Nabeyama Michels.
Prof. Orientador

Profa. Dra. Janaina Fracaro Souza Gonçalves.
Membro titular

Prof. Dr. Janksyn Bertozzi
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho à minha família,
amigos, docentes e a todos que
contribuíram para esse momento.

AGRADECIMENTOS

Certamente palavras não são capazes de listar e agradecer a todos que fizeram parte dessa etapa. Peço desculpas antecipadas àquelas pessoas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas com certeza fazem parte do meu pensamento e da minha gratidão.

A priori agradeço aos meus pais, Antonio Carlos e Dagmar, e aos meus irmãos, Igor, Larissa e Maycon, por sempre estarem ao meu lado acreditando e incentivando. Sendo fonte de amor e inspiração na minha vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Roger Nabeyama Michels, que me guiou com extrema sabedoria, não só na condução desse trabalho, mas ao longo da graduação.

A Prof.(a) Dr(a). Janaina Fracaro Souza Gonçalves, pela contribuição e ensinamentos passados.

A Prof.(a) Dr(a). Elizabeth Mie Hashimoto, pelo direcionamento na análise experimental e pelas considerações ao longo de toda a realização do trabalho.

Ao Prof. Dr. Janksyn Bertozzi, pelas observações e contribuições ao longo dos ensaios.

Aos meus amigos da vida e da Universidade, em especial ao Gabriel Laridondou Domingues, Gustavo Ferreira de Freitas, Rafael Tanganini Boa Sorte e Reinaldo Matis Gussi, que entraram juntos comigo nessa jornada e compartilharam das mais diversas experiências acadêmicas.

A todos os demais professores da UTFPR Campus Londrina, em especial aos do Departamento de Engenharia Mecânica, agradeço pelo conhecimento e experiências passados.

Aqui, o conhecimento de homem algum
pode ir além de sua experiência.
(LOCKE, John, 1689)

RESUMO

GIMENEZ, Mayther Freire. **Monitoramento do comportamento da corrente elétrica durante o processo de fresamento**. 2020. 57. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2020.

Na usinagem a maioria das máquinas-ferramentas utilizadas exigem energia elétrica como fonte de energia principal. Por conseguinte, a aferição da energia despendida na usinagem pode ser uma ferramenta para auxiliar os usuários a tomarem decisões de gestão mais rentáveis. O presente trabalho propõe um sistema de monitoramento não invasivo de baixo custo. Visando estimar a corrente elétrica demandada, com base na variação dos parâmetros de corte no processo de fresamento de topo do acrílico e PVC expandido. Mais especificamente o sistema proposto é constituído de uma placa Arduino® integrada a um sensor de corrente SCT-013-000, um módulo RTC-DS3231 e um módulo *SD Card*, que realizam a medição e o armazenamento, respectivamente, dos valores de corrente coletados diretamente do cabo de alimentação da *Router Spindle TVS. 1ZM3. 12*. Os dados foram tratados estatisticamente por meio da análise de variância (ANOVA). Com base no contraste estatístico pode-se concluir que os fatores possuem efeito individualmente no consumo da corrente e que o desgaste da ferramenta promove um aumento no consumo da corrente elétrica do motor principal.

Palavras-chave: Fresamento de topo. Sistema de monitoramento. Arduino. Análise de variância.

ABSTRACT

GIMENEZ, Mayther Freire. **Monitoring the behavior of the electrical current during the milling process.** 2020. 57. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Federal Technology University - Parana. Londrina, 2020.

Most of the machine tools used in machining require electrical power as the main power source. Therefore, the gauging of the energy spent on machining can be a tool to help users make more profitable management decisions. This work proposes a low-cost non-invasive monitoring system. Aiming to estimate the electrical current demanded, based on the variation of the cutting parameters in the end milling process of acrylic and expanded PVC. More specifically the proposed system consists of an Arduino® board integrated to a SCT-013-000 current sensor, a RTC-DS3231 module and an SD Card module, which perform the measurement and storage, respectively, of the current values collected directly from the power cable of the Spindle TVS Router. 1ZM3. 12. The data were treated statistically through the analysis of variance (ANOVA). Based on the statistical contrast it can be concluded that the factors have an effect on the current consumption and that the wear of the tool promotes an increase in the electric current consumption of the main motor

Keywords: End milling. Monitoring system. Arduino. Analysis of variance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fresamento tangencial.....	16
Figura 2 - Fresamento frontal.....	17
Figura 3 - (a) Fresamento concordante; (b) Fresamento discordante.....	17
Figura 4 - Direção dos movimentos de corte.....	18
Figura 5 - Cunha de corte da ferramenta.....	21
Figura 6 - Arestas de corte e superfícies da parte de corte de uma fresa frontal.....	21
Figura 7 - Lista dos materiais para ferramentas de corte.....	23
Figura 8 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.....	24
Figura 9 - Principais parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte.....	25
Figura 10 - Comportamento desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte.....	26
Figura 11 - Esquema do funcionamento do sensor de Efeito Hall.....	30
Figura 12 - Placa Arduino Mega.....	31
Figura 13 - Fluxograma das etapas experimentais realizadas.....	32
Figura 14 - Máquina Ferramenta utilizada nos ensaios.....	33
Figura 15 - Fresa de topo 6mm – 2 cortes.....	34
Figura 16 - (a) Corpo de prova em Acrílico; (b) Corpo de prova em PVC expandido.....	34
Figura 17 - Fixação do corpo de prova.....	35
Figura 18 - Ilustração do sistema de aquisição de dados.....	37
Figura 19 - Sistema de aquisição em funcionamento.....	38
Figura 20 - Alicata amperímetro ET-3200A (Minipa).....	39
Figura 21 - QQ-plot.....	45
Figura 22 - Comportamento dos parâmetros com efeito sobre a corrente elétrica (Ampere).....	48
Figura 23 - (a) Fresa de topo 6 mm nova; (b) Fresa após todos os ensaios com fluido de corte.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de controle e níveis adotados para os ensaios.	40
Tabela 2 – Blocos representados pelo tipo de usinagem e suas respectivas repetições.....	40
Tabela 3 - Parâmetros para a primeira repetição do ensaio à seco.	41
Tabela 4 - Parâmetros para a primeira repetição do ensaio com fluido de corte.	41
Tabela 5 - Variável dependente.	41
Tabela 6 - Modelo da ANOVA.	42
Tabela 7 - Corrente elétrica média aferida na usinagem em vazio.	43
Tabela 8 - Valores de corrente elétrica.	44
Tabela 9 - Análise de variância dos dados de corrente.....	47
Tabela 10 - Teste de Tukey (Blocos)	48
Tabela 11 - Teste de Tukey (Velocidade de corte).....	49
Tabela 12 - Teste de Tukey (Velocidade de avanço).	49
Tabela 13 - Teste de Tukey (Material).	50

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

a_e	(Penetração de trabalho) [mm]
a_p	(Profundidade de corte) [mm]
d	(Diâmetro da fresa) [mm]
f_z	(Avanço por dente) [mm/dente]
K_B	Largura da cratera [mm]
K_M	Distância do centro da cratera à aresta de corte [mm]
K_T	Profundidade da cratera [mm]
n	(Rotação) [rpm]
VB_B	Desgaste de flanco médio [mm]
VB_{Bmax}	Desgaste de flanco máximo [mm]
VB_N	Desgaste de entalhe [mm]
v_c	Velocidade de corte [m/min]
VC_N	Desgaste de entalhe [mm]
v_e	Velocidade de corte efetiva [mm/min]
v_f	Velocidade de avanço [mm/min]
Z	Número de dentes da fresa

LETRAS GREGAS

Ω	<i>Ohm</i>
----------	------------

ABREVIações

ABNT	(Associação Brasileira de Normas Técnicas)
AC	(<i>Alternating Current</i>)
A/D	(<i>Digital / Analog</i>)
ANOVA	(Análise de Variância)

ASM	<i>(American Society for Metals)</i>
CNC	<i>(Controle Numérico Computadorizado)</i>
DC	<i>(Direct Current)</i>
IDE	<i>(Integrated Development Environment)</i>
ISO	<i>(International Organization Standardization)</i>
NBR	<i>(Normas Brasileiras)</i>
PVC	<i>(Policloreto de Vinila)</i>
RTC	<i>(Real Time Clock)</i>
SCT	<i>(Split-Core Current Transformer)</i>
UTFPR	<i>(Universidade Tecnológica Federal do Paraná)</i>
USB	<i>(Universal Serial Bus)</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 PROCESSOS DE FRESAMENTO.....	15
2.1.1 Parâmetros de Corte.....	18
2.2 GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE	19
2.3 MATERIAIS PARA FERRAMENTA DE CORTE	22
2.4 DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CORTE	23
2.5 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM	26
2.5.1 Monitoramento Direto	27
2.5.2 Monitoramento Indireto	27
2.5.3 Monitoramento da Usinagem por Meio dos Parâmetros Elétricos do Motor ...	28
2.6 SENSOR DE EFEITO HALL	29
2.7 ARDUINO	30
3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	32
3.1 EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS	33
3.1.1 Máquina Ferramenta.....	33
3.1.2 Ferramenta de Corte.....	34
3.1.3 Corpos de prova	34
3.1.4 Fixação dos Corpos de Prova.....	35
3.1.5 Sistema de Aquisição	36
3.1.6 Alicata Amperímetro Digital	39
3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DOS DADOS	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 MONITORAMENTO DOS ENSAIOS PRELIMINARES.....	43
4.2 MONITORAMENTO DA CORRENTE ELÉTRICA DO MOTOR PRINCIPAL ...	43
4.3 PRESSUPOSTOS PARA APLICAÇÃO DA ANOVA.....	44
4.3.1 Independência	44
4.3.2 Normalidade.....	45
4.3.3 Homogeneidade de Variância.....	45
4.3.3.1 Teste de Bartlett – Blocos	46
4.3.3.2 Teste de Bartlett - Velocidade de corte	46
4.3.3.3 Teste de Bartlett - Velocidade de avanço	46
4.3.3.4 Teste de Bartlett – Material	46
4.4 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA).....	47
4.4.1 Teste de Tukey – Blocos	48

4.4.2 Teste de Tukey – Velocidade de corte.....	49
4.4.3 Teste de Tukey – Velocidade de avanço	49
4.4.4 Teste de Tukey – Material	50
5 CONCLUSÃO.....	51
REFERÊNCIAS.....	52
ANEXO A - Código do sistema de monitoramento	55

1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo que objetiva conferir a uma peça forma, dimensões e acabamento por meio da ação de uma ferramenta pela remoção controlada de cavaco (Ferraresi, 1977).

A importância econômica da usinagem segundo Trent e Wright (2000) revela que os gastos com processos de usinagem superam 15% dos gastos com os demais produtos fabricados em todos os países industrializados. Essa relevância econômica viabiliza uma maior reflexão e análise da possibilidade de se desenvolver novas tecnologias que permitam um melhor desempenho desses processos de usinagem levando a uma redução nos custos associados.

Dentro desse contexto, o processo de fresamento, dentre todos os processos de usinagem empregados atualmente apresenta ser o de maior empregabilidade na indústria, devido a sua enorme versatilidade de aplicações e por sua elevada capacidade de remoção de cavaco (Souto, 2007).

A operação de fresamento funciona com a peça de trabalho sendo forçada contra a ferramenta de corte rotativa contendo uma ou mais arestas de corte. Muitos fenômenos que atingem a produtividade, como desgaste de ferramenta, a vibração e até a quebra da ferramenta, ocorrem naturalmente, pois durante cada rotação a ferramenta está sujeita a elevadas variações térmicas e de tensões mecânicas que acabam desencadeando no aparecimento de avarias e desgaste da ferramenta, de forma inevitável (Souto, 2007).

Esses fenômenos se não monitorados degradam a qualidade das peças usinadas e podem até promover erros dimensionais. Sob certas condições, quando o desgaste da ferramenta ou a vibração são elevados podem causar um tempo de inatividade na máquina, como resultado de uma falha catastrófica da ferramenta. Estes eventos em máquinas ferramentas devem ser evitados, pois danificam as peças usinadas, a própria máquina ferramenta e expõe os operadores a situações de risco (Cho et al., 2005). Além disso, o tempo de inatividade sempre tem um efeito negativo na produtividade, pois provoca um aumento nos custos de produção. Yeo et al., (2000) relatam que a falha da ferramenta contribui com até 6,8% para o tempo de inatividade dos processos de usinagem.

A priori, o principal problema é quando o operador fica como responsável por observar e avaliar o estado da ferramenta ele não é capaz de identificar o momento

de troca com exatidão, levando-se em conta a qualidade da peça que está sendo produzida e o limite da vida útil da ferramenta (Souto, 2007). Ademais, a introdução do controle automatizado nas máquinas ferramentas dificultou ainda mais o monitoramento visual, além de impossibilitar a avaliação física da ferramenta na região de corte, mesmo quando se aborda em prevenção contra as avarias repentinas e inesperadas da ferramenta (Dolinšek e Kopač, 1999).

A determinação do melhor momento para efetuar a troca da ferramenta para que não haja prejuízo da produtividade nas indústrias deve ser determinada em tempo real (Souto, 2007). Segundo Matsumoto e Diniz (1997) uma vertente em constante crescimento está no monitoramento indireto e em tempo real do desgaste da ferramenta de corte, que vão desde a vibração, temperatura, forças de corte, emissão acústica até parâmetros elétricos do motor.

1.1 OBJETIVO GERAL

Monitorar o comportamento do consumo da corrente elétrica em uma fresadora CNC durante o processo de fresamento de topo em polímeros, por meio de um sistema de aquisição não invasivo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentro do objetivo geral, são realizadas as seguintes investigações com os seguintes objetivos:

- Adotar parâmetros de corte que estressem a ferramenta;
- Analisar o efeito do material da peça a ser usinada no consumo da corrente elétrica monitorada;
- Analisar o efeito dos parâmetros de corte no consumo da corrente elétrica monitorada;
- Analisar o efeito da usinagem com e sem fluido de corte no consumo da corrente elétrica monitorada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSOS DE FRESAMENTO

Segundo (Ferraresi, 1977) fresamento consiste em um processo de usinagem destinado a obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas normalmente multicortantes. Onde a ferramenta é provida de um movimento de rotação ao redor de seu eixo e a peça ou a ferramenta se deslocam seguindo uma trajetória determinada pelo operador.

A *American Society for Metals* (ASM) define fresamento como o processo de usinagem onde o material é removido da peça devido ao movimento rotativo da ferramenta multicortante. Cada ferramenta remove uma pequena quantidade do material a cada revolução do eixo da árvore. Tanto a ferramenta quanto a peça podem se movimentar em mais de uma direção ao mesmo tempo, podendo assim qualquer superfície ser usinada (Dib, 2013 *apud* Metals Handbook, 1989).

Segundo Diniz *et al.*, (2014), o fresamento é a operação de usinagem que se caracteriza por meio de uma ferramenta, fresa. A fresa é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo. O corte advém da rotação da fresa ao redor do seu próprio eixo e do movimento de avanço, que é geralmente feito pela própria peça a ser usinada fixada na mesa da máquina, o qual obriga a peça passar sob a ferramenta em rotação, lhe oferecendo a forma e dimensão desejadas.

O fresamento é realizado com uma ferramenta de corte rotativa multiarestada, que realiza movimentos de avanço contra uma peça em quase todas as direções. É um processo amplamente utilizado para gerar faces planas, porém, com o desenvolvimento de máquinas e *softwares*, há uma crescente demanda para produzir outros formatos de peças e superfícies (Sandvik, 2017).

Segundo Stemmer (1993), fresamento consiste em um processo de usinagem no qual a remoção do material da peça ocorre de forma intermitente, pelo movimento rotativo de ferramenta que é geralmente multicortante, assim, é possível gerar peças das mais variadas formas.

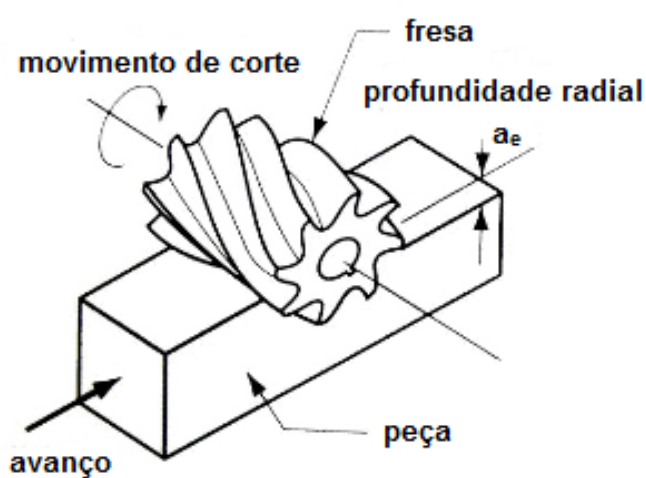
Portanto, entende-se que o fresamento é um processo que de modo geral objetiva remover material com espessura de corte instantaneamente variável, em

corte interrompido gerado pela combinação entre avanço da mesa e o movimento rotativo da ferramenta multicortante com a geometria definida.

Segundo Ferraresi (1977) e Diniz *et al.*, (2014), dentro do processo de fresamento se distinguem dois tipos:

a) Fresamento tangencial: operação na qual os dentes ativos da ferramenta estão na superfície, que está sendo gerada. Destinado a obtenção de superfície plana paralela ao eixo de rotação da ferramenta, Figuras 1.

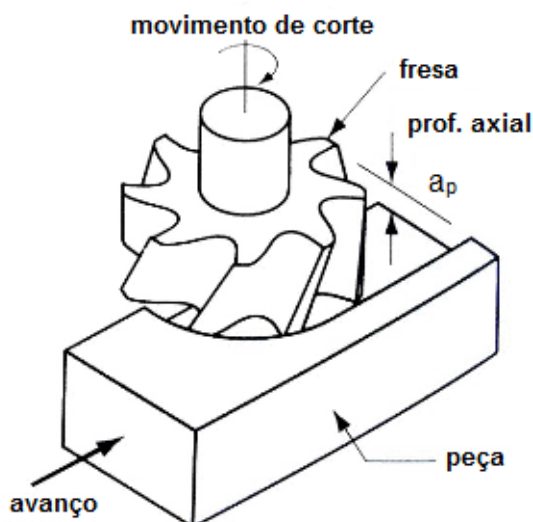
Figura 1 - Fresamento tangencial.



Fonte: Adaptado de Santos Peixoto (2019).

b) Fresamento frontal: operação na qual os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta, sendo eixo da fresa perpendicular à superfície gerada. Designado a obtenção de superfícies planas ao eixo de rotação da ferramenta, Figuras 2.

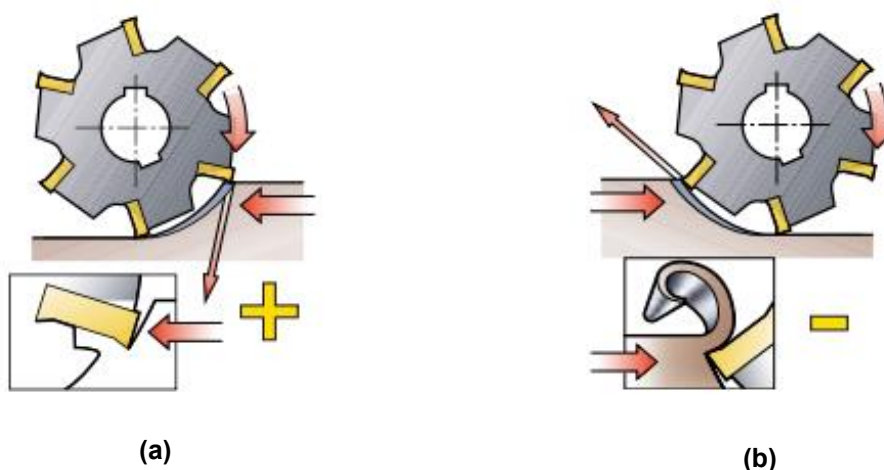
Figura 2 - Fresamento frontal.



Fonte: Adaptado de Santos Peixoto (2019).

Além disso, os tipos de fresamento se diferem também quanto ao tipo de corte, podendo ser concordante ou discordante. No fresamento discordante o avanço e o movimento de corte têm sentidos contrários. Enquanto no fresamento concordante eles apresentam o mesmo sentido, conforme ilustrado na Figura 3. Porém, de acordo com a posição da fresa em relação à peça, um processo de fresamento pode apresentar parte concordante e outra discordante (Souto, 2007).

Figura 3 - (a) Fresamento concordante; (b) Fresamento discordante.

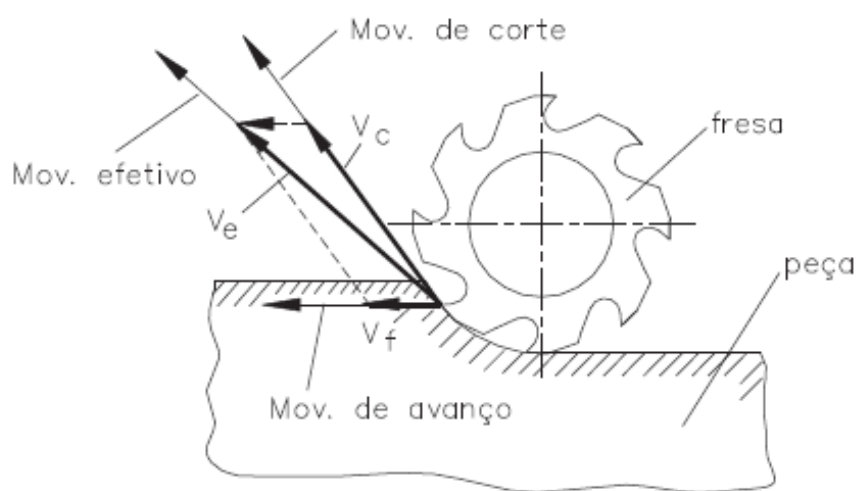


Fonte: Sandik (2017).

2.1.1 Parâmetros de Corte

Arelados aos tipos de fresamentos descritos anteriormente seção 2.1, tem-se os parâmetros de corte: velocidade de corte (v_c), velocidade de avanço (v_f) e a profundidade de corte (a_p).

Figura 4 - Direção dos movimentos de corte.



Fonte: Machado e Silva (2004).

De acordo com Machado *et al.*, (2009) esses parâmetros de usinagem possuem as seguintes definições:

- Velocidade de corte (v_c): é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, Figura 4, segundo a direção e sentido de corte. É calculada pela Equação 1.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} [\text{m/min}] \quad (1)$$

Onde:

d = diâmetro da peça ou da ferramenta em mm;

n = número de rotações por minuto (rpm).

- Velocidade de avanço (v_f): velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, Figura 4, segundo a direção e sentido do avanço. É dada pela Equação 2.

$$v_f = f_z \cdot Z \cdot n \text{ [mm/min]} \quad (2)$$

Onde:

f_z = avanço por dente [mm/dente];

Z = número de dentes da fresa;

n = número de rotações por minuto (rpm).

- Profundidade de corte (a_p): é a profundidade de penetração da ferramenta na peça, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho, Figura 2.

2.2 GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE

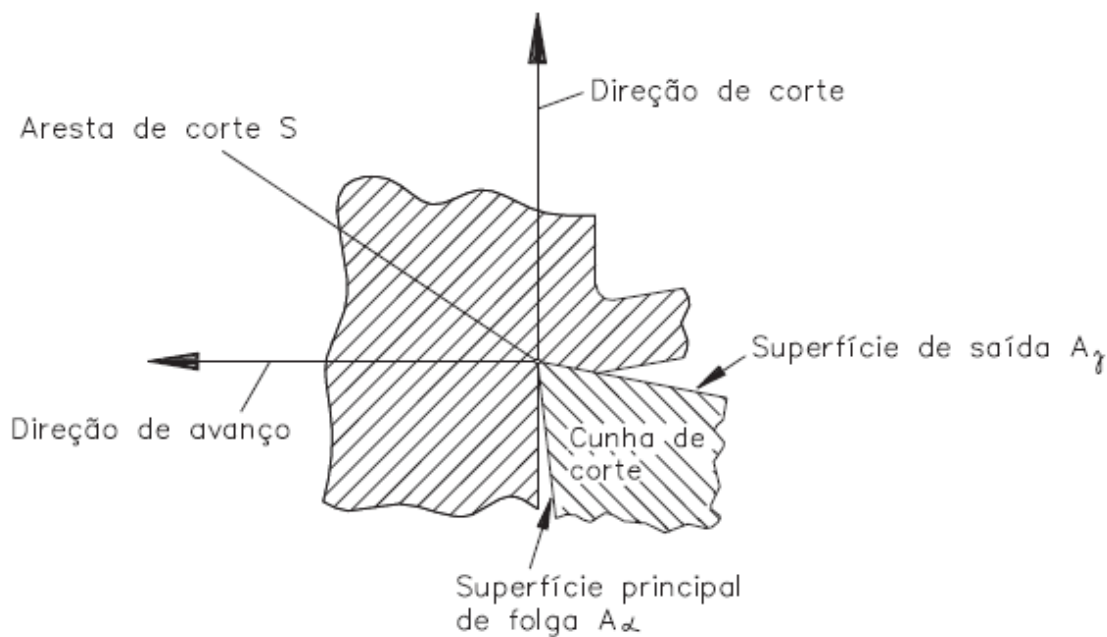
A geometria de ferramenta de corte exerce grande influência no desempenho da usinagem. Por melhor que seja o material da ferramenta, se sua geometria não for preparada adequadamente a operação não obterá êxito. Tão importante é sua importância que se faz necessário normalizar, da maneira mais conveniente possível, os ângulos da cunha cortante para uniformizar a nomenclatura entre os profissionais e a literatura especializada (Machado *et al.*, 2009). As definições a seguir, baseiam-se na norma brasileira NBR 6163 – Conceitos da Técnica de Usinagem: Geometria de Cunha Cortante: Terminologia.

De acordo com Diniz *et al.*, (2014) as ferramentas de usinagem apresentam, geralmente, as seguintes partes construtivas:

- Parte de corte – parte ativa da ferramenta construída pelas suas cunhas de corte. A parte ativa da ferramenta é construída ou fixada sobre um suporte ou cabo da ferramenta, por meio do qual é possível fixar a ferramenta para construção, afiação, reparo, controle e trabalho. A Figura 6 mostra que a ferramenta poderá ser fixada pelo seu eixo.

- Cunha de corte – é a cunha da ferramenta, formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga, Figura 5.
- Superfície de saída (A_γ) – é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco é formado e sobre a qual o cavaco escoa durante sua saída da região do trabalho de usinagem, Figuras 5 e 6.
- Superfície principal de folga (A_α) – é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta principal de corte e que defronta com a superfície em usinagem principal, Figuras 5 e 6.
- Superfície secundária de folga (A'_α) – é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta de corte secundário e que defronta com a superfície em usinagem secundária, Figuras 5 e 6.
- Aresta principal de corte S – é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal, Figura 5. Gera na peça a superfície em usinagem principal, Figura 6.
- Aresta secundária de corte S' – é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies da saída e de folga secundária. Gera na peça a superfície em usinagem secundária, Figura 6.
- Ponta de corte – é a parte da cunha de corte onde se encontram as arestas principal e secundária de corte, Figura 6. A ponta de corte pode ser a intersecção das arestas, ou a concordância das duas arestas por meio de um arredondamento, ou o encontro das duas arestas por meio de um chanfro.

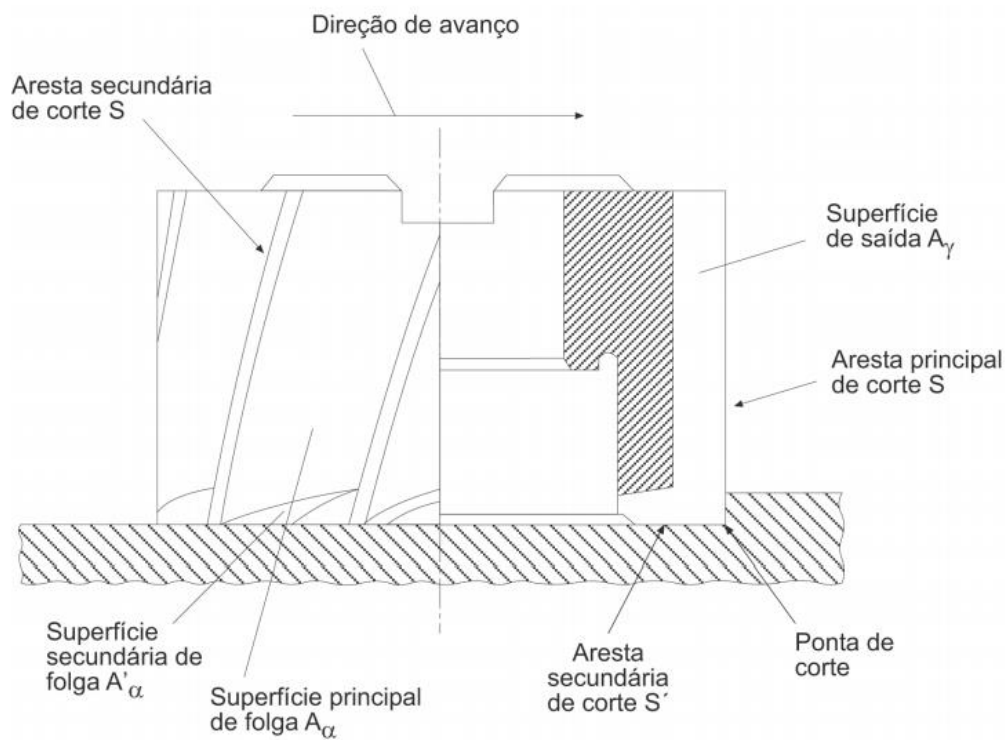
Figura 5 - Cunha de corte da ferramenta



Plano da figura = Plano de trabalho

Fonte: Machado e Silva (2004).

Figura 6 - Arestas de corte e superfícies da parte de corte de uma fresa frontal.



Fonte: Diniz et al. (2014).

2.3 MATERIAIS PARA FERRAMENTA DE CORTE

Segundo Diniz *et al.*, (2014) para realizar a seleção criteriosa do material da ferramenta, uma série de fatores devem ser ponderados, dentre os quais podem ser listados os seguintes: material a ser usinado, processo de usinagem, condição da máquina operatriz, forma e dimensões da ferramenta, custo do material da ferramenta, condições de usinagem, condições de operação. Qualquer que seja o material para ferramenta em consideração, é necessário que ele apresente uma série de requisitos de menor ou maior importância, dependendo dos diversos fatores citados acima. Quatro das principais características são: dureza a quente, resistência ao desgaste, tenacidade e estabilidade química.

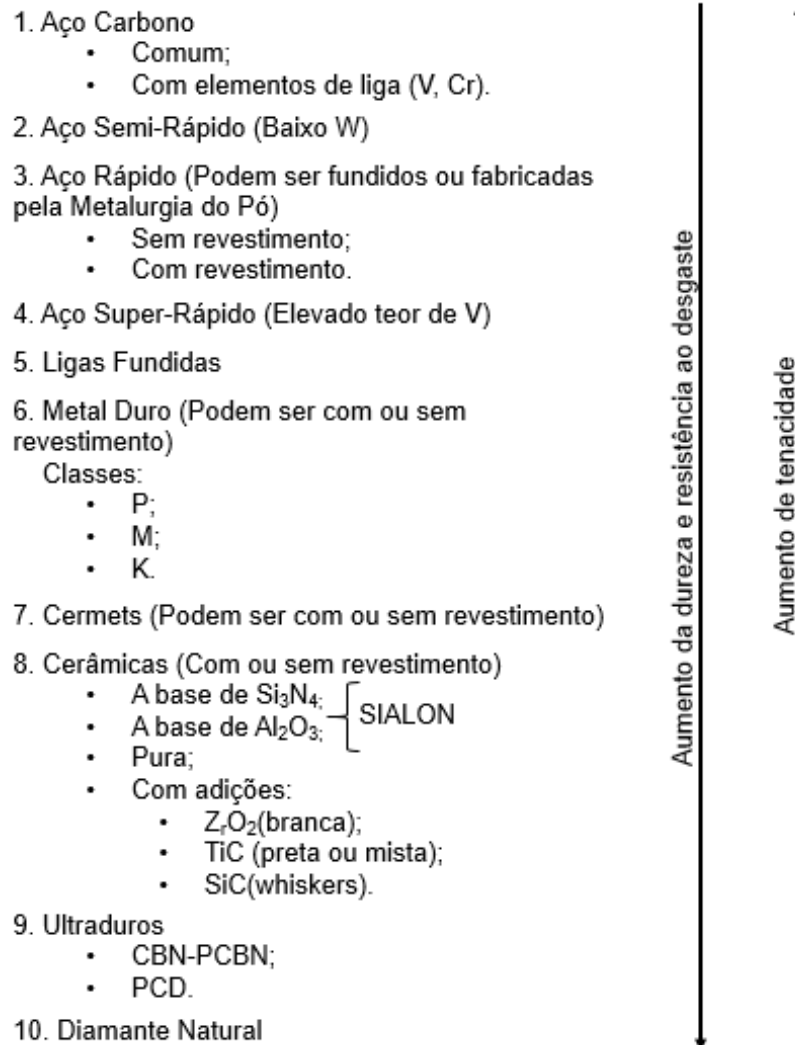
Em processos de usinagem é mais comum utilizar-se uma ferramenta com material mais duro do que a peça, de modo que surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza agreguem para o aparecimento de novos materiais de ferramenta mais resistentes para as operações de usinagem. Em contra partida, a operação de usinagem com cortes interrompido, como fresamento, requerem materiais de ferramenta com suficiente tenacidade para suportarem os choques e os impactos inerentes ao processo (Machado e Silva, 2004).

As propriedades desejáveis em um material para ferramenta de corte podem ser assim listadas:

- Alta dureza.
- Tenacidade suficiente para evitar falha por fratura.
- Alta resistência ao desgaste abrasivo.
- Alta resistência a compressão.
- Alta resistência ao cisalhamento.
- Boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas.
- Alta resistência ao choque térmico.
- Alta resistência ao impacto.
- Ser inerte quimicamente.

A Figura 7 lista os materiais que existem hoje no mercado mundial para ferramentas de corte em ordem cronológica de surgimento e, grau de dureza e tenacidade.

Figura 7 - Lista dos materiais para ferramentas de corte.



Fonte: Adaptado de Machado e Silva (2004).

2.4 DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CORTE

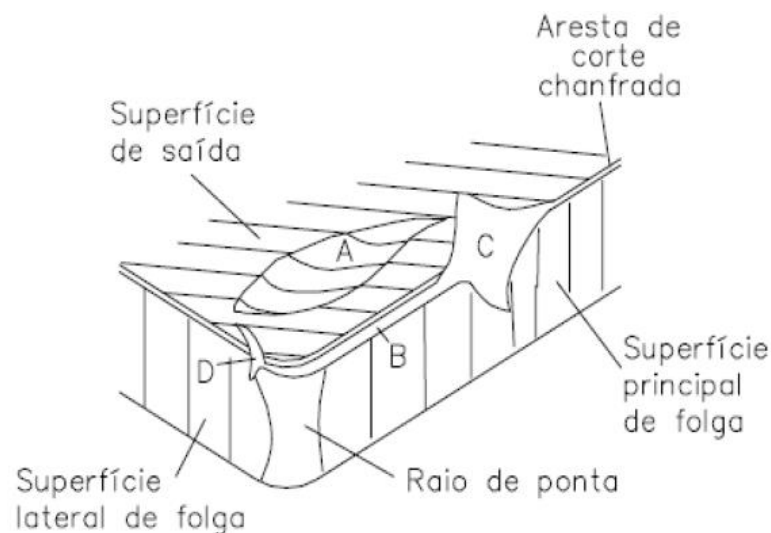
Segundo Souto (2007), o desgaste pode atingir níveis elevados e comprometer a integridade e a qualidade do processo de usinagem. Pode ocorrer tanto no corte interrompido quanto no contínuo. Este desgaste ocorre de maneira progressiva, implicando na perda de material tanto na superfície de saída como na superfície de folga.

Mesmo se a ferramenta de corte possuir uma elevada tenacidade para evitar uma avaria, estará sempre sujeita ao desgaste. Ao longo do processo de usinagem a ação de corte muda a forma e, portanto, a geometria original da ferramenta de corte, alterando a área de contato na interface cavaco-ferramenta (Machado *et al.*, 2009).

A Figura 8 apresenta as principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte e mostra três formas de desgaste:

- Desgaste de cratera (área A): ocorre na superfície de saída da ferramenta, causada pelo atrito entre ferramenta e cavaco (Diniz *et al.*, 2014).
- Desgaste de flanco (área B): ocorre na superfície de folga da ferramenta, por meio do contato entre ferramenta e peça, sendo o tipo de desgaste mais comum. Este tipo de desgaste ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça por modificar totalmente a forma da aresta de corte original fazendo com que a peça mude de dimensão. É incentivado pelo aumento da velocidade de corte (Diniz *et al.*, 2014).
- Desgaste de entalhe (áreas C e D): embora seja uma forma de desgaste, é considerado como um mecanismo devido à falta de unanimidade quanto a suas causas. Sua ocorrência se verifica principalmente na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas (ligas de níquel, titânio, cobalto e aços inoxidáveis) (Souto, 2007).

Figura 8 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.

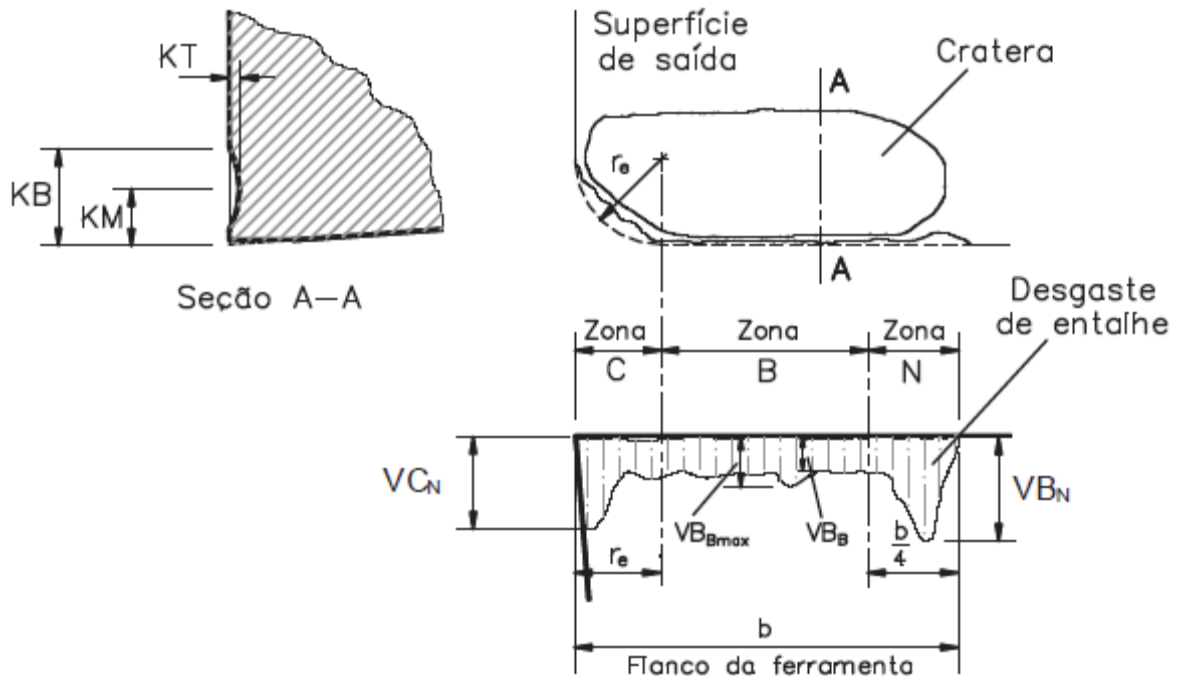


Fonte: Machado e Silva (2004) apud Dearnley e Trent (1982).

Em decorrência, quando se avalia a vida de uma ferramenta, é necessário quantificar o nível de desgaste. Para isto, deve-se seguir os parâmetros apresentados

na Figura 9 que são utilizados pela norma ISO 3685 (1997) para quantificar esses desgastes.

Figura 9 - Principais parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte.



Fonte: Machado e Silva (2004).

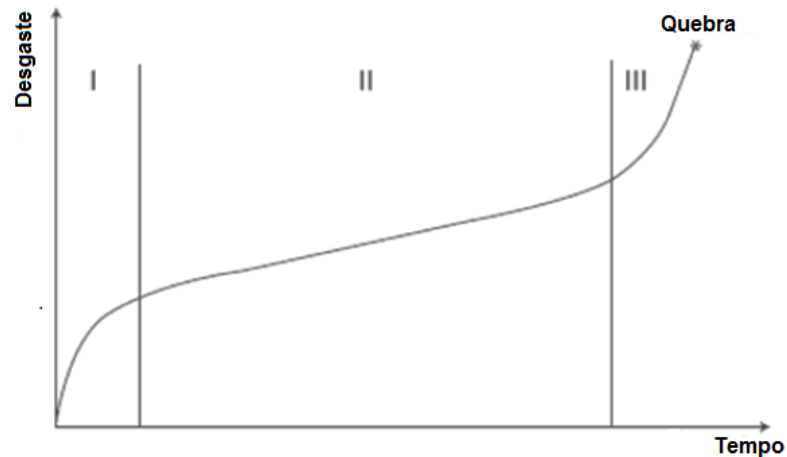
Onde:

- K_T = Profundidade da cratera;
- VB_B = Desgaste de flanco médio;
- VB_{Bmax} = Desgaste de flanco máximo;
- VB_N = Desgaste de entalhe.

Segundo Machado e Silva (2004), o tempo em que uma aresta de corte trabalha efetivamente antes de ser reafiada ou substituída é denominado “vida da ferramenta de corte”. Um critério deve ser então adotado para determinar o fim da vida da ferramenta, com o intuito de manter o processo produtivo dentro de condições econômicas adequadas.

As ferramentas de corte, em usinagem, apresentam normalmente uma evolução de desgaste seguindo uma curva padrão, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Comportamento desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte.



Fonte: Machado et al., (2009).

Onde:

- Estágio I: ocorre nos primeiros instantes de corte. A ferramenta sofre um desgaste acelerado devido a adequação ao sistema tribológico.
- Estágio II: fase onde há uma acomodação da evolução do desgaste, que cresce a uma taxa aproximadamente constante ao longo do tempo de usinagem.
- Estágio III: desencadeia o início de uma aceleração no desgaste em um curto espaço de tempo. Isso ocorre, pois o desgaste atingiu proporção elevadas e eventualmente poderá acontecer a falha da ferramenta.

2.5 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM

Segundo Souto (2007), uma forma de se determinar a troca de uma ferramenta de corte é adotar um critério para determinar o final de vida, tais como a rugosidade da superfície usinada, valor máximo ou médio para o desgaste de flanco (VB_{Bmax} e VB_B), valor da profundidade (K_T) para o desgaste de cratera, nível de vibração do conjunto, distância percorrida pela ferramenta durante o corte, potência consumida dentre outros.

O monitoramento de uma ferramenta de corte é de suma importância em um sistema de manufatura. A partir de um sistema de monitoramento é possível que o operador conheça o real estado de desgaste da ferramenta de corte, reduzindo os impactos econômicos acarretados por uma possível quebra da ferramenta ou perda na qualidade dos produtos manufaturados por uma ferramenta desgastada.

Sistemas de monitoramento utilizam de diversos sinais provenientes do processo de usinagem com a finalidade de auxiliar na completa automatização do processo. De acordo com Braga (1992) para uma utilização adequada de um sistema de monitoramento, é desejável que ele tenha, dentre outras, as seguintes características:

- Confiabilidade, indicando a dependência entre o parâmetro medido e o parâmetro que está sendo monitorado, incluindo o fator repetibilidade da performance do sensor em ambientes reais, isto é, ambiente fabril;
- Não seja intrusivo, o que corresponde a não necessidade de se montarem dispositivos complexos que interfiram no funcionamento da máquina;
- Econômico;
- Que o parâmetro medido seja somente influenciado pelo que se deseja medir.

2.5.1 Monitoramento Direto

Os métodos direto de monitoramento são aqueles onde a aferição do parâmetro desejado é executada diretamente sobre a peça ou ferramenta de corte. Para que seja efetuado, o processo de usinagem necessita ser interrompido, gerando um tempo adicional e ocioso ao processo (Costa, 1995).

Para Dan (1990) este sistema de monitoramento tem como seus principais métodos:

- Medição do desgaste da ferramenta via microscópio óptico ou sistemas computadorizados de vídeo;
- Medição da rugosidade da superfície da peça usinada.

2.5.2 Monitoramento Indireto

Segundo Costa (1995) nos sistemas de monitoramento indireto, a medição do parâmetro que se deseja monitorar é executada por meio de um outro parâmetro que possa ser medido em tempo real e que possa ser relacionado com o primeiro. Atualmente, este é o sistema que vem merecendo maior atenção acadêmica e industrial, uma vez que em oposição ao anterior, neste caso o processo de usinagem

não necessita de interrupção, com relativo ganho na produtividade. Entretanto, quando se realiza o monitoramento indiretamente o desgaste deixa de ser o único fator a ser monitorado e, outros fatores influenciam, como:

- Velocidade de corte;
- Profundidade de usinagem;
- Avanço;
- Materiais de ferramenta e da peça.

2.5.3 Monitoramento da Usinagem por Meio dos Parâmetros Elétricos do Motor

Segundo Souto (2007) é um monitoramento bastante simples, de baixo custo e não intrusivo, pois fica instalado perto do motor e longe da região de corte.

De acordo com Dan (1990) durante o processo de usinagem a potência consumida pelo motor principal da máquina aumenta com o desgaste da ferramenta de corte. Dessa forma, quanto maior o desgaste da ferramenta de corte, maior o esforço de corte e, conseqüentemente, maior a corrente elétrica necessária ao processo. Então, a vida da ferramenta pode ser monitorada por meio da análise do comportamento dos sinais elétricos do motor da máquina.

Para Souto (2007), o fato de medir parâmetros elétricos é de certa forma medir indiretamente os esforços de corte, se explica pois o motor da máquina-ferramenta, gera a potência mecânica necessária para executar uma operação de usinagem por meio do consumo de corrente elétrica em uma quantidade diretamente proporcional a potência e as forças de corte.

Segundo Kovac (2008) o sinal da corrente é muito preciso quando relacionado com o desgaste da ferramenta de corte. Embora existam variações de fornecimento durante a coleta de dados, os erros são considerados pequenos quando comparados a faixa de aplicação.

O monitoramento por meio dos parâmetros elétricos do motor tem como principais vantagens (dos Santos, 1988):

- Técnica pouco intrusiva;
- Baixo custo;
- Tecnologia e operação relativamente simples;
- Fácil instalação;

- Não requer muito espaço;
- Pode ser aplicado a maioria dos motores (AC e DC);
- Pode realizar monitoramento em processo(*on-line*);
- É um bom sistema de monitoramento para operações de fresamento, pois os valores de potência são pouco sensíveis aos choques de entrada da ferramenta.

De acordo com Lopes (2013) para monitorar os sinais elétricos do motor basta utilizar sensores de Efeito Hall. Estes sensores são transformadores de corrente que variam sua tensão de saída em função de um campo magnético aplicado, pois a corrente elétrica é capaz de produzir um campo magnético proporcional a corrente.

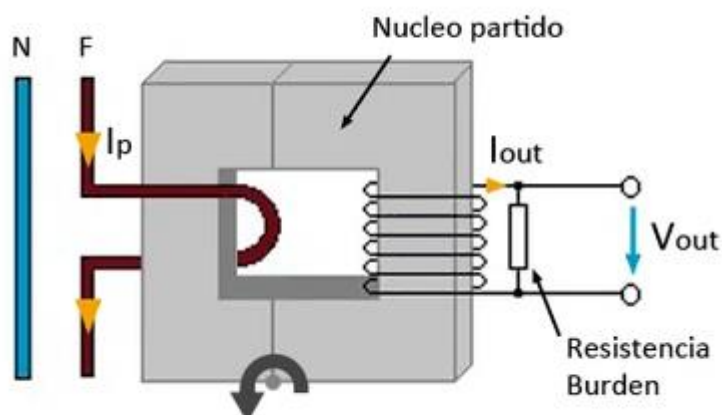
Então, os sinais de corrente elétrica são captados pelo sensor de Efeito Hall, que é instalado circulando um fio condutor de corrente próximo do motor, e transformados em tensão elétrica proporcional a ela para a entrada do conversor A/D – uma placa de expansão que tem por objetivo integrar o microcomputador com o meio externo. Neste caso, a placa tem a função de transformar os sinais analógicos em digitais para serem armazenados e analisados no microcomputador (Matsumoto e Diniz, 1997).

2.6 SENSOR DE EFEITO HALL

O funcionamento do sensor de Efeito Hall, Figura 11, baseia-se na passagem de uma corrente elétrica do fio condutor por meio de um concentrador de fluxo magnético circular, gerando uma diferença de potencial proporcional a corrente medida entre suas extremidades (Souza, 2019).

Segundo Viana et al. (2017) o funcionamento do sensor SCT-013-000 retorna uma medição de corrente/tensão, mas para tornar possível essa aferição o sensor deve ser energizado.

Figura 11 - Esquema do funcionamento do sensor de Efeito Hall.



Fonte: YDHC (2018).

2.7 ARDUINO

O Arduino é uma plataforma utilizada para prototipação de circuitos elétricos que inclui *hardware* e *software* livre visando oferecer ferramentas adaptáveis e de baixo custo para a criação de projetos interativos das mais diversas ordens.

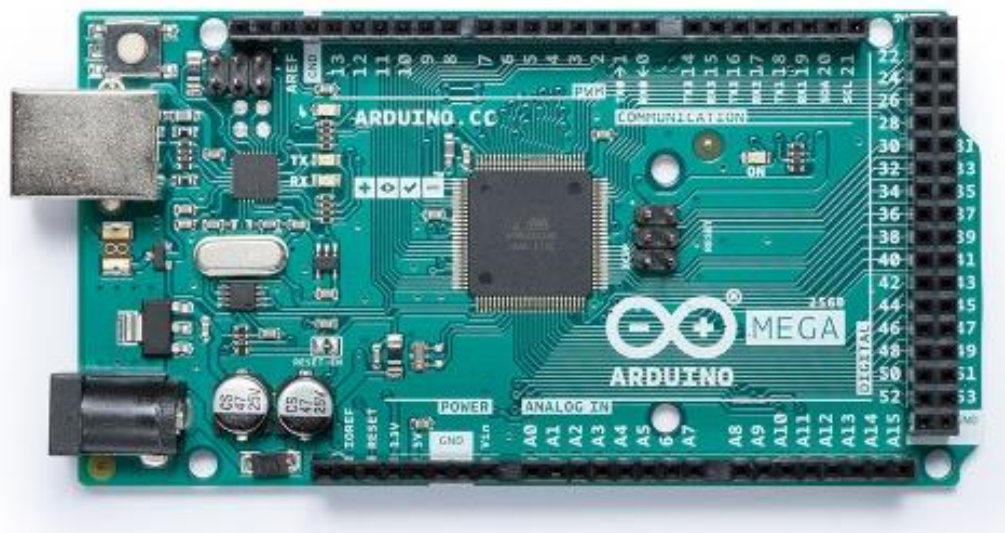
O Arduino é ideal para o desenvolvimento de dispositivos capazes de interagir com o ambiente, por meio da utilização de sensores e atuadores. Os sensores podem medir valores de grandezas como: temperatura, luminosidade, pressão etc. Já os atuadores podem agir sobre o meio promovendo modificações. Exemplos de atuadores: motores, servomotores, displays entre outros. A plataforma utiliza-se de uma camada simples de *software* implementada na placa, que é o *bootloader*, e uma interface amigável no computador que utiliza a linguagem baseada na linguagem C/C++ a qual é também *open source*. (Souza et al., 2011).

A placa, Figura 12, possui na sua parte central um microcontrolador, esse microchip possui um gerador de clock, temporizadores, contador, interface de comunicação, conversores A/D, D/A; memória SRAM, EEPROM e FLASH. Para comandar o *hardware* é necessário desenvolver o *software*, sendo assim o fabricante disponibiliza um ambiente de desenvolvimento integrado IDE, onde é possível editar o programa, compilar e transferir o código para a memória do microcontrolador. (Fonseca e Vega, 2011).

Segundo Cavalcante, Tavoraro e Molisani (2011), existem outras plataformas construídas para microcontroladores, porém o Arduino possui um destaque no cenário

mundial devido a facilidade de programação, versatilidade e baixo custo. Mesmo para os que desejam interações de alto nível, o Arduino tem atendido às expectativas.

Figura 12 - Placa Arduino Mega.



Fonte: www.arduino.cc

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este trabalho propõe estudar o comportamento da corrente elétrica consumida pelo motor *Spindle* durante o processo de usinagem por fresamento de topo na usinabilidade de polímeros (Acrílico e PVC expandido). Para facilitar a compreensão da metodologia utilizada, a Figura 13 apresenta um fluxograma com todas as etapas experimentais seguidas.

Figura 13 - Fluxograma das etapas experimentais realizadas.



Fonte: Autoria própria (2020).

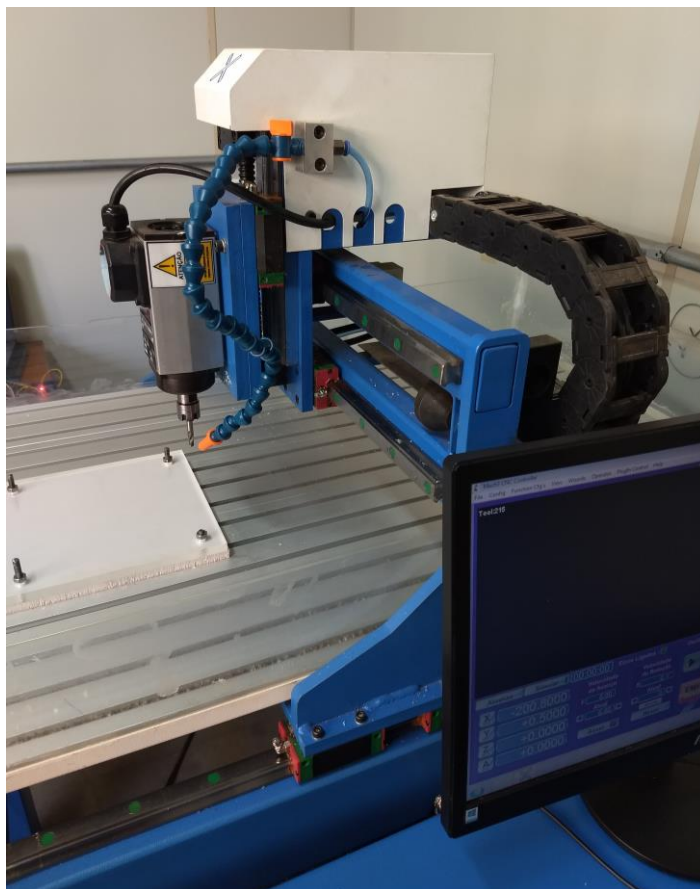
3.1 EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS

Em geral, no desenvolvimento de uma pesquisa experimental, faz-se necessária a utilização de diversos recursos materiais, como forma de mensuração dos dados gerados nos ensaios. Serão especificadas a seguir todas as máquinas, ferramentas, acessórios, materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

3.1.1 Máquina Ferramenta

Para os ensaios de usinagem, utilizou-se uma CNC Router Lexno montada com um *Spindle* TVS.1ZM3.12, Figura 14. As principais especificações do *Spindle* são rotação máxima de 18000 rpm, potência nominal de 1 HP.

Figura 14 - Máquina Ferramenta utilizada nos ensaios.



Fonte: Autoria própria (2020).

3.1.2 Ferramenta de Corte

A ferramenta de corte utilizada no processo foi a fresa de topo com haste 6mm cilíndrica em aço rápido HSS – 2 cortes da marca Rocast, Figura 15.

Figura 15 - Fresa de topo 6mm – 2 cortes.

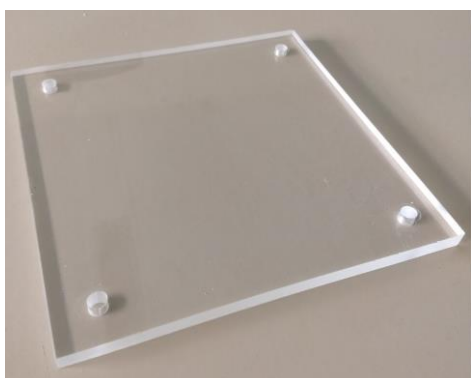


Fonte: www.amatools.com.br.

3.1.3 Corpos de prova

Os polímeros utilizados na usinagem do experimento foram acrílico e PVC expandido em forma de placa com 200 mm x 200 mm x 10mm, a Figura 16, ilustra o modelo das placas, que serão utilizadas para efetuar o processo de fresamento.

Figura 16 - (a) Corpo de prova em Acrílico; (b) Corpo de prova em PVC expandido.



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2020).

3.1.4 Fixação dos Corpos de Prova

Visualizando a Figura 16 é possível verificar que os quatro cantos de ambos materiais possuem furos. A furação foi realizada com o intuito de facilitar a fixação das placas na mesa da *Router*. A Figura 17 expõe como foi realizada a fixação.

Figura 17 - Fixação do corpo de prova.



Fonte: Autoria própria (2020).

3.1.5 Sistema de Aquisição

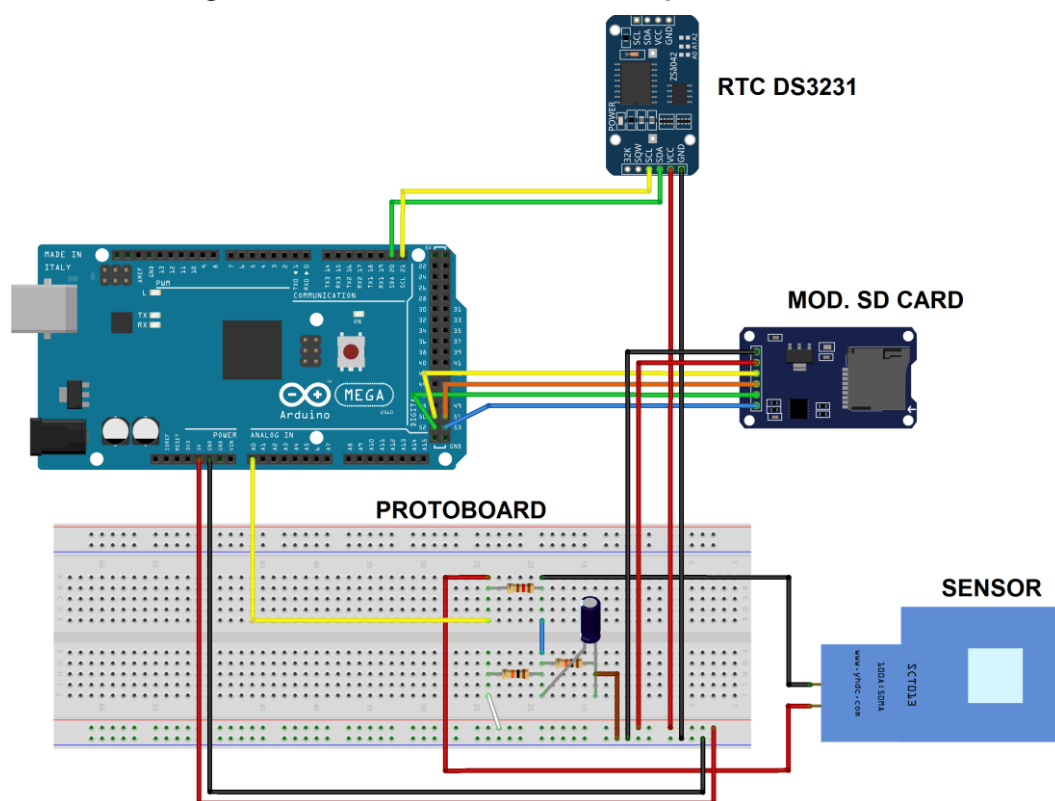
Com o avanço dos semicondutores, nas últimas décadas, projetos de circuitos eletrônicos tem envolvido novos circuitos integrados (VIANA *et al.*, 2017). Assim, o desenvolvimento e a integração de um sistema de aquisição envolvem componentes passivos tais como capacitores, resistores, indutores e transformadores visando gerar um determinado sinal analógico na saída (Kularatna, 2008).

De acordo com Viana *et al.*, (2017) fazendo uso de processadores, memórias e outros dispositivos periféricos para processarem informações e obter-se na saída sinais de natureza digital.

Seguindo a metodologia Souza (2019), para montar o sistema de aquisição, Figura 18, foram necessários os seguintes componentes:

- 1 placa Arduino Mega;
- 1 sensor de corrente SCT-013-000;
- 1 resistor de 120 Ω (5%);
- 2 resistores de 10 k Ω para divisão da tensão;
- 1 capacitor de filtro de 10nF;
- *Jumpers*;
- 1 *Protoboard*;
- Módulo RTC DS3231;
- Módulo SD Card.

Figura 18 - Ilustração do sistema de aquisição de dados.



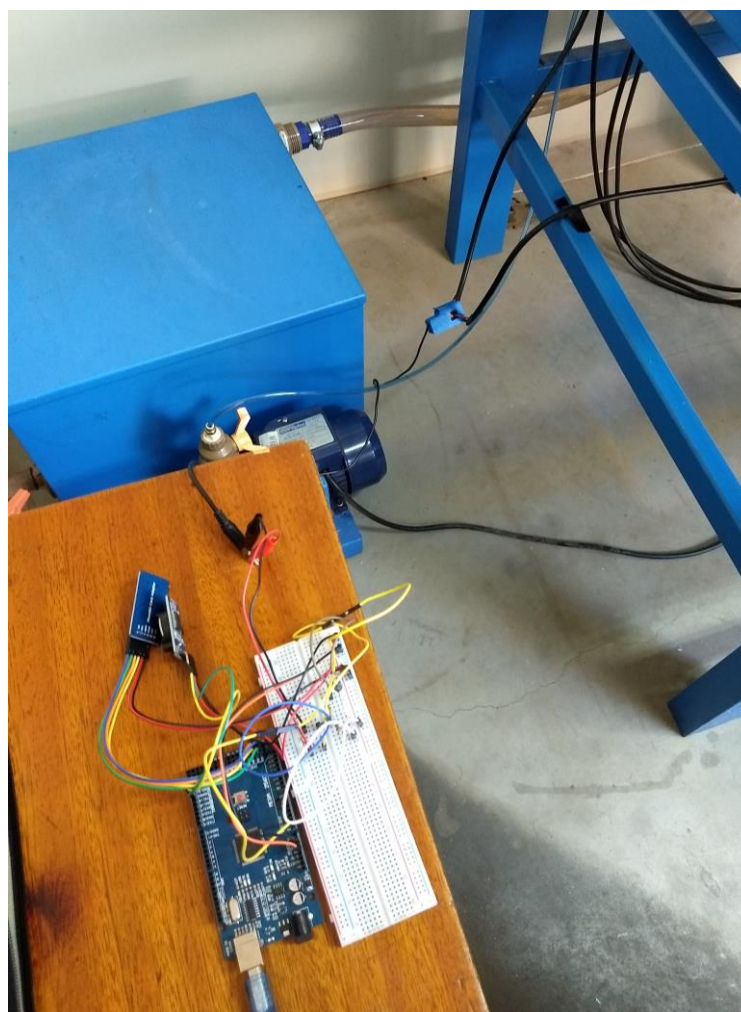
Fonte: Autoria própria (2020).

O sensor SCT-013-000 tem capacidade de medição de uma corrente nominal de 100 A e em sua saída valores entre 0 e 50 mA proporcionais ao valor de corrente percorrido no condutor principal.

A programação lógica do Arduino e dos demais componentes listados, foi executada no *software* ARDUINO IDE e os dados mensurados foram armazenados no módulo Sd Card.

A construção desse sistema, para a aquisição de dados demandou um investimento de 350,00 reais. o que torna altamente atrativo comparado aos sistemas de aquisição comerciais. A Figura 19 mostra o sistema de aquisição integrado ao cabo de alimentação do motor *Spindle* TVS.1ZM3.12.

Figura 19 - Sistema de aquisição em funcionamento.



Fonte: Autoria própria (2020).

3.1.6 Alicate Amperímetro Digital

Para validar os dados coletados pelo sistema de aquisição utilizou-se um alicate amperímetro (Minipa), Figura 20.

Figura 20 - Alicate amperímetro ET-3200A (Minipa).



Fonte: Autoria própria (2020).

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DOS DADOS

Conduziu-se o experimento no laboratório L-22 do Grupo de Automação e Instrumentação Aplicada (GAIA) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), localizado no município de Londrina, estado do Paraná, Brasil.

Para os ensaios optou-se pelo fresamento de topo objetivando atingir um maior estresse na fresa, conseqüentemente uma maior alteração no valor da corrente aferida. As operações de usinagem foram realizadas em uma *CNC Router Spindle*, com e sem aplicação de fluido de corte.

Os parâmetros de corte adotados como variáveis de entrada foram a velocidade de corte v_c e a velocidade de avanço v_f . A profundidade de corte a_p foi mantida constante em todos os ensaios de usinagem.

Foram utilizadas duas fresas de topo aço rápido HSS (diâmetro de 6mm e 2 cortes). A primeira fresa foi utilizada nos ensaios a seco e a segunda foi utilizada nos ensaios com fluido de corte MV AQUA 180, fluido sintético refrigerante. Segundo o fabricante, a recomendação de uso do MV AQUA 180 em geral vai de 10 a 15% (concentração real, m/V), tendo um índice de refração de 2,5. Durante os ensaios utilizou-se uma concentração de 12%.

A Tabela 1 apresenta os fatores de controle ou variáveis de entrada e as respectivas condições (níveis).

Tabela 1 - Fatores de controle e níveis adotados para os ensaios.

Fatores de controle	Níveis	Especificações	
Velocidade de corte	2	150 [mm/min]	250 [mm/min]
Velocidade de avanço	2	200 [mm/min]	300 [mm/min]
Fluido	2	Com	Sem
Material	2	Acrílico	PVC expandido

Fonte: Autoria própria (2020).

Para cada experimento foram realizadas três réplicas, totalizando em 48 ensaios. A ordem de execução dos ensaios foi aleatorizada em blocos, como explicitado na Tabela 2.

Tabela 2 – Blocos representados pelo tipo de usinagem e suas respectivas repetições.

Blocos	Usinagem	Sequência
B1	Seco	1º repetição
B2	Seco	2º repetição
B3	Seco	3º repetição
B4	Fluido de corte	4º repetição
B5	Fluido de corte	5º repetição
B6	Fluido de corte	6º repetição

Fonte: Autoria própria (2020).

A Tabela 3 exemplifica as combinações dos parâmetros adotados para a primeira repetição do ensaio à seco, já a Tabela 4 apresenta as combinações dos parâmetros referentes a primeira repetição do ensaio com fluido. Para cada ensaio

foram monitoradas e coletadas medições da corrente elétrica consumida pelo motor principal. Tabela 5 indica as características da variável dependente do experimento.

Tabela 3 - Parâmetros para a primeira repetição do ensaio à seco.

Ensaio	Vc [m/min]	Vf [mm/min]	Material	a _p [mm]
1	250	200	Acrílico	0,5
2	250	200	PVC	0,5
3	250	300	Acrílico	0,5
4	150	200	PVC	0,5
5	150	300	PVC	0,5
6	150	200	Acrílico	0,5
7	150	300	Acrílico	0,5
8	250	300	PVC	0,5

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 4 - Parâmetros para a primeira repetição do ensaio com fluido de corte.

Ensaio	Vc [m/min]	Vf [mm/min]	Material	a _p [mm]
25	250	200	PVC	0,5
26	150	200	PVC	0,5
27	250	300	PVC	0,5
28	250	200	Acrílico	0,5
29	150	300	PVC	0,5
30	150	300	Acrílico	0,5
31	250	300	Acrílico	0,5
32	150	200	Acrílico	0,5

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 5 - Variável dependente.

Variável resposta	Tipo de variável	Unidade
Corrente	Quantitativa	Ampere [A]

Fonte: Autoria própria (2020).

A variável resposta aferida nos ensaios, como dito anteriormente foi a corrente elétrica. Dessa forma, considerando um nível de significância de 5%, a seguintes hipóteses foram testadas:

- H₀: Não há efeito de bloco (fluido) *versus* H₁: Há efeito bloco (fluido).
- H₀: Não há efeito de interação tripla *versus* H₁: Há efeito de interação tripla.
- H₀: Não há efeito de interação dupla *versus* H₁: Há efeito de interação dupla.

Se a hipótese nula for rejeitada nos casos anteriores, as seguintes hipóteses serão testadas:

- H₀: Não há efeito de velocidade de corte *versus* H₁: Há efeito de velocidade de corte.

- H_0 : Não há efeito de velocidade de avanço *versus* H_1 : Há efeito de velocidade de avanço.

- H_0 : Não há efeito de material *versus* H_1 : Há efeito de material.

Então, para testar os efeitos das causas de variação do experimento, uma análise de variância (ANOVA) será realizada. A Tabela 6 expõe a estrutura da tabela (ANOVA).

Tabela 6 - Modelo da ANOVA.

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma quadrática	Média quadrática	F ₀
Blocos (fluido)	a - 1	SQ _{Blocos}	QM _{Blocos}	QM _{Blocos} /QM _{Resíduo}
Vc	b - 1	SQ _{Vc}	QM _{Vc}	QM _{Vc} /QM _{Resíduo}
Vf	c - 1	SQ _{Vf}	QM _{Vf}	QM _{Vf} /QM _{Resíduo}
Material	d - 1	SQ _{Material}	QM _{Material}	QM _{Material} /QM _{Resíduo}
Vc*Vf	(b - 1)(c - 1)	SQ _{Vc*Vf}	QM _{Vc*Vf}	QM _{Vc*Vf} /QM _{Resíduo}
Vc*Material	(b - 1)(d - 1)	SQ _{Vc*Material}	QM _{Vc*Material}	QM _{Vc*Material} /QM _{Resíduo}
Vf*Material	(b - 1)(d - 1)	SQ _{Vf*Material}	QM _{Vf*Material}	QM _{Vf*Material} /QM _{Resíduo}
Vc*Vf*Material	(a - 1)(b - 1)(c - 1)	SQ _{Vc*Vf*Material}	QM _{Vc*Vf*Material}	QM _{Vc*Vf*Material} /QM _{Resíduo}
Resíduo	abcd(r - 1)	SQ _{Resíduo}	QM _{Resíduo}	
Total	abcdr - 1	SQ _T		

Fonte: Adaptado de Montgomery e Runger (2016).

Logo, o critério de rejeição do teste é definido com: rejeitar H_0 se o nível descritivo (p -valor) for menor do que o nível de significância (α).

Se os efeitos da causa de variação forem significativos, conseqüentemente, um teste de Tukey será realizado para testar as seguintes hipóteses:

- H_0 : Não há diferença entre as médias.
- H_1 : Há pelo menos um par de médias diferentes entre si.

Com o propósito de auxiliar na execução das análises estatísticas, o Minitab® será utilizado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados, em tópicos, os resultados preliminares e os resultados obtidos no fresamento de topo quando utilizadas duas velocidades de corte, duas velocidades de avanço, dois materiais para corpo de prova e usinagem à seco e com fluido de corte.

4.1 MONITORAMENTO DOS ENSAIOS PRELIMINARES

A Tabela 7 mostra os resultados das correntes aferidas nos testes preliminares de usinagem em vazio. Esses testes serviram para certificar da precisão do sistema de aquisição, assim como de levantar valores de referência do consumo de corrente elétrica pelo motor *Spindle* do CNC durante o movimento em vazio.

Tabela 7 - Corrente elétrica média aferida na usinagem em vazio.

Fluido	v_c [m/min]	v_f [mm/min]	Corrente média [A]
Sem	150	200	1,7470
Sem	250	200	1,7887
Sem	150	300	1,7520
Sem	250	300	1,7944
Com	150	200	1,6882
Com	250	200	1,7296
Com	150	300	1,6950
Com	250	300	1,7244

Fonte: Autoria própria (2020).

4.2 MONITORAMENTO DA CORRENTE ELÉTRICA DO MOTOR PRINCIPAL

A Tabela 8 apresenta os valores médios da corrente elétrica monitorada durante os ensaios efetuados em cada repetição. Com relação aos valores da média da corrente elétrica mostrada na Tabela 8, estes foram medidos enquanto a máquina estava em processo de usinagem. Portanto, o valor da corrente representa o valor aferido no processo de corte.

Tabela 8 - Valores de corrente elétrica.

Fluido	v_c [m/min]	v_f [mm/min]	Material	1º Repetição Corrente [A]	2º Repetição Corrente [A]	3º Repetição Corrente [A]
Sem	150	200	Acrílico	1,7838	1,7809	1,7754
Sem	250	200	Acrílico	1,8243	1,8115	1,8104
Sem	150	300	Acrílico	1,8003	1,7970	1,7803
Sem	250	300	Acrílico	1,8152	1,8225	1,8224
Sem	150	200	PVC	1,7828	1,7619	1,7698
Sem	250	200	PVC	1,8034	1,8173	1,8125
Sem	150	300	PVC	1,7913	1,7733	1,7685
Sem	250	300	PVC	1,8322	1,8100	1,7965
Com	150	200	Acrílico	1,7008	1,7155	1,7245
Com	250	200	Acrílico	1,7468	1,7727	1,7749
Com	150	300	Acrílico	1,7188	1,7236	1,7470
Com	250	300	Acrílico	1,7557	1,7686	1,7732
Com	150	200	PVC	1,6885	1,7114	1,7321
Com	250	200	PVC	1,7305	1,7363	1,7609
Com	150	300	PVC	1,7016	1,7152	1,7285
Com	250	300	PVC	1,7403	1,7456	1,7619

Fonte: Autoria própria (2020).

Para análise da interação dos níveis das variáveis quanto a corrente elétrica consumida pelo motor *Spindle*, utilizou-se um planejamento fatorial aleatorizado por blocos.

4.3 PRESSUPOSTOS PARA APLICAÇÃO DA ANOVA

Para ser possível aplicar a ANOVA faz-se necessário atender os seguintes pressupostos: independência, normalidade e homogeneidade de variância. Com os pressupostos atendidos é possível aplicar a análise de variância para avaliar a existência de interação entre os fatores ou de efeito individual dos mesmos.

4.3.1 Independência

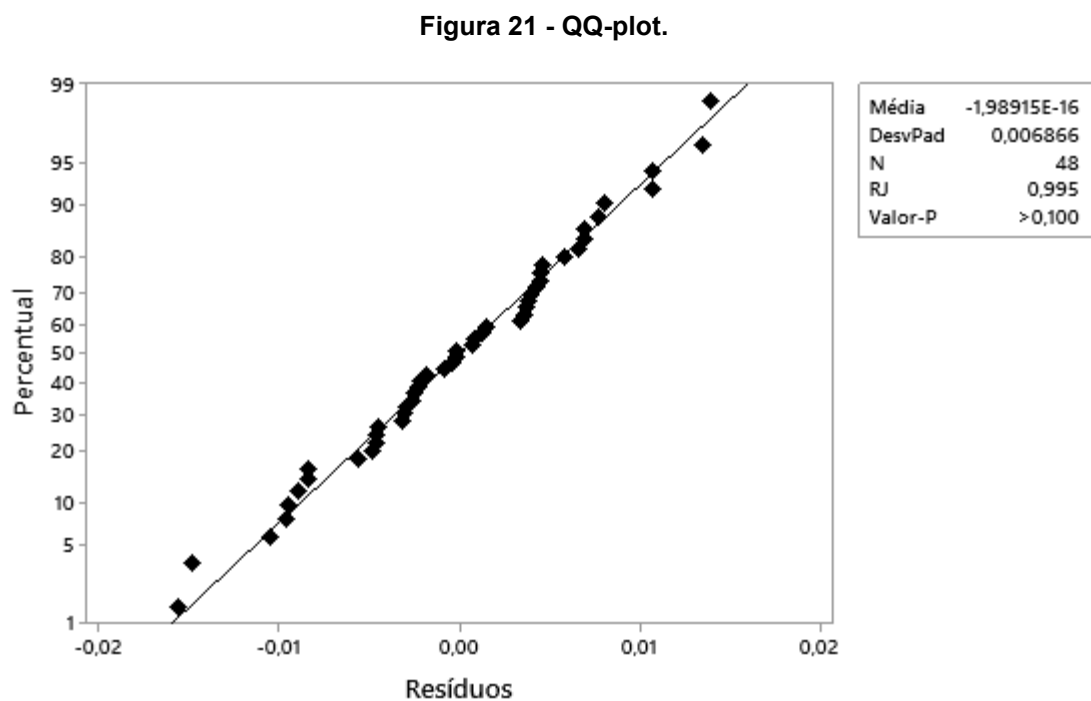
Os ensaios foram realizados aleatoriamente dentro de cada bloco. Logo, o requisito de independência foi atendido.

4.3.2 Normalidade

Os resíduos devem seguir distribuição normal. Para verificar deve-se aplicar teste de Shapiro-Wilk.

- H_0 : Os dados seguem distribuição normal *versus* H_1 : Os dados não seguem distribuição normal.

A distribuição normal, fica evidente na Figura 21, uma vez que os pontos estão em torno da reta.



Fonte: Autoria própria (2020).

4.3.3 Homogeneidade de Variância

As variâncias dos fatores devem ser iguais. Portanto cada tratamento será avaliado pelo teste de Bartlett separadamente.

4.3.3.1 Teste de Bartlett – Blocos

As hipóteses são:

- H_0 : As variâncias dos blocos são iguais *versus* H_1 : As variâncias dos blocos não são iguais.

Portanto, ao nível de significância de 5% com p -valor = 0,979 não se rejeita H_0 . Logo, tem-se evidência que no nível dos blocos as variâncias são iguais.

4.3.3.2 Teste de Bartlett - Velocidade de corte

As hipóteses são:

- H_0 : As variâncias das velocidades de corte são iguais *versus* H_1 : As variâncias das velocidades de corte não são iguais.

Com p -valor = 0,760 não se rejeita H_0 . Dessa forma, tem-se evidência de que no nível das velocidades de corte as variâncias são iguais.

4.3.3.3 Teste de Bartlett - Velocidade de avanço

As hipóteses são:

- H_0 : As variâncias das velocidades de avanço são iguais *versus* H_1 : As variâncias das velocidades de avanço não são iguais.

Ao nível de significância de 5% com p -valor = 0,815 não se rejeita H_0 . Logo, tem-se evidência que no nível das velocidades de avanço as variâncias são iguais.

4.3.3.4 Teste de Bartlett – Material

As hipóteses são:

- H_0 : As variâncias dos materiais são iguais *versus* H_1 : As variâncias dos blocos não são iguais.

Por fim, ao nível de significância de 5% com p -valor = 0,771 não se rejeita H_0 . Logo, tem-se evidência que no nível dos materiais as variâncias também são iguais.

4.4 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

Com os pressupostos da seção anterior sendo atendidos foi possível aplicar a análise de variância para os dados de corrente. Por meio Tabela 9 é possível observar que não houve efeito de interação tripla sendo que o p -valor = 0,482 é maior que o nível de significância. Dessa forma, a hipótese H_0 apresentada na seção 3.3 não foi rejeitada. O mesmo ocorre com as interações duplas, ou seja, nenhuma apresentou efeito de interação.

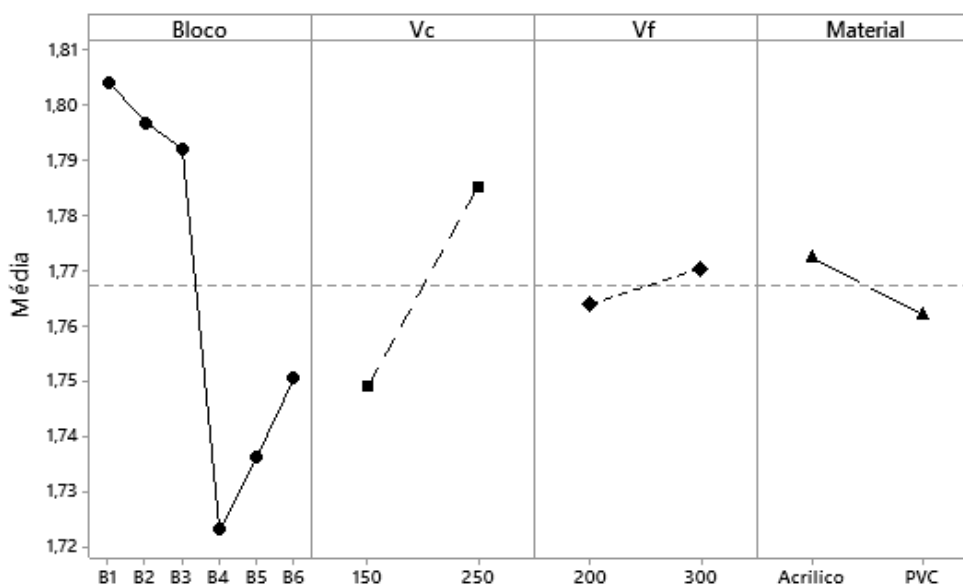
Tabela 9 - Análise de variância dos dados de corrente.

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma quadrática	Média quadrática	F ₀	p -valor
Blocos (fluido)	5	0,048562	0,009712	153,42	0,000
V _c	1	0,01587	0,01587	250,69	0,000
V _f	1	0,000537	0,000537	8,49	0,006
Material	1	0,001304	0,001304	20,6	0,000
V _c *V _f	1	0,000118	0,000118	1,87	0,180
V _c *Material	1	0,000055	0,000055	0,87	0,357
V _f *Material	1	0,000001	0,000001	0,16	0,692
V _c *V _f *Material	1	0,000032	0,000032	0,51	0,482
Resíduo	35	0,002216	0,000063		
Total	47	0,068705			

Fonte: Autoria própria (2020).

Como abordado na seção 3.3 se as hipóteses de interação tripla e dupla fossem rejeitadas seriam verificadas as hipóteses de efeito individual de cada fator. Como é possível ver pelos dados expostos na Tabela 9 todos os fatores possuem um p -valor menor que o nível de significância. Logo, temos evidência de que há efeito dos blocos, da velocidade de corte, da velocidade de avanço e do material, Figura 22, ilustra os efeitos dos fatores sobre a corrente. Desse modo, será necessário a realização do teste de Tukey para cada parâmetro de controle.

Figura 22 - Comportamento dos parâmetros com efeito sobre a corrente elétrica (Ampere).



Fonte: Autoria própria (2020).

4.4.1 Teste de Tukey – Blocos

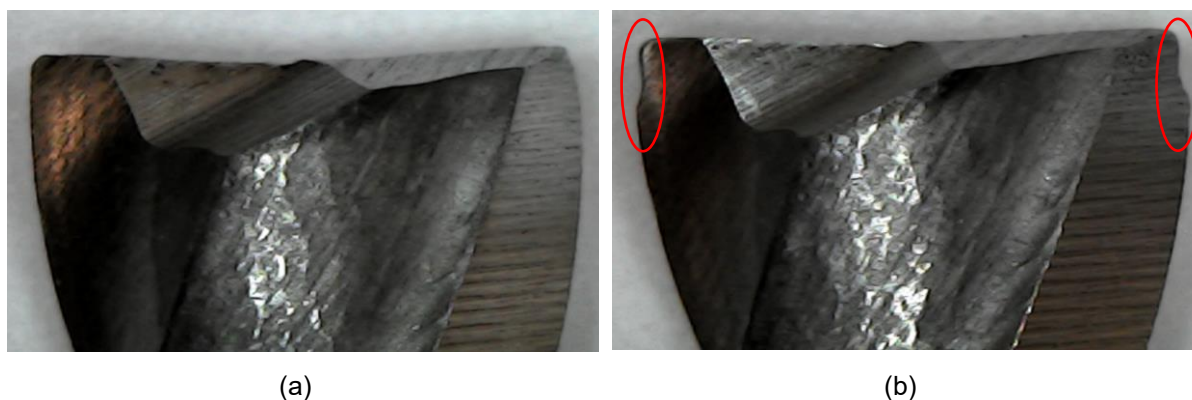
Aplicando o teste de Tukey para os Blocos, em que B1, B2, B3 representam a primeira, segunda e terceira repetição dos ensaios à seco, respectivamente. E B4, B5 e B6 as repetições sucessivas, porém com fluido de corte. Verifica-se pela Tabela 10, que os blocos referentes aos ensaios sem fluido de corte têm um consumo maior de corrente elétrica e que seus valores médios se distinguem apenas em dois grupos A e B. Enquanto os blocos correspondentes aos testes com fluido de corte possuem cada repetição em um grupo diferente e a média da corrente elétrica cresceu gradativamente em cada repetição. Esse comportamento deve-se possivelmente ao desgaste da ferramenta, evidenciado na Figura 23.

Tabela 10 - Teste de Tukey (Blocos)

Grupos	Tratamentos	Média [A]
A	B1	1,80416
A B	B2	1,79680
B	B3	1,79198
C	B6	1,75038
D	B5	1,73611
E	B4	1,72288

Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 23 - (a) Fresa de topo 6 mm nova; (b) Fresa após todos os ensaios com fluido de corte.



Fonte: Autoria própria (2020).

4.4.2 Teste de Tukey – Velocidade de corte

Por meio da Tabela 11 pode-se concluir que o consumo de corrente elétrica é elevado com o aumento da velocidade de corte.

Tabela 11 - Teste de Tukey (Velocidade de corte).

Grupos	Tratamentos	Média [A]
A	250 [m/min]	1,78523
	B 150 [m/min]	1,74887

Fonte: Autoria própria (2020).

4.4.3 Teste de Tukey – Velocidade de avanço

Quanto a velocidade de avanço, Tabela 12, notou-se um acréscimo no consumo da corrente elétrica com o aumento da velocidade, assim como no parâmetro da velocidade de corte. Porém o aumento na média da corrente consumida com base no aumento da velocidade de avanço foi pequeno.

Tabela 12 - Teste de Tukey (Velocidade de avanço).

Grupos	Tratamentos	Média [A]
A	300 [mm/min]	1,77040
	B 200 [mm/min]	1,76370

Fonte: Autoria própria (2020).

4.4.4 Teste de Tukey – Material

Quanto ao consumo de corrente elétrica, Tabela 13, nos diferentes materiais observa-se que as médias de corrente elétrica são iguais as calculadas para a velocidade de avanço. Sendo o consumo de corrente maior durante a usinagem do acrílico.

Tabela 13 - Teste de Tukey (Material).

Grupos	Tratamentos	Média [A]
A	Acrílico	1,77040
B	PVC expandido	1,76370

Fonte: Autoria própria (2020).

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de aquisição de baixo custo e não intrusivo capaz de monitorar a corrente elétrica consumida pelo motor principal de uma fresadora CNC, por meio de análise experimental. Com base nos dados experimentais realizou-se uma análise de variância (ANOVA), a qual visou avaliar a influência dos parâmetros de controle sob a variação na corrente elétrica monitorada.

A partir dos resultados obtidos da análise estatística pode-se determinar que todos os parâmetros apresentaram efeito sob a corrente elétrica aferida individualmente. O parâmetro com maior influência sob o comportamento da corrente elétrica consumida pelo motor *Spindle* é a velocidade de corte. A velocidade de avanço e o material mostraram ser menos influentes.

A corrente elétrica aferida nos blocos de ensaios com fluido de corte mostrou-se menor do que nos ensaios à seco. Os resultados possibilitaram também visualizar um aumento progressivo na corrente média aferida em cada repetição dos ensaios com fluido de corte. Sendo esse fato associado ao desgaste da ferramenta. Desse modo, o desgaste da ferramenta de corte também apresenta uma influência sob o valor da corrente monitorada.

Como sugestão para trabalhos futuros sugere-se realizar os ensaios em matérias com propriedades distintas.

Outro ponto sugerido, refere-se ao sistema de aquisição. Deve-se realizar um processo de usinagem onde em um único ensaio possa ser possível observar o aumento da corrente elétrica monitorada devido ao desgaste da ferramenta.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6163. **Geometria da Cunha Cortante**. 1980.

BRAGA, Durval U. **Monitoramento do processo de torneamento via parâmetros elétricos do motor da máquina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 1992.

CAVALCANTE, Marisa Almeida; TAVOLARO, Cristiane Rodrigues Caetano; MOLISANI, Elio. Física com Arduino para iniciantes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 4503-4503, dez. 2011. FapUNIFESP (SciELO).

Cho, S., S. Asfour, A. Onar and N. Kaundinya, 2005. **Tool breakage detection using support vector machine learning in a milling process**. Int. J. Mach. Tool. Manu., 45: 241-249.

COSTA, C. E. **Monitoramento do processo de torneamento de desbaste via corrente elétrica do motor principal da máquina e via vibração da ferramenta**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, 1995.

DAN, L., Mathew, J., 1990, **Tool Wear and Failure Monitoring Techniques for Turning – a Review**. Int. Journal of Machine Tools and Manufacturing, Vol.30, N°.4, pp.579-598.

DIB, M. H. M. **Fundamentos do fresamento: uma aplicação em microfresamento**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

Diniz, A.E.;Marcondes, F.C.; Coppini, N.L. **Tecnologia da usinagem dos Materiais**. 9º Ed. – Artliber Editora Ltda. - SP 2014

DOLINSEK, S.; KOPAC, J. **Acoustic Emission Signals for Tool Wear Identification**. Wear. 225-229, pp. 295-303,1999

DOS SANTOS, M. T. **Estudo do monitoramento do Desgaste de Fresas de Topo Baseado em Emprego de Sensores**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Ed. Edgard Bluncher Ltda, 1977.

FONSECA, E. G. P.; VEJA, A. S. **Tutorial sobre Introdução a Projetos Utilizando o Kit de Desenvolvimento Arduino**. Anais: XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Cobenge. Blumenau: FURB, 2011. 7 p.

KOVAC, Pavel. **In Process Monitoring System for Milling Machine**. Faculty of Technical Sciences Department of Manufacturing Engineering. Serbia, 2008.

Kularatna, N., 2008, “**Electronic Circuit Design - From Concept to Implementation**”, Ed. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, USA, 483 p.

LOPES, Cláudio Parreira. **Análise do desgaste de ferramentas no fresamento de engrenagens cônicas de grandes dimensões fundidas em aço ABNT 4140**. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Ufsj, São João del Rei, 2013.

MACHADO, Alisson R.; SILVA, Marcio B. da. **Usinagem dos Metais** – Apostila Didática. Uberlândia: Edufu (Editora UFU), 2004.

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

MATSUMOTO, Hidekasu., DINIZ, Anselmo E. **Torneamento de Aço Endurecido Monitorado por Emissão Acústica e Corrente do Motor**, 14º COBEM, Bauru, SP, Brasil, 1997.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2016. 652 p.

RIBEIRO JUNIOR. Elson Heraldo; PENTEADO, Rosangela de Fatima Stankowitz. **Modelo para formatação de trabalhos acadêmicos da UTFPR**. Ponta Grossa, 2011. (Apostila)

Souto, U. B. **Monitoramento do Desgaste de Ferramenta no Processo de Fresamento via Emissão Acústica**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

SANDVIK COROMANT. **Manual de Treinamento: Tecnologia em Usinagem**. 2017.

SANTOS PEIXOTO, A. C. **SIMULAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE USINAGEM NO FRESAMENTO DE TOPO DO INCONEL® 718 E VALIDAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS**. 2019. 39 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SOUZA, Anderson R. de et al. **A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC**. Revista Brasileira de Ensino de Física, Rio de Janeiro, v. 33, n. 1, p.1-5, 21 mar. 2011.

SOUZA, Lucas Melegari de. **Desenvolvimento de um sistema de baixo custo para o monitoramento do desgaste de ferramenta de corte via corrente elétrica**. 2019. 62 p. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

STEMMER, Caspar E. **Ferramentas de corte I**. 3. Ed - Florianópolis: Ed. da UFSC, 1993. 249 p.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 4th Edition, Butterworths-Heinemann, ISBN 0-7506-7069-X, 2000, 446 pags.

VIANA, Rhander *et al.* **Monitoramento da Potência Ativa na Usinagem Utilizando um Sistema de Baixo Custo. Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, [S.L.],2017. ABCM. <http://dx.doi.org/10.26678/abcm.cobef2017.cof2017-1316>.

Yeo, S.H., L.P. Khoo and S.S. Neo, 2000. **Tool condition monitoring using reflectance of chip surface and neural network**. J. Intell. Manuf., 11: 507-514.

YHDC, 2018. **Sensor não invasivo**. Disponível em: <<https://www.poweruc.pl/blogs/news/non-invasive-sensor-yhdc-sct013-000-ct-used-with-arduino-sct-013?lang=pt>>. Acessado 30/09/2020.

ANEXO A - Código do sistema de monitoramento

```

#include <EmonLib.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <DS3231.h>
#include <Wire.h>

EnergyMonitor SCT013;
DS3231 rtc;
RTCDatetime dataehora;

int pinSCT = A0;

const int chipSelect = 53;

File dataFile;

bool cartaoOk = true;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  SCT013.current(pinSCT, 16.667);
  {
    Serial.begin(9600);
    rtc.begin();
    rtc.setDateTime(__DATE__, __TIME__);
  }
  if (!SD.begin(chipSelect))
  {
    Serial.println("Erro na leitura do arquivo! Não existe um cartão SD ou o módulo está
conectado incorretamente!");
    cartaoOk = false;
    return;
  }
}

void loop()
{
  dataehora = rtc.getDateTime();
  delay(400);

  // Caso o cartão esteja funcionando é criado um arquivo no cartão SD com o nome
  datalog.csv em modo de escrita

```

```
if (cartaoOk)
{
    dataFile = SD.open("DATA600d.csv", FILE_WRITE);
    //Serial.println("Inicializado cartão SD para escrita");
}
//Limpendo Variáveis

String leitura = "";
float corrente = 0;

// Leitura do sensor
double Irms = SCT013.calcIrms(1480);

// Caso os valores lidos do sensor não sejam válidos executamos as seguintes linhas
if (isnan(Irms))
{
    Serial.println ("Falha na leitura do sensor");
    delay(400);
    return;
}

// Se tudo estiver funcionando, escrevemos os dados a serem armazenados em uma
String
leitura = String(Irms)+ " ; " + String(dataehora.hour)+ ":"+ String(dataehora.minute)
+ ":" + String(dataehora.second);

// Se o arquivo estiver aberto para leitura executa-se o código

if (dataFile)
{
    Serial.println(leitura);
    dataFile.println(leitura);
    dataFile.close();
    delay(400);
}
}
```