

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

LUCAS MELEGARI DE SOUZA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA O
MONITORAMENTO DO DESGASTE DE FERRAMENTA DE CORTE
VIA CORRENTE ELÉTRICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**LONDRINA
2019**

LUCAS MELEGARI DE SOUZA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA O
MONITORAMENTO DO DESGASTE DE FERRAMENTA DE CORTE
VIA CORRENTE ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico pelo curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina.

Orientadora: Prof. Dra. Janaína Fracaro de Souza Gonçalves.

Co-orientador: Prof. Dr. Roger Nabeyama Michels.

LONDRINA

2019



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



TERMO DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA O MONITORAMENTO DO DESGASTE DE FERRAMENTA DE CORTE VIA CORRENTE ELÉTRICA

Por

LUCAS MELEGARI DE SOUZA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 11 de Junho de 2019 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.

Janaina Fracaro de Souza Gonçalves
Professora Orientadora

Amadeu Lombardi Neto
Membro titular

Haustin Stelmastchuk Vieira
Membro titular

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

Dedico esse trabalho aos meus pais Joaquim e Aparecida, ao meu irmão Samuca e irmãs Raquel e Cris.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora Prof^a Janaina Fracaro de Souza Gonçalves, por toda a ajuda e sabedoria com que me orientou ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu Co-Orientador Prof^o Roger Nabeyama Michels por toda orientação e apoio ao longo desse trabalho.

A professora Elizabeth pela contribuição no desenvolvimento do trabalho.

Ao pessoal do laboratório de análises do departamento de Materiais pela ajuda com as medições.

Aos meus amigos por sempre me ajudarem e apoiarem nos momentos difíceis e pelos momentos de descontração.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica pela contribuição na minha formação.

E a todos que direta ou indiretamente me ajudaram ao longo da vida.

RESUMO

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 páginas. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

Em processos de fabricação por usinagem a substituição prematura de ferramentas de corte gera custos adicionais ao processo e quando trocada tardiamente o desgaste da ferramenta compromete a qualidade superficial e as tolerâncias dimensionais da peça. Na indústria, o controle de desgaste das ferramentas de corte é realizado por estimativa, por métodos estatísticos ou realizados diretamente. No entanto, essas previsões são imprecisas e trabalhosas, e ocupam um tempo do processo para realizá-las. O presente trabalho propõe um sistema de monitoramento indireto de baixo custo utilizando uma placa Arduino integrada a um sensor de corrente SCT-013-000, um módulo *SD Card* e um módulo *RTC DS3231* que realizam a medição e armazenamento dos valores de corrente coletados, em função do tempo, diretamente no cabo de alimentação da máquina-ferramenta. O objetivo deste sistema é correlacionar a corrente elétrica com o desgaste máximo de flanco (VB_{max}) usando uma ferramenta de corte de aço rápido de 10% Co, no processo de torneamento do aço SAE 4140. Um teste de curta duração com parâmetros de corte constantes foi realizado, e as imagens das marcas de desgaste foram registradas por meio de um microscópio modelo *Zeiss Axio*, com posterior processamento de imagem utilizando o software livre *Image J*. A partir dos dados coletados para corrente elétrica, medições de rugosidade média (R_a) e valores medidos de desgaste, foram obtidos modelos de correlação entre desgaste e corrente elétrica assim como de desgaste e rugosidade média. O modelo de correlação da rugosidade média (R_a) mostrou-se mais limitado comparado ao modelo de corrente elétrica. Foi observado um aumento de 11 % entre a corrente elétrica média quando a ferramenta não apresentava desgaste e no momento de fim da vida.

Palavras-chave: Torneamento. Aço SAE 4140. Desgaste de ferramenta de corte. Monitoramento de corrente elétrica.

ABSTRACT

Souza, Lucas Melegari de. **Development of a low cost system for monitoring the wear of cutting tool via electric current.** 2019. 62 pages. Completion work of Mechanical Engineering course – Federal Technology University - Paraná. Londrina, 2019.

In machining processes, the premature replacement of cutting tools generates additional costs to the process and, when changed late, tool wear compromises surface quality and dimensional tolerances of the workpiece. In industry, the wear control of cutting tools is performed by estimation, by statistical methods or directly performed. However, these predictions are imprecise and labor-intensive, and take time out of the process to accomplish them. The present work proposes a low cost indirect monitoring system using an Arduino board integrated with a current sensor SCT 013-00-00, an SD Card module and an RTC DS3231 module that perform the measurement and storage, as function of time, of the directly collected current values on the power cable of the machine tool. The purpose of this system is to correlate electric current with maximum flank wear (VB_{max}) using a 10% Co high speed steel cutting tool in the SAE 4140 steel turning process. A short duration test with constant cutting parameters was performed, and images of the wear marks were recorded by means of a Zeiss Axio model microscope, with further image processing using the free software Image J. From the data collected for electric current, from mean roughness measurements (R_a) and values of wear, correlation models were obtained between wear and electric current as well as wear and average roughness. The correlation model of the average roughness (R_a) showed to be more limited when compared to the electric current model. An increase of 11% in the average electric current was observed between the new tool and the end of life.

Keywords: Turning. SAE 4140 Steel. Cutting tool wear. Monitoring of Electric current.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Movimentos e parâmetros de corte do processo de torneamento.....	16
Figura 2. Geometria de uma ferramenta de torneamento.	18
Figura 3. Planos do sistema de referência da ferramenta.	19
Figura 4. Ângulos da cunha de corte em relação ao plano de referência.....	20
Figura 5. Ângulos da cunha de corte definidos em relação ao plano ortogonal.	21
Figura 6. Ângulo da cunha de corte definido em relação ao plano de corte.....	21
Figura 7. Lista de materiais de ferramentas de corte	23
Figura 8. Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.	26
Figura 9. Parâmetros para medir o desgaste das ferramentas de corte.....	26
Figura 10. Curva padrão de desgaste de uma ferramenta de corte.	27
Figura 11. Desgaste de flanco em um inserto de corte.	28
Figura 12. Desgaste de cratera em um inserto de corte.....	28
Figura 13. Desgaste de entalhe em um inserto de corte.	29
Figura 14. Principais mecanismos de desgaste em ferramentas de corte	30
Figura 15. Aresta postiça de corte.....	31
Figura 16. Distribuição dos mecanismos de desgaste em ferramentas de corte	31
Figura 17. Esquema de funcionamento do sensor de corrente	41
Figura 18. Ilustração de uma placa Arduino modelo Mega	42
Figura 19. Ferramenta de corte utilizada.....	44
Figura 20. Torno mecânico convencional.....	46
Figura 21. Microscópio binocular Zeiss Scope A.....	46
Figura 22. Rugosímetro.....	47
Figura 23. Esquemática do Sistema de aquisição de dados	48
Figura 24. Sistema de monitoramento e aquisição de dados.....	49
Figura 25. Montagem do sistema de monitoramento junto ao torno.....	50
Figura 26. Corpo de prova usinado	53
Figura 27. Imagens da ferramenta de corte sem desgaste e com desgaste	53
Figura 28. Desgastes de flanco próximo e no fim da vida da ferramenta.....	54
Figura 29. Curva do desgaste em função do tempo.....	55
Figura 30. Comportamento da corrente em função do tempo durante o movimento ativo.....	57
Figura 31. Gráfico da corrente média em função do desgaste.....	59
Figura 32. Resíduos VS valor ajustado para corrente elétrica.....	60
Figura 33. Análise de distribuição normal dos valores médio de corrente.....	60
Figura 34. Gráfico da rugosidade média em relação ao desgaste.	62
Figura 35. Resíduos VS valor ajustado para a rugosidade.	63
Figura 36. Distribuição normal dos valores de rugosidade média	63

LISTA DE ABREVIATURAS

RPM	Rotações por minuto
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ISO	International Organization Standardization
PVD	Physical Vapor Deposition
HRC	Hardness Rockwell C
ABNT	Associação brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
CNC	Comando Numérico Computadorizado
IDE	Ambiente de desenvolvimento Integrado
RTC	Real Time clock
SCT	Split-Core Current Transformer

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3 REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 PROCESSO DE TORNEAMENTO.....	15
3.2 GEOMETRIA DAS FERRAMENTAS DE CORTE.....	17
3.3 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE	22
3.3.1 Aço Rápido.....	23
3.4 DESGASTES EM FERRAMENTAS DE CORTE	25
3.4.1 Desgaste de Flanco.....	27
3.4.2 Desgaste de Cratera	28
3.4.3 Desgaste de Entalhe	29
3.5 MECANISMOS DE DESGASTE	29
3.6 VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE	32
3.7 MONITORAMENTO DA USINAGEM.....	32
3.7.1 Monitoramento Direto	33
3.7.2 Monitoramento Indireto.....	33
3.7.2.1 Monitoramento via Emissão Acústica.....	34
3.7.2.2 Monitoramento da temperatura de corte	34
3.7.2.3 Monitoramento via Vibrações	35
3.7.2.4 Monitoramento da potência de corte via corrente elétrica	36
3.7.2.5 Monitoramento das forças de usinagem.....	39
3.8 SENSORES DE CORRENTE NÃO INVASIVO	41
3.9 ARDUINO	41
4 METODOLOGIA	43
4.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	43
4.2 MATERIAIS E APARATO EXPERIMENTAL.....	43
4.2.1 Ferramenta de Aço Rápido	43
4.2.2 Material de Ensaio.....	44
4.2.3 Máquina-Ferramenta: Torno Convencional	45
4.2.4 Microscópio	46

4.2.5 Rugosímetro.....	47
4.2.6 Sistema de Monitoramento da Corrente Elétrica.....	47
4.3 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....	49
4.3.1 Pré Testes.....	49
4.3.2 Ensaio de Monitoramento.....	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
5.1 ANÁLISE DO DESGASTE DA FERRAMENTA EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	55
5.2 ANÁLISE DA CORRENTE ELÉTRICA COM O TEMPO E DESGASTE.....	56
5.3 RELAÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA COM O DESGASTE.....	58
5.4 INFLUÊNCIA DO DESGASTE NA RUGOSIDADE SUPERFICIAL MÉDIA.....	61
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	64
7 CONCLUSÃO.....	65
REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de fabricação que confere forma, dimensões e acabamento as peças por meio da remoção de seu material, por ação de uma ferramenta de corte. É um dos processos mais utilizados, sendo responsável por boa parte dos componentes mecânicos produzidos, devido à variedade de geometrias que podem ser obtidas, e o alto grau de precisão e acabamento superficial conferido (Ferraresi, 1977).

Segundo Trent e Wright (2000) a usinagem é um dos processos de fabricação mais populares do mundo, sendo responsável por transformar em cavacos aproximadamente 10% de toda produção de metais, empregando dezenas de milhares de pessoas em todo mundo.

O estudo de ferramentas de corte em usinagem implica na determinação de uma grandeza chamada de tempo de vida, que é o tempo que a mesma trabalha efetivamente até perder sua capacidade de corte dentro de um critério previamente estabelecido (Ferraresi, 1977).

Durante a usinagem o monitoramento do desgaste da ferramenta de corte por parte do operador é um procedimento trabalhoso, e sem instrumentos adequados não é possível certificar-se do momento adequado para substituição do mesmo. Essa prática torna-se complicada quando o processo é por CNC (Comando Numérico Computadorizado), onde não há uma boa visualização da ferramenta de corte; sendo necessário a remoção da mesma para que seja feita tal análise, o que implica na parada da produção tardia ou prematuramente.

Segundo Chaves *et al.*, (2014) uma das abordagens de estimativa do tempo de vida da ferramenta de corte é por meio da aplicação de modelos matemáticos que descrevem a curva de vida da ferramenta. Porém, estes apresentam grandes desvios devido às variações das propriedades metalúrgicas da própria matéria prima durante a usinagem.

Favaretto *et al.*, (2009) realizou uma pesquisa em empresas da região metropolitana de Curitiba, no qual verificou-se em 60% das empresas a detecção da variação na vida das ferramentas era conforme o aviso verbal da produção. E em 20% das empresas entrevistadas, a detecção na variação da vida útil das ferramentas de corte se dava pela observação da variação do consumo.

Outra vertente com crescente evolução segundo Matsumoto e Diniz (1997), está no monitoramento indireto do desgaste da ferramenta de corte por meio do registro dos sinais de vibração, temperatura, forças de corte, emissão acústica e parâmetros elétricos do motor.

Diniz e Pires (1996) realizaram um estudo bem sucedido em chão de fábrica no qual verificou-se que, 68% das arestas de corte de insertos usados em torneamento de desbaste, eram substituídos antes do momento adequado. E por meio do treinamento dos operadores em como relacionar o desgaste das ferramentas com o aumento da corrente elétrica no motor de acionamento, esse percentual diminuiu para 16,6%.

Partindo dessas premissas esse estudo propõe o desenvolvimento de um sistema de monitoramento indireto do desgaste de ferramenta de corte, durante o processo de torneamento de desbaste, via corrente elétrica. Utilizando a plataforma de prototipagem Arduino integrada a um sensor de corrente não invasivo, do tipo ferromagnético.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Propor um sistema de monitoramento indireto do desgaste de ferramenta de corte monitorando a corrente elétrica no cabo de alimentação de um torno convencional, utilizando a plataforma de prototipagem eletrônica *Arduino*.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar um sistema de aquisição/monitoramento da corrente elétrica a partir de uma placa Arduino Mega 2560 e um sensor de corrente SCT-013-000;
- Implementar ao sistema uma configuração adicional de monitoramento remoto, via comunicação *Bluetooth*.
- Desenvolver uma metodologia de monitoramento a partir da corrente elétrica.
- Verificar o aumento do desgaste em função do tempo.
- Correlacionar corrente elétrica com o desgaste da ferramenta.
- Relacionar rugosidade com desgaste da ferramenta.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Na sequência será realizada uma revisão bibliográfica acerca do tema estudado, partindo de conceitos iniciais até conceitos mais específicos relativos a sistemas de monitoramento.

3.1 PROCESSO DE TORNEAMENTO

Para Ferraresi (1977) o torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Onde a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar ao referido eixo. Nesse processo podem ser executados seis tipos de operações e, dependendo do posicionamento, montagem, geometria e trajetória da ferramenta estes são descritos como:

- 1) Torneamento cilíndrico: o deslocamento da ferramenta é retilíneo e paralelo ao eixo principal da máquina;
- 2) Torneamento cônico: o deslocamento da ferramenta é retilíneo, mas sua trajetória é inclinada em relação ao eixo principal da máquina;
- 3) Torneamento Radial: o deslocamento da ferramenta é retilíneo com a sua trajetória perpendicular ao eixo principal da máquina;
- 4) Perfilamento: o deslocamento da ferramenta é retilíneo seguindo uma trajetória radial ou axial, de modo que o perfil da ferramenta define a forma final da peça.
- 5) Torneamento Curvilíneo: nessa operação, o deslocamento da ferramenta segue uma trajetória curvilínea.

As operações de torneamento podem ser classificadas em:

- Torneamento de acabamento: responsável por obter na peça as dimensões finais, ou um acabamento superficial específico, ou ambos.

Caracteriza-se por ser uma operação leve, com pouco volume de material removido da peça e avanços bem menores aos usuais.

- Torneamento de desbaste : é a operação que antecede o acabamento, destinadas a obter as dimensões próximas as especificadas para uma dada peça. Trata-se de uma operação robusta com maior volume de material retirado e avanços maiores.

A norma ABNT NBR 6162 (1989) define que no torneamento ocorrem três movimentos específicos relativos entre peça e ferramenta: o movimento de corte, movimento de avanço e o movimento de profundidade, definidos na Figura 1

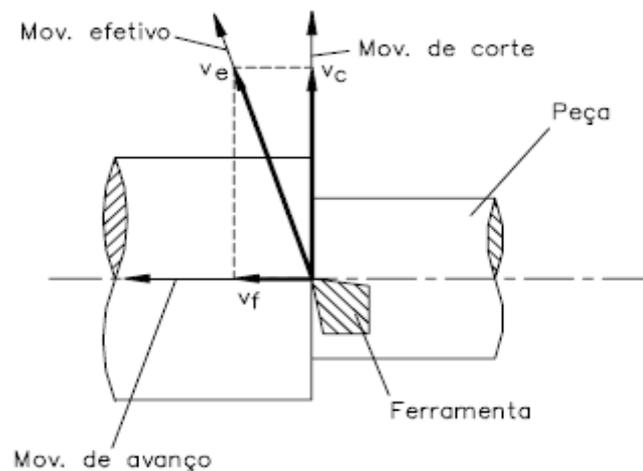


Figura 1. Movimentos e parâmetros de corte do processo de torneamento.
Fonte: Adaptado de Machado e Silva (2004)

Segundo a norma ABNT NBR 6162 (1989) o movimento de corte, ocorre entre a ferramenta e peça provocando a remoção de cavaco durante uma única rotação ou curso da peça, sem a ocorrência do movimento de avanço. O movimento de avanço ocorre entre peça e ferramenta, que concomitante com o movimento de corte promove a remoção contínua de cavaco, durante varios cursos da ferramenta. Já o movimento de profundidade é do tipo passivo, sem retirada de material, entre a ferramenta e a peça, no qual é selecionada a espessura da camada de material a ser removida.

Associados a esses movimentos estão as grandezas ou parâmetros de corte: velocidade de corte (V_c), velocidade de avanço (V_f) e profundidade de corte (a_p), definidos na Figura 1.

A velocidade de corte, em torneamento, é a velocidade tangencial instantânea do movimento de corte resultante da rotação da peça em relação a aresta de corte da ferramenta, dada pela Equação 1.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

v_c : velocidade de corte (m/min);

d : diâmetro da peça (mm);

n : número de rotações por minuto (Rpm);

A velocidade de avanço é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e sentido de avanço. É dada pela Equação 2.

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

Onde:

v_f : velocidade de avanço (mm/min);

f : avanço (mm/volta);

n : número de rotações por minuto (RPM);

3.2 GEOMETRIA DAS FERRAMENTAS DE CORTE

A norma da ABNT NBR 6163 (1980) define que a geometria de uma ferramenta de corte para torneamento, ilustrada na Figura 2, é composta por:

- *Cunha de corte*: é a cunha formada pelas superfícies de saída e de folga da ferramenta.
- *Superfície de saída (A_V)*: é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco se desliza.

- *Superfície de folga (A_α)*: é a superfície que determina a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem principal.
- *Superfície de folga secundária (A'_α)*: é a superfície que determina a folga entre a ferramenta e a superfície em usinagem secundária.
- *Arestas de Corte*: são as arestas da cunha de corte formada pelas superfícies de saída e de folga. Distinguem-se como:
 - *Aresta ou Flanco Principal de Corte (S)*: formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga.
 - *Aresta ou Flanco Secundário de Corte (S')*: formada pela intersecção das superfícies de saída e secundária de folga.
- *Ponta ou gume Corte*: parte da cunha de corte onde se encontram a aresta principal e secundária de corte.

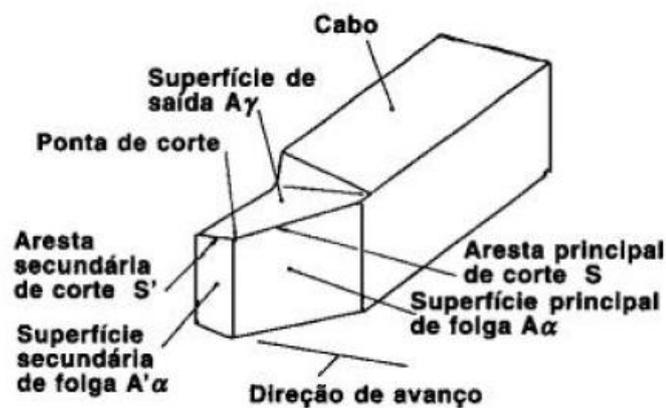


Figura 2. Geometria de uma ferramenta de torneamento.
Fonte: Machado e Silva (1999).

Quanto à determinação dos ângulos da ferramenta de corte se faz necessário empregar um sistema de referência, que auxilia na definição dos principais ângulos de uma ferramenta de corte para torneamento, conforme a Figura 3. Em que:

- *Plano de referência da ferramenta (P_r)* – Plano que passa pelo ponto de corte e é perpendicular a direção de corte admitida. Sendo esta escolhida de forma que o plano de referência seja paralelo ou perpendicular a superfície ou eixo da ferramenta de corte.

- *Plano de corte da ferramenta (P_s)* – Plano que passa pelo ponto de corte de corte escolhido, e é tangente a aresta principal de corte e perpendicular ao plano de referência da ferramenta.
- *Plano de corte secundário (P_s')* – plano que passa pelo ponto de corte escolhido, tangente a aresta de corte secundária e perpendicular ao plano de referência da ferramenta.
- *Plano ortogonal da ferramenta (P_o)* – Plano que passa pelo ponto de corte escolhido, e é perpendicular aos planos de referência e de corte da ferramenta.
- *Plano admitido de trabalho (P_f)* – Plano que passa pelo ponto de corte escolhido, é perpendicular ao plano de referência e paralelo a direção de avanço admitida.
- *Plano dorsal da ferramenta (P_p)* – Plano que passa pelo ponto de corte escolhido, e é perpendicular ao plano de referência e plano admitido de trabalho da ferramenta.
- *Plano normal a aresta de corte (P_n)* – Plano que passa pelo ponto de corte escolhido e é perpendicular a aresta de corte S.

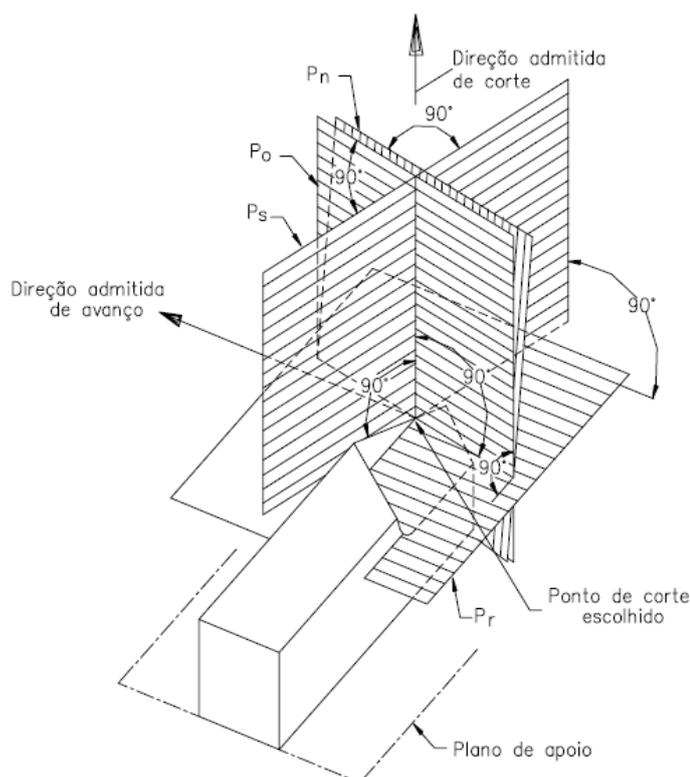


Figura 3. Planos do sistema de referência da ferramenta.
Fonte: Machado e Silva (2004).

Com relação ao plano de referência (P_r) ocorrem três ângulos, ilustrados na Figura 4, onde são denominados com o subscrito “r” que denota relação com o plano de referência. A soma desses ângulos fornece um valor de 180° . Sendo eles:

- Ângulo de posição primária da ferramenta (χ_r) – Ângulo entre o plano de corte da ferramenta (P_s) e o plano admitido de trabalho (P_f). Sendo sempre positivo e situado fora da cunha de corte, e no seu vértice situa-se a ponta da ferramenta.
- Ângulo de posição secundário (χ'_r) – Ângulo entre o plano de corte secundário (P'_s) e o plano de trabalho admitido. Sempre é positivo, e no seu vértice situa-se a ponta da ferramenta.
- Ângulo da ponta da ferramenta (ϵ_r) - Ângulo entre o plano de corte (P_s) e secundário de corte (P'_s).

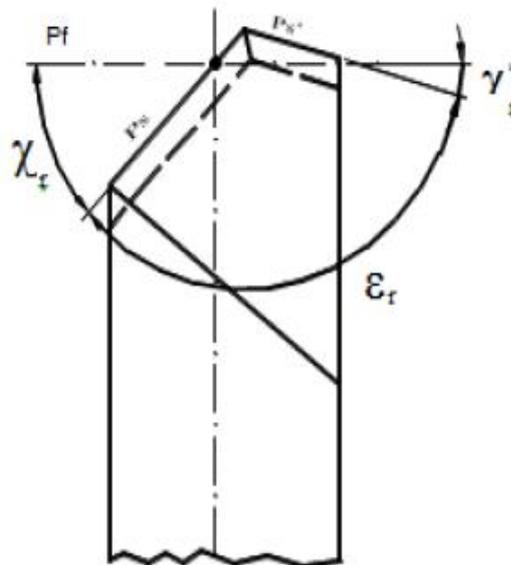


Figura 4. Ângulos da cunha de corte em relação ao plano de referência.
Fonte: Reis (2000).

No plano ortogonal da ferramenta existem três ângulos, ilustrados na Figura 5. Sendo eles:

- Ângulo de saída da ferramenta (γ_0) – Ângulo entre a superfície de saída A_γ e o plano de referência da ferramenta P_r . Podendo este ser positivo ou negativo.

- Ângulo de cunha da ferramenta de cunha (β_0) - Ângulo entre as superfícies de saída A_γ e de folga A_α .
- Ângulo de folga (α_o) - Ângulo entre a superfície de folga A_α e o plano de corte P_s .

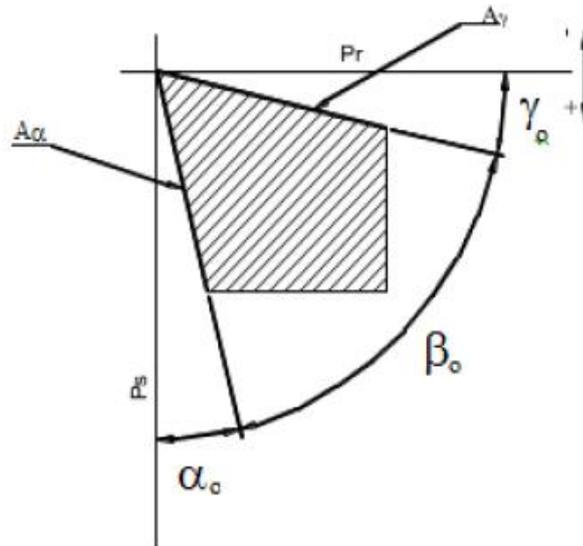


Figura 5. Ângulos da cunha de corte definidos em relação ao plano ortogonal.

Fonte: Adaptado de Reis (2000)

E por fim têm-se o ângulo de inclinação da ferramenta de corte (λ_s), definido em relação ao plano de corte, e situado entre a aresta de corte e o plano de referência da ferramenta (P_r). Pode assumir uma configuração positiva ou negativa, conforme ilustrado na Figura 6.

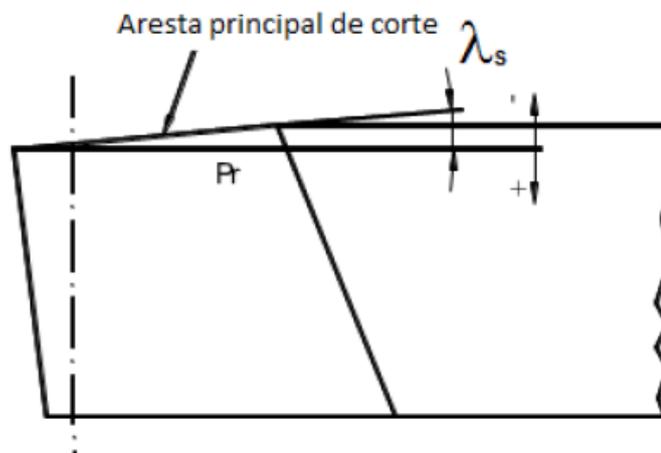


Figura 6. Ângulo da cunha de corte definido em relação ao plano de corte.

Fonte: Reis (2000).

3.3 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE

Em usinagem é comum utilizar-se como ferramenta um material mais duro que o da peça, de modo que o surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribuem para o aparecimento de novos materiais de ferramentas, com propriedades equivalentes. Por outro lado, operações de usinagem com corte interrompido, como o fresamento, requerem materiais de ferramentas suficientemente tenazes para suportarem os choques e impactos inerentes ao processo (Machado e Silva, 2005).

O material de ferramenta de corte deve apresentar as seguintes propriedades:

- Dureza;
- Resistência ao desgaste;
- Tenacidade;
- Resistência a compressão;
- Resistência ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas em altas temperaturas;
- Resistência ao impacto;
- Resistência ao choque térmico e inerte quimicamente.

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

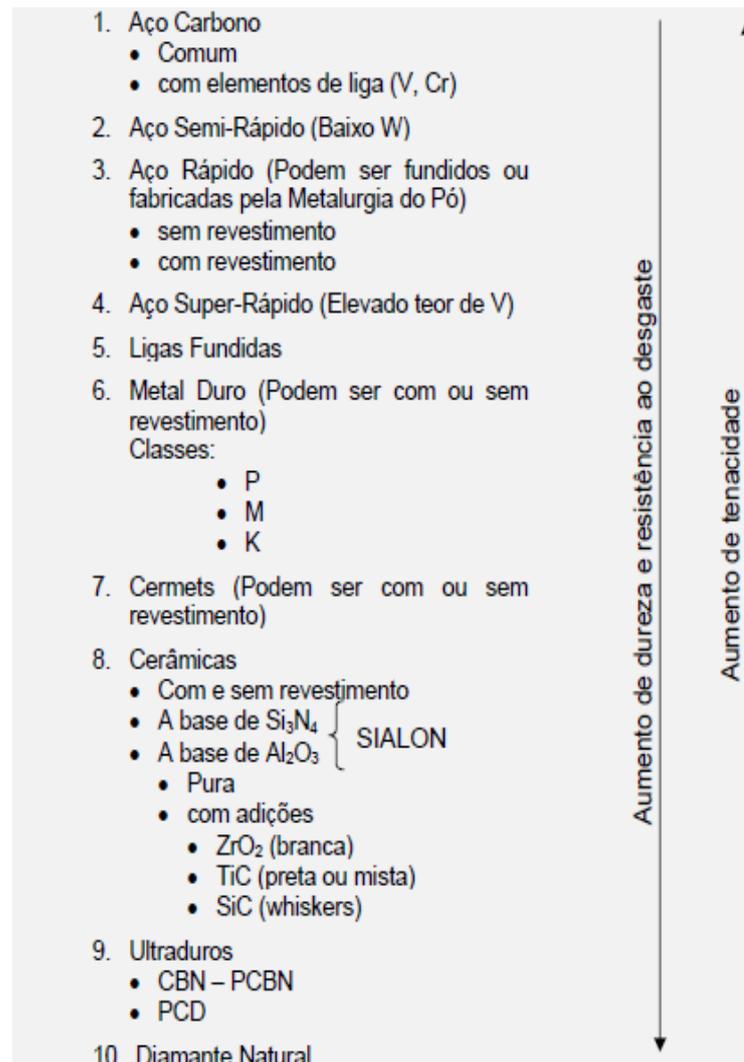


Figura 7. Lista de materiais de ferramentas de corte
Fonte: Machado e Silva (2005).

3.3.1 Aço Rápido

As ferramentas de aço rápido surgiram no final do século XIX, desenvolvidas pelos americanos Frederick Taylor e Mansuel White, revolucionaram os processos de usinagem na época, devido a sua capacidade de usinar metais em altas velocidades, comparado às ferramentas em aço carbono utilizadas (Machado e Silva, 2004)

Segundo Nogueira (2004) os aços rápidos têm essa denominação devido a sua capacidade de manter a dureza quando utilizados em altas velocidades de corte. Podem ser endurecidos via tratamento térmico a um valor de dureza entre 65 a 70 HRC, sem que nenhum recozimento considerável ocorra até temperaturas de corte em torno de 600° C.

Foi a partir de 1921 com a adição de Cobalto, como elemento de liga nos aços rápidos, surgiram os aços super-rápido, que conferiu maior dureza a quente e resistência ao desgaste. De início a adição de cobalto ficou limitada a apenas a 5%, em virtude da dificuldade de forjamento desses aços. Mas com o aperfeiçoamento das técnicas foi possível utilizar ligas com teor de 8% até 12 % de cobalto (Stemmer, 1993).

Atualmente encontra-se uma variedade de grupos de aços rápidos, para cada tipo de aplicação. A AISI classifica os aços rápidos em dois grandes grupos de acordo com o tipo de elemento de liga em sua composição, sendo os grupos: T – a base de Tungstênio (W) e M – a base de Molibdênio (Mo).

Segundo os Chiaverini (1986) os principais elementos de liga dos aços rápidos são:

- Carbono (C) - O teor desse elemento varia entre 0,7 a 1,6%. O aumento desses teores promove a formação de carbonetos, conferindo uma maior dureza e conseqüente resistência ao desgaste. Teores menores de carbono conferem menores durezas em estado de revenido.
- Tungstênio (W) – Esse elemento é responsável pela elevada resistência da ferramenta ao desgaste, podendo apresentar teores de até 20%. Promove a formação de carbonetos complexos com o Fe, que se dissolvem parcialmente na Austenita em temperaturas acima de 980°. E quando dissolvidos não e precipitam facilmente, ocorrendo apenas no revenimento.
- Molibdênio (Mo) – Substituto parcial do Tungstênio, em função do seu menor peso atômico, chega reduzir até pela metade a quantidade de Tungstênio necessária para realizar a ligação dos átomos ao aço. Em função do seu baixo ponto de fusão, os aços ligados ao Molibdênio, são temperados em temperaturas inferiores em comparação ao Tungstênio.
- Vanádio (V) – Apresentam teores de 1 a 5%. Tem ação desoxidante e também forma carbonetos. Sendo este o elemento de liga mais duro encontrado nos aços rápidos. No entanto quando eleva-se o teor de Vanádio é necessário aumentar o teor de Carbono, para se evitar a ferritização do aço, o que diminui consideravelmente a dureza. Os aços

com alto teor de Vanádio e Carbono são denominados de super-rápidos, pois são mais resistentes ao desgaste em relação aos aços rápidos comuns.

- Cromo (Cr) – Nos aços rápidos esse elemento apresenta teores na faixa de 4%, que em conjunto com o carbono são responsáveis pela elevada temperabilidade dos aços rápidos.
- Cobalto (Co) – Esse elemento aumenta substancialmente a dureza a quente da ferramenta, aumentando a eficiência das ferramentas em operações de alta velocidade de corte onde ocorrem altas temperaturas. Esse elemento de liga permite maiores temperaturas de têmpera, sem o risco de crescimento de grãos. Os aços com cobalto produzem grandes quantidades de Austenita retida na têmpera, favorecendo endurecimentos secundários durante o revenimento.

3.4 DESGASTES EM FERRAMENTAS DE CORTE

Segundo Machado e Silva (2003) o desgaste altera a geometria original da ferramenta de corte, modificando a área de contato na interface cavaco-ferramenta. Como consequência, várias outras modificações irão surgir, sendo as mais importantes: o aumento na geração do calor, o aumento das forças de usinagem e a elevação da deformação plástica. Durante a usinagem dos metais a ação do corte muda a forma e, portanto, a geometria original da ferramenta de corte. Verifica-se um desgaste progressivo tanto na superfície de folga como na superfície de saída da ferramenta.

Existem pelo menos três formas de desgaste em uma ferramenta de corte:

- 1) Desgaste de cratera (área A da Fig.8);
- 2) Desgaste de flanco (área B da Fig.8);
- 3) Desgaste de entalhe (áreas C e D da Fig.8).

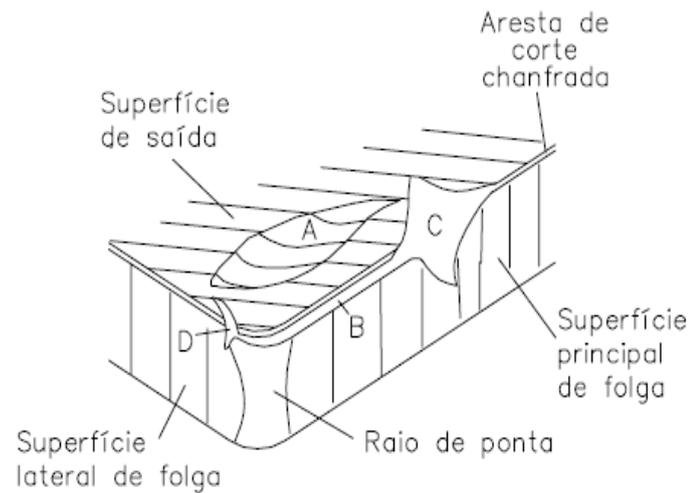


Figura 8. Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.
Fonte: Dearnley e Trent (1982).

A Figura 9 relaciona os parâmetros utilizados pela norma ISO 3685 (1993) para quantificar tais formas de desgastes. Os principais são:

- 1) K_T = profundidade da cratera;
- 2) VB_b = desgaste de flanco médio;
- 3) VB_{max} = desgaste de flanco máximo;
- 4) VB_n = desgaste de entalhe;

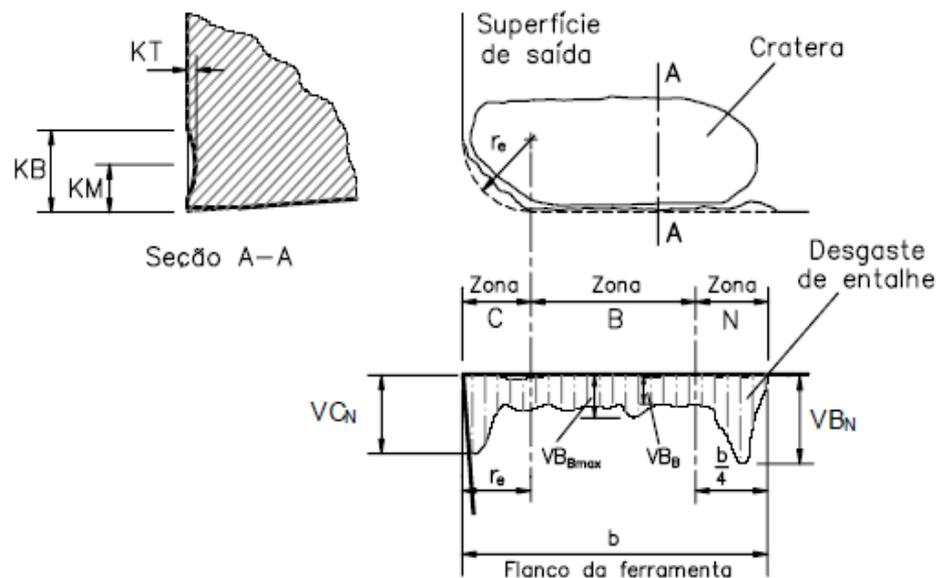


Figura 9. Parâmetros para medir o desgaste das ferramentas de corte
Fonte: ISO 3685 (1993)

Em usinagem, normalmente, as ferramentas de corte se desgastam seguindo a curva padrão da Figura 10. No eixo ordenado, o desgaste é representado por qualquer um dos parâmetros: desgaste de flanco, de cratera ou entalhe, mostrados na Figura 8.

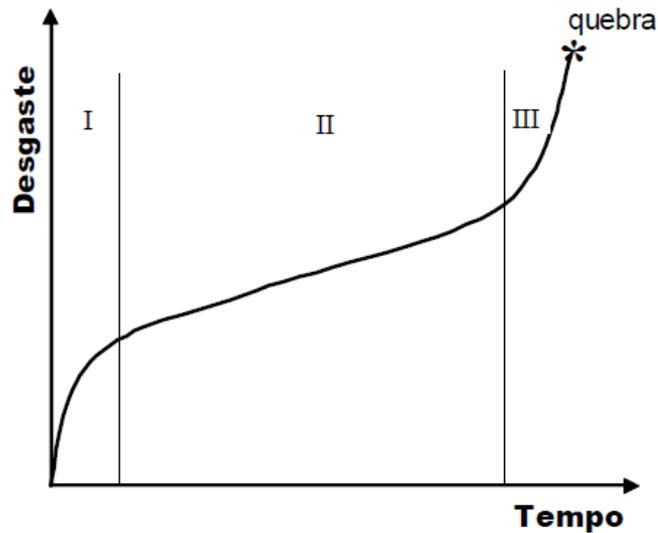


Figura 10. Curva padrão de desgaste de uma ferramenta de corte.
Fonte: Adaptado de Machado e Silva (2015)

Onde:

- Estágio I: É a fase inicial do corte, onde a ferramenta se desgasta rapidamente devido a adequação tribológica da cunha ao processo.
- Estágio II: A característica predominante é um desgaste com uma taxa aproximadamente constante ao longo do tempo de usinagem. Nessa fase a ferramenta já está adequada ao processo e os mecanismos do desgaste operam a uma taxa menor.
- Estágio III: Nesse último estágio inicia-se a aceleração acentuada do desgaste em um curto espaço de tempo e posteriormente poderá acontecer a falha catastrófica da ferramenta.

3.4.1 Desgaste de Flanco

É o tipo de desgaste mais comum, e ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e peça. Essa forma de desgaste,

ilustrada na Figura 11, promove deterioração do acabamento superficial da peça e, por modificar totalmente a forma da aresta de corte original, faz com que a peça mude de dimensão, podendo sair de sua faixa de tolerância, incentivado pelo aumento de velocidade de corte (Diniz *et al.*, 2008).



Figura 11. Desgaste de flanco em um inserto de corte.
Fonte: Sandvik (2002)

3.4.2 Desgaste de Cratera

É a concavidade que se forma na superfície de saída da ferramenta, Figura 12, devido ao atrito da mesma com o cavaco. Diferentemente do desgaste abrasivo, a interação metalúrgica entre o cavaco quente e o material da ferramenta, provoca este tipo de desgaste. Em elevada velocidade de corte, o material da ferramenta pode se dissolver no cavaco e, finas partículas da ferramenta se aderem ao cavaco, sendo levada junto com o mesmo, formando a cratera na superfície de saída da ferramenta (Stemmer, 1993).



Figura 12. Desgaste de cratera em um inserto de corte.
Fonte: Sandvik (2002)

3.4.3 Desgaste de Entalhe

O desgaste de entalhe ilustrado na Figura 13 pode se formar no extremo da aresta que corresponde à profundidade de corte, onde o ar entra em contato com a zona de corte. Esse tipo de desgaste pode provocar rebarba e debilitar a aresta de corte, provocando aumento da rugosidade superficial da peça e até provocar a quebra da ferramenta (Sandvik, 1998).



Figura 13. Desgaste de entalhe em um inserto de corte.
Fonte: Sandvik (2002).

3.5 MECANISMOS DE DESGASTE

O desgaste de uma ferramenta é o resultado da ação de vários fenômenos distintos, denominados componentes ou mecanismos do desgaste. E dependendo da natureza do material usinado e das condições de usinagem, uma dessas componentes predominará sobre as demais (Ferraresi, 1977). De acordo com Stemmer (1993) para que se possa aumentar a vida das ferramentas é indispensável conhecer as causas do desgaste. A Figura 14 ilustra os principais mecanismos de desgaste que podem ocorrer em uma ferramenta.

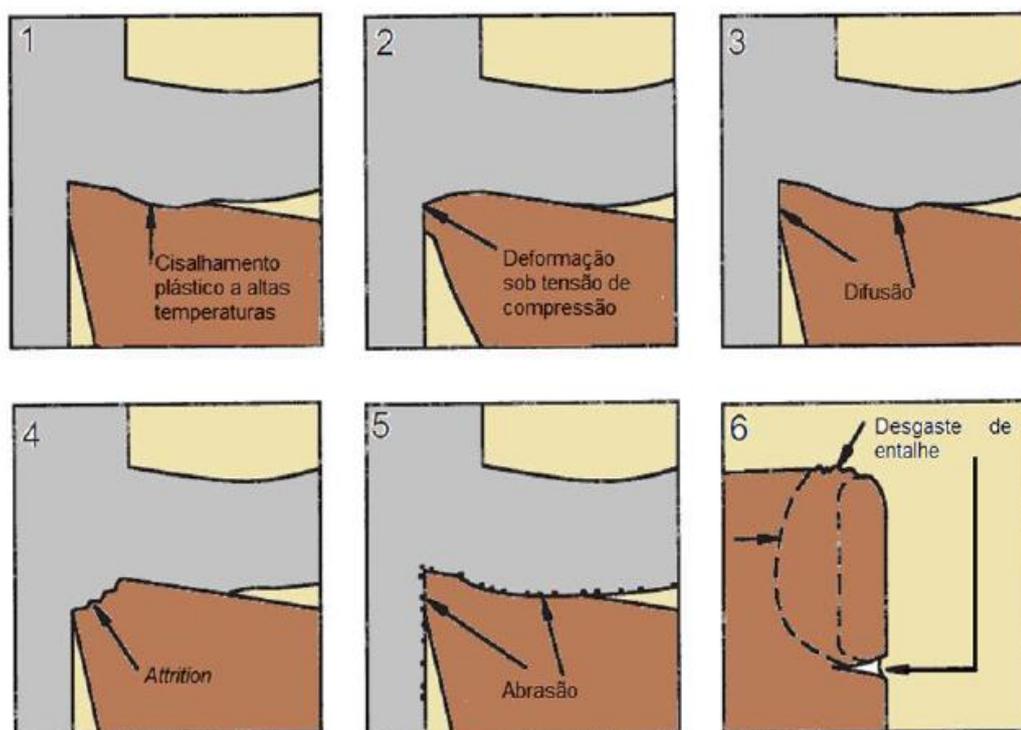


Figura 14. Principais mecanismos de desgaste em ferramentas de corte
Fonte: Adaptado de Trent e Wright (2000).

Trent e Wright (2000) colocam o cisalhamento, a deformação plástica e o desgaste de entalhe (itens 1, 2 e 6 da Figura 14) como mecanismos de desgaste, no entanto outros autores os classificam como avarias e desgaste, de modo que neste trabalho serão considerados apenas os demais itens como mecanismos de desgaste.

A difusão, item 3 da Figura 14, consiste na transferência de átomos de um metal para outro, no estado sólido. Dependendo fortemente da temperatura de corte, da duração do contato, afinidade química e intensidade do contato. Em ferramentas de aço carbono e aço rápido esta forma de desgaste não tem significado, pois a faixa de temperaturas de difusão é bem mais alta que a temperatura de amolecimento da ferramenta. Diferentemente do metal duro, no qual pode ocorrer a difusão em temperaturas na faixa de 700 a 1300°C.

O mecanismo da aderência (*attrition*), item 4 da Figura 14, ocorre entre a ferramenta e o material da peça, onde a aspereza superficial conferida a ferramenta se dá em função das altas temperaturas e pressões presentes na área de corte e ao fato de que a superfície inferior do cavaco, recém arrancada, apresenta-se limpa e sem camadas protetoras de óxido, sendo quimicamente muito

ativa. O resultado dessa mecânica é a formação da aresta postiça de corte (APC), ilustrada na Figura 15.

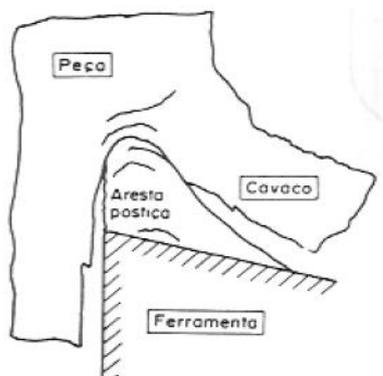


Figura 15. Aresta postiça de corte
Fonte: Diniz et al., (2014)

A abrasão, item 5 da Figura 14, é o arrancamento de finas partículas da ferramenta, em decorrência do escorregamento sob alta pressão e temperatura entre peça e ferramenta. Esta forma de desgaste aumenta com o incremento da velocidade de corte e também com o aumento do número de inclusões e partículas duras no aço (como carbonetos e óxidos).

Viergege (1970) *apud* König e Klocke (1997) desenvolveram um diagrama, conforme a Figura 16, bastante elucidativo acerca dos mecanismos de desgastes em função das condições de usinagem.

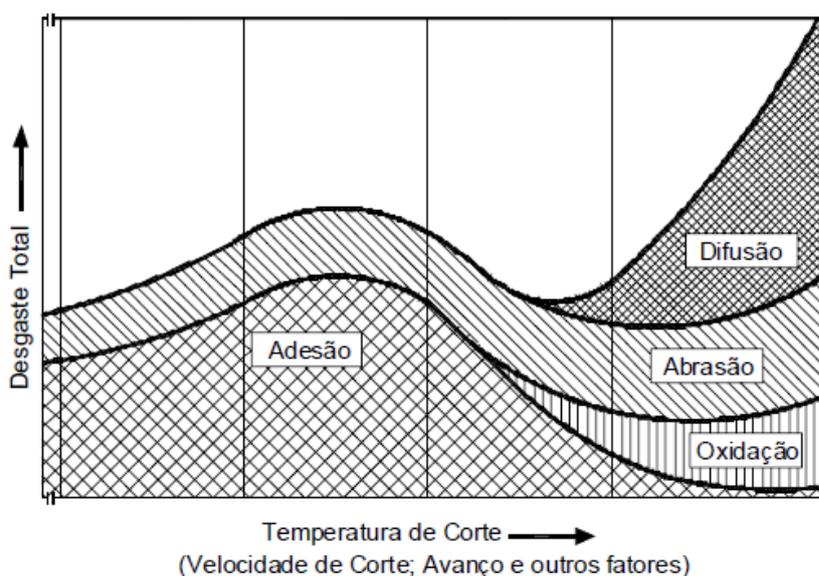


Figura 16. Distribuição dos mecanismos de desgaste em ferramentas de corte
Fonte: Viergege (1970) *apud* König e Klocke (1997)

No diagrama supracitado é expresso que os mecanismos de adesão, abrasão, difusão e oxidação se dão em função da temperatura e velocidade de corte ou outro parâmetro que possa influenciá-los. Verificando-se que em baixas temperaturas apenas a abrasão e adesão se fazem presentes e, em temperaturas e velocidades de corte mais elevadas, o mecanismo de adesão cede espaço aos mecanismos de difusão e oxidação.

3.6 VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE

Para Ferraresi (1977) a vida de uma ferramenta é o tempo que a mesma trabalha efetivamente, descontados os tempos passivos, até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. E quando atingido esse tempo a ferramenta deve ser reafiada ou substituída. Assim sendo, a ferramenta deve ser retirada quando:

- O desgaste da superfície de saída atinge proporções elevadas;
- A temperatura do gume cortante, proveniente do atrito cavaco-ferramenta-peça, se aproxima da temperatura na qual a ferramenta perde o fio de corte;
- Não é mais possível manter as tolerâncias exigidas na peça;
- O acabamento superficial da peça usinada não é mais satisfatório;
- Houver aumento das forças de Usinagem;

3.7 MONITORAMENTO DA USINAGEM

O monitoramento do processo de usinagem é uma ferramenta preditiva onde o uso de recursos eletrônicos e supervisórios permitem que o operador conheça o real estado de desgaste da ferramenta de corte. Auxiliando no processo de tomada de decisão para que seja efetuada a parada do processo no momento oportuno e feita a substituição da ferramenta o mais próximo do fim da sua vida útil sem que haja interrupções indesejadas da produção.

De acordo com Braga (1992) para a utilização adequada de um sistema de monitoramento, é desejável que ele tenha as seguintes características:

- Confiabilidade, indicando a dependência entre o parâmetro medido e o parâmetro que está sendo monitorado;
- Seja não intrusivo, eliminando a necessidade de dispositivos que interfiram no funcionamento da máquina;
- Econômico;
- Que o parâmetro medido seja influenciado somente pelo que se deseja medir;

3.7.1 Monitoramento Direto

Monitoramento direto como sugere o nome, é a medição do parâmetro desejado feito diretamente na peça ou ferramenta de corte. Para que seja realizado, o processo de usinagem deve ser interrompido, gerando um incremento de tempo ao processo até a leitura dos valores desejados. Entretanto essa forma de sensoriamento mensura diretamente a variável desejada sem interferência de outros fenômenos e parâmetros externos.

Esse sistema adota os seguintes métodos (Dan 1990):

- 1) Medição do desgaste da ferramenta via microscópio óptico ou sistema computadorizado de vídeo;
- 2) Medição da rugosidade superficial da peça usinada.

3.7.2 Monitoramento Indireto

Nesse tipo de monitoramento a medição do parâmetro é executada por meio de outro parâmetro que possa ser medido em tempo real, de modo que ambos possam ser relacionados. Contudo, não só o desgaste influencia o parâmetro monitorado, mas outras variáveis, como:

- Velocidade de corte;

- Profundidade de usinagem;
- Avanço;
- Material da ferramenta e da peça;

Atualmente há uma tendência entre os pesquisadores para o uso de certos métodos indiretos, como monitoramento de parâmetros elétricos do motor, forças de corte, temperatura de corte, vibrações e emissão acústica (Botsaris; Tsanakas, 2008).

3.7.2.1 Monitoramento via Emissão Acústica

Emissão acústica (EA) pode ser definida como sendo ondas de tensão elástica geradas como resultado de rápida liberação de energia de deformação dentro de um material a um estímulo externo (Matsumoto e Diniz, 1997). As ondas se devem a um rearranjo interno na estrutura cristalina dos metais e a frequência de propagação é acima de 20 kHz (Dolinsk e Kopac, 1999).

Dois tipos de sinais são associados à EA: o sinal contínuo, devido às deformações plásticas em materiais dúcteis e o sinal de pico, oriundos da propagação de trincas e impactos do cavaco (Blum e Inasake, 1990).

Segundo ensaios realizados por Inasaki e Yonetsu (1981, p.261-268 apud Costa, 1995, p.24) em operação de torneamento a amplitude do sinal de emissão acústica aumenta proporcionalmente com o desgaste do flanco, principalmente em algumas faixas de frequência.

Cisneros *et al.* (2003), propôs um sistema de aquisição de dados via emissão acústica baseado em sensores piezo elétricos montados no porta ferramenta, realizando o monitoramento em tempo real do desgaste de fresas de topo. Segundo os autores um problema no monitoramento da condição da ferramenta por EA foi o ruído no sinal medido, a solução encontrada foi à utilização de sistema de filtragem dos sinais, do tipo passa-baixa.

3.7.2.2 Monitoramento da temperatura de corte

Vários métodos, práticos e analíticos, vêm sendo desenvolvidos ao longo do tempo com o objetivo de determinar a temperatura gerada durante o processo de usinagem, porém, nenhum deles é universalmente aceito como absoluto (Machado e Silva, 2004).

De Melo (1998) desenvolveu um método que consiste da utilização de técnicas de problemas inversos de condução de calor, para medição em tempo real, da temperatura na aresta inferior oposta à aresta de corte. A técnica apresentou-se bastante sensível a variações de parâmetros geométricos importantes, tais como o comprimento de contato cavaco-ferramenta e o posicionamento dos sensores de temperatura.

Outra abordagem é utilização de métodos práticos para a medição da temperatura de usinagem, citados por Trent e Wright (2000):

- Método do termopar ferramenta-peça;
- Medição direta por inserção de termopares na ferramenta de corte;
- Medição do calor de radiação com sensores infravermelhos;
- Medição utilizando vernizes termo sensíveis;
- Medição usando pós-químicos;
- Medição usando o método do filme PVD;
- Medição por técnicas metalográficas.

A maior limitação das técnicas de monitoramento em tempo real ainda é devido à dificuldade de acesso à região de corte. Contudo as técnicas analíticas e numéricas atuais permitem determinar com maior exatidão a temperatura de usinagem, podendo se destacar o uso de elementos finitos (MEF) e os da Diferenças Finitas, para a obtenção da distribuição de temperatura na ferramenta de corte, na peça e até mesmo no cavaco.

3.7.2.3 Monitoramento via Vibrações

O fenômeno d vibração vem sendo estudado há mais de cem anos em suas três formas básicas: a vibração livre, a vibração forçada e a vibração auto excitada. As vibrações podem causar desgaste prematuro da ferramenta de corte,

interferência na qualidade superficial, perda de precisão dimensional, danos em componentes da máquina operatriz, além de ruídos indesejáveis e prejudiciais ao ambiente de produção (Souza, 2015).

Durante o processo de usinagem, a deformação plástica e o atrito entre o cavaco, a ferramenta de corte e a peça produzem vibrações, assim como as oscilações da força de corte. E com o decorrer do tempo de corte, o desgaste também vai aumentando, o que gera alterações de frequência e intensidade.

Um sistema de monitoramento via vibração proposto por Costa (1995), em que acelerômetros foram instalados no porta ferramentas de um torno, permitindo captar sinais elétricos, que foram amplificados e filtrados, para retirada das faixas de frequências indesejáveis, e que posteriormente processados e analisados. No entanto, autor não encontrou uma relação direta entre o aumento do desgaste e o valor RMS (valor médio quadrático) do sinal da vibração; e também não foi possível estabelecer um nível de vibração que culminasse o fim de vida da ferramenta, em decorrência da forte influência que as condições de usinagem exerceram sobre os valores de vibração.

Diniz e Hara (1999) também constataram que há limitações na utilização de índices de monitoramento baseados em sinais de vibração. Pois estes não variam apenas só com o desgaste, mas também com os parâmetros de usinagem e geometria da ferramenta. Mostraram em seu trabalho que:

- A vibração da ferramenta diminui com o aumento da dureza e da tenacidade do material;
- A vibração da ferramenta cresce com o aumento da velocidade de corte;
- Houve uma tendência de aumento na vibração da ferramenta com aumento da profundidade de corte (a_p);
- A influência do avanço (f) é praticamente desprezível;
- Quanto maior o raio da ferramenta, maior a sua vibração.

3.7.2.4 Monitoramento da potência de corte via corrente elétrica

Segundo Diniz et al., (2008) uma máquina-ferramenta gera potência para girar seu eixo árvore e executar o movimento de corte e de avanço. Podendo estabelecer as seguintes relações para a potência de corte e de avanço.

a) Potência de corte (P_c)

$$P_c = \frac{F_c * v_c}{60 * 75} \quad [CV] \quad (3)$$

Onde: F_c é a Força de corte [Kgf] e v_c a velocidade de corte em [m/min].

b) Potência de avanço (P_f)

$$P_f = \frac{F_f * v_f}{1000 * 60 * 75} \quad [CV] \quad (4)$$

Onde: F_f é a força de avanço em [Kgf] e v_f velocidade de avanço em [mm/rot.].

c) Potência efetiva (P_e)

$$P_e = P_f + P_c \quad (5)$$

Alguns autores afirmam que em máquinas operatrizes que apresentam um único motor para movimento de corte e avanço, se despreza a potência de avanço, onde $P_f \ll P_c$, o que resulta em $P_e = P_c$. De modo que a potência de corte pode ser relacionada com a potência consumida pelo motor (P_m), conforme a Equação 6.

$$P_c = P_m * \eta \quad (6)$$

Onde, o rendimento (η) varia entre 60 – 80% em máquinas convencionais e, é maior que 90% em máquinas CNC, onde o motor tem variação de rotação contínua e a transmissão é feita com poucos elementos.

Da literatura de Chapman (2013) a relação para o cálculo da potência mecânica do motor (P_m), a partir da corrente elétrica, é dada pela Equação 7.

$$P_m = \sqrt{3} * U_{fase-fase} * I_{rms} * FP \quad (7)$$

Onde: FP é o fator de potência do motor elétrico da máquina, $U_{fase-fase}$ a tensão entre fases (V) e I_{rms} a corrente eficaz (A);

Conforme as simplificações descritas anteriormente em que a potência efetiva pode ser considerada como a própria potência de corte, têm-se pela Equação 7, que apenas a potência elétrica ativa do motor (P_m) é suficiente para determinar a potência de corte consumida (P_c) de usinagem. Como também é possível determinar a força de corte (F_c) rearranjando a Equação 3.

Alguns autores se dedicaram a estudar esse método de monitoramento, externando-os em dissertações e artigos conforme a seguir:

Na dissertação de mestrado de Braga (1992), utilizando como método o monitoramento do desgaste via corrente elétrica do motor principal de um torno CNC. Foi observado que a corrente elétrica apresentou alterações significativas apenas quando a ferramenta apresentava um desgaste frontal de 0,8 mm, ou próximo da ocorrência de uma falha por quebra. O autor conclui que a observação da corrente pode ser muito útil para evitar acontecimentos de falha da ferramenta, em operações de desbaste onde o fenômeno do desgaste é alto.

Em seu trabalho de monitoramento da corrente elétrica e dos sinais de vibração no processo de torneamento de desbaste, Costa (1995) observou que o comportamento de variação na curva de corrente do motor principal em relação ao comprimento de corte, possibilitou verificar o momento em que a taxa de desgaste da ferramenta aumentava abruptamente. Também foi verificado que a definição de um valor fixo de corrente para indicar o fim da vida da ferramenta não é um bom procedimento, e que a análise do comportamento da curva de corrente parece ser mais interessante.

Shao et al.(2004) realizaram um estudo para observação do desgaste de pastilhas de metal duro numa condição nova e outra desgastada, durante o fresamento tangencial de ferro fundido. Foi utilizado um sistema de monitoramento

da potencia do motor de um fresadora horizontal. Onde verificaram uma boa correlação entre aumento na potencia elétrica em relação ao desgaste de flanco. Também observaram picos de potência logo quando a ferramenta entrava e saia da peça, que segundo os autores foi gerado por um aumento repentino da carga do sistema de acionamento, devido ao incremento de torque no eixo arvore.

Os pesquisadores Shao et al.(2004) também explicam que o monitoramento da potência elétrica consumida reside no fato de que, um valor de corrente menor é consumido para uma ferramenta não desgastada e um valor maior a ferramenta que apresenta desgaste. Os autores também propõem que se houverem perdas associadas, entre o eixo árvore e a máquina, estas podem ser desconsideradas, uma vez que se houver variação na corrente elétrica é devido a alguma mudança nos mecanismos de corte.

Al-sulamain et al.(2005) avaliaram a relação entre potência consumida com o aumento do desgaste, para três brocas de diferentes diâmetros, durante a furação de um aço médio carbono. E verificaram que houve um aumento da potência conforme se processava o desgaste de flanco.

Lançoni et al.(2005) realizam um estudo comparativo entre a medição da força de corte por meio da potência elétrica, potência elétrica calculada por meio da corrente elétrica do motor de acionamento de um rebolo, e comparadas com a medição das forças utilizando um dinamômetro piezelétrico. E verificaram que a potencia elétrica calculada pela corrente elétrica, e a potencia medida estavam sempre próximas, e ambas foram proporcionais a potência mecânica.

Em seu trabalho de monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo, via sinais de potência e emissão acústica. Silva (2010) verificou uma tendência no aumento da potência com o decorrer do tempo e com a evolução do desgaste. Relata-se também uma diferença de 15% entre o valor da potência efetiva para uma ferramenta na condição de nova e posteriormente desgastada.

3.7.2.5 Monitoramento das forças de usinagem

O conhecimento da força de usinagem que age na aresta de corte e o estudo do comportamento de suas componentes são de grande importância, não somente porque a potência requerida para executar o corte pode ser estimada, mas

também, porque elas devem ser consideradas no projeto das máquinas ferramentas e de seus elementos. Ela pode ser responsável diretamente pelo colapso da ferramenta de corte por deformação plástica da aresta, além de influenciar no desenvolvimento de outros mecanismos e processos de desgaste. A força de usinagem pode também representar um índice de usinabilidade, além de ser usada como parâmetro para controle adaptativo do processo (Machado e Silva 2004).

De acordo com Botsaris e Tsanakas (2008), o torque e a força de avanço, estão fortemente correlacionados com o desgaste da ferramenta. Isso se deve ao de que parâmetros dinâmicos geralmente aumentam à medida que a ferramenta desgasta gradualmente, devido ao aumento do atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho. Ou seja, o aumento da área de contato entre a ferramenta e a peça, diminui a tensão para cortar o material, o que aumenta a força necessária para usinar o material.

König e Klocke (1997) verificaram a influência do desgaste sobre as componentes da força de usinagem. No caso do desgaste de cratera, onde o ângulo de saída é mais positivo, ocasiona a diminuição das componentes. No entanto se ocorrer um predomínio de desgaste de flanco, as forças aumentam, em função do aumento da área de contato entre a peça e a superfície de incidência ou folga. E em seus estudos verificaram que uma marca de desgaste de 0,5 mm resulta em um aumento de 100% força passiva, de 90% na força de avanço e de 20% na de corte. Já os autores Lee et al., (1989) mostraram que, para cada 0,1 mm de acréscimo na largura na marca de desgaste do flanco (VB), a componente da força passiva aumenta 30%, a de avanço aumenta 25% e a de corte cresce 10%.

König e Klocke (1997) verificaram que conforme se dava o aumento da velocidade corte havia uma redução das forças, devido ao aumento da temperatura, que reduz a resistência do material, sendo usinado, ao cisalhamento. Também verificou que se aumentasse a profundidade de corte (a_p) além do raio de arredondamento da quina, as componentes aumentavam linearmente.

Tomando como base as validações dos autores supracitados pode se afirmar que os parâmetros de usinagem agem fortemente na magnitude das forças de usinagem. E caso queira avaliar somente os níveis de desgaste da ferramenta deve se trabalhar numa configuração em que os parâmetros de usinagem sejam constantes.

3.8 SENSORES DE CORRENTE NÃO INVASIVO

Esses tipos de sensores são conhecidos como Transformador de Corrente, cujo funcionamento baseia-se na passagem de uma corrente elétrica do fio condutor por meio de um concentrador de núcleo ferromagnético circular, induzindo uma corrente em seus pólos, proporcional a corrente que cruza o fio condutor, conforme a representação da Figura 17.

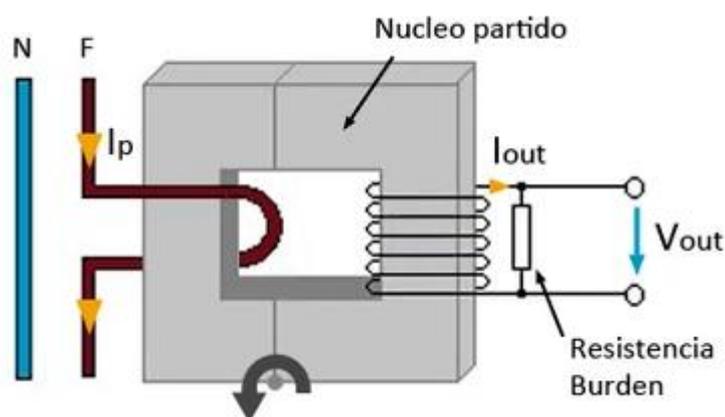


Figura 17. Esquema de funcionamento do sensor de corrente
Fonte: YHDC (2018).

Esses sensores têm o núcleo dividido (como um grampo) que permite ao usuário envolver o fio condutor de um determinado equipamento elétrico sem ter que cortá-lo. Como a saída do sensor é um valor de corrente, esta pode ser convertida em um valor de tensão, utilizando um resistor de carga, de modo que seja possível utilizá-lo em controladores nos quais apenas sinais analógicos de tensão são legíveis.

3.9 ARDUINO

O surgimento dos micros controladores possibilitou que problemas tratados com soluções de *hardware* fossem tratados usando *software* de computadores. De forma que um mesmo circuito poderia desempenhar funções totalmente diferentes, por meio da reprogramação e alteração de alguns parâmetros do programa.

Apesar da facilidade trazida pelos microcontroladores, trabalhar com os mesmos não é tão trivial. Desta forma, um grupo de pesquisadores italianos criaram

um dispositivo que tornasse o seu uso simples e acessível a qualquer pessoa, o que resultou nas placas Arduino.

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica que inclui hardware e software livre que visa oferecer ferramentas adaptáveis e de baixo custo para a criação de projetos interativos das mais diversas ordens, podendo ser usado até por pessoas com pouca ou nenhuma experiência com micros controladores

Uma placa Arduino é ilustrada na Figura 18. Seus componentes básicos são: um controlador, uma interface serial ou USB e alguns pinos digitais e analógicos. Possui funcionamento semelhante ao de um pequeno computador, sendo capaz de interpretar entradas e controlar as saídas a partir da *IDE*, que é o software onde é escrito um código em linguagem C++ e inserida as rotinas que devem ser executadas pelo controlador.

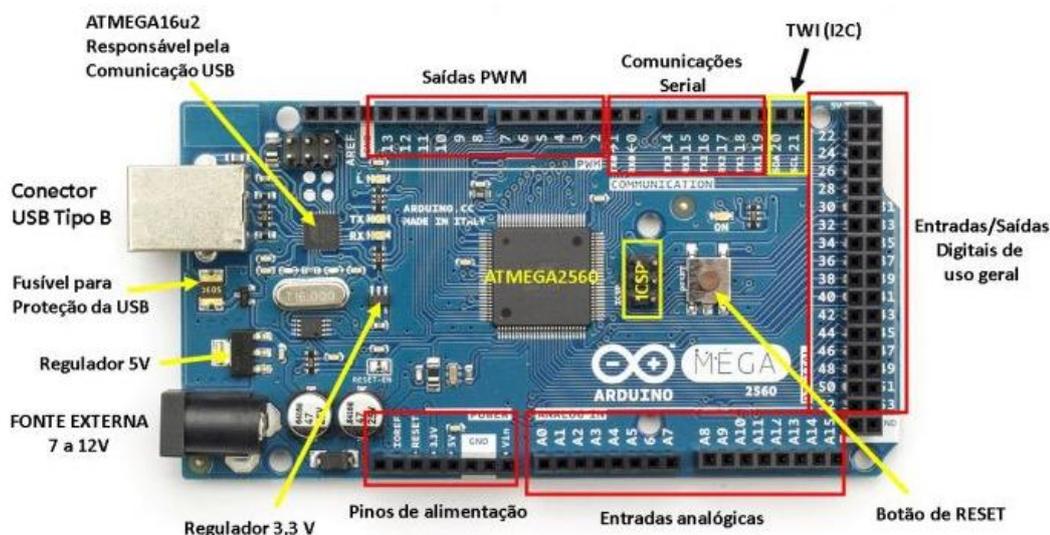


Figura 18. Ilustração de uma placa Arduino modelo Mega
Fonte: www.embarcados.com.br

4 METODOLOGIA

A partir do referencial teórico presente neste trabalho, julgou-se apropriado um planejamento experimental que envolve uma descrição do método de monitoramento da corrente elétrica e do sistema de medição e aquisição utilizado, e também dos pré-testes realizados para definição dos parâmetros de corte adequados ao ferramental e material disponível.

4.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O monitoramento do desgaste da ferramenta de corte é uma técnica de grande valia para se verificar quando a ferramenta chega ao fim da sua vida útil em um dado processo de usinagem com parâmetros de corte definidos. No entanto medições diretas do desgaste de ferramentas é um processo trabalhoso para o operador, e para realizá-la deve ser parar a máquina de tempos em tempos o que acaba gerando um tempo adicional ao processo.

Partindo dessas premissas propõe-se nesse trabalho o método de monitoramento indireto do desgaste de uma ferramenta de ponta única de aço rápido, durante a operação de torneamento de desbaste, por meio da medição da corrente elétrica de alimentação de um torno mecânico convencional. Utilizando um sistema de medição e aquisição de baixo custo, a partir de uma placa Arduino e um sensor de corrente modelo SCT-013-000. Tal método apresenta baixa intrusividade no processo, pois não necessita de nenhuma modificação na máquina ou na ferramenta de corte.

4.2 MATERIAIS E APARATO EXPERIMENTAL

A seguir são elencados todos os materiais e equipamentos utilizados para a realização desse estudo.

4.2.1 Ferramenta de Aço Rápido

Nesse experimento utilizou-se uma ferramenta de aço rápido obtida por afiação manual a partir uma barra de seção quadrada de 5/16 x 4" – 10% Co em sua composição, do fabricante *Steely Cutter*. A geometria obtida por afiação manual é ilustrada na Figura 19, onde os ângulos aproximados estão elencados abaixo:

- Ângulo de folga: 6°
- Ângulo de posição primário: 70°
- Ângulo de posição secundário: 14°
- Ângulo de saída: 10°
- Ângulo de inclinação: -2°



Figura 19. Ferramenta de corte utilizada
Fonte: Autoria própria

Vale ressaltar que por ser um processo de afiação manual, onde a precisão não é garantida, foi utilizada uma ferramenta para os pré-testes e outra para o experimento final, devido a dificuldade de manter os ângulos constantes nessa forma de afiação.

4.2.2 Material de Ensaio

O material de ensaio selecionado no presente trabalho é um aço SAE 4140, conhecido como aço cromo-molibdênio, de médio carbono. É um aço que apresenta alta temperabilidade, alta resistência mecânica e boa tenacidade. Sua escolha se

deu em função da sua característica de média usabilidade e devido a sua larga aplicação como material de construção mecânica, na fabricação de eixos, engrenagens, bielas, virabrequins, equipamentos agrícolas e parafusos.

Foram utilizados dois tarugos redondos comerciais de 63,5 mm de diâmetro e 155 mm de comprimento, de aço SAE 4140 laminado. A composição química em percentuais está detalhada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço SAE 4140 (% peso)

Aço	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	N	Ti
4140	0,42	0,27	0,82	0,021	0,011	0,06	0,86	0,16	0,2	0,016	0,009	0,003

Fonte: Fabricante AÇOS TREFITA LTDA.

Os tarugos foram usinados para retirada da carepa e das imperfeições superficiais, obtendo *Blanks*, com dimensões de 61,5 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento. Foi realizado um furo de centro em uma das faces dos corpos de provas, para fixação no contra ponta do torno, de forma que garantisse rigidez no momento da usinagem. O comprimento útil do corpo de prova foi fixado em 105 mm. De modo que a partir do comprimento total do corpo de prova, de 150 mm, fosse reservado 45 mm para fixação do mesmo na placa do torno.

4.2.3 Máquina-Ferramenta: Torno Convencional

A realização dos experimentos se deu no laboratório de Usinagem da UTFPR – Londrina, no qual foi disponibilizado um torno convencional NARDINI modelo Nodus 220, ilustrado pela Figura 20, com as seguintes especificações:

- Gama de rotações disponíveis: 30 – 2360 RPM;
- Potência: 3,6 – 6 KW
- Diâmetro máximo de torneamento possível: 330 mm;
- Comprimento máximo admissível: 1500 mm;



Figura 20. Torno mecânico convencional
Fonte: Autoria própria.

4.2.4 Microscópio

Para leitura e medição das marcas de desgaste na ferramenta foi utilizado um microscópio binocular do fabricante Zeiss modelo Axio Scope A, equipado com uma câmera AxioCam ERc 5s, ilustrado na Figura 21, onde foi utilizada uma aproximação de 5x combinado com uma lente objetiva de 10x, conferiu uma aproximação de 50x com uma escala de 500 μm .



Figura 21. Microscópio binocular Zeiss Scope A.
Fonte: Autoria própria.

4.2.5 Rugosímetro

Para medição das rugosidades médias das faixas foi utilizado um rugosímetro *Instrutherm RP 200*, ilustrado na Figura 22.



Figura 22. Rugosímetro.
Fonte: Autoria própria.

4.2.6 Sistema de Monitoramento da Corrente Elétrica

Foi construído um sistema de aquisição de dados referente a valores de corrente elétrica, a partir de uma placa Arduino e um sensor de corrente não invasivo de, conforme a esquemática da Figura 23. Sendo composto pelos seguintes itens:

- 1 placa Arduino Mega 2560;
- 1 sensor de corrente não invasivo modelo SCT- 013-000;
- 1 resistor de carga 120 Ω ;
- 2 resistores de 10k Ω ;
- 2 Resistores de: 1,5k Ω e 2,2 k Ω ;
- 1 capacitor de filtro de 10 uF;
- *Jumpers*;
- 1 *Protoboard*;
- Módulo modelo RTC (Relógio de tempo real) modelo DS3231;
- Módulo *SD Card*;
- Módulo *Bluetooth* modelo HC 05.

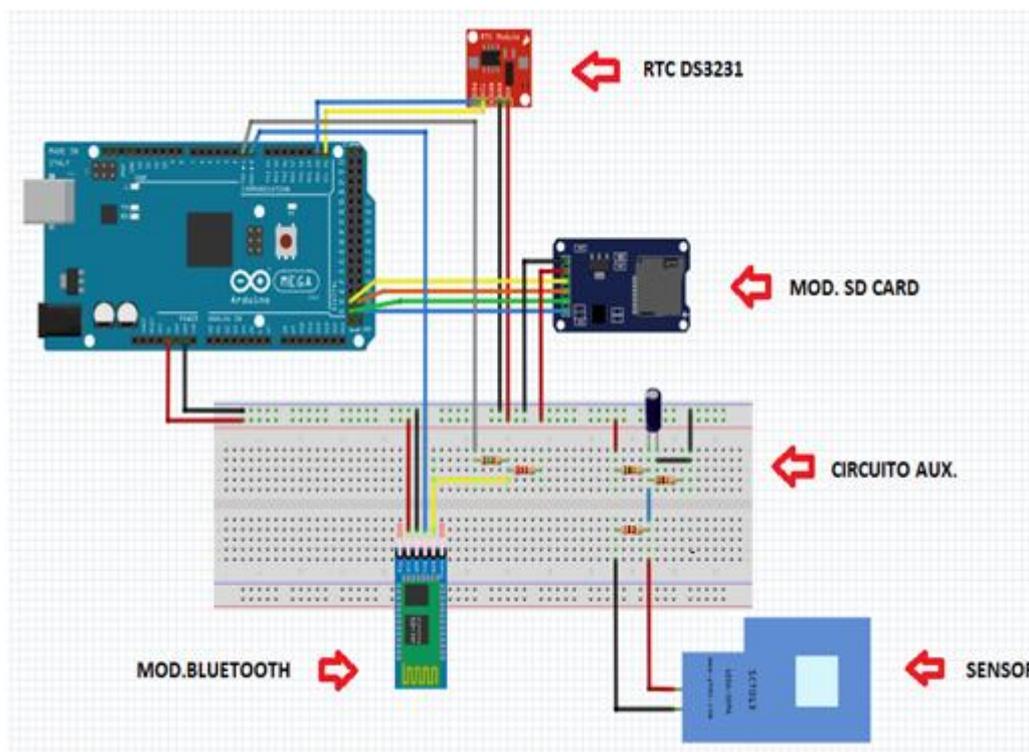


Figura 23. Esquemática do Sistema de aquisição de dados
Fonte: Autoria própria.

Nesse sistema o sensor SCT-013-000 utilizado tem capacidade de medição de uma corrente nominal de 100 A, resultando em um sinal entre 0 a 50mA em sua saída proporcionais ao valor de corrente percorrido no cabo de alimentação da máquina. Como apenas sinais de tensão são legíveis ao Arduino foi necessário montar um circuito eletrônico auxiliar, conforme a Figura 23, para que os valores de correntes gerados na saída do sensor fossem convertidos em sinais de tensão.

A programação lógica em C++ do Arduino e dos demais componentes listados foi executada no *software ARDUINO IDE*, conforme o APÊNDICE A. Os valores de corrente mensurados são armazenados no *Sd Card* para posteriores análises. Foi incrementada ao sistema, uma comunicação via *Bluetooth*, opcional, de modo que o monitoramento da corrente possa ser efetuado pelo operador, de forma remota, utilizando o aplicativo *Bluetooth SSP - unWired Lite* disponível na *Play Store*, a partir de um celular, *Tablet* ou outro dispositivo com *Android* e conexão *Bluetooth*.

A configuração final do sistema construído é ilustrada na Figura 24. Foi investido um valor de R\$ 170,00 contando todos os componentes descritos anteriormente.

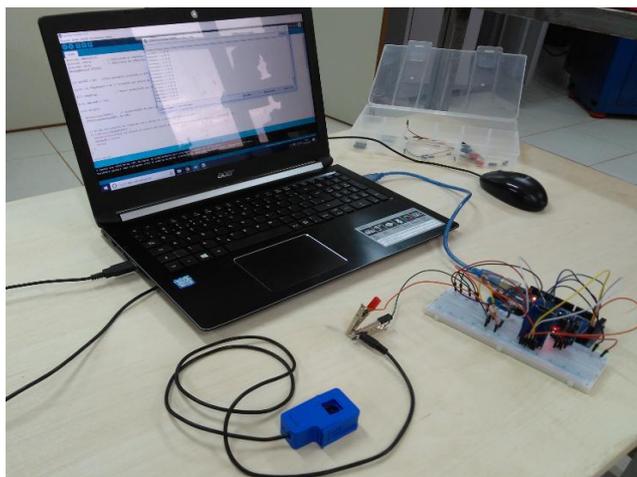


Figura 24. Sistema de monitoramento e aquisição de dados
Fonte: Autoria própria.

4.3 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

4.3.1 Pré Testes

Para essa etapa de testes foi feito a montagem do sistema de monitoramento da corrente elétrica junto ao torno, o sensor SCT-013-000 foi preso ao cabo de alimentação da máquina conforme a Figura 25. Realizou-se uma verificação dos valores de corrente para um movimento em vazio da ferramenta de corte, e comparados com as leituras de corrente em um amperímetro, para verificar a calibração do sensor. Vale ressaltar que como esse sistema é não invasivo não foi realizada nenhuma intervenção ou adaptação da máquina-ferramenta da Figura 20.



Figura 25. Montagem do sistema de monitoramento junto ao torno
Fonte: Autoria própria.

Foram realizados alguns testes utilizando uma ferramenta de corte de “sacrifício” para se ter uma projeção da vida útil da mesma. A ferramenta foi reafiada entre os testes, de modo que o desgaste do teste anterior não interferisse no seguinte. Essa etapa de testes bem como a do ensaio se deram em operações de corte a seco.

Com o intuito de realizar-se um experimento de curta duração foram selecionadas parâmetros de corte conforme a Tabela 2, de forma arbitrária, com velocidades de cortes altas o suficiente para se desgastar a ferramenta em um intervalo de tempo não muito curto e não muito longo. Adotou-se como critério de desgaste para o fim da vida útil da ferramenta, conforme a norma ISO 3685, um desgaste de flanco máximo $VB_{max} = 0,6 \text{ mm}$.

Como a velocidade de corte utilizada para usinagem de aço de médio percentual de carbono, utilizando ferramenta de aço rápido, é de aproximadamente 25 m/min, foi selecionado para um teste inicial uma velocidade ligeiramente superior a esse valor, em 28 m/min. Na Tabela 2 podem ser verificados os parâmetros utilizados e as respectivas observações para cada um deles.

O acompanhamento do desgaste durante os testes foi realizado utilizando uma lupa escalonada, com resolução de 0,1 mm e 8X de aproximação, a título de observações momentâneas. Os parâmetros de corte e resultados para cada respectivo teste são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de corte utilizados nos testes

Teste	v_c (m/min)	f (mm/rot)	a_p (mm)	l_c (mm)	VB_{max} (mm)
1	28	0,079	1,25	800	0,300
2	37,1	0,1	1,25	420	0,430
3	44,5	0,15	1,25	165	0,610

Fonte: Autoria própria.

Onde:

V_c – *velocidade de corte*

f – *avanço*

a_p – *profundidade de corte*

l_c – *comprimento de corte*

Em relação aos testes, da Tabela 2, foram observados os seguintes pontos:

- 1° Teste: A velocidade de corte média utilizada não proporcionou um desgaste apreciável para a ferramenta de corte. Houve formação de aderências do material da peça na ferramenta. O tipo de cavaco formado foi do tipo espiral.
- 2° Teste: O desgaste observado foi considerável, no entanto, ainda houve formação de aderências na ferramenta. O que desfavoreceu a progressão do desgaste, já que tal mecanismo se comporta como uma aresta de corte junto à ferramenta. O cavaco formado era do tipo espiral.
- 3° Teste: Obteve-se um desgaste apreciável para a ferramenta, conforme o valor pré-estabelecido. Observou-se pouca aderência na ferramenta, o que favoreceu uma melhor observação da marca de desgaste assim como a progressão do mesmo ao longo do teste. O cavaco apresentou-se espiralado.

Os parâmetros de corte do terceiro teste mostraram se mais apropriados, então este foram adotados para a etapa de ensaio.

A partir dos testes verificou-se que o acompanhamento da evolução do desgaste ao fim de passes longos, ou seja, em comprimentos de corte maiores gerou poucas medições de desgaste para construção de um modelo que relacione desgaste com o tempo. O que demandou um monitoramento em comprimentos menores de corte, por meio de trechos ou faixas demarcadas ao longo do comprimento útil do corpo de prova.

Notou-se que utilizar velocidades médias de corte, entre um diâmetro inicial e final, gerou imprecisões nos valores de corrente observados, pois a cada diâmetro usinado há uma respectiva velocidade de corte, que por sua vez influência diretamente nas forças de corte. Ou seja, conforme se deu a diminuição do diâmetro do corpo de prova, a cada passe, resultou numa diminuição da velocidade, que implicou diretamente na diminuição dos valores de corrente observados. Uma vez que a velocidade de corte é o parâmetro que mais influência no desgaste de ferramenta. Concluiu-se então, que para a análise da corrente elétrica em função do desgaste, na etapa de ensaio, deve se utilizar parâmetros de corte constantes.

Foram observadas mudanças nos valores de corrente para as rotações utilizadas nos testes. De modo que para o ensaio final deve-se utilizar uma mesma rotação, ou seja, evitar escalonamentos para manter a velocidade de corte constante. E para evitar tais inconvenientes, na etapa de ensaio, adotou-se como método utilizar o mesmo diâmetro de corte e rotação a partir dos dois corpos de prova restante do teste.

4.3.2 Ensaio de Monitoramento

A partir do material restante e constatações dos testes, adotou-se como método realizar marcações de faixas de 15 mm no corpo de prova, ao todo seis, conforme a configuração da Figura 26.

Para obter uma velocidade de corte próxima ao do terceiro teste, Tabela 2, foi conferido um diâmetro de 38,0 mm para o corpo de prova. Onde a combinação com uma rotação de 375 RPM, proporcionou um valor de 44,8 m/min para a velocidade de corte.

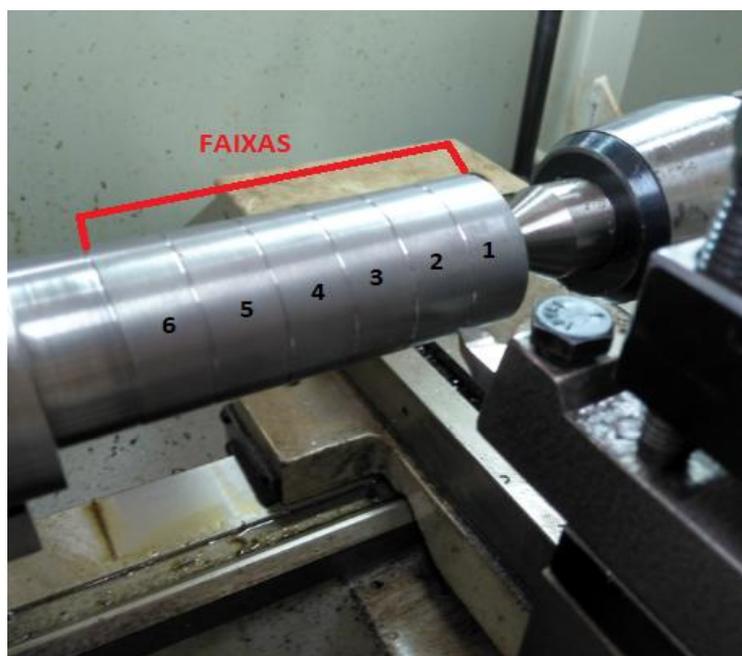


Figura 26. Corpo de prova usinado
Fonte: Autoria própria.

Para melhor precisão nas medições de desgaste, nessa etapa foi utilizado o microscópio, ilustrado na Figura 21, onde foi realizado inicialmente o registro de imagem da aresta de corte da ferramenta antes utilizá-la, conforme a Figura 27.a. Em seguida foi usinada cada uma das seis faixas demarcadas, de modo que ao fim de cada, efetuou-se a medição do desgaste da ferramenta, armazenamento dos valores de corrente monitorados e medição das rugosidades superficiais média, no sentido perpendicular ao de avanço. O valor de desgaste flanco máximo obtido ao fim da sexta faixa foi de $VB_{max} = 0,242\text{ mm}$, ilustrado na figura 27.b.

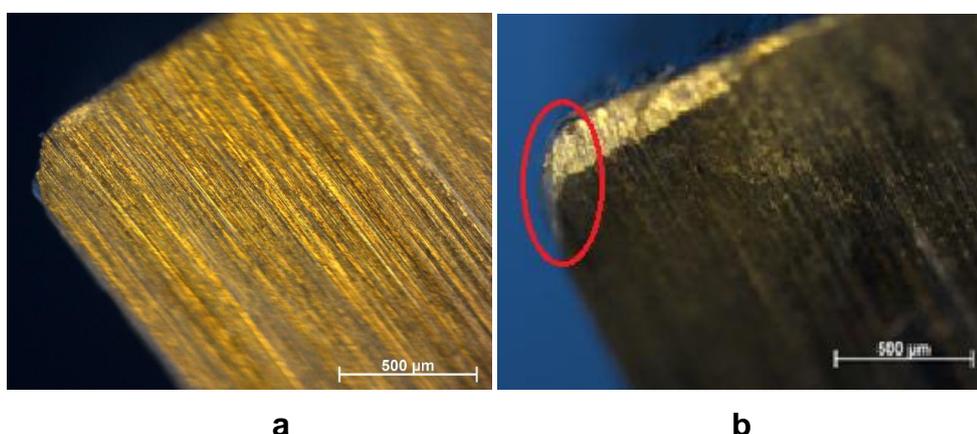


Figura 27. Imagens da ferramenta de corte sem desgaste e com desgaste
Fonte: Autoria própria.

Como um desgaste apreciável ainda não havia sido atingido, foi necessário realizar uma segunda etapa de ensaios utilizando a mesma ferramenta desgastada e mesmos parâmetros de corte. A fim de se evitar variações de dureza do material e variações nos valores de corrente, optou-se não realizar escalonamento de rotação para outro respectivo diâmetro, que mantivesse a velocidade de corte constante. Dessa forma utilizou-se o mesmo diâmetro de torneamento, a partir de outro corpo de prova na mesma configuração e material da Figura 26.

Ao longo desta etapa foram verificadas seguintes ocorrências:

- A ferramenta atingiu um valor de desgaste de flanco máximo $VB_{max} = 0,381\text{ mm}$, no fim da 8ª faixa, conforme a Figura 28.a.
- Ao término da 10ª faixa, para um comprimento de corte de 150 mm, a ferramenta atingiu o fim de sua vida útil com $VB_{max} = 0,617\text{ mm}$, Figura 28.b.

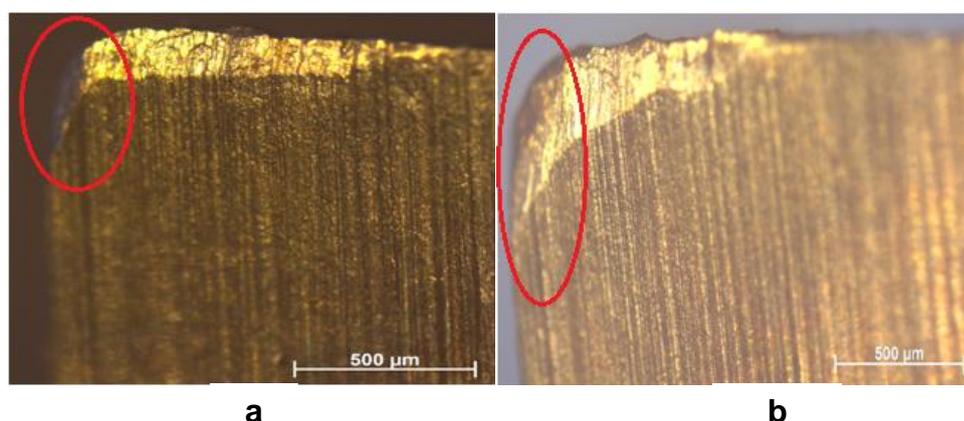


Figura 28. Desgastes de flanco próximo e no fim da vida da ferramenta
Fonte: Autoria própria.

Quanto a comunicação via *Bluetooth*, utilizando o módulo HC 05, não foi usada durante o ensaio, para se evitar alguma variação nos resultados. Pois esse componente é uma configuração opcional que pode ser utilizada quando o sistema não estiver em ensaio, mas sim em operação durante processos industriais onde a observação momentânea para tomada de decisão é importante. No APÊNDICE B podem ser verificadas algumas medições para movimentos passivos da ferramenta, obtidas por meio de um *Smartphone* com *Android*, a título de observação da capacidade do sistema em realizar leituras de forma remota.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Objetivando uma melhor compreensão dos resultados esse capítulo foi dividido em quatro seções respectivamente:

- Análise do desgaste da ferramenta de corte em função do tempo;
- Análise da corrente elétrica com o tempo e desgaste;
- Relação da corrente elétrica com o desgaste;
- Análise da influência do desgaste na rugosidade superficial média.

5.1 ANÁLISE DO DESGASTE DA FERRAMENTA EM FUNÇÃO DO TEMPO

A partir do acompanhamento da evolução do desgaste da ferramenta de corte, foram obtidas imagens das marcas de desgaste utilizando o microscópio óptico da Figura 21. As respectivas medições do desgaste se deram via processamento das imagens, por meio do *software* livre *Image J*. A partir dos valores obtidos construiu-se graficamente a curva de desgaste em função do tempo, conforme a Figura 29.

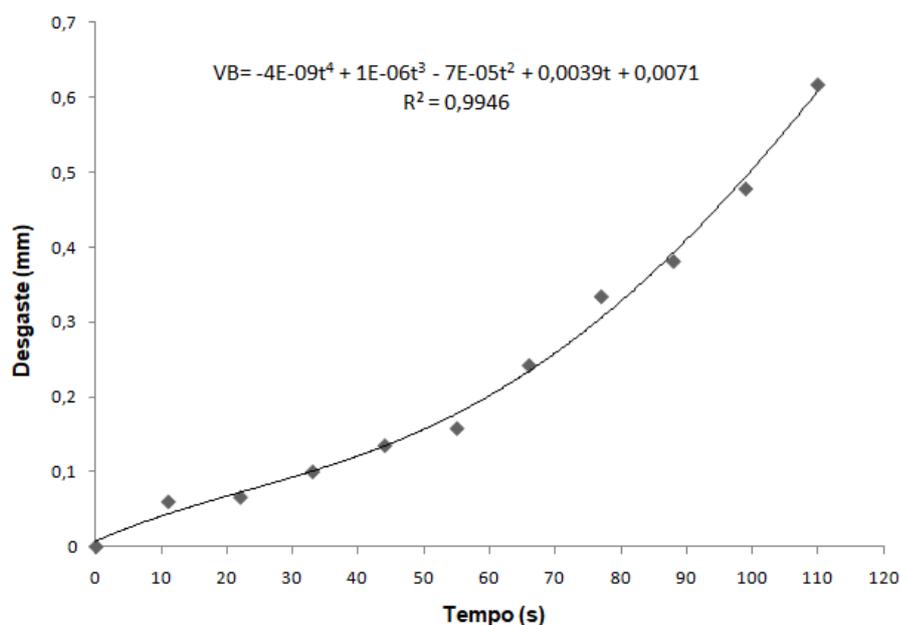


Figura 29. Curva do desgaste em função do tempo.
Fonte: Autoria própria.

Observa-se, na curva acima, que na fase inicial, durante o intervalo $0 < t < 20$ s, a ferramenta tem um aumento progressivo do desgaste. E numa fase intermediária, de $20 < t < 55$ s aproximadamente, a taxa de crescimento do desgaste é constante. Já no intervalo final da curva, verifica-se que a ferramenta chega próximo ao fim da sua vida útil, onde crescimento da curva é mais acentuado, onde a possibilidade de ocorrência de falha da ferramenta é esperada. O comportamento da curva obtida possui um comportamento próximo a curva teórica da Figura 10, com as respectivas fases comentadas anteriormente.

A ferramenta atingiu o fim da sua vida no instante de 110 segundos, em um comprimento de corte de $L_c = 150 \text{ mm}$ onde a condição de desgaste foi $VB_{max} = 0,617 \text{ mm}$. Onde a norma ISO 3685 de 1993 os critério para o fim da vida útil da ferramenta de corte para ferramentas de aço rápido, cerâmica e metal duro, são respectivamente:

- Desgaste de flanco médio: $VB = 0,3 \text{ mm}$;
- Desgaste de flanco máximo: $VB_{max} = 0,6 \text{ mm}$;
- Desgaste de entalhe: $VB_N = 1 \text{ mm}$;
- Falha catastrófica (Quebra).

5.2 ANÁLISE DA CORRENTE ELÉTRICA COM O TEMPO E DESGASTE

Como mencionado anteriormente além das medições de desgaste eram efetuadas leituras de correntes durante o movimento ativo da ferramenta, ao longo de cada faixa demarcada. E estes valores eram armazenados no sistema de monitoramento em um cartão de memória. A metodologia de faixas favoreceu a um menor volume de dados, o que facilitou a análise dos valores de corrente armazenados.

Utilizando a versão de teste do *software Minitab* foi construído o gráfico de corrente em função do tempo, com os valores de corrente mensurados, durante o corte ou movimento ativo da ferramenta, conforme a Figura 30.

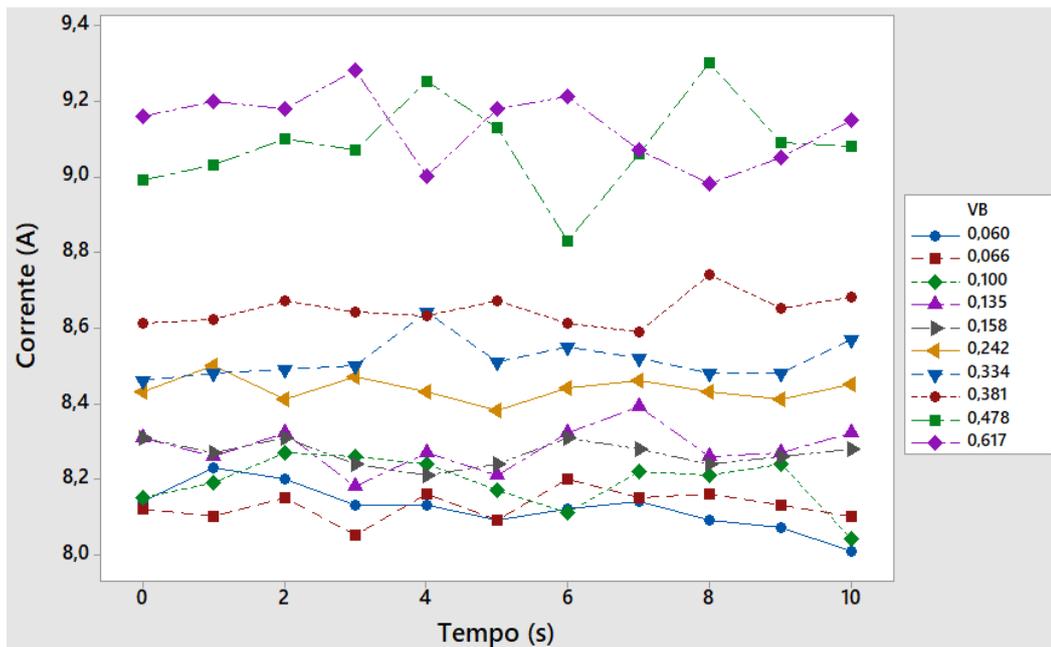


Figura 30. Comportamento da corrente em função do tempo durante o movimento ativo.
Fonte: Autoria própria.

Da Figura 30 podem-se destacar os seguintes pontos:

- Verifica-se um aumento da corrente com o decorrer do tempo de corte monitorado, o que está relacionada com o aumento dos desgastes, destacados na legenda ao lado da figura.
- Para os valores iniciais de desgaste de flanco máximo de $VB_{max} = 0,060$ a $0,135$ mm, as curvas de corrente encontram-se empacotadas, ou seja, mais próximas, e sem alterações apreciáveis para a corrente e desgaste.
- Nos intervalos de desgaste de $VB_{max} = 0,242$ a $0,381$ mm inicia-se um distanciamento entre as curvas centrais em relação às curvas inferiores, mais empacotadas, é nesse momento que a marca de desgaste se torna mais evidente e ocorre um incremento nos valores de corrente.
- A partir do momento em que o desgaste de entalhe atinge valores de $VB_{max} = 0,478$ a $0,617$ mm, próximo ao fim da vida útil da ferramenta, se torna evidente uma diferenciação no comportamento das curvas de corrente. Observa-se na figura um distanciamento das curvas de corrente da região superior, em relação às curvas centrais. Verifica-se também um comportamento de picos e vales acentuados na corrente, devido à ao

aumento da carga no sistema de acionamento com a evolução abrupta do desgaste.

5.3 RELAÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA COM O DESGASTE

A partir do gráfico da Figura 30 que relaciona valores de corrente obtidos diretamente do experimento. Torna-se necessário determinar os valores médios de corrente, para construção de um modelo devidamente ajustado que relacione à variável desgaste, com a resposta, corrente. Dessa forma foi gerada a Tabela 3 com os respectivos valores de desgaste (VB_{max}) e corrente elétrica média (I) para cada faixa usinada, assim como o desvio padrão (s) associado a cada valor de corrente média.

Tabela 3. Valores de corrente e desgaste mensurados

Faixas	VB_{max}(mm)	I (A)	s
1	0,060	8,12	0,06
2	0,066	8,13	0,04
3	0,100	8,19	0,07
4	0,135	8,28	0,06
5	0,158	8,27	0,03
6	0,242	8,40	0,09
7	0,334	8,52	0,05
8	0,381	8,65	0,04
9	0,478	9,08	0,12
10	0,617	9,13	0,09

Fonte: Autoria própria.

Inserindo os valores da tabela acima no *software Minitab* versão de teste, verificou-se que um modelo de regressão linear simples ofereceu um melhor ajuste entre variável desgaste, e a resposta corrente. Foi gerado um gráfico linear ilustrado na Figura 31.

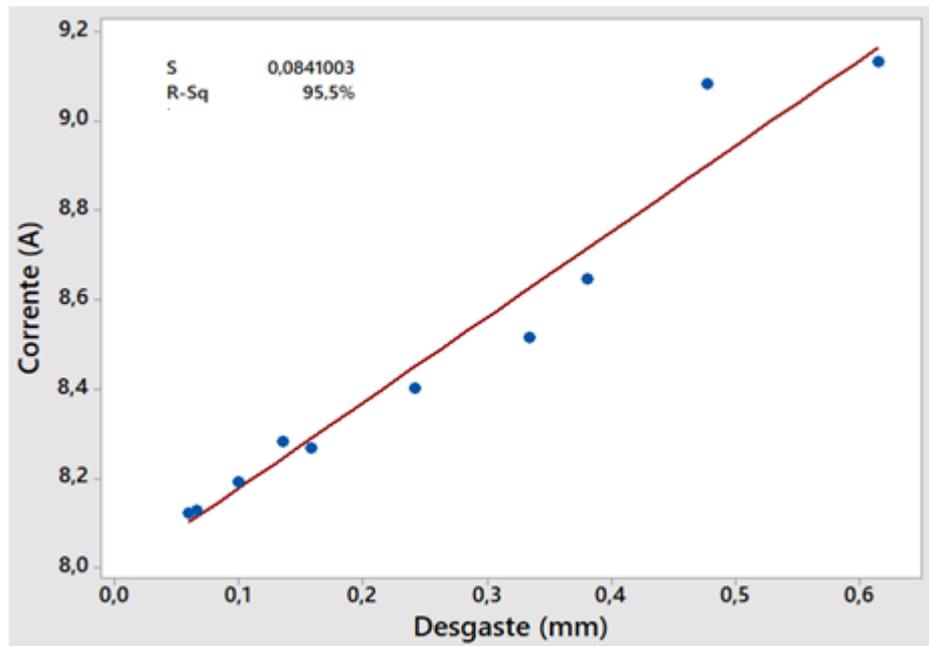


Figura 31. Gráfico da corrente média em função do desgaste.
Fonte: Autoria própria.

Com base na Figura 31 e por meio do *software Minitab* versão de teste obteve-se as seguintes informações:

- O modelo linear obtido que correlaciona, corrente elétrica (I), em função do desgaste (VB), é expresso conforme a Equação 8.

$$I = 1,916 VB + 7,985 \quad (8)$$

- O Coeficiente de determinação (R -sq), na legenda do gráfico indica que o desgaste da ferramenta explica em 95,5% a variação na resposta da corrente elétrica. O que é uma boa correlação, uma vez que se encontra perto de 100%.
- O valor $S = 0,08410$, denota a distância média em que os valores de corrente estão da reta ajustada, e quanto mais próxima de zero, melhor a precisão dos dados dispersos em torno da reta.

Apesar do coeficiente de determinação (R -sq) apresentar-se alto não indica necessariamente que o modelo tenha um bom ajuste. De forma que se torna necessário analisar os resíduos para avaliar a qualidade dos resultados.

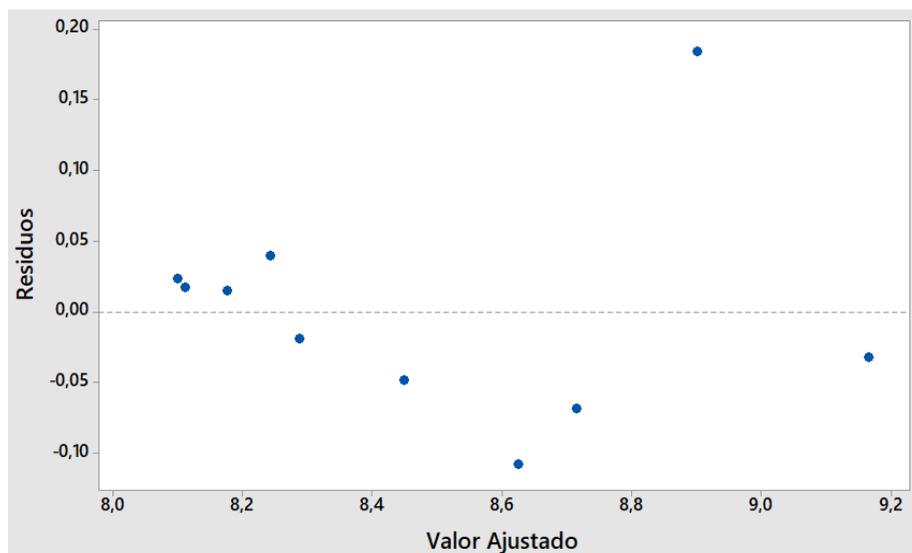


Figura 32. Resíduos VS valor ajustado para corrente elétrica.
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 32 mostra que os resíduos apresentam uma aleatoriedade e não aparenta haver correlação entre um resíduo e seu respectivo valor ajustado para a resposta. Indicando que o modelo linear apresenta um bom ajuste.

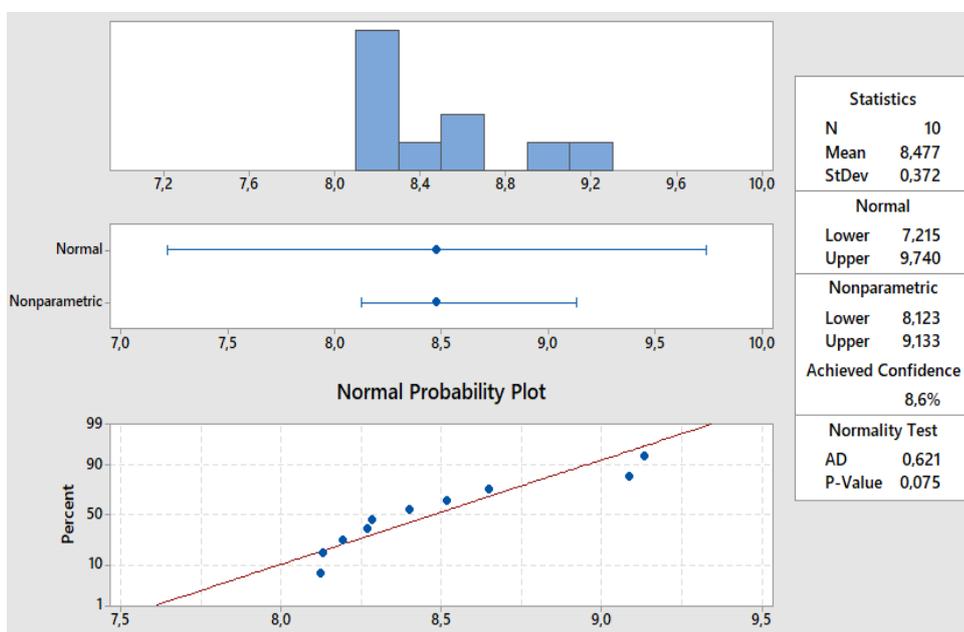


Figura 33. Análise de distribuição normal dos valores médio de corrente.
Fonte: Autoria própria.

Analisando os dados de distribuição normal dos valores de corrente, ilustrado na Figura 33, nota-se:

- Que o valor médio da corrente ($I = 8,477 \text{ A}$), encontra-se dentro do intervalo de confiança de 95%, respectivamente no intervalo de $8,123 < I < 9,133$.
- Apresentam uma distribuição normal ao longo da reta ajustada. Indicando que o modelo é adequado para determinar o comportamento da corrente em relação ao desgaste.

5.4 INFLUÊNCIA DO DESGASTE NA RUGOSIDADE SUPERFICIAL MÉDIA

Juntamente com as medições de desgaste da ferramenta (VB_{max}) e corrente, optou-se por realizar medições do parâmetro rugosidade média (R_a) para cada faixa demarcada no corpo de prova. Escolheu-se esse fator por ser o mais utilizado em trabalhos acadêmicos, e por questões de rapidez na realização do ensaio foi realizada apenas uma medição de rugosidade. As medidas foram realizadas posicionando o Rugosímetro, da Figura 22, perpendicular as marcas de avanço do corpo de prova. Os valores mensurados estão dispostos na Tabela. 4.

Tabela 4. Valores das Rugosidades médias e desgaste

Faixas	VB_{max} (mm)	R_a (μm)
1	0,060	4,146
2	0,066	4,505
3	0,100	4,230
4	0,135	4,402
5	0,158	4,264
6	0,242	4,526
7	0,334	4,601
8	0,381	4,734
9	0,478	4,712
10	0,617	4,734
	Média	4,485
	Desvio padrão	0,218
	Variância	0,047

Fonte: Autoria própria.

Por meio dos valores da Tabela 4, e utilizando o Minitab versão teste gerou-se um modelo de regressão linear simples, que melhor se adequou a relação variável preditora e resposta. A reta ajustada é ilustrada na Figura 34.

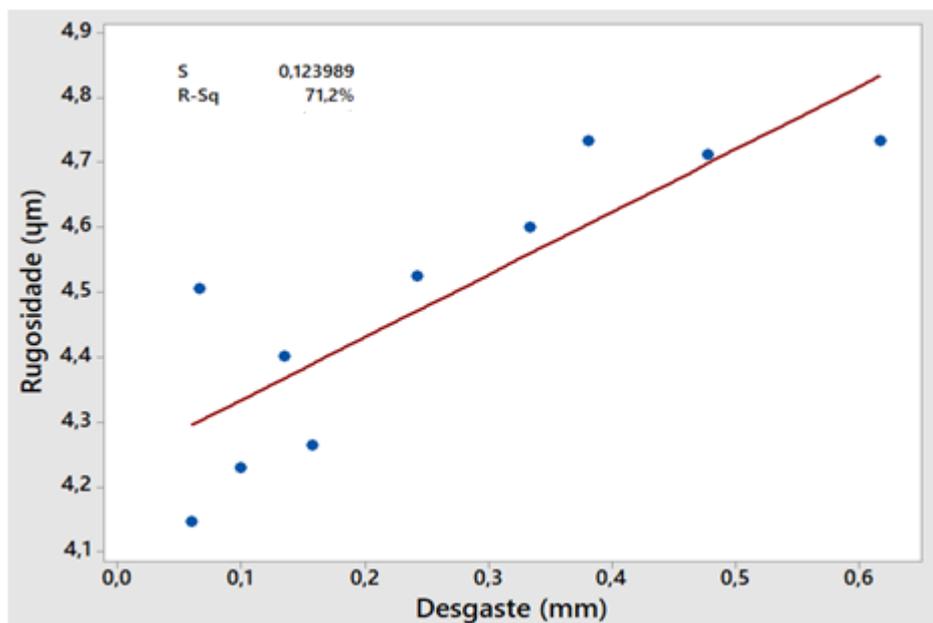


Figura 34. Gráfico da rugosidade média em relação ao desgaste.
Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 34, os seguintes pontos são observados:

- O valor do coeficiente de determinação $R-sq$ indica que o desgaste da ferramenta explica em 71,2% a variação na rugosidade média. Embora não esteja tão próximo de 100%, esse valor ainda é relevante, para se determinar uma correlação entre rugosidade e desgaste.
- O valor de $S = 0,1239$, denota a distância média em que os valores de rugosidade estão da reta ajustada.
- O modelo linear obtido que correlaciona à rugosidade média (Ra) com o desgaste (VB) e dado pela Equação 9.

$$Ra = 0,9674 VB + 4,237 \quad (9)$$

A mesma análise para os resíduos no ajuste da resposta da corrente se faz necessária para rugosidade, de modo que:

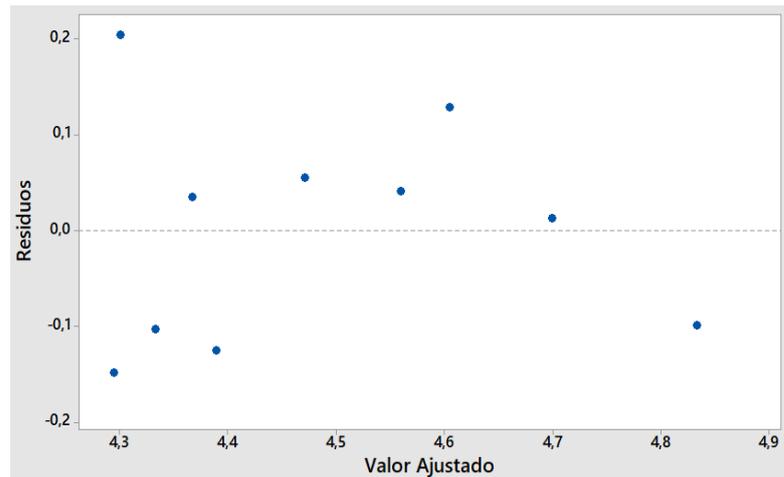


Figura 35. Resíduos VS valor ajustado para a rugosidade.
Fonte: Autoria própria.

A figura 35 mostra que os resíduos apresentam aleatoriedade. Verifica-se que não há correlação entre um resíduo e seu respectivo valor ajustado a resposta, rugosidade média. Mostrando que o modelo linear apresenta um bom ajuste. A distribuição normal dos valores de rugosidade média é ilustrada na Figura 36. Observa-se que:

- O valor médio $R_a = 4,485\mu\text{m}$, encontra-se respectivamente dentro do intervalo de confiança de 95%, entre $3,746 < R_a < 5,224 \mu\text{m}$.
- Os valores de rugosidade apresentam uma distribuição normal próximo a reta de distribuição normal ajustada.

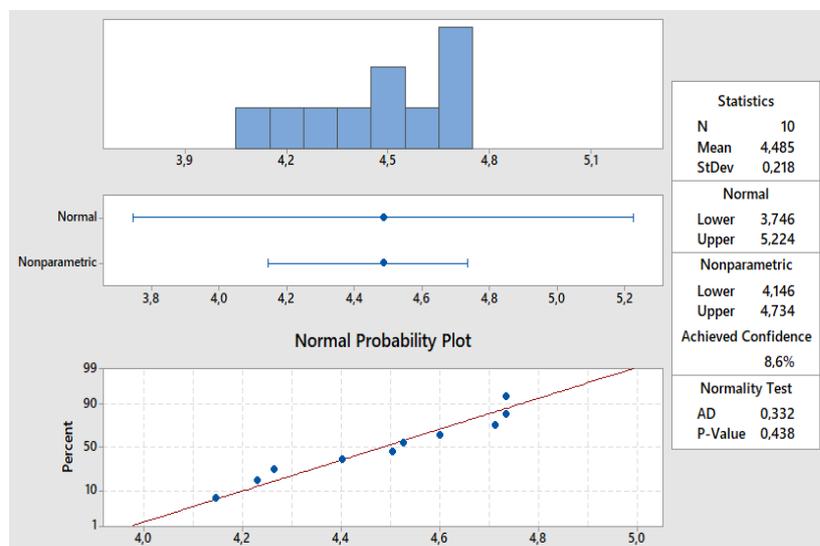


Figura 36. Distribuição normal dos valores de rugosidade média
Fonte: Autoria própria.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base no resultados, obteve-se uma boa correlação entre corrente elétrica e desgaste, conforme o modelo da Figura 31. As variações nos valores de corrente em relação ao desgaste só foram significativas quando a ferramenta apresentou um desgaste de flanco máximo de $VB_{max} = 0,478mm$ a $0,617 mm$. O que vai de encontro, em partes, com as observações de Braga (1992), que obteve alterações significativas a partir de um desgaste frontal de 0,8 mm e próximo da quebra da ferramenta.

Verificou-se também que observar o comportamento das curvas de corrente Figura 30 e a inclinação da reta do modelo linear da Figura 31 respectivamente, é uma boa alternativa para se prever a falha da ferramenta. No entanto, observou-se que estabelecer um valor fixo de corrente para se determinar o fim da vida da ferramenta não aparenta ser muito adequado. Pois a corrente é uma variável bastante instável ao longo do tempo, e em certos momentos os valores podem ser menores ou maiores, em relação a um valor médio ou máximo pré-estabelecido. Costa (1995) também verificou esse mesmo comportamento, propondo em seu estudo apenas analisar a inclinação das curvas de corrente como forma de predição.

Foi observado um aumento de 11 % entre a corrente elétrica média quando a ferramenta não apresentava desgaste e no momento de fim da vida. O que se aproxima do estudo de Silva (2010) que obteve um aumento de 15% aproximadamente na potência de corte efetiva média, determinada a partir da corrente elétrica, de uma ferramenta nova e posteriormente desgastada, durante o fresamento de topo utilizando insertos de corte.

7 CONCLUSÃO

O sistema de monitoramento da corrente elétrica proposto mostrou-se eficiente em quesitos de medição e armazenamento dos valores de corrente. O sistema *Bluetooth* apresenta-se como uma boa alternativa para monitoramento remoto, no entanto só é possível observar os valores de correntes medidos pelo sensor.

A metodologia de monitoramento pela demarcação de faixas mostrou-se eficiente para acompanhar a evolução do desgaste da ferramenta. Uma vez que realizar medições ao fim de passes longos, gera imprecisões e pouca quantidade de informações para se construir um modelo adequado para previsão da vida útil da ferramenta.

O modelo de rugosidade superficial encontrado demonstrou uma correlação razoável com o do desgaste da ferramenta. Entretanto, quando comparado ao modelo que relaciona corrente elétrica vs desgaste, mostra-se mais limitado em relação ao ajuste dos dados a reta.

Contudo, vale salientar que nesse trabalho a utilização de uma ferramenta em aço rápido, afiada manualmente, não garante que tais modelos sejam adequados para se criar uma projeção de vida para outra ferramenta de aço rápido ou insertos de corte. Pois a geometria e angulação da ferramenta variam conforme a afiação realizada. Entretanto, a metodologia de realizar testes, demarcar faixas, monitorar a corrente, medir os desgastes e construir um modelo, podem ser utilizados para se validar outro tipo de ferramenta, do mesmo ou outro material.

Para extensões futuras, sugere-se o estudo do monitoramento do desgaste de insertos de corte, durante o fresamento de topo, via corrente elétrica, de forma remota utilizando comunicação *wireless*. Também pode ser realizado um estudo comparativo entre a medição das forças de corte pela potência elétrica consumida e a medição das forças de corte utilizando um dinamômetro piezométrico. Desenvolver um aplicativo próprio para comunicação *Bluetooth*, próprio para monitoramento remoto de processos de usinagem, onde se obtenha gráficos, como forma de observação. Assim como explorar outras formas de monitoramento indireto, via emissão acústica, temperatura de corte e vibrações.

REFERÊNCIAS

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

ABNT. NBR 6162. **Movimentos e relações geométricas na usinagem dos metais**. Rio de Janeiro, 1989.

AL-SULAMAIN, Faleh A.; BASEER, Abdul M.; SHEIK, Anwar K. **Use of electrical Power for online monitoring of tool condition**. Journal of Materials Processing Technology. Vol.166,3 ed. p 364-371, 2005.

BOTSARIS, Pantells N; TSANAKAS, John A. **State-of-the-art in methods applied to tool condition Monitoring (TCM) in unmanned machining operations: a review**. The International Conference of COMADEM, Prague, 2008, pp. 73-87.

BLUM, T., INASAKI, I. **A Study on Acoustic Emission from Orthogonal Cutting Process**. Journal of Engineering for Industry, Vol. 112, August 1990, pp. 203.

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.

CISNEROS, César A. F.; CHABU, Ivan.; CHING TU, Carlos C.; BATALHA, Gilmar F. **Melhorias na instrumentação no sistema de monitoramento de desgaste de fresa de topo por emissão acústica**. Congresso Brasileiro de engenharia de fabricação. Maio de 2003.

CHAPMAN, Stephen J., 2013, **Fundamentos de Máquinas Elétricas**, Ed. McGraw Hill, Porto Alegre, Brasil, 698 p.

CHAVES, B.T; CASARIN, J.J; KIECKOW, F. **Sistema de monitoramento do desgaste de ferramentas de corte em operações de usinagem**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. Novembro de 2014.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. Vol III, 2ª Ed., McGraw-Hill, 1986.

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

DAWSON, Steve.; SCHROEDER, Tom. **Compacted graphite iron: a viable alternative**. Crystal Lake: Engineered Casting Solutions AFS Spring, 2000.

DEARNLEY, Peter A., TRENT, E.M. **Wear mechanisms of coated carbides tools.** Metals technology. V. 09, p. 60 – 75, fevereiro 1982.

DE MELO, A. C. A. **Estimação da Temperatura de Corte Utilizando Problemas Inversos em Condução de Calor.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1998.

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.

DINIZ, A. E.; HARA, C. M .**Using neural network to establish the end of turning tool life based on tool vibrations signals,** Revista Maquinas e Metais, 1(370), 73-85, (1996).

DINIZ, Anselmo E.; MARCONDES Francisco C.; COPPINI Nivaldo L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 6. Ed São Paulo: Artliber Editora. 2008.

DINIZ, Anselmo E.; MARCONDES Francisco C.; COPPINI Nivaldo L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** 9. Ed São Paulo: Artliber Editora. 2014.

DINIZ, Anselmo E.; PIRES José R. **Evitando o Desperdício de Ferramentas de Torneiar: Uma Aplicação em Chão de Fábrica,** Revista Maquinas e Metais, 1(370), 73-85, (1996).

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

EMBARCADOS, 2014. **Placa Arduino Mega 2560.** Disponível em: < <https://www.embarcados.com.br/arduino-mega-2560/> >. Acesso em 11/12/2018.

FAVARETTO, Alexandre S.; VALLE, Pablo D.; JUNIOR, Osiris C. **O gerenciamento de ferramentas de corte na indústria automotiva: um estudo de casos na região metropolitana de Curitiba.** Produto & Produção, vol. 10, n. 3, p. 45 - 60 out. 2009.

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

INASAKI, I., YONETSU, S. **In Process detection of cutting tool damage by acoustic emission Measument.** Proc.22 th IMTDR, pp.261 – 268, (1981).

ISO 3685. **Tool life testing with single-point turning tools,** 1993.

KONIG, Wilfried., KLOCKE, Fritz., 1997. **Fertigungsverfahren 1: Drehen, Frasen, Bohren**. Springer-Verlag, Berlin, Deutschland, 417p.

LANÇONI, P. N.; BOSO, D. A.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. **Estudo comparativo da força de corte no processo de retificação**. In: Simpep - Simpósio da Engenharia de Produção, 2005, Bauru. XII Simpep. Bauru, 2005.

LIN, J.; LEE, S.; WENG, C. **Estimation of Cutting Temperature in High Speed Machining**. Journal of Engineering Materials and Technology, vol. 114, 1992, pp 289-290.

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

MACHADO, Alisson R.; SILVA, Márcio B. da.; COELHO, Reginaldo T.; ABRÃO, Alexandre M. **Teoria da Usinagem dos Metais**, 3ª ed. São Paulo; Editor Edgard Blucher, 2015

MACHADO, Alisson R.; SILVA, Márcio B. da. **Usinagem dos Metais**. Apostila, DEEME-UFU, Uberlândia. 1999

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

NOGUEIRA, R. M. U. **Obtenção e estudo de insertos sinterizados de aços rápidos AISI M2, M3/2 e T15**. Dissertação. Joinville, SC, 2004.

REIS, A. M. **Influência do ângulo de posição secundário da ferramenta, raio da ponta e lubrificação na usinagem em presença de aresta postiça de corte**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2000.

SANDVIK COROMANT, 2002. **Desgaste em arestas de corte**. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/ptpt/knowledge/materials/cutting_tool.aspx> Acessado em 04/05/2018

SILVA, R. H. L. Da. **Monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2010.

SHAO, H.; WANG, H.L.; ZHAO, X.M. **A cutting power model for tool wear monitoring in milling**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 44, 14 ed., p. 1503-1509, 2004.

SOUZA, André João. **Monitoramento de Processos de Usinagem**. Apostila Didática. Porto Alegre: UFRGS, 2015.

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

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000. 446p. ISBN-13: 978-0-7506-7069-2.

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 10/06/2019.

APÊNDICE 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 de leitura não existe um cartão SD");
    cartaoOk = false;
    return;
  }
}

void loop(){

  dataehora = rtc.getDateTime();
  delay(400);

  if (cartaoOk){
    dataFile = SD.open("DATALOG.csv", FILE_WRITE);
    //Serial.println(" Inicializado cartão SD para escrita :D ");
  }

  String leitura = "";
  float corrente = 0 ;

  double Irms = SCT013.calcIrms(1480);

  if (isnan(Irms)) {
    Serial.println ("Falha na leitura do sensor");
  }
}

```

```
    delay(400);
    return ;
}
    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);
    }
}
```

APÊNDICE B – Leituras de corrente por meio do smartphone com a ferramenta em movimento passivo

