

VICTOR HUGO SERAFIM RUBIN

**MONITORAMENTO DO TORNEAMENTO DO AÇO
ABNT D6 COM FERRAMENTAS DE PCBN**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2017

VICTOR HUGO SERAFIM RUBIN

**MONITORAMENTO DO TORNEAMENTO DO AÇO ABNT D6
COM FERRAMENTAS DE PCBN**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

Uberlândia – MG

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

R896m Rubin, Victor Hugo Serafim, 1991-
2017 Monitoramento do torneamento do aço ABNT D6 com ferramentas
de PCBN / Victor Hugo Serafim Rubin. - 2017.
100 f. : il.

Orientador: Álisson Rocha Machado.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.142>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Usinagem - Produção - Teses. 3.
Aço - Ferramenta de corte - Teses. 4. Emissão acústica - Teses. I.
Machado, Álisson Rocha. II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO
NÚMERO DE ORDEM: 471
DATA: 24/03/2017

Às oito horas do dia vinte e quatro de março de dois mil e dezessete, no Anfiteatro A do Bloco 50, Campus Santa Mônica, reuniu-se a Banca Examinadora, composta pelos Professores Dr. Álisson Rocha Machado (orientador) e, Dr. Marcus Antônio Viana Duarte da Universidade Federal de Uberlândia, e Dr. Alexandre Dias da Silva da Universidade Federal de Santa Maria, sob a presidência do primeiro, desenvolver o processo de avaliação da dissertação intitulada “*Monitoramento do Torneamento do Aço ABNT D6 com Ferramentas de PCBN*”, apresentada pelo aluno **VICTOR HUGO SERAFIM RUBIN**, matrícula número **11512EMC010**, em complementação aos requisitos determinados pelo Regimento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para obtenção do título de Mestre. Após discorrer sobre seu trabalho, o candidato foi arguido pelos membros da Banca, diante das comunidades universitária e externa. Em seguida, a dissertação foi avaliada em seção privada pelos membros da Banca que, ao encerrar o processo, consideraram-na:

- () Aprovada
() Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação do orientador.
() Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação da banca.
() Reprovada

conferindo ao aluno, em caso de aprovação, o título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação, Linha de Pesquisa: Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem). As demandas complementares observadas pelos examinadores deverão ser satisfeitas no prazo máximo de 60 dias, para dar validade a esta aprovação. Para constar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelo presidente e demais membros da Banca.

Assinaturas:

Prof. Dr. Álisson Rocha Machado (orientador)

UFU 

Prof. Dr. Marcus Antônio Viana Duarte

UFU 

Prof. Dr. Alexandre Dias da Silva

UFSM 

Uberlândia, 24 de março de 2017

DEDICATÓRIA

Em primeiro lugar, aos meus pais; ao meu orientador e a todos aqueles que me ajudaram e continuam me dando forças.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, dono de toda sabedoria e conhecimento.

Aos meus pais, Maritana e Hugo Rubin, e a toda minha família.

Ao Prof. Dr. Álisson Rocha Machado pela orientação, paciência e todos os ensinamentos que foram passados nos últimos anos.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), pela oportunidade concedida, e a CAPES pelo auxílio financeiro.

À Sandvik e a Villares Metals pelo fornecimento de materiais e ferramentas que foram de grande ajuda no presente trabalho.

Ao professor Dr. Márcio Bacci da Silva e ao Prof. Dr. Éder por sempre se mostrarem prestativos em todas as solicitações de auxílio e em todos os momentos de dúvida.

Aos técnicos do LEPU, Lázaro Vieira, Thiago Pereira, Thiago Menezes, que sempre me auxiliaram.

Ao técnico e mestre Alcione dos Reis, ao aluno de iniciação científica Kenji Okada, à minha amiga Déborah de Oliveira e ao mais novo amigo Henrique Hubner, pelo suporte técnico e emocional durante todo o desenvolvimento da dissertação.

Aos meus amigos e colegas do LEPU que de alguma forma fizeram parte desta jornada, Prof. Armando Marques, Prof. Cleudes Guimarães, Prof. Raphael Lima de Paiva, Maksym Ziberov, Antonio Vitor de Melo, Mariana Landim, Ivanilson Souza, Aline Elias.

RUBIN, V. H. S., **Monitoramento do Torneamento do Aço ABNT D6 com Ferramentas de PCBN, 2017**, 100 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.

Resumo

O monitoramento dos processos de produção é de grande interesse industrial em todo o mundo. Em usinagem a sua importância reside na possibilidade de otimizar a vida da ferramenta de corte e prevenir sua quebra, além de controlar a rugosidade superficial da peça de trabalho, de modo que a crescente busca por melhoria na qualidade e produtividade, com redução de custos se torna maior a cada dia. Um ponto crítico para o processo de usinagem não assistido é identificar o momento exato de troca da ferramenta de corte, considerando sua máxima utilização e respeitando os limites de qualidade da peça. Com o crescente aumento dos sistemas de manufatura e, portanto, da competitividade surge a necessidade de melhorias no processo, em que a detecção e correção prematura de falhas que podem ocorrer durante a fabricação contribuem neste sentido. Com esse foco, este trabalho monitorou o processo de torneamento do aço VC131 (ABNT D6) endurecido (60 HRC) via emissão acústica, corrente do motor principal e força de usinagem de modo a detectar falhas, quebra e desgaste da ferramenta de corte de PCBN, durante testes de vida da ferramenta. Esta aplicação se justifica também por se tratar de um material caro e de baixa usinabilidade (aço ABNT D6) e de uma ferramenta de alto custo aquisitivo (PCBN). Foram estudados os efeitos das variáveis do processo de usinagem (velocidade de corte e avanço) nos sinais monitorados. Além de monitorar o sinal de emissão acústica, o sinal de corrente do motor e da força durante a usinagem, periodicamente o teste era interrompido para medição do desgaste de flanco (máximo - VB_{Bmax}) e o teste foi considerado concluído quando o desgaste de flanco atingia um critério de fim de vida, baseado neste desgaste, pré-estipulado (0,6 mm para VB_{Bmax}). Os resultados dos testes foram utilizados para treinamento de uma rede neural artificial em Matlab. Um fator importante é que esse sistema permite o monitoramento on-line, ou seja, durante o funcionamento normal da máquina, sem que a mesma precise ser interrompida durante a usinagem e um acompanhamento instantâneo do corte, permitindo a prevenção da quebra e avarias. Os sinais de força e potência aumentaram com o tempo, ao contrário do que ocorreu com o sinal de emissão acústica. A rede neural se apresentou um excelente recurso para detecção de desgaste.

Palavras-chave: Monitoramento da usinagem, aço VC 131 (ABNT D6), emissão acústica, redes neurais, forças de corte, potência

RUBIN, V. H. S., **Monitoring of the Turning of ABNT D6 Steel with PCBN Tools** 2017. 100 p. Master's Dissertation, Federal University of Uberlandia, Uberlandia - MG.

Abstract

The monitoring of production processes is of great industrial interest worldwide. In machining its importance lies in the possibility of optimizing the life of the cutting tool and preventing its breakage, in addition to controlling the surface roughness of the workpiece, so that the search for improvements in quality and productivity, with reduced costs are constantly increasing. A critical point for the unattended machining process is to identify the exact moment of change the cutting tool, considering its maximum use and respecting the quality limits of the workpiece. With the constant increase in manufacturing systems and therefore competitiveness, the need for improvements in the process arises, in which the detection of premature failures that may occur during manufacturing contribute in this sense. With this focus, this work has monitored the turning process of hardened (60 HRC) VC131 (ABNT D6) steel via acoustic emission, main motor electrical current and machining force in order to detect failures, breakage and wear of PCBN cutting tools during tool life tests. This application is justified because of the high cost and low machinability of the work material (ABNT D6 steel) and the high acquisition cost of the cutting tool (PCBN). The effects of the machining parameters (cutting speed and feed rate) on the monitored signals were studied. In addition to monitoring the signals of acoustic emission, electrical current and force during machining, periodically the test was interrupted to measure the flank wear (average - VB_B and maximum - VB_{Bmax}) and the test was considered complete when the flank wear reached the stipulated end-of-life criteria (0.6 mm for VB_{Bmax}). The results of the tests were used to training an artificial neural network in Matlab. An important factor is that this system allows online monitoring, i.e. during normal operation of the machine, without having to interrupt the process during the machining and instant follow up of the cut, allowing prevention of breakage and breakdowns. The force and power signals increased over time, unlike the acoustic emission signal. The neural network presented an excellent feature for detection of wear.

Keywords: Monitoring, hard turning, acoustic emission, neural network, machining force, power

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Processo de torneamento cilíndrico	4
Figura 2.2 - Alguns processos de torneamento: (a) cilíndrico externo; (b) cônico externo; (c) curvilíneo; (d) cilíndrico interno; (e) cônico interno; (f) sangramento radial (FERRARESI, 2006)	5
Figura 2.3 - Variáveis do Processo	6
Figura 2.4 - Elementos de uma ferramenta de corte (ferramenta de barra) (CIMM, 2015)	6
Figura 2.5 - Formas de Desgaste (adaptado de TRENT, 1982)	9
Figura 2.6 - Curva de evolução de desgaste da ferramenta de corte (FERRARESI, 2006)..	10
Figura 2.7 - Mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte (KÖNIG e KLOCKE,1997, apud MACHADO et al., 2015).....	12
Figura 2.8 - Rugosidade Ra (MITUTOYO, 2015)	17
Figura 2.9 - Rugosidade em função do avanço e do raio de ponta (MITSUBISHI, 2015).....	18
Figura 2.10 - Camada Branca (JÚNIOR, 2009).....	20
Figura 2.11 - Força de usinagem e suas componentes no processo de torneamento (FERRARESI, 1977).....	23
Figura 2.12 - Esquema com as possíveis fontes de geração de emissão acústica no corte ortogonal (RANGWALA e DORNFELD, 1991).....	Erro! Indicador não definido.
Figura 2.13 - Esquema de montagem do experimento (adaptado de GUO e AMMULA, 2005).	30
Figura 2.14 - Diagrama funcional de um sistema de aquisição	33
Figura 2.15 - Esquema estabelecido para a usinagem (adaptado de M. NESLUŠAN, 2013)	35
Figura 2.16 - (a) Mapa polar de EA da superfície da peça de cobre utilizada nos experimentos; (b). Detalhe da metalografia da superfície da peça com seus defeitos superficiais (LEE et al., 2006).....	37
Figura 2.17 - Fontes de AE em diferentes estádios de remoção de material (LEE et al.,2006)	38
Figura 2.18 - Modelo não linear de neurônios utilizados na RNA (HAYKIN, 2001).....	40
Figura 2.19 - Estrutura de uma rede neural artificial (Da Silva,2010)	41

Figura 2.20 - Topologia de uma rede neural (a) Perceptron monocamada; (b) Perceptron multicamadas (HAYKIN, 2001)	43
Figura 2.21 - Aprendizado de uma rede neural: (a) Supervisionado (b) não supervisionado (HAYKIN, 2001).....	44
Figura 3.1 - Fluxograma dos experimentos desenvolvidos neste trabalho.	46
Figura 3.2 - Ferramenta PCBN (IC = 12,7 mm; RE = 1,1906; S = 4,7 mm; LE = 2,8 mm) (SANDVIK, 2016).....	48
Figura 3.3 - Suporte utilizado (SANDVIK, 2016)	48
Figura 3.4 - Montagem do sistema de aquisição de força (adaptado de MARQUES, 2015). 49	
Figura 3.5 - Circuito amplificador de corrente	50
Figura 3.6 - Medição da potência elétrica.	50
Figura 3.7 - Localização dos sensores de emissão acústica.....	51
Figura 3.8 - Software para medição dos sinais de EA desenvolvido em LabView.....	52
Figura 3.9 - Programa utilizado na plotagem do mapa acústico.....	53
Figura 3.10 - Método de medição da rugosidade.....	54
Figura 3.11 - Estéreo-microscópio utilizado para acompanhamento do desgaste nas ferramentas de corte.....	55
Figura 3.12 - Topologia da rede neural 6 – 5 – 5 – 1.....	57
Figura 4.1 - Desgaste de flanco máximo (VB_{BMax}) das ferramentas na condição 1 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm).....	60
Figura 4.2 – Desgaste de flanco máximo (VB_{BMax}) das ferramentas na condição 2 ($v_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm).....	60
Figura 4.3 - Desgaste de flanco máximo (VB_{BMax}) das ferramentas na condição 3 ($v_c = 225$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm).....	61
Figura 4.4 - Desgaste de flanco máximo (VB_{BMax}) das ferramentas na condição 4 ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm).....	61
Figura 4.5 - Volume de material removido em cada teste	62
Figura 4.6 - Fotos de algumas ferramentas obtidas no Microscópio Eletrônica de Varredura (MEV) – (a) – Desgaste de flanco, Condição 1; (b) – Desgaste de flanco, Condição 1; (c) – Desgaste de flanco, Condição 2; (d) – Desgaste de flanco, Condição 3; (e) – Desgaste de cratera, Condição 1; (f) – Desgaste de cratera, Condição 2.....	63
Figura 4.7 - Força e rugosidade em função do desgaste para a condição 1 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)	65
Figura 4.8 - Força e rugosidade em função do desgaste para a condição 2 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)	65

Figura 4.9 - Força e rugosidade em função do desgaste para a condição 3 ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)	66
Figura 4.10 - Força e rugosidade em função do desgaste para a condição 4 ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm).....	66
Figura 4.11 - Gráfico da corrente elétrica do torno em vazio, em função da rotação.....	68
Figura 4.12 - Gráfico de corrente da condição 1 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)	68
Figura 4.13 - Gráfico de corrente da condição 2 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)	69
Figura 4.14 - Gráfico de corrente da condição 3 ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)	69
Figura 4.15 - Gráfico de corrente da condição 4 ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)	70
Figura 4.16 - Sinal bruto de emissão acústica e espectro de frequência de uma ferramenta nova ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm).....	71
Figura 4.17 - Sinal bruto de emissão acústica e espectro de frequência de uma ferramenta em meia vida ($VB_{BMAX} = 0,34$ mm) ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm).....	71
Figura 4.18 - Sinal bruto de emissão acústica e espectro de frequência de uma ferramenta fim de vida ($VB_{BMAX} > 0,50$ mm) ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm).....	72
Figura 4.19 - Sinal bruto de emissão acústica e espectro de frequência de uma ferramenta nova ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm).....	72
Figura 4.20 - Sinal bruto de emissão acústica e espectro de frequência de uma ferramenta em meia vida ($VB_{BMAX} = 0,32$ mm) ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm).....	73
Figura 4.21 - Sinal bruto de emissão acústica e espectro de frequência de uma ferramenta em fim de vida ($VB_{BMAX} > 0,50$ mm) ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm).....	73
Figura 4.22 - Espectro de frequência de uma ferramenta nova para a condição 2 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm).....	74
Figura 4.23 - Espectro de frequência de uma ferramenta em meia vida para a condição 2 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm).....	74
Figura 4.24 - Espectro de frequência de uma ferramenta nova para a condição 2 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm).....	75
Figura 4.25 – Sinal bruto de uma ferramenta nova para a condição 2 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)	76
Figura 4.26 - Sinal bruto de uma ferramenta nova para a condição 2 ($v_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)	76

Figura 4.27 - Mapa de emissão acústica para diferentes velocidades ($V_c = 175$ m/min à esquerda e $V_c = 225$ m/min à direita) ($f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm).....	77
Figura 4.28 - Mapa de emissão acústica para diferentes avanços ((a) $f = 0,10$ mm/rot., (b) $f = 0,20$ mm/rot. e (c) $f = 0,05$ mm/rot.) ($V_c = 175$ m/min, $a_p = 0,2$ mm)	78
Figura 4.29 - Mapa de emissão acústica para diferentes estados da ferramenta na condição 2 ((a) ferramenta nova; (b) ferramenta em meia vida; (c) ferramenta em fim de vida).....	79
Figura 4.30 – Espectro de um sinal bruto de emissão acústica.....	80
Figura 4.31 - Espectro de um sinal filtrado de emissão acústica de 30 kHz a 40 kHz	80
Figura 4.32 - Resultados do sinal de emissão acústica da condição 1.....	81
Figura 4.33 - Resultados do sinal de emissão acústica da condição 2.....	81
Figura 4.34 - Resultados do sinal de emissão acústica da condição 3.....	82
Figura 4.35 - Resultados do sinal de emissão acústica da condição 4.....	82
Figura 4.36 - Evolução do erro médio quadrático durante a fase de treinamento.....	83
Figura 4.37 - Coeficiente de correlação entre os dados estimados pela RNA.....	84
Figura 4.38 - Evolução do erro médio quadrático durante a fase de treinamento.....	86
Figura 4.39 - Coeficiente de correlação entre os dados estimados pela RNA.....	87
Figura 4.40 – Rugosidade real e estimada pela RNA para a condição 5 ($V_c = 200$ m/min; $f = 0,15$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)	88
Figura 4.41 - Rugosidade real e estimada pela RNA para a condição 6 ($V_c = 250$ m/min; $f = 0,05$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Principais parâmetros de rugosidade de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002)	16
Tabela 2.2 - Métodos de monitoramento (adaptado de DAN e MATHEW, 1990).....	22
Tabela 2.3 - Fatores monitorados nos processos de usinagem (TONSHOFF <i>apud</i> MATSUMOTO, 1998)	32
Tabela 3.1 - Composição química aço VC131 (dados do fabricante).....	47
Tabela 3.2 - Condições de corte utilizadas	56
Tabela 3.3 - Parâmetros de corte dos testes de validação.....	58
Tabela 4.1 - Dados do processo de validação	85

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Al ₂ O ₃	<i>Óxido de alumínio</i>
a _p	Profundidade de corte
EA	Emissão acústica
f	Avanço
F _c	Força de corte
F _f	Força de avanço
F _p	Força passiva
HRC	Dureza Rockwell C
I	Corrente elétrica [A]
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
NBR	Norma Brasileira
PCBN	Nitreto Cúbico de Boro Policristalino
Ra	Desvio aritmético médio
RNA	Redes Neurais Artificiais
R _q	Desvio médio quadrático
R _t	Altura total do perfil
R _z	Altura máxima do perfil
VB _B	Desgaste de flanco
V _c	Velocidade de corte

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Torneamento.....	4
2.1.1 Variáveis do processo de usinagem.....	5
2.2 Desgaste em ferramentas de corte.....	7
2.2.1 Formas de Desgaste.....	8
2.2.2 Curva de evolução do desgaste.....	10
2.2.3 Mecanismos de Desgaste em Ferramentas de Corte	11
2.3 Acabamento Superficial de Peças Usinadas	15
2.3.1 Parâmetros de rugosidade.....	16
2.3.2 Parâmetros que afetam a rugosidade	17
2.3.3 Medição de rugosidade.....	19
2.3.4 Integridade superficial em aços endurecidos	19
2.4 Monitoramento do desgaste de ferramenta de corte	20
2.4.1 Métodos de monitoramento do desgaste de ferramenta de corte.....	21
2.5 Monitoramento da Rugosidade de Peças Usinadas	27
2.5.1 Monitoramento da Rugosidade Via Potencia Elétrica.....	28
2.5.2 Monitoramento da Rugosidade Via Vibração	28
2.5.3 Monitoramento da Rugosidade Via Emissão Acústica	29
2.6 Monitoramento no processo de torneamento	30
2.6.1 Sistemas Utilizados e grandezas monitoradas.....	32
2.7 Redes Neurais Artificiais (RNA).....	39
2.7.1 Topologia das redes neurais.....	42
2.7.2 Aprendizagem de Redes Neurais Artificiais	43
CAPÍTULO III - METODOLOGIA.....	46
3.1 Materiais e Equipamentos Utilizados.....	47
3.2 Aquisição de dados	48
3.2.1 Medição de força	48
3.2.2 Medição de Potência	49

3.2.3 Emissão Acústica.....	50
3.2.4 Rugosidade.....	53
3.2.5 Desgaste	54
3.3 Procedimento Experimental.....	55
3.4 Aplicação da Rede Neural Artificial.....	56
CAPÍTULO IV - RESULTADOS.....	59
4.1 Resultados do desgaste máximo de flanco ($VB_{BMÁX}$).....	59
4.2 Resultados da força de usinagem e da rugosidade superficial	64
4.3 Resultados da corrente elétrica de alimentação do motor da máquina ferramenta.....	67
4.4 Resultados da emissão acústica	70
4.4.1 Sinal Bruto de emissão acústica	70
4.4.2 Mapa De Emissão Acústica	76
4.4.3 Resultados do RMS do sinal de emissão acústica filtrado	79
4.5 Resultados Redes Neurais Artificiais para o desgaste.....	83
4.5.1 Validação do Modelo	84
4.6 Resultados Redes Neurais Artificiais para a rugosidade Ra.....	85
4.6.1 Validação do modelo	87
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES.....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Há 700 anos antes de Cristo, o homem já trabalhava os materiais brutos, onde praticamente todas as ferramentas eram fabricadas em ferro. No início do século XVIII, a madeira era o principal material utilizado pela engenharia para a fabricação de peças. Com a revolução industrial, novos e mais resistentes materiais apareceram, impulsionando o desenvolvimento dos aços-liga como ferramentas de corte. A indústria mecânica foi impulsionada com a utilização de água e vapor como fonte de energia, que proporcionou o aparecimento de máquinas-ferramentas responsáveis pela fabricação de outras variedades de máquinas e instrumentos, em substituição ao trabalho humano em diversas atividades. (MACHADO et al. 2015)

Dentre os vários processos de usinagem existentes, podemos destacar o torneamento, o fresamento, a furação e a retificação como os principais.

Seja qual for o processo, é necessário o uso de máquinas específicas, denominadas máquinas ferramentas. No desenvolvimento histórico das Máquinas Ferramentas, sempre se procurou soluções que permitissem aumentar a produtividade com qualidade elevada, associada a minimização dos desgastes físicos na operação das máquinas. Estudos mais aprofundados sobre a usinagem iniciaram-se somente no início do século XIX e em 1900, o americano F. W. Taylor descobriu o aço rápido, determinando um passo marcante no desenvolvimento tecnológico da usinagem.

Um ponto crítico para o processo de usinagem não assistida é identificar o momento exato de troca da ferramenta de corte, considerando sua máxima utilização e respeitando os limites de qualidade da peça. A prática hoje ainda é muito conservadora em relação à vida da ferramenta para garantir a qualidade da peça e evitar avarias, resultando na substituição prematura, com subutilização da aresta de corte. Em meio industrial isto pode gerar um custo desnecessário, pois aumenta a quantidade de ferramentas consumidas e a frequência de trocas de ferramentas. Basicamente são utilizadas duas estratégias para a substituição de

ferramentas de corte dadas como desgastadas, (i) troca por falha ou desgaste excessivo ou (ii) troca programada após a usinagem de um número pré-estabelecido de peças acabadas. Normalmente, as trocas são programadas baseado na qualidade da peça, que deve ser monitorada continuamente (MAIA, 2015).

O monitoramento dos processos de usinagem é de grande interesse tanto para pesquisadores quanto para indústrias no mundo todo, sendo de suma importância para a otimização da vida da ferramenta e prevenção da quebra, de modo que a crescente busca por qualidade e produtividade se torna maior a cada ano.

Este trabalho visa conhecer e identificar o comportamento do desgaste de uma ferramenta via emissão acústica – EA, corrente do motor e força de usinagem até que a ferramenta atinja seu fim de vida, visando melhor produtividade e a troca automática da ferramenta. Um fator importante é que esse sistema permite o monitoramento on-line, ou seja, durante o funcionamento normal da máquina, sem que a mesma precise ser interrompida durante a usinagem e um acompanhamento instantâneo do corte, permitindo a prevenção da quebra e avarias.

Optou-se por usar um material de difícil usinabilidade (aço AISI/ABNT D6 ou VC 131, designação Villares Metals), onde o monitoramento, obviamente, se torna mais importante, porque o desgaste é muito rápido e o preço tanto do material, como da ferramenta de corte são muito elevados. A decisão de usar PCBN é porque é a mais indicada para usinar aços endurecidos (acima de 45 HRC – este está com 58 HRC).

Este aço tem aplicações típicas em: matrizes de corte, facas e tesouras de alto rendimento, ferramentas para cortes de chapas de aço, estampas para corte de precisão na indústria de papel, placas de revestimento de moldes para tijolos e ladrilhos, ferramentas para prensagem de pós-metálicos e materiais altamente abrasivos, guias para máquinas operatrizes, réguas para retificadoras, calibres, micrômetros e ferramentas em geral, que exige alta resistência à abrasão e retenção de corte. (Villares Metals, 2006)

OBJETIVOS

Este trabalho visa monitorar o processo de torneamento do aço VC131 (ABNT D6) endurecido via emissão acústica, potência (corrente do motor principal) e força de usinagem de modo a detectar falhas, quebra e desgaste da ferramenta de corte de PCBN, e relacionar com a integridade superficial (rugosidade) do material usinado. Pretende-se assim determinar qual dos sinais monitorados se relacionam mais fielmente à variação do desgaste das ferramentas de corte e à qualidade da usinada. O resultado deste trabalho permitirá que os usuários explorem efetivamente a ferramenta de corte até o seu limite máximo permissível

com segurança, sem perda de qualidade da peça, reduzindo os custos de produção e aumentando a eficiência do processo.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Torneamento

Ferraresi (2006) define torneamento como: “processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes”. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo. Quanto à forma da trajetória, o torneamento pode ser retilíneo ou curvilíneo (Figura 2.1).

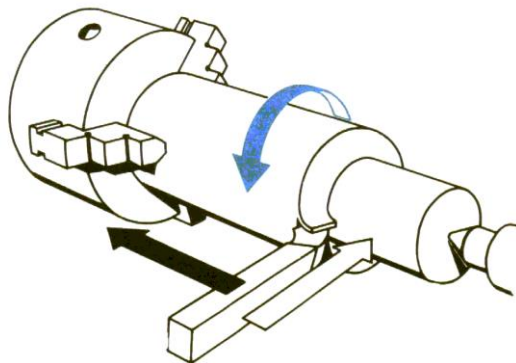


Figura 2.1 - Processo de torneamento cilíndrico

Torneamento retilíneo: Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea. O torneamento retilíneo pode ser: cilíndrico (externo, interno, sangramento axial), cônico (externo, interno), radial (faceamento, sangramento radial ou de perfil (radial ou axial).

Torneamento curvilíneo: Processo de torneamento, no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória curvilínea.

A Figura 2.2 apresenta os diversos tipos de torneamento.

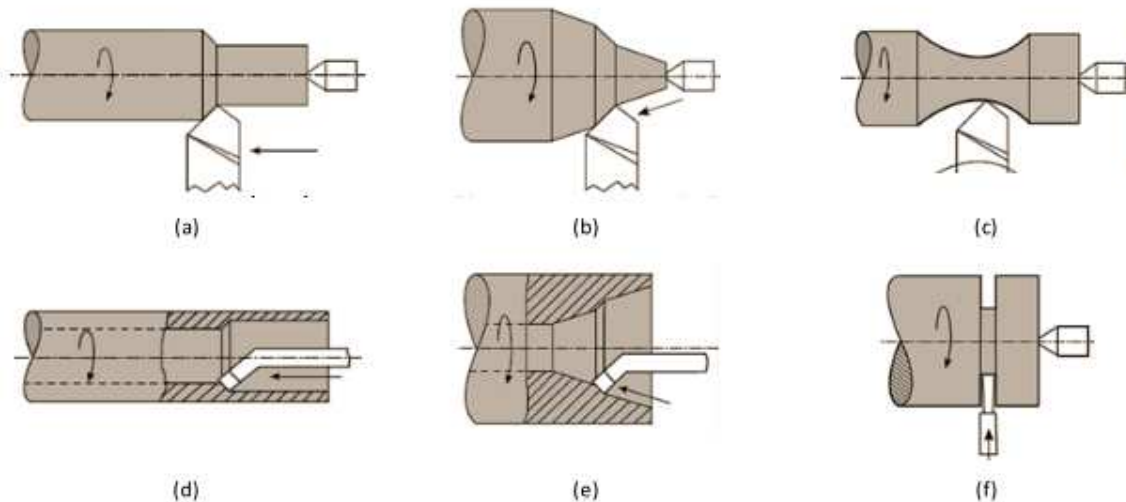


Figura 2.2 - Alguns processos de torneamento: (a) cilíndrico externo; (b) cônico externo; (c) curvilíneo; (d) cilíndrico interno; (e) cônico interno; (f) sangramento radial (FERRARESI, 2006)

Como acontece em todos os processos de usinagem, as operações de torneamento podem ser subdivididas em desbaste e acabamento. Na operação de desbaste, a principal preocupação é garantir uma elevada taxa de remoção do material, deixando as peças com a forma e as dimensões próximas da final. Na operação de acabamento, quando o sobremetal deixado pela operação de desbaste é removido, a qualidade final do componente é prioritária (MACHADO et al., 2015).

2.1.1 Variáveis do processo de usinagem

O processo de usinagem dos metais é estabelecido por uma grande quantidade de parâmetros e condições que influenciam no seu comportamento, tornando difícil seu monitoramento. A velocidade de corte, o avanço, a profundidade de corte, as características da ferramenta (geometria, material, revestimento) além do material da peça a ser usinada fazem parte destes parâmetros. Além disso, o comportamento do sistema máquina-ferramenta assim como as condições de trabalho são aspectos importantes que também afetam na qualidade do sinal adquirido.

Nos processos de torneamento, os parâmetros de corte e a geometria das ferramentas de corte determinam a qualidade da peça produzida (TRENT e WRIGHT, 2000) e podem ser identificados na Figura 2.3.

A partir da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte é possível determinar a taxa de remoção de material, usado para medir a eficiência da operação.

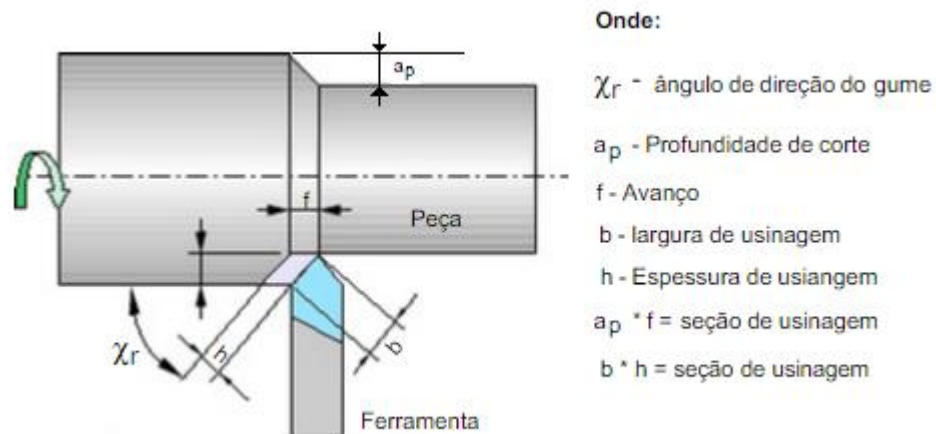


Figura 2.3 - Variáveis do Processo

A geometria da ferramenta de corte é um dos fatores de maior influência no desempenho da usinagem. A Figura 2.4 identifica os elementos que compõem uma ferramenta de corte, com destaque para a cunha cortante.

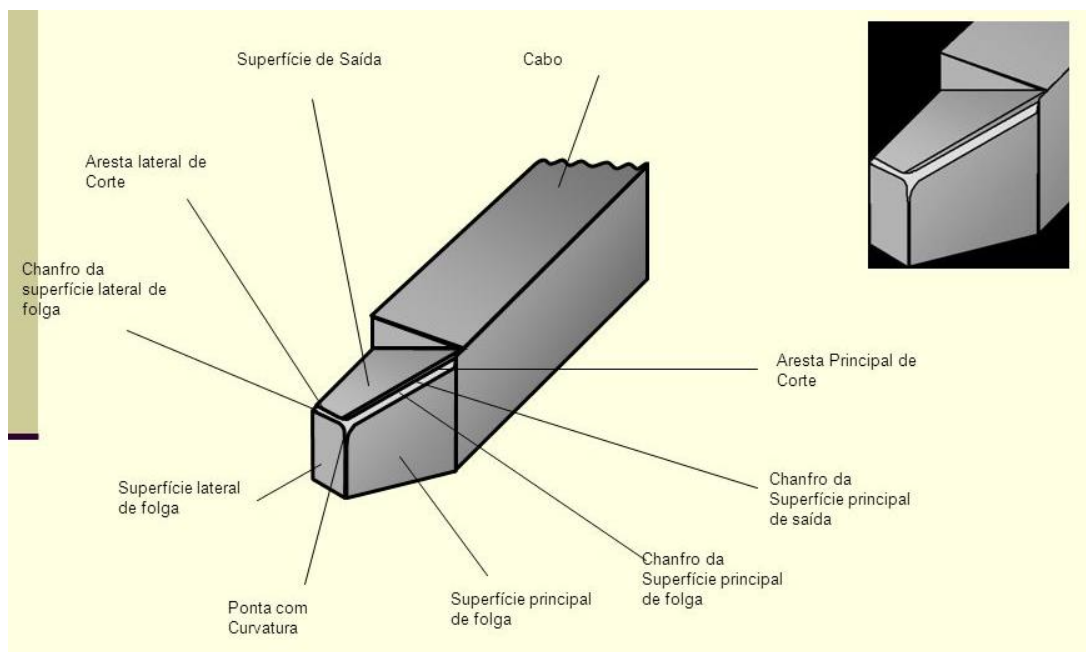


Figura 2.4 - Elementos de uma ferramenta de corte (ferramenta de barra) (CIMM, 2015)

Para cada par ferramenta/peça vai existir uma geometria de corte apropriada ou ótima. A geometria da ferramenta influencia na formação do cavaco, temperatura de corte, forças de usinagem, desgaste da ferramenta, qualidade final da peça, entre outros fatores.

2.2 Desgaste em ferramentas de corte

O desgaste em ferramentas de corte é amplamente estudado, pois todo material usinado gera um desgaste na ferramenta devido a esforços mecânicos, vibrações dos sistemas e atrito dinâmico entre peça/ferramenta/cavaco, sendo que, mais cedo ou mais tarde, essa ferramenta deve ser trocada.

Segundo Machado et al. (2015), estudar e entender o processo pelo qual as ferramentas se desgastam é muito importante, pois pode permitir ações coerentes e efetivas para reduzir a taxa desse processo, prolongando a vida da aresta de corte.

Denomina-se vida da ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzindo os tempos passivos), até perder a capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido (FERRARESI, 2006).

A vida da ferramenta de corte é importante, pois baseado nela determina-se as condições econômicas na usinagem dos metais. Condições de corte que levam a uma vida curta não são econômicas, pois aumentam o número de trocas e elevam o custo de produção, em contrapartida, baixas remoções de material fazem com que o processo fique mais lento, aumentando o tempo de produção.

Guo e Ammula (2005) utilizaram um sistema para monitorar danos na ferramenta na usinagem de aços endurecidos em tempo real, utilizando sinais de emissão acústica. Foi utilizado uma ferramenta de CBN para usinar o aço AISI 52100 de 52 HRC em um torno CNC ROMI-Bridgeport EZ-PATH SD e condições de corte: $V_c = 100$ m/min, avanço de 0,0508 mm/volta e profundidade de corte de 0,1 mm em usinagem a seco. Foi concluído que o sinal EA RMS, Bruto e análise de frequência são sensíveis ao desgaste da ferramenta assim como a possibilidade de detectar quebra.

Existem três formas de se levar uma ferramenta à destruição durante um processo de usinagem: a avaria, o desgaste e a deformação plástica (MACHADO et al., 2015). Os autores definem-nas como:

- Avaria: Fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lascamento ou trinca da aresta de corte. A quebra e o lascamento levam à destruição total ou à perda de uma quantidade considerável de material da aresta de forma repentina e imprevisível. A quebra é mais comum em materiais em ferramentas com baixa tenacidade, como as cerâmicas e os ultraduros. Já o lascamento depende também da tenacidade da

ferramenta, mas pode ocorrer até mesmo em ferramentas de aço rápido. A trinca promove a abertura de uma fenda no corpo da ferramenta de corte. As avarias podem ser de origem térmica ou mecânica.

- **Desgaste:** O desgaste em ferramentas é definido como mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material. Em tribologia define-se desgaste como sendo a destruição de uma ou ambas as superfícies que compõem um sistema tribológico, geralmente envolvendo perda progressiva de material. O desgaste ocorre de forma progressiva e em pequenas proporções, podendo ocorrer segundo vários mecanismos.

- **Deformação plástica:** Mudança geométrica da aresta de corte pelo deslocamento do material. Ela ocorre por cisalhamento devido às altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte. É mais comum ocorrer em ferramentas com resistência ao cisalhamento relativamente baixa e com maior tenacidade, como aço rápido, ligas fundidas e metal duro.

2.2.1 Formas de Desgaste

A ferramenta de corte é solicitada termicamente e mecanicamente durante a usinagem. Algumas formas de desgaste de naturezas distintas podem ser observadas na ferramenta de corte ao longo de sua utilização, são elas (MACHADO et al. 2015): desgaste de cratera, desgaste de flanco e desgaste de entalhe.

- **Desgaste de Cratera:** O desgaste de cratera ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito com o cavaco. O desenvolvimento deste tipo de desgaste está diretamente ligado à temperatura e à pressão e é aumentado juntamente com os parâmetros de usinagem, principalmente a velocidade de corte. Este tipo de desgaste não influencia diretamente na rugosidade ou na tolerância dimensional da peça, mas altera o ângulo de saída e o comprimento de contato cavaco-ferramenta. O crescimento do desgaste de cratera pode gerar a quebra da ferramenta, quando este enfraquece demasiadamente a cunha.

- **Desgaste de flanco:** O desgaste de flanco ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre a ferramenta e a peça, sendo este a forma mais comum de desgaste e ocasiona a deterioração do acabamento superficial da peça, pois modifica totalmente a aresta de corte original. Além disso, faz com que a peça mude de dimensão.

- **Desgaste de Entalhe:** O desgaste de entalhe ocorre nos dois extremos da largura de corte, na região de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça. Nestes extremos há possibilidade de acesso das condições atmosféricas, onde o oxigênio tem papel importante (TRENT e WRIGHT, 2000). Ele tem o formato da letra “V” e por isto é também conhecido como desgaste em “V”.

A Norma ISO 3685 (1993) define alguns parâmetros que são utilizados para medir o desgaste das ferramentas de corte. Os principais são:

K_T = profundidade de cratera

VB_B = desgaste de flanco médio

$VB_{B_{máx}}$ = desgaste de flanco máximo

VB_N = desgaste de entalhe

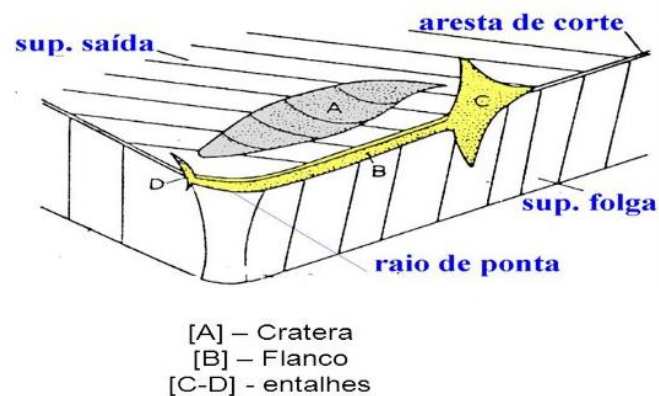


Figura 2.5 - Formas de Desgaste (adaptado de TRENT, 1982)

As formas de desgaste mais regulares e previsíveis são o desgaste de flanco e de cratera. Normalmente, as condições de corte empregadas na usinagem de metais proporcionam o crescimento destas formas de desgastes, principalmente o desgaste de flanco, que são dominantes para determinar o fim de vida das ferramentas de corte (FERRARESI, 2006).

Outras avarias também devem ser consideradas, como (MACHADO et al., 2015):

- **Deformação Plástica:** ocorre quando o material da ferramenta amolece devido às altas temperaturas juntamente com altas pressões em usinagem. A deformação na aresta de corte provoca deficiência no controle do cavaco e deterioração do acabamento da peça. O crescimento desta deformação pode causar o colapso da ferramenta. É evitada pelo uso de uma ferramenta com maior dureza a quente, ou pela mudança nas condições de usinagem (diminuição dos esforços e da temperatura) ou modificação na geometria da ferramenta.
- **Lascamento:** o lascamento é resultado da remoção de partículas maiores de uma só vez. Ocorre principalmente em ferramentas muito frágeis ou nas condições de força excessiva de

corte, corte interrompido e material da peça com inclusões duras. O lascamento prejudica o acabamento da peça e, se continua crescendo, provoca a quebra da ferramenta.

- Trincas: as trincas podem ser causadas pela variação da temperatura, neste caso de origem térmica, que se apresentam perpendicular à aresta; ou pela variação dos esforços mecânicos, principalmente quando são repetitivos, se apresentando paralelas à aresta. As trincas de origem térmica ocorrem porque a ferramenta se aquece durante a formação do cavaco, gerando temperaturas maiores na superfície do que no seu interior, o que promove uma dilatação desigual. Se a ferramenta não tiver boa condutividade térmica e baixo coeficiente de dilatação, pode não suportar este processo, abrindo, assim, uma trinca.

2.2.2 Curva de evolução do desgaste

Em usinagem, as ferramentas tendem a seguir um padrão de desgaste como mostra a Figura 2.6. O desgaste pode ser dado por qualquer um dos parâmetros que identificam as formas de desgaste: flanco, cratera ou entalhe (MACHADO et al., 2015).

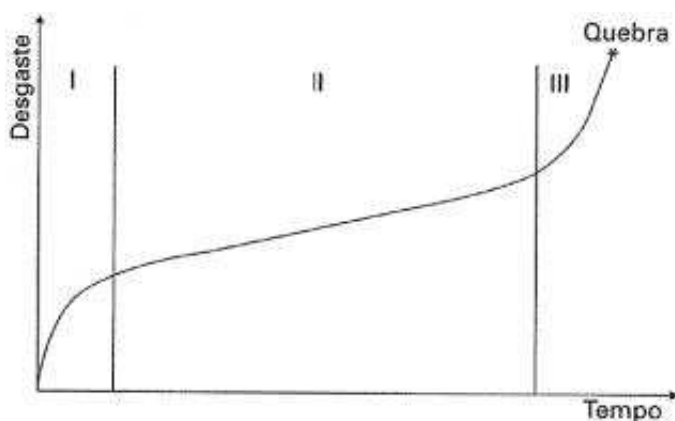


Figura 2.6 - Curva de evolução de desgaste da ferramenta de corte (FERRARESI, 2006)

Como pode ser observado na Figura 2.6, o desgaste pode ser dividido em 3 estágios (MACHADO, 2015). No primeiro estágio a ferramenta sofre um desgaste acelerado, natural de adequação ao sistema tribológico envolvido, como se a cunha cortante estivesse se acomodando ao processo, passando então a apresentar um desgaste cada vez menor com o passar do tempo, e uma primeira inflexão é observada no final deste estágio.

O estágio de número dois é caracterizado por uma taxa de desgaste constante ao longo do tempo. A ferramenta já se encontra adequada ao processo e os mecanismos específicos de desgaste operam em uma taxa constante

Logo após, ocorre uma nova inflexão, onde há uma nova aceleração no desgaste, aumentando acentuadamente a taxa, e promovendo, em um curto espaço de tempo, a quebra da ferramenta. Isto acontece porque o desgaste atinge níveis tão elevados que as temperaturas e tensões envolvidas irão promover, eventualmente, o colapso da ferramenta.

Assim, na prática, deve-se evitar a entrada no último estágio e o monitoramento do desgaste se mostra uma ferramenta que pode ajudar imensamente no processo de utilização das mesmas.

Um critério de fim de vida deve ser determinado, de forma a garantir produção com qualidade exigida, com manutenção da integridade da ferramenta de corte até o final, antes de ocorrer a quebra.

Os critérios que determinam o fim de vida das ferramentas de corte normalmente utilizados se baseiam nos seguintes fatores (FERRARESI, 2006).

- O desgaste da superfície de saída da ferramenta atinge proporções tão elevadas que se receia uma quebra da ferramenta de corte.
- Os desgastes atingem valores que fazem com que a temperatura da aresta de corte se aproxima da temperatura na qual a ferramenta perde o fio de corte
- Devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta, não é mais possível obter as tolerâncias dimensionais exigidas na peça.
- O acabamento superficial não é mais satisfatório
- O aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interfere no funcionamento da máquina.

No meio industrial, os critérios de fim de vida da ferramenta normalmente estão a cargo do operador que, ao temer a quebra da ferramenta e seus efeitos danosos, costuma trocá-la bem antes do desgaste chegar próximo da quebra. Como resultado, há um grande desperdício no uso das ferramentas.

2.2.3 Mecanismos de Desgaste em Ferramentas de Corte

Quando se fala em desgaste e vida da ferramenta é fundamental entender os mecanismos que agem na mesma e as fazem se desgastarem. Na Figura 2.7 é apresentado um diagrama clássico dos mecanismos de desgaste.

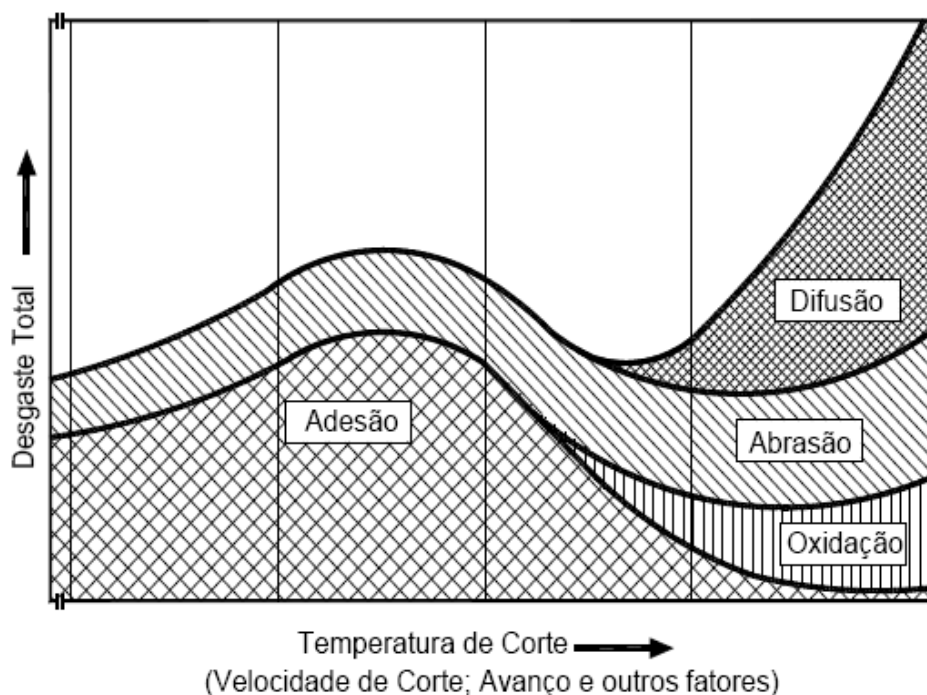


Figura 2.7 - Mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte (KÖNIG e KLOCKE, 1997, apud MACHADO et al., 2015)

Observam-se quatro mecanismos possíveis de atuarem durante a usinagem para promover o desgaste na ferramenta de corte: difusão, abrasão, adesão e oxidação.

Difusão

Esse mecanismo envolve a transferência de material no nível atômico e é fortemente dependente da temperatura, do tempo e da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de fluxo (zona secundária de cisalhamento) (MACHADO et al., 2015). Quanto maior for a afinidade química, a temperatura, o tempo de contato e o nível de agitação atômica, maior será a atividade de difusão entre a ferramenta e o cavaco.

As condições físicas sobre a zona de corte são favoráveis à difusão, o que comprova a existência de um gradiente de velocidade na zona de fluxo, onde na interface com a ferramenta a velocidade é zero, garantindo o tempo suficiente para que haja difusão.

Este mecanismo de desgaste atua tanto na superfície de saída como na superfície de folga, e a taxa de desgaste irá aumentar com todos os parâmetros de corte que tem relação com o aumento de temperatura, como é o caso da velocidade de corte e do avanço. Como o desgaste se desenvolve no material da ferramenta em nível atômico, a superfície desgastada tem como característica ser uma superfície com aspecto liso ou espelhado (MACHADO et al., 2015).

Abrasão

O desgaste abrasivo ocorre devido à presença de partículas duras no material da peça que podem estar soltas entre as duas superfícies com movimento relativo (abrasão a três corpos) ou pertencendo a uma das superfícies (abrasão a dois corpos) (MACHADO et al., 2015)

Como a usinagem se dá justamente através do movimento relativo entre dois corpos (peça/cavaco e cavaco/ferramenta), a presença de partículas duras ou a formação dessas partículas durante a usinagem podem promover o desgaste abrasivo. As partículas abrasivas podem ser provenientes tanto da peça, quanto da própria ferramenta. Precipitados duros (óxidos, carbonetos, nitretos ou carbonitretos) provenientes da peça ou do cavaco poderão dar origem ao desgaste (FERRARESI, 2006).

Tanto o desgaste de flanco como o de cratera podem ser gerados por abrasão, porém ela é mais significativa no flanco, pois a superfície de folga atrita com um elemento rígido, a peça, enquanto na saída, a superfície atrita com um elemento flexível, o cavaco.

É importante salientar que quanto maior o teor de carbono na peça usinada, maior o desgaste abrasivo, pois a dureza da peça e a formação de carbonetos duros deixam o processo mais abrasivo (TRENT e WRIGHT, 2000).

Adesão

Durante a usinagem em velocidades relativamente baixas, as temperaturas também são baixas e os desgastes baseados no cisalhamento e na difusão não acontecem. O fluxo de metal através da aresta de corte é mais irregular, menos contínuo e laminar. Além disso, dependendo do material da peça, a APC pode ser formada e isso reduz a continuidade do contato. Sobre essas condições uma grande quantidade de fragmentos, de tamanho microscópico, pode ser arrancada intermitentemente da superfície da ferramenta, e esse mecanismo é chamado de *attrition* (TRENT e WRIGHT, 2000).

Esse mecanismo de desgaste tem por característica a produção de superfícies ásperas, já que o processo se dá em nível granular. Além disso, a granulação fina desfavorece seu aparecimento ou crescimento (TRENT e WRIGHT, 2000).

Oxidação

O aquecimento da ferramenta junto a aresta de corte provoca a formação de uma película de oxido na superfície de saída e próximo a aresta lateral de corte. Só ocorre se a temperatura for suficientemente elevada e se houver a presença de oxigênio na região aquecida (MACHADO et al. 2015).

O oxigênio forma um óxido de W-Co-Fe com volume molar maior que a estrutura primitiva, formando pequenas protuberâncias.

A oxidação das ferramentas é responsável pela deterioração da aresta lateral de corte, fazendo com que piore rapidamente o acabamento superficial das peça usinadas e, portanto, reduz drasticamente a vida da ferramenta (FERRARESI, 2006).

Godoy et al. (2014) estudaram o torneamento interrompido e contínuo no acabamento de aços endurecidos utilizando ferramentas de corte de cerâmica e PCBN. Foi utilizado um torno CNC de 15 kW de potência no motor principal para usinar o aço AISI 4340 com 56 HRC de dureza. As ferramentas de corte utilizadas foram CBN7015, CBN7025 e CC670, todas da Sandvik Coromant. Como condições de corte foram utilizadas: avanço de 0,08 mm/rot, profundidade de 0,15 mm e velocidade de corte 150-270 m/min. Os autores consideraram como variáveis de saída o desgaste de flanco, os mecanismos de desgaste avaliados em um microscópio eletrônico com EDS, e a rugosidade Ra. Os principais resultados que os autores encontraram para as ferramentas de CBN são:

- Os principais mecanismos de desgaste foram abrasivo, para as velocidades mais baixas e difusivos para as velocidade mais alta.
- O desgaste de flanco nas ferramentas de CBN foram menores que as ferramentas de cerâmica tanto nas baixas como nas altas velocidades de corte.
- O desgaste na ferramenta de CBN não causaram grandes variações na rugosidade, exceto no fim de vida.

Ånmark et al. (2015) estudaram o efeito da composição química de aços endurecidos no desgaste da ferramenta na usinagem utilizando PCBN como ferramentas de corte. Foram utilizados quatro materiais com dureza variando entre 550 e 800 HV, usinados em um torno CNC OKUMA LB 300-M com condições de corte: $f = 0,1$ mm/rota $a_p = 0,1$ mm e $V_c = 170$ m/min. Como principais conclusões encontradas pelos autores, os aços com maiores teores de enxofre deram vida maior para a ferramenta; os principais mecanismos de desgaste foram o abrasivo e o difusivo. A degradação química ocorre na superfície da ferramenta de corte durante o contato com uma camada de transferência relativamente estagnada de material da peça de trabalho, o que gera um desgaste mais severo na ferramenta.

Em estudo do desgaste de ferramentas de PCBN e CBN, Saketi et al. (2015) acreditam que os danos observados sejam o resultado da deformação plástica local causada por fragmentos de PCBN arrancados, principalmente grânulos de cBN, sendo puxados para fora da aresta de corte. Além disso, o fato de as regiões de desgaste do flanco e da cratera exibirem superfícies desgastadas relativamente suaves com muito poucos sinais de qualquer desgaste preferencial dos constituintes da fase material PCBN, isto é, a fase CBN e a fase

ligante metálica, indica a presença de desgaste triboquímico em combinação com adesivo e abrasivo, desgaste em uma escala muito fina

2.3 Acabamento Superficial de Peças Usinadas

Dentre os fatores que exercem influência sobre o desempenho dos componentes mecânicos, destacam-se o material utilizado e as condições da superfície. Durante o processo de usinagem, a superfície gerada pode sofrer alterações, as quais têm influência sobre as propriedades do material. Devido à variedade de processos de usinagem, é fundamental a avaliação dos diferentes processos e condições de corte inerentes, de modo a selecionar a operação mais adequada para fabricação.

A qualidade de uma superfície gerada no processo de usinagem é importante, para satisfazer os requisitos funcionais do componente final, e também para garantir a longevidade e a confiabilidade dos produtos, nos mais diversos tipos de indústria.

Determinar um plano de execução, com base em requisitos técnicos e econômicos, de forma a garantir produtos com as especificações técnicas necessárias e viáveis em termos de custo, é de extrema importância frente a grande concorrência vivida pelos meios produtivos na atualidade (SANTOS, 2001).

Griffiths (2001) define: “integridade da superfície (IS) é o conjunto das características topográficas, mecânicas, químicas e metalúrgicas de uma superfície manufaturada e suas relações com o desempenho funcional”. Assim, a integridade superficial pode ser dividida em acabamento superficial (topografia da superfície) e alterações sub-superficiais.

Geralmente especificado em projetos mecânicos, o acabamento superficial, representado principalmente pela rugosidade, consiste em um conjunto de micro irregularidades da superfície usinada, que tendem a formar um padrão ou textura característicos em uma superfície.

A rugosidade de uma peça depende de inúmeros fatores, dentre eles estão o processo de formação do cavaco, vibrações do sistema, aresta postiça de corte, atrito da superfície de incidência da ferramenta com a peça e, principalmente, do avanço e do raio de ponta da ferramenta.

A importância da rugosidade justifica-se pela sua relação com diversos fatores como: precisão e tolerância dimensionais, resistência à corrosão, resistência à fadiga, escoamento de fluidos, lubrificação, transferência de calor, superfícies que irão receber pintura, superfícies que sofrem atrito, entre outros. Assim, a qualidade da superfície usinada depende da rugosidade, da forma geométrica e de defeitos intrínsecos do material como: inclusões,

trincas, bolhas, além de outros defeitos gerados pelo processo de usinagem. (MACHADO et al., 2015)

2.3.1 Parâmetros de rugosidade

Parâmetros de rugosidade são usados para avaliar o acabamento superficial de um componente. Segundo Machado et al. (2015) a rugosidade pode ser avaliada por diversos parâmetros, que podem ser classificados em:

- **Parâmetros de amplitude:** determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales ou pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície.
- **Parâmetros de espaço:** determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície.
- **Parâmetros híbridos:** determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço.

Alguns parâmetros são utilizados de forma a medir e avaliar a rugosidade de diferentes formas, como mostra a tabela abaixo.

Tabela 2.1 - Principais parâmetros de rugosidade de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002)

Símbolo	Nome	Definição
Ra	Desvio aritmético médio do perfil avaliado	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
Rq	Desvio médio quadrático do perfil avaliado	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
Rt	Altura total do perfil avaliado	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade do vale do perfil no comprimento de avaliação.
Rz	Altura máxima do perfil avaliado	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.
Rsk	Fator de assimetria do perfil avaliado (skewness)	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e Rq ao cubo, no comprimento de amostragem.
Rku	Fator de achatamento do perfil avaliado (kurtosis)	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de Rq à quarta potência no comprimento de amostragem.

Dentre estes parâmetros, o mais utilizado é a rugosidade média R_a , que consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento em relação à linha média (Figura 2.8). Pode ser representada como a altura de um retângulo com área igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e a linha média, e comprimento igual ao percurso de medição.

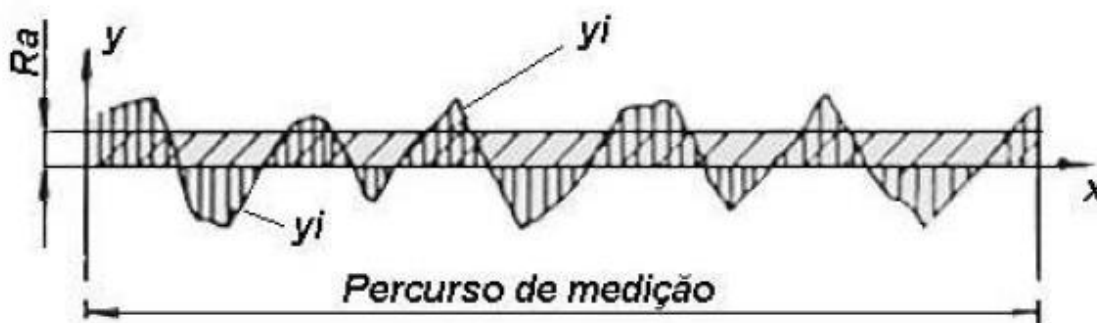


Figura 2.8 - Rugosidade R_a (MITUTOYO, 2015)

Devido à facilidade de medição, a rugosidade média é bastante empregada em controles contínuos em linhas de produção para avaliação da rugosidade em superfícies de pouca responsabilidade que apresentam sulcos bem definidos, como peças torneadas, por exemplo.

2.3.2 Parâmetros que afetam a rugosidade

- Avanço e raio de ponta da ferramenta

Estes fatores são os que mais influenciam a rugosidade, de tal forma que o parâmetro de rugosidade máxima ($R_{\text{máx}}$ ou R_t) teórico, para um processo de torneamento, pode ser determinado por meio da Equação 1.

$$R_{\text{max}} = \frac{f^2}{8r} \quad r > f \quad (1)$$

A Figura 2.9 demonstra essa relação, onde se observa as marcas de avanço e a influência positiva do raio de ponta.

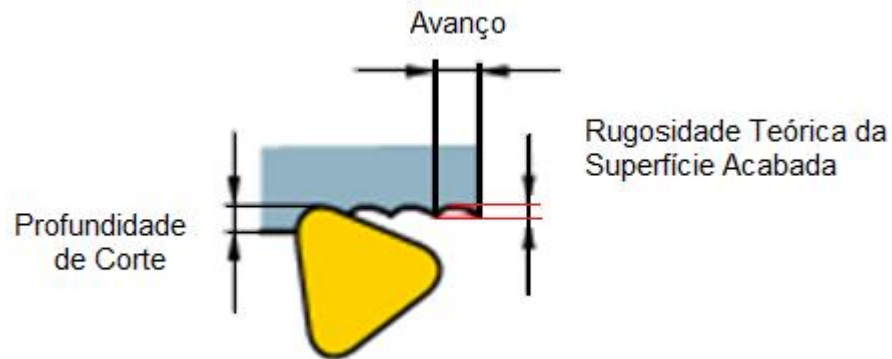


Figura 2.9 - Rugosidade em função do avanço e do raio de ponta (MITSUBISHI, 2015)

- Velocidade de corte

Para baixas velocidades há a formação da aresta postiça de corte (APC) que prejudica muito o acabamento superficial. Em altas velocidades a APC desaparece e, devido a um aumento na temperatura de usinagem, a redução das forças de cisalhamento provoca uma melhoria no acabamento. É importante lembrar que, em altas velocidades, o motor que gira o eixo árvore pode gerar vibrações, prejudicando o acabamento.

- Geometria da ferramenta

Os componentes da ferramenta que mais afetam a rugosidade são:

- Ângulo de saída: quanto maior, menores as forças de usinagem e vibrações, e menores os danos causados por este ângulo no acabamento superficial.
- Ângulo de folga: quando menor que 5° , acarreta um aumento nas forças de corte, cujo efeito é negativo para o acabamento. Além disso, o atrito entre a superfície usinada e a superfície de folga tende a imprimir na peça o perfil de desgaste da ferramenta de corte. Isso dificulta a saída de fragmentos da aresta postiça de corte (quando houver), que tendem a aderir na peça.
- Raio de ponta de ferramenta: Como já falado anteriormente, junto com o avanço é o parâmetro mais influente na rugosidade. A Equação 1 prevê o menor parâmetro de rugosidade possível de ser obtida no torneamento (rugosidade teórica), pois considera apenas os benefícios do aumento do raio de ponta da ferramenta. O aumento do raio de ponta a partir

de determinado ponto crítico acarreta o crescimento das forças de usinagem e vibrações, afetando de forma negativa a rugosidade.

Outros fatores também podem influenciar a rugosidade como as vibrações do sistema máquina/ferramenta/peça, o fluido de corte utilizado, o modo de fixação da peça e da ferramenta, o desgaste da ferramenta de corte e a própria composição do material da peça usinado.

2.3.3 Medição de rugosidade

Existe um grande número de técnicas disponíveis para a análise da integridade superficial. Entretanto, considera-se que é suficiente dispor de um número mínimo de dados, que podem ser complementados com análises posteriores. A integridade superficial pode ser qualificada através de parâmetros como rugosidade, análise macroscópica, análise microscópica, dureza, ensaios não destrutivos, medição de tensões residuais, resistência a fadiga, ensaios de tração, dentre outros (TRENT e WRIGHT, 2000).

A forma mais comum de medir a rugosidade é utilizando um aparelho chamado Rugosímetro, que é simples e de baixo custo, se comparado a alguns métodos de medição sem contato. O rugosímetro consiste em um apalpador com ponta de diamante que percorre uma linha retilínea de distância previamente estabelecida. O deslocamento vertical é percebido por um sensor piezoelétrico que o converte em tensão, sendo amplificado e convertido numericamente.

O raio do apalpador deve ser considerado, pois quanto maior o raio, menor é a precisão. O raio funciona como um filtro, suavizando os picos e vales diminuindo a exatidão do instrumento.

“A medição de rugosidade pode ser realizada sem contato, isto é, pode ser feita por meio de uma sonda óptica que incide raios infravermelhos sobre a superfície da peça e, em seguida, detecta a dispersão dessa radiação por meio de uma matriz de fotodiodos. A intensidade da dispersão é calculada e então correlacionada com os conhecidos parâmetros de rugosidade” (MACHADO et al., 2015).

2.3.4 Integridade superficial em aços endurecidos

A usinagem de aços endurecidos normalmente produz uma rugosidade muito baixa, dependendo dos parâmetros de corte, do material da peça e do desgaste da ferramenta. Isto se deve ao fato de normalmente envolver altas velocidades e temperaturas de corte,

juntamente com uma baixa profundidade de corte. No torneamento de aços endurecidos, dificilmente ocorre a formação de aresta postiça, por causa da baixa ductilidade do material da peça e da alta temperatura de corte, como resultado, a aresta de corte é transferida para a superfície com razoável precisão (COSTA, 1993).

Além destes fatores, também é comum a aparição da camada branca, que é uma camada dura que se forma em materiais ferrosos sobre variadas condições de corte. Ela pode ser originada a partir da formação do cavaco e pode ser vista somente através da microscopia óptica. Além disso, essa camada influencia na resistência à fadiga da peça, bem como no comportamento da mesma quando submetida ao atrito, afetando significativamente o desempenho do componente usinado (BOSHEH e MATINVEGA, 2005).

A usinagem de aços endurecidos, devido à deformação plástica na formação do cavaco, envolve altas pressões, temperaturas, deformações e taxas de deformação. A superfície da peça está sujeita a mudanças metalúrgicas, que podem proporcionar a “camada branca”, que tem a influência significativa na fadiga, na corrosão sob tensão e no desgaste das peças. (POULACHON, 2003)

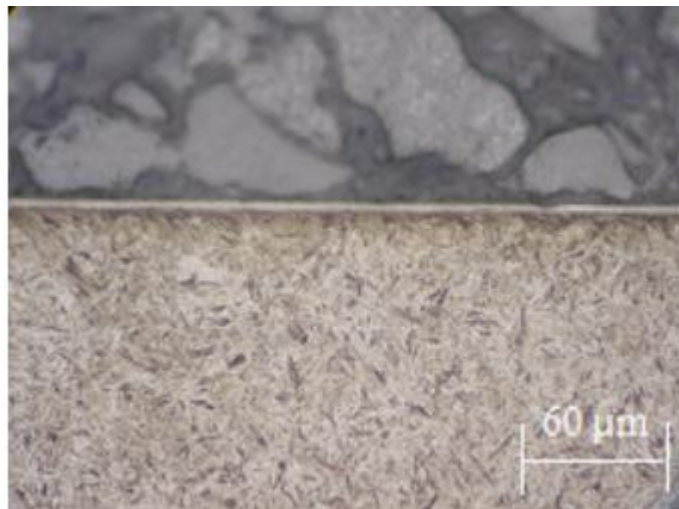


Figura 2.10 - Camada Branca (JÚNIOR, 2009)

2.4 Monitoramento do desgaste de ferramenta de corte

A crescente busca da indústria em trabalhar com segurança e reduzir custos juntamente com necessidade de manutenção da qualidade dos produtos para competir no mercado mundial geram grande interesse no monitoramento dos processos. Nesse sentido, foram desenvolvidos sistemas de monitoramento, com o intuito de detectar e corrigir falhas, minimizando a necessidade de paradas e prevendo o que ocorre durante o processo.

O monitoramento da usinagem consiste em adquirir dados que podem ser extraídos durante ou após a usinagem, como rugosidade, desgaste da ferramenta, força, potência, e emissão acústica. O monitoramento de um processo de usinagem pode ocorrer por meio de controle de algumas variáveis, entre elas podem-se citar a máquina, a dinâmica do processo, as ferramentas de corte, a qualidade da peça, entre outros, a fim de se obter o melhor desempenho do sistema (BYRNE et al., 1995).

Um ponto crítico para a manufatura não assistida é a incapacidade de detectar o momento exato de troca da ferramenta, considerando sua máxima utilização e respeitando os limites de qualidade da peça. Indústrias que não possuem detecção automática do estado da ferramenta utilizam basicamente duas estratégias para a substituição de ferramentas dadas como desgastadas, (i) troca por falha ou desgaste excessivo ou (ii) troca programada após a usinagem de um número pré-estabelecido de peças acabadas. Normalmente, as trocas são programadas baseado na qualidade da peça, que deve ser monitorada continuamente.

Com o crescente aumento dos sistemas de manufatura e, portanto, da competitividade, surge a necessidade de melhorias no processo, em que a detecção e correção de falhas que ocorrem durante a fabricação podem contribuir neste sentido. Para tanto, torna-se de extrema importância o monitoramento do processo de usinagem para a otimização da vida da ferramenta de corte e prevenção da quebra, assim diminuindo o custo de produção.

Para que um sistema de monitoramento alcance sucesso em sua implementação, ele deve apresentar como características principais: ser confiável, ser o menos intrusivo possível, possuir a capacidade de operar em campo e ser de baixo custo. O sistema deve medir apenas o fenômeno que se deseja verificar, garantindo que não haja interferências externas, sem interferir no funcionamento da máquina na qual está montado.

Métodos de monitoramento do desgaste de ferramenta de corte

Existem vários métodos para programar o monitoramento nos processos de usinagem, normalmente divididos em (DAN e MATHEW, 1990):

- Monitoramento direto: método em que a grandeza a ser monitorada é medida diretamente, utilizando sensores óticos, equipamentos de medição de geometria e condição de desgaste da ferramenta, entre outros. A medição do desgaste por meio de um microscópio ou ainda a qualidade superficial de uma peça por meio de um rugosímetro são bastante comuns em usinagem, porém o processo precisa ser interrompido para a medição. Por outro lado, uma vez que a variável é medida diretamente, não sofre interferência de outros parâmetros.

• Monitoramento indireto: método em que outro parâmetro é medido e relacionado com o parâmetro a ser monitorado, para a tomada de decisão. Por exemplo, para monitorar o desgaste de uma ferramenta de corte poderia ser utilizada a potência de corte, o sinal de emissão acústica ou as componentes da força de usinagem, já que essas respostas do sistema estão intimamente ligados ao desgaste da ferramenta. As grandezas são adquiridas em tempo real, enquanto o processo esteja acontecendo, sem a necessidade de interrupção para a medição de qualquer outro parâmetro e, devido a isso, é o sistema que vem merecendo maior atenção acadêmica e industrial, pois há um relevante ganho de produtividade e eficiência.

Encontra-se na tabela 2.2 a classificação e característica de alguns dos principais sistemas de monitoramento em desenvolvimento acadêmico e industrial.

Tabela 2.2 - Métodos de monitoramento (adaptado de DAN e MATHEW, 1990)

MÉTODO	PROCESSO	MEDIDA	SENSOR
Direto	Ótico	Forma ou posição da ponta da ferramenta	Microscópio
	Radioatividade	Tamanho das partículas de radioatividade	Espectrômetros medidores de radioatividade
	Dimensão da peça	Dimensão da peça	Micrometros e transdutores eletromagnéticos
Indireto	Forças de usinagem	Variação de força	Dinamômetros
	Temperatura	Variação de temperatura	Termopares, pirômetros óticos
	Potência	Variação da potência ou da corrente	Amperímetros e voltímetros
	Emissão acústica	Variação da pressão de onda de energia	Transdutor piezoelétrico
	Rugosidade	Variação da rugosidade superficial	Rugosímetro transdutor ótico
	Vibração	Variação da vibração do sistema peça ferramenta	Acelerômetro

2.4.1 Monitoramento via força de usinagem

Conhecer e estudar a força que age na ferramenta de corte são importantes, pois, além de ser levada em consideração no projeto das máquinas ferramentas e de seus elementos, permitem estimar a potência requerida para executar o corte. A força de usinagem pode ser responsável direta pelo colapso da ferramenta de corte por deformação plástica da aresta, além de influenciar no desenvolvimento de outros mecanismos e processos de desgaste. Ela pode também representar um índice de usinabilidade, além de poder ser usada como parâmetro para controle adaptativo do processo (MACHADO et al., 2015).

Dessa forma é possível imaginar a utilidade de um monitoramento das forças presentes no processo de usinagem. Afinal, através desse monitoramento é possível avaliar se as forças estão dentro da faixa permissível para a máquina-ferramenta, se há alguma alteração inesperada durante o processo, ou ainda avaliar a condição de corte de uma ou de várias ferramentas.

É fácil analisar a relação entre desgaste da ferramenta e as forças de usinagem assim como medir as forças durante o processo. A força de usinagem se divide em três componentes: força de corte, força de avanço e força passiva. Estes componentes podem ser identificados na Figura 2.11.

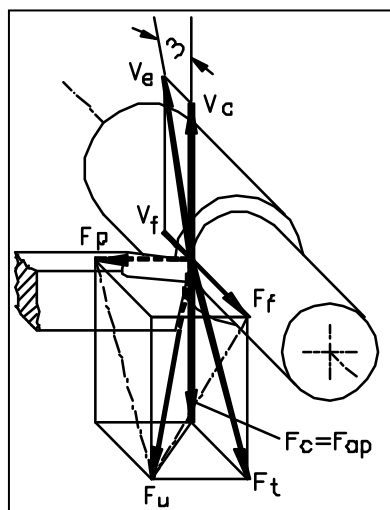


Figura 2.11 - Força de usinagem e suas componentes no processo de torneamento (FERRARESI, 1977)

O dinamômetro é o equipamento usado para a medição das componentes da força de usinagem, sendo o mais eficiente, aquele que utiliza cristais piezoelétricos, que possuem a propriedade de, quando comprimidos ou expandidos, gerar uma tensão elétrica proporcional à força. Um dinamômetro deve ter sensibilidade compatível com o processo, rigidez, exatidão

de forças, rapidez de resposta para detectar variações com o tempo e insensibilidade quanto à variação de temperatura e umidade.

A maior desvantagem da utilização de dinamômetros para a medição de força é a intrusividade do equipamento devido a sua dimensão, sua posição junto à ferramenta e o cabeamento necessário.

Vários fatores influenciam a força de usinagem, dentre eles pode-se destacar a evolução dos desgastes de flanco e cratera que ocorre na ferramenta durante o processo de usinagem. O desgaste de flanco contribui sempre para aumentar os esforços de usinagem, já que a evolução do mesmo contribui para a diminuição do ângulo efetivo de folga. Já o desgaste de cratera provoca alterações na cunha da ferramenta de modo a aumentar o ângulo de saída, o que pode acarretar na diminuição dos esforços de corte (MACHADO et al., 2015).

2.4.2 Monitoramento via potência de usinagem

Uma das maneiras de medir a potência efetiva de corte é transformando as forças de corte e avanço em potências, através da multiplicação de seus valores pela velocidade de corte e velocidade de avanço, respectivamente. Dessa forma a soma dos dois valores de potências resulta na potência efetiva de corte, que é a potência necessária para que seja realizado o corte (MACHADO et al., 2015).

A soma de todas as potências envolvidas no processo de corte fornece a potência mecânica útil (W) necessária para ocorrer a usinagem. Como a velocidade de corte é bem maior que a velocidade de avanço, pode-se desprezar esta última e considerar esta potência útil como sendo igual a potência de corte (FERRARESI, 1977).

Durante o processo de corte, a energia consumida na unidade de tempo pelo motor principal aumenta à medida que a ferramenta se desgasta, logo, é possível monitorar a vida da ferramenta através da análise do comportamento dos sinais elétricos do motor da máquina. Pode-se afirmar ainda que este processo é não intrusivo, ou seja, não apresenta qualquer interferência considerável sobre o funcionamento normal da máquina ferramenta.

O sistema de medição que tem se destacado para o monitoramento de potência é a utilização de sensores de efeito hall, devido a sua precisão, alta frequência e facilidade de aquisição de sinais. Consiste em sensores com a sensibilidade a alterações eletromagnéticas geradas pela corrente que alimenta o motor. Este sinal é convertido em tensão elétrica, que necessita ser filtrado, ampliado e convertido digitalmente para aquisição em computador. Este sistema permite que o monitoramento seja realizado em tempo real sem que seja necessária a interrupção do processo, com consequente ganho na produtividade.

2.4.3 Monitoramento via vibração do sistema

Durante o processo de usinagem ocorrem vibrações no sistema máquina-ferramenta-peça que podem ser acompanhadas para analisar a evolução do desgaste da ferramenta de corte.

Vibração é definida como o movimento de um sistema dinâmico em torno de sua posição estática. Para que um sistema mecânico vibre é necessário, e suficiente, que o mesmo tenha capacidade de armazenar energia cinética (que tenha inércia), energia potencial elástica (que seja flexível) e uma excitação externa dependente do tempo. Conseqüentemente, na prática é muito difícil evitar a vibração. Geralmente ela ocorre devido a efeitos dinâmicos de tolerâncias de fabricação, folgas, contatos, o atrito entre peças de um mecanismo e, principalmente, devido ao efeito de forças dinâmicas desequilibradas de componentes rotativos e alternativos de máquinas (DUARTE, 2005).

Com o desgaste da ferramenta, as forças de usinagem aumentam, provocando uma maior vibração no sistema máquina/ferramenta/peça. Vibrações mecânicas são geralmente resultado de movimentos periódicos de ondas, sendo que em usinagem as vibrações são produzidas por variações cíclicas nas componentes dinâmicas das forças.

A vibração do sistema sofre influência de alguns fatores, como por exemplo, o material da peça, levando-se em consideração a dureza e o limite de resistência, tendendo a aumentar com a velocidade de corte, a profundidade de usinagem e com os ângulos e raio de ponta da ferramenta. Além disso, pode ser causada por eixo desbalanceado, defeito em um rolamento, engrenagens desgastadas, entre outros.

2.4.4 Monitoramento via emissão acústica

Entende-se por emissão acústica (EA) as ondas elásticas transientes geradas pela rápida liberação de energia de uma fonte ou fontes localizadas no interior do material sujeito a um estado de tensão. Essa energia liberada está associada com a redistribuição abrupta de tensões internas e como resultado há a propagação de uma onda de tensões através do material. Dentre as fontes relacionadas com EA, apenas a deformação plástica, principalmente pelo movimento de discordâncias, e fratura são significantes no processo de usinagem (RAVINDRA et al., 1997).

A emissão acústica tem sido uma das mais promissoras técnicas de monitoramento de sistemas de usinagem, tendo como vantagem a altíssima frequência envolvida (a banda de frequência chega a 1MHz), o que gera uma sensibilidade muito maior que qualquer outro sistema de medição, apesar de ser mais sensível a ruídos do sistema. A geração deste sinal

é intrínseca ao processo de deformação (corte, trinca quebra ou atrito) dos materiais, ou seja, a EA é gerada pelo próprio processo de deformação.

No processo de corte dos metais, a emissão acústica é gerada por diferentes fontes, sendo que as principais são o cisalhamento e a deformação plástica na zona primária de corte, o atrito entre cavaco e ferramenta e ferramenta e peça, a quebra do cavaco e sua colisão com a ferramenta e peça e a formação e propagação de trincas (BLUM & INASAKI, 1990).

A EA pode ser detectada por um sensor piezoelétrico de alta frequência, transformando as ondas de tensão elástica em sinal elétrico. Um sensor ideal possui uma curva de tensão por tempo idêntica à curva de amplitude do sinal, no ponto em que o sensor está localizado. Esta onda se propaga nos materiais com a mesma velocidade de uma onda acústica, velocidade do som, daí o nome emissão acústica.

Existem cinco possíveis fontes de emissão acústica em um processo de usinagem (Figura 2.12) e que podem ser identificadas em um processo típico de corte ortogonal (RANGWALA e DORNFELD, 1991):

1. Deformação plástica na zona primária de cisalhamento;
2. Deformação plástica na zona secundária de cisalhamento devido ao contato por aderência;
3. Atrito que ocorre na zona de escorregamento na superfície de saída da ferramenta;
4. Fratura do cavaco;
5. Atrito entre a ferramenta e a nova superfície da peça gerada.

A utilização da emissão acústica para o monitoramento de um processo é relativamente simples, o sinal é de fácil captação e muito sensível aos fenômenos que ocorrem no processo. Além disso, o sinal não consegue apenas detectar disfunções, mas também fornece informações valiosas sobre a ocorrência de anomalias na superfície das peças. Contudo, alguns problemas devem ser citados, como (INASAKI, 1998):

- Fixar o sensor na peça, nos processos onde a mesma está estática (fresamento, por exemplo) é relativamente simples, contudo tem a desvantagem de que o sinal de EA passa a não ser constante, pois a distância entre o local de corte (onde o sinal é gerado) e onde está o sensor varia. Dessa forma, o ideal é utilizar sensores cuja distância do ponto de corte varia o menos possível. Nos processos de torneamento o sensor é normalmente fixado no suporte da ferramenta, o mais próximo possível do inserto.

- Uma alta taxa de aquisição é requerida em um processo de monitoramento via sinal de EA, e isso faz com que a quantidade de dados a serem tratados seja enorme, provocando

dificuldades de armazenamento e processamento, além de aumentar o custo de aquisição, visto que o conversor A/D deverá ser mais eficiente. Devido a este problema, é comum trabalhar com o RMS ao invés do sinal bruto.

- Para que o sinal amostrado seja representativo do sinal real, seguindo o teorema de Nyquist (Shanon, 1949), é necessário que ele seja digitalizado com uma frequência que equivalha à pelo menos o dobro da frequência que se deseja. Por exemplo, caso queira trabalhar frequências de até 1000 kHz, será necessária a aquisição com uma taxa de 2000 kHz, aumentando ainda mais a quantidade de dados.
- Outra dificuldade está na questão da flexibilidade e confiabilidade do sistema de monitoramento, ou seja, um problema mais amplo, que atinge não só a emissão acústica. Transferir a técnica estudada em condições laboratoriais para a prática do chão de fábrica apresenta dificuldades. Sugere-se, portanto, que todo o estudo de implementação de um sistema de monitoramento seja feito no próprio chão de fábrica, o que é muito complexo.

2.5 Monitoramento da Rugosidade de Peças Usinadas

Apesar do estágio avançado da automatização envolvida nas linhas de produção, o monitoramento dos processos ainda está muito atrasado. O monitoramento do desgaste e do acabamento superficial permite aumentar a produção e reduzir custos, uma vez que reduz os tempos improdutivos e impede que trocas antecipadas de ferramentas de corte ocorram. O fim da vida da ferramenta é determinado quando o desgaste da mesma atinge valores previamente estabelecidos, os quais normalmente baseiam-se no limite de capacidade de produzir peças dentro dos padrões de qualidade (acabamento superficial e tolerância dimensional), determinados pelo projeto. Assim, a informação sobre a qualidade da peça está também relacionada ao estado de afiação da ferramenta.

O acabamento superficial pode ser classificado como ondulações e desvios micro geométricos, principalmente a rugosidade superficial. Esta última nada mais é do que irregularidades finas resultantes da ação inerente do processo de corte e deve ser estudada com detalhe para que o domínio do processo possa estar mais acessível. A rugosidade superficial é influenciada por vários parâmetros, principalmente pelas condições de corte (velocidade, avanço e profundidade de corte) e pela geometria da ferramenta (principalmente pelo raio de ponta). Vale ressaltar, que o acabamento superficial, de um modo geral, melhora quando: deflexões geradas por esforços de usinagem ou vibrações são pequenas; o raio de

ponta da ferramenta é grande; a ferramenta e a peça estão centradas; material da peça livre de defeitos; aresta de corte sem quebras; corte sem aresta postiça de corte (APC) (MACHADO et al., 2015).

A medida da rugosidade a partir de um rugosímetro é simples de ser realizada em laboratório, porém é lenta para ser feita em produção, podendo no entanto ser utilizada dentro de um controle estatístico de qualidade como um parâmetro adicional para verificação da funcionalidade dos sistemas de desgaste em tempo real.

A utilização da rugosidade como parâmetro indicador para o fim de vida da ferramenta é bastante utilizada na prática, pois no chão de fábrica o mais importante é a qualidade dos componentes fabricados. O desgaste causa variação na ponta da ferramenta, alterando assim a geometria da mesma e as condições de atrito, influenciando também os esforços envolvidos, incentivando outros fenômenos como vibração e fluxo lateral de cavacos.

2.5.1 Monitoramento da Rugosidade Via Potencia Elétrica

Braga (1992) realizou testes de desbaste em aço 1045 com ferramentas de metal duro sem revestimento e chegou à conclusão de que a corrente de armadura do motor principal pode ser um parâmetro confiável para estipular o critério de fim de vida da ferramenta, quando o objetivo é somente remover uma grande quantidade de material e não obter tolerâncias apertadas e bom acabamento superficial. Neste caso a determinação do fim de vida pela quebra da ferramenta foi muito mais eficaz que por critérios de desgaste de flanco. Outra conclusão apresentada foi a de que o aumento dos valores de corrente com o aumento do desgaste de flanco é muito mais sensível quanto maiores forem o avanço e a velocidade de corte.

2.5.2 Monitoramento da Rugosidade Via Vibração

Meola et al. (2002) realizaram a modelagem do acabamento superficial do processo de torneamento via monitoramento de vibrações. Foram realizados 42 testes no processo de torneamento do aço 1045, utilizando-se a ferramenta do tipo SNMG 120408 P45 e um torno MAX – II – 520 da IMOR de 5 kW. Tais testes foram efetuados a seco, utilizando-se sempre ferramentas novas, não havendo a necessidade de se medir o desgaste delas. O processo foi realizado com sete velocidades de corte diferentes para três avanços distintos e profundidade de corte constante ($a_p = 1$ mm). Foram feitas medidas de vibrações e da rugosidade média R_a . Foi concluído que o acabamento superficial no processo de torneamento pode ser monitorado com grande precisão via parâmetros de usinagem e medição das vibrações. Os

parâmetros de aceleração do porta-ferramenta mais correlacionados com a rugosidade superficial foram o nível de potência vibratória na banda de 1/3 de oitava centrada em 800 Hz, o fator de crista, o momento central de quarta ordem e a kurtosis. Um ajuste linear relacionando a rugosidade superficial com os parâmetros velocidade de corte, avanço e fator de crista da aceleração, resultou num erro de 2,5% entre os valores de Ra preditos e medidos, o que mostra a excelência do monitoramento.

Bonifácio e Diniz (1994) mostraram que o monitoramento da vibração da ferramenta de metal duro revestida é adequado para se estipular o fim de vida da mesma em processos de torneamento cilíndrico de acabamento em aço AISI 4340. Foi adquirido o sinal de vibração do porta-ferramenta e analisado no domínio do tempo por meio da raiz média quadrada (RMS) e no domínio da frequência pela transformada rápida de Fourier (FFT), sempre comparando com os valores de rugosidade que era utilizada como critério de fim de vida da ferramenta. Como resultados principais os autores encontraram:

- Os valores de fim de vida da ferramenta baseada em critérios de valores de rugosidade média ou critérios de sinais de vibração se mostraram similares.
- Por meio do monitoramento via vibração, pode-se determinar de modo satisfatório o momento de troca da ferramenta, usando o sinal RMS de vibração até 8000 Hz.

2.5.3 Monitoramento da Rugosidade Via Emissão Acústica

Frigieri (2013) propôs um método de monitoramento do processo de torneamento utilizando sinal acústico e modelos de misturas de gaussianas e coeficientes mel-cepstrais (MFCC) e concluiu que:

Os sinais acústicos apresentaram características capazes de parametrizar a rugosidade resultante do processo em 5 níveis diferentes. Foi possível extrair dois parâmetros do sinal (perfil de energia e MFCC), cada um com características diferentes. O MFCC apresentou a maior correlação com os valores de rugosidade medidas, apresentando desempenho superior ao modelo utilizando perfil de energia. A utilização do microfone como meio de captura de sinais para monitoramento mostrou-se eficiente comparando-se o custo do mesmo em relação aos sensores de emissão acústica (acelerômetros), considerando-se os resultados obtidos.

Pereira (2013) monitorou o acabamento superficial da peça através de emissão acústica na retificação centerless de passagem do aço ABNT 1035 e concluiu que é possível determinar parâmetros de monitoramento do processo de retificação centerless via EA. Foi observado que o sinal de EA teve sua amplitude aumentada significativamente ao longo do

período estudado. Além disso, o monitoramento via EA permitiu identificar fontes de variação do processo, como por exemplo, vibrações causadas por folgas nas guias de entrada do rebolo de corte.

Guo e Ammula (2005) monitoraram, em tempo real, os danos da superfície usinada, por meio da emissão acústica no aço AISI 52100 de 62 HRC de dureza. Os parâmetros analisados foram o RMS, amplitude e o espectro de frequência, que foram correlacionados com o acabamento superficial. A Figura 2.13 apresenta um desenho esquemático do experimento desenvolvido pelo autor.

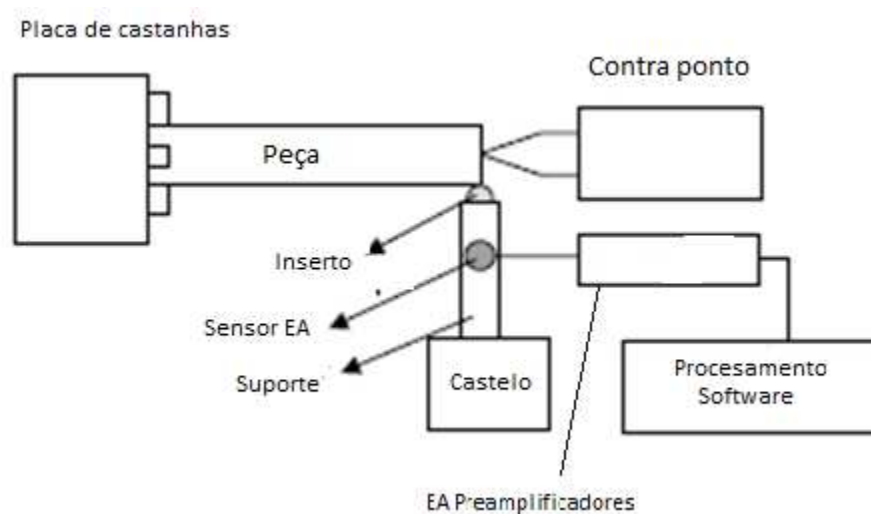


Figura 2.12 - Esquema de montagem do experimento (adaptado de GUO e AMMULA, 2005).

Foi concluído que EA RMS e a frequência são sensíveis à detecção de camada branca, assim como são bem relacionados com o desgaste da ferramenta e a rugosidade superficial. Além disso, danos na superfície induzem alta frequência de EA, assim como picos na amplitude do sinal.

2.6 Monitoramento no processo de torneamento

Como já comentado neste trabalho, são vários os meios de monitoramento da usinagem em laboratório e aplicação em meio industrial. Considerando a dificuldade do operador em detectar o momento de troca da ferramenta, fazendo-a de modo muito conservador, então a solução mais viável para o problema da substituição da ferramenta está no monitoramento indireto de parâmetros de usinagem utilizando sensores de emissão acústica, de vibração, de potência elétrica entre outros.

Em termos de concorrência, por um lado, existe a necessidade constante de aumentar a produtividade, reduzir custos, melhorar os processos, minimizar estoques e,

consequentemente, aumentar a competitividade. Por outro lado, as exigências do mercado com relação à qualidade da peça levam as empresas a buscar mecanismos que as assegurem. Isto está levando-as a aumentarem cada vez mais o seus índices de automação na manufatura.

Com o constante aumento da automação dos sistemas de manufatura, cresce a necessidade da detecção e correção de falhas que ocorrem durante os processos de fabricação. Para isso, recorre-se aos sistemas de monitoramento que permitem a detecção do efeito indesejável e a sua correção automática ou via operador.

Um sistema de monitoramento deve procurar realizar a substituição total ou parcial das atividades que o homem exerce no processo da manufatura, como por exemplo, as máquinas CNC já substituíram em grande parte o trabalho humano, mas ainda falta muito a se fazer. Em geral, funções como estabelecimento da troca da ferramenta, inspeção da peça e a troca da ferramenta seriam funções muito úteis para o processo de torneamento.

A Tabela 2.3 (TONSHOFF *apud* MATSUMOTO, 1998) mostra os diversos fatores da máquina, do processo, da preparação da ferramenta e da peça que podem ser monitorados. Nesta tabela, a expressão “dependente do tempo” significa que o monitoramento acontece em tempo real, isto é, durante a realização do processo, e “independente do tempo” é aquele efetuado quando o processo já não está ocorrendo mais.

Tabela 2.3 - Fatores monitorados nos processos de usinagem (TONSHOFF *apud* MATSUMOTO, 1998)

	Dependente do tempo	Independentemente do tempo
Máquina	- CNC – Controle - Colisão	- Precisão - Deformação térmica
Ferramenta	-Desgaste - Quebra - Aproximação	- Desgaste - Presença de ferramenta
Processo	- Vibração - Esforços - Temperatura	- Refrigerante
Preparação da ferramenta	-Afição	- Compensação e zeramento
Peça	- Dimensão - Forma - Rugosidade	- Dimensão da matéria prima - Material - Integridade da superfície

2.6.1 Sistemas Utilizados e grandezas monitoradas

Um sistema eletromecânico é constituído pela junção de subsistemas que são compostos por componentes tanto elétricos como mecânicos, de forma que cada um possa desempenhar sua função e comunicar entre si. Permitem por meio de uma entrada, a obtenção de uma resposta na saída do sistema de forma correspondente e desejável. Desta forma todo sistema pode ser representado por um diagrama de blocos, tornando sua visualização mais simples e compreensível aos olhos do leitor.

Os principais componentes de um sistema de monitoramento e controle são: sensor, condicionador, conversor A/D, modelo e estratégia. Com exceção da estratégia, todos os outros componentes fazem parte do sistema da aquisição. Sistema de aquisição de dados é qualquer arranjo que permita transformar os sinais analógicos em digitais, para permitir a interpretação e manipulação por sistemas digitais (BRUSAMARELO, 2010). A necessidade de automatizar a aquisição de dados de medição ocorre em muitas aplicações, tanto em atividades de pesquisa e desenvolvimento como no monitoramento contínuo e controle de

processos.

Na Figura 2.14 apresentam-se os elementos funcionais de um sistema de aquisição. Nela estão indicados os sensores e transdutores, os cabos de ligação, o condicionamento de sinal, o equipamento de aquisição, o computador e o software de aquisição. Cada elemento funcional vai afetar a exatidão do sistema total de medição e a correta escolha dos dados do processo físico que se pretende monitorar.



Figura 2.13 - Diagrama funcional de um sistema de aquisição

- Sensores

Os sensores e transdutores fornecem a ligação direta entre o mundo real e o sistema de aquisição de dados, convertendo sinais de grandezas físicas em sinais elétricos (tensões ou correntes) apropriados para os condicionadores de sinais e os equipamentos de aquisição de dados. Um sensor deve ser: confiável, barato, não intrusivo e deve suportar o ambiente industrial.

- Condicionadores

Os sinais elétricos gerados nos sensores e transdutores muitas vezes necessitam ser convertidos numa forma apropriada para o equipamento de aquisição, particularmente para o conversor analógico-digital (A/D). O condicionamento de sinal também é responsável pela alimentação de energia necessária para que o transdutor possa operar.

Os sinais de baixa intensidade devem ser amplificados para aumentar a resolução e reduzir o ruído. Para uma maior precisão, o sinal deve ser amplificado, de forma que a tensão máxima do sinal a ser condicionado coincida com a tensão máxima de entrada do conversor A/D;

As outras funções do condicionador são a filtragem e a linearização do sinal. O filtro é utilizado para remover sinais indesejados, como o filtro de ruídos, que serve para atenuar sinais de alta frequência que podem reduzir a precisão da medição. A linearização também é importante, pois muitos sensores tem uma resposta não-linear para os fenômenos a serem

medidos

- Conversores analógico/digital e digital/analógico

O conversor A/D é um hardware de medição responsável pelas entradas e saídas de sinais na cadeia de medida. Assim, ele pode executar qualquer uma das seguintes funções:

- entrada, processamento e conversão para o formato digital, usando conversores digitais (AD) de sinais analógicos, provenientes do meio de medição. Os dados após convertidos são transferidos para o computador para visualização, armazenamento ou análise;
- entrada de sinais digitais que contêm informação acerca de um sistema ou processo;
- processamento e conversão para um formato analógico, utilizando conversores analógicos (DA) de sinais digitais do computador para controlo de processos;
- saída de sinais de controlos digitais.

- Modelos

São funções matemáticas aplicadas para relacionar o parâmetro que se deseja medir com o parâmetro a ser relacionado feitas através do sinal de saída dos sensores. Como por exemplo, relacionar desgaste da ferramenta através de medição de força por um sensor piezoelétrico. Estas ferramentas podem ser simples e algébricas ou funções temporais complexas ou reconhecimento de padrões. Normalmente, estes modelos são utilizados pelo software de medição.

- Estratégias

São as decisões tomadas a partir das informações obtidas com o monitoramento, como desgaste e quebra da ferramenta de corte. O sistema pode tomar decisões como indicar alguma informação, acionar um alarme e/ou parar o processo.

Em usinagem, especialmente em processos de torneamento, as principais grandezas monitoradas são: força, potência do eixo arvore da máquina, vibrações e emissão acústica.

M. Neslusan et. al. (2015) estudaram a detecção da quebra da ferramenta durante a usinagem de aços endurecidos a baixas taxas de remoção a partir do sinal de emissão acústica - EA. Foi Usinado o aço ABNT 52100 de 62 HRC em uma máquina CNC Hurco TM8 com inserto de cerâmica preta ($Al_2O_3 + TiC$) e condições de corte V_c : 25–250 m/min ; $f = 0,09$ mm; $a_p = 0,25$ e $0,075$ mm. Foram utilizados dois sensores para a aquisição de emissão acústica, um para altas frequências e outro para baixas. Foram analisados os sinais EA RMS, EA bruto e a potência do sinal EA e comparados com a formação de cavaco juntamente com o desgaste da ferramenta. A Figura 2.15 mostra o esquema estabelecido assim como a posição dos sensores.

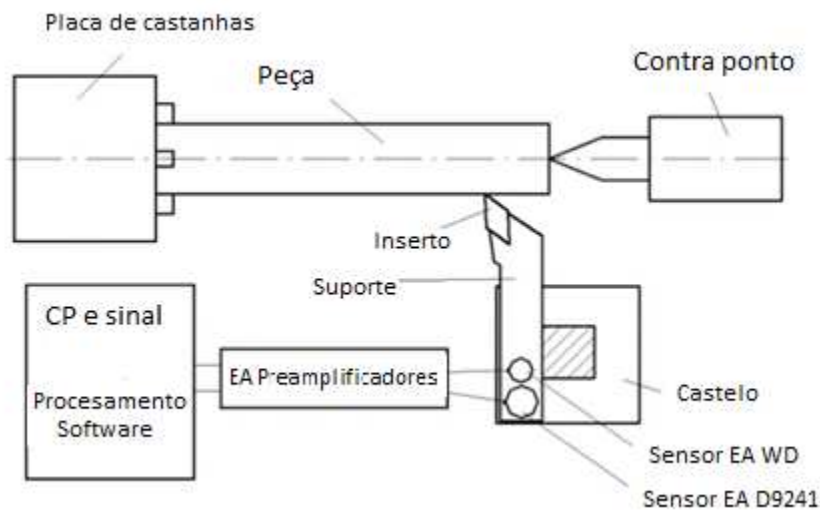


Figura 2.14 - Esquema estabelecido para a usinagem (adaptado de M. NESLUŠAN, 2013)

Como principais resultados foram encontrados:

- Técnicas de EA são sistemas muito sensíveis para o monitoramento de processos específicos na zona de corte. A formação de cavacos segmentados durante torneamento é um exemplo específico dos processos diferentes na zona de corte.
- Aplicação dos dois sensores EA com gamas de frequência diferentes permite a detecção dos diferentes processos na zona de corte.
- EA apresenta fraca sensibilidade para a detecção de diferentes fases do desgaste da ferramenta.
- Os sinais EA bruto refletem transformações no caráter do cavaco produzido

Y.B. Guo e S.C. Ammula (2005) utilizaram um sistema para monitorar danos a ferramenta na usinagem de aços endurecidos em tempo real utilizando sinais de emissão acústica. Foi utilizada ferramenta de CBN para usinar o aço AISI 52100 de 52 HRC em um torno CNC ROMI-Bridgeport EZ-PATH SD e condições de corte: $V_c = 100$ m/min, avanço de 0,0508 mm/volta e profundidade de corte: $a_p = 0,1$ mm, em usinagem a seco. Chegou-se à conclusão que o sinal EA RMS bruto e análise de frequência são sensíveis ao desgaste da ferramenta assim como a possibilidade de detectar quebra.

Haber et. al. (2004) realizaram uma investigação do monitoramento em processos de usinagem de alta velocidade em operações de fresamento. Para isso utilizaram sensores de vibração (aceleração), emissão acústica e dinamômetro analisando e comparando os sinais

brutos e no domínio da frequência. Em suas conclusões foi destacada a relevância das análises da força de corte e vibrações, sendo que as mesmas exibem o melhor desempenho das condições da ferramenta, sendo que o sinal de EA demonstra claramente a transição de ferramenta nova para gasta, sendo este muito sensível à mudanças nas condições das ferramentas.

Pigari A. C. (1995) estudou o monitoramento do desgaste da ferramenta no processo de torneamento utilizando sinais de emissão acústica. Utilizando um torno CNC ROMI COSMOS 30, usinou barras laminadas de aço ABNT 4340 com insertos de metal duro classe P35 com revestimento de TiC, TiN e óxido de alumínio. O sinal de EA foi adquirido por um sensor do tipo banda larga diferencial da Physical Acoustic Corporation, trabalhando em uma faixa de 100 KHz a 1 MHz. Os parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de corte foram variados a cada teste. O autor concluiu que o sinal de EA altera-se substancialmente quando a ferramenta chega ao fim de vida, em geral crescendo, portanto, é possível identificar o momento de troca da ferramenta implementando algum modelo matemático que identifique a variação da inclinação da curva de VRMS por percurso de corte.

Weis (1994) inspecionou 26 fabricantes de monitoramento das condições da ferramenta e 20 usuários num total de 1161 sistemas instalados em áreas industriais, especialmente em empresas do ramo automotivo. As principais finalidades desses sistemas era monitorar a quebra da ferramenta (50%), o desgaste (28%) e colisão (22%). Os métodos de monitoramento incluíam sensores de emissão acústica (27%), deformação (22%), força (17%), corrente elétrica (17%) e outros (17%), o que mostra a importância da emissão acústica já nos anos 90.

Lee et al. (2006) utilizam o sinal de emissão acústica para o monitoramento de processos de manufatura de precisão. O ponto principal do artigo é o fato de utilizarem mapas de energia gerados a partir do sinal para detectar falhas superficiais nos processos (retificação, fresamento e torneamento de precisão com diamante) que requerem tolerâncias extremamente apertadas. A Figura 2.16 apresenta o detalhe de um rebolo abrasivo monitorado via sinal de EA, em que os defeitos de sua superfície foram mostrados no mapa de intensidade luminosa. Isso demonstra que o uso da EA para o monitoramento do processo e caracterização da ferramenta pode servir como ferramenta ligando a manufatura aos estágios de controle de qualidade podendo evoluir no futuro para a eliminação da necessidade de etapas de controle de qualidade, sendo esta realizada on-line durante a fabricação do produto.

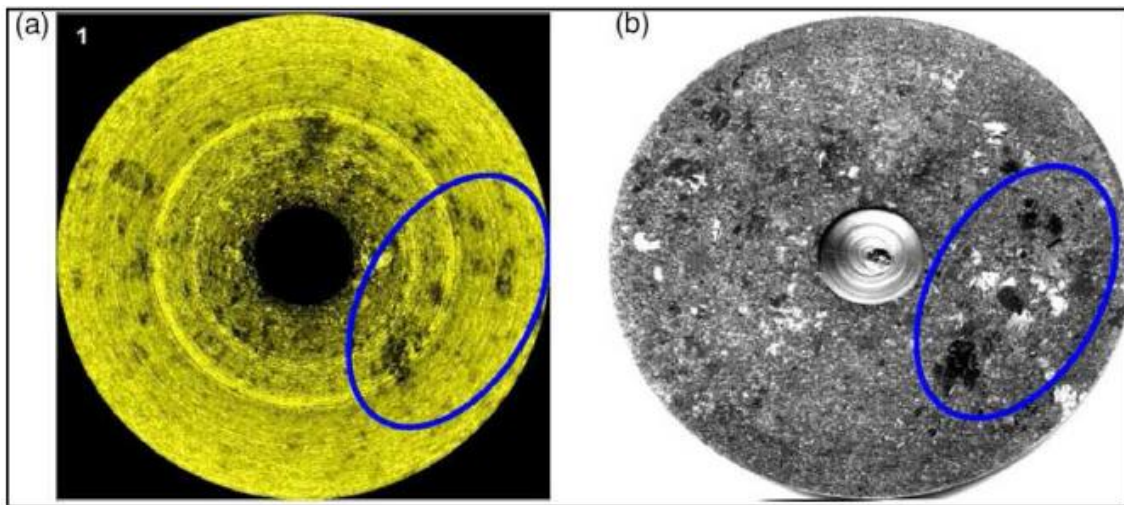


Figura 2.15 - (a) Mapa polar de EA da superfície da peça de cobre utilizada nos experimentos; (b). Detalhe da metalografia da superfície da peça com seus defeitos superficiais (LEE et al., 2006)

Da Silva (2010) estudou o monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais. O material usinado foi uma barra é um aço inoxidável martensítico utilizado para a fabricação de moldes para injeção de plásticos, com especificação VP80 com insertos de metal duro e revestidos com nitreto de titânio (TiN), classe P25 em Centro de usinagem vertical, modelo Discovery 760 (ROMI). Os sinais analisados foram de EA e a potência de corte e comparados com o desgaste da ferramenta utilizando redes neurais artificiais. Como principais conclusões:

- Há a tendência de aumento nos valores de potência efetiva de corte média à medida que o tempo de usinagem aumenta e conseqüentemente o desgaste;
- Em média a diferença entre o valor de potência efetiva média de uma ferramenta nova e a mesma desgastada é de aproximadamente 15%;
- O gráfico de amplitude de sinal de EA em função do tempo de aquisição sofre variações na amplitude do sinal na fase inativa de corte à medida que o desgaste aumenta. Sendo assim, pode dar uma indicação do aumento do desgaste;
- A análise dos espectros do sinal de EA fornece informações valiosas a respeito do comportamento do sinal ao longo da vida da ferramenta;

- Técnicas de monitoramento utilizando emissão acústica e potência efetiva de corte média parecem ser uma boa alternativa para sistemas de monitoramento do desgaste de ferramentas;

Lee et al. (2006) demonstram as principais frequências e a área dos sensores a serem utilizados no monitoramento de usinagem, como é mostrado na Figura 2.17.

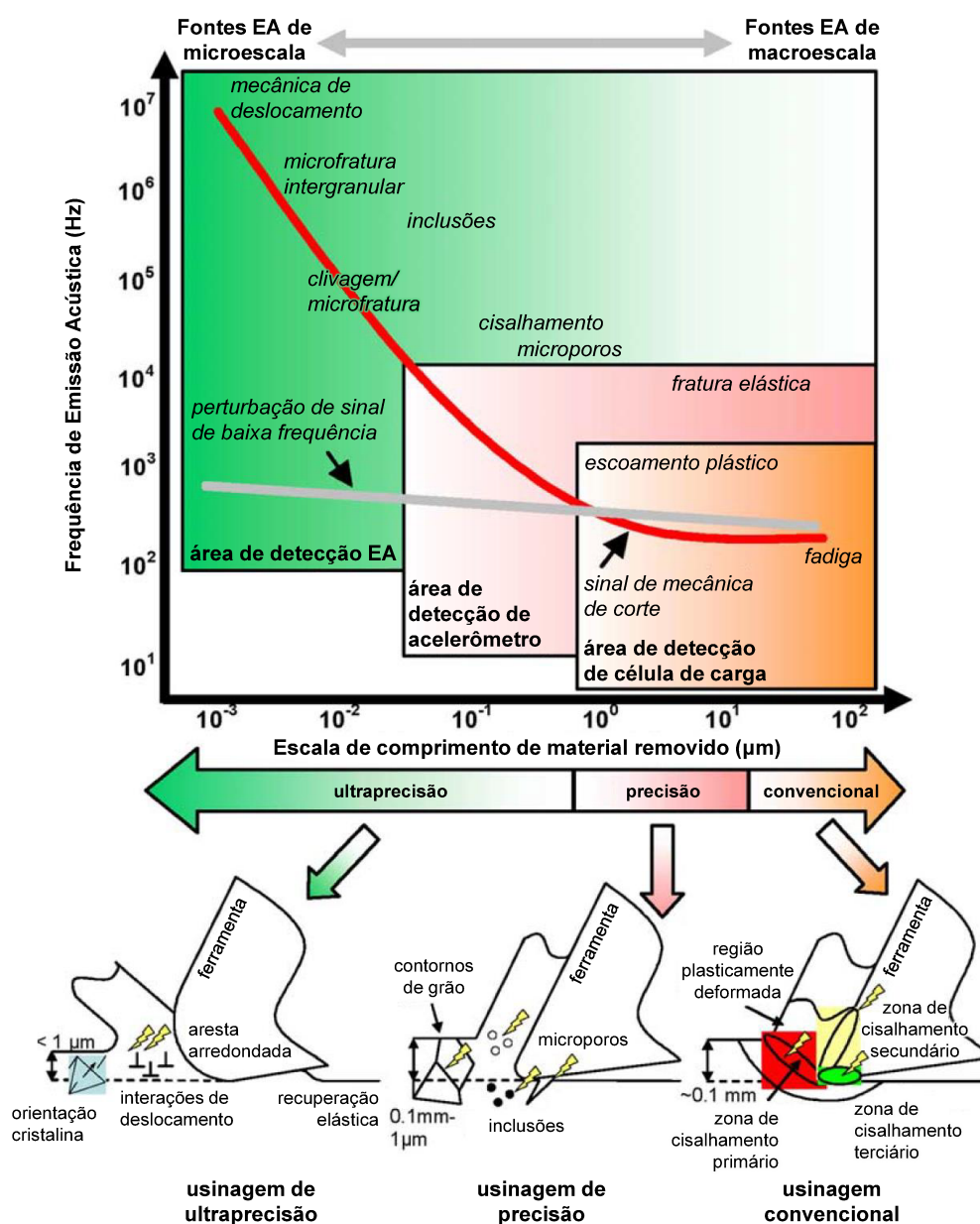


Figura 2.16 - Fontes de emissão acústica em diferentes estádios de remoção de material (LEE et al., 2006)

2.7 Redes Neurais Artificiais (RNA)

As redes neurais artificiais - RNA consistem em um método de inteligência artificial de solucionar problemas, construindo um sistema que tenha circuitos que simulem o cérebro humano, inclusive seu comportamento, ou seja, aprendendo, errando e fazendo descobertas. São técnicas computacionais que apresentam um modelo inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência.

Braga et al. (2007) definem redes neurais artificiais (RNA) como sendo sistemas paralelos distribuídos compostos de unidades de processamentos simples (nós) que calculam determinadas funções matemáticas (normalmente não lineares). Tais unidades são dispostas em uma ou mais camadas e interligadas por um grande número de conexões, geralmente unidirecionais. Na maioria dos modelos, estas conexões estão associadas a pesos, os quais armazenam o conhecimento representado no modelo e servem para ponderar a entrada recebida por cada neurônio da rede.

A RNA foi criada através de uma analogia com o cérebro humano na década de 1940 por McCulloch e Pitts, sendo utilizadas para resolver características da inteligência artificial, sendo que a capacidade de aprender por exemplos e treinamentos é a grande motivadora para o uso de redes neurais artificiais (TATIBANA e KAETSU, 2016). Neste caso, em lugar de tentar programar um computador digital de modo a fazê-lo reproduzir um comportamento inteligente, se procura construir um computador que possua circuitos modelando os circuitos cerebrais, como também espera-se observar um comportamento inteligente emergindo, aprendendo novas tarefas, errando, fazendo generalizações e descobertas.

A capacidade de se implementar computacionalmente versões simplificadas de neurônios biológicos deu origem a uma subespecialidade da inteligência artificial, conhecida como redes neurais artificiais – RNA (HAYKIN, 2001)

Segundo Haykin (2001) uma rede neural é um processador maciço e paralelamente distribuído, constituídos de unidades de processamento simples, que têm a propensão neural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo possível para uso. Ela se assemelha ao cérebro em dois aspectos:

1. O conhecimento é adquirido pela rede a partir de seu ambiente através de um processo de aprendizagem.
2. Forças de conexões entre neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, são utilizados para armazenar o conhecimento adquirido.

Há três elementos básicos que formam um modelo neuronal (HAYKIN, 2001):

- Um conjunto de sinapses, sendo que cada sinapse é caracterizada por um “peso”.

- Um somador, que efetua a soma dos sinais de entrada; cada entrada é ponderada pela respectiva sinapse do neurônio.
- Uma função de ativação (sendo às vezes também referida como função restritiva), que limita a amplitude da saída de um neurônio a um valor finito.

Para Guyon (1991), o neurônio artificial é uma estrutura matemática lógica que procura simular a forma, comportamento e funções de um neurônio biológico. Assim os dendritos são substituídos por entradas, cujas ligações com o corpo celular artificial são realizadas através de elementos, chamados pesos (simulando a sinapse neural).

O procedimento utilizado para realizar o processo de aprendizagem é chamado de algoritmo de aprendizagem, cuja função é modificar os pesos sinápticos da rede de uma forma ordenada para alcançar um objetivo de projeto desejado (HAYKIN, 2001). A Figura 2.18 mostra um modelo de um RNA.

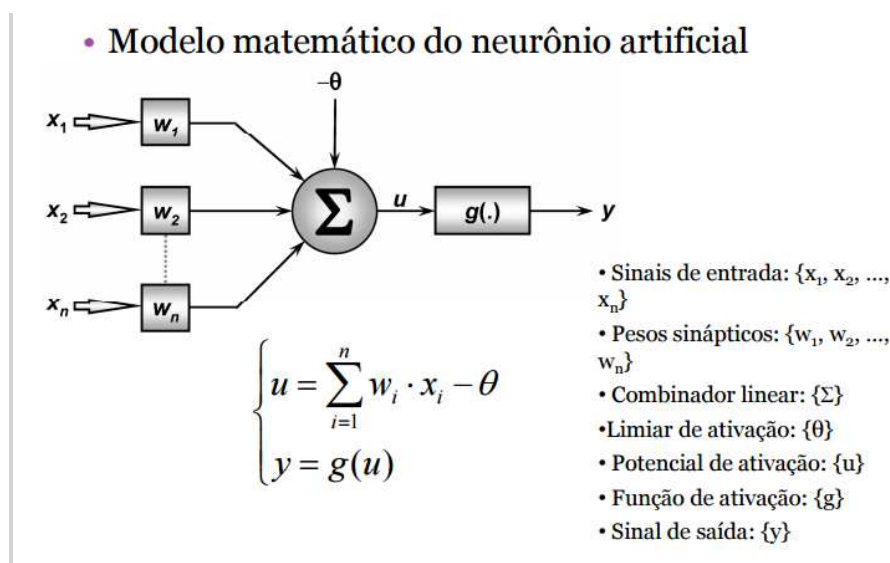


Figura 2.17 - Modelo não linear de neurônios utilizados na RNA (HAYKIN, 2001).

Na Figura 2.18, observa-se que um sinal x_j na entrada da sinapse $j = \{1, 2, \dots, n\}$ conectado ao neurônio X é multiplicado pelo peso sináptico W_k (o índice do peso sináptico (k) refere-se ao neurônio em questão). O elemento u é a saída do sinal de entrada combinado.

O modelo também inclui a bia (θ) aplicado externamente com a função de aumentar (caso seu valor seja positivo) ou diminuir (caso seja negativo) a entrada líquida da função de ativação. A bia é um parâmetro do neurônio W e seu uso tem o efeito de aplicar uma transformação afim na saída u da combinação linear

Assim, as RNAs consistem em uma rede de elementos de processamento de sistemas altamente não lineares em paralelo. Estes elementos são chamados de neurônios, sendo que

alguns respondem a estímulos de entrada, outros permitem a saída de dados (resposta do sistema), e os demais não são acessíveis, pertencentes às camadas ocultas, como mostra a Figura 2.19.

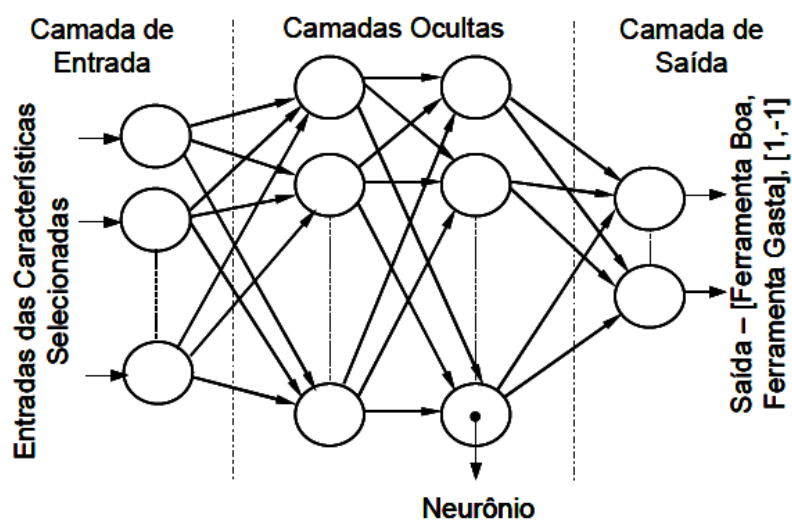


Figura 2.18 - Estrutura de uma rede neural artificial (Da Silva, 2010)

As RNAs foram desenvolvidas como generalizações de modelos matemáticos do conhecimento humano ou biologia neural, baseado nas hipóteses a seguir (FAUSETT, 1993):

1. O processamento das informações ocorre em muitos elementos simples, chamados neurônios;
2. Os sinais são transmitidos entre os neurônios através de conexões;
3. Cada conexão está associada a um peso, que, em uma típica malha neural, multiplica o sinal transmitido.
4. Cada neurônio aplica uma função de ativação (usualmente não linear) à sua malha de entrada (soma de peso do sinal de entrada) para determinar o seu sinal de saída.

O que se espera da computação neural é que possua algumas características e habilidades do cérebro humano, como reconhecimento de padrões, memória associativa, otimização, predição e controle. O motivo pelo qual máquinas inspiradas na biologia são diferentes das máquinas atuais se encontra no fato de que as máquinas atuais baseiam seu processamento explicitamente em modelos matemáticos. Mecanismos de controle baseado em mecanismos neurais, entretanto, não são baseados em modelos, utilizam cálculos matemáticos para efetuar suas operações, porém podem coordenar diversos graus de

liberdade durante a execução de tarefas manipulativas e em ambientes desestruturados. Eles são capazes de lidar com tarefas complicadas sem que tenham que desenvolver um modelo matemático e nem um modelo do ambiente em que operam.

Sistemas de computação baseados em redes neurais tem a capacidade de receber ao mesmo tempo várias entradas e distribuí-las de maneira organizada. Geralmente, as informações armazenadas por uma rede neural é compartilhada por todas as suas unidades de processamento. Característica que contrasta com os atuais esquemas de memória, onde a informação fica confinada a um determinado endereço.

A rede torna-se um sistema tolerante a falhas quando parte de sua estrutura interna for sensivelmente corrompida. Após o processo de treinamento, os seus resultados são normalmente obtidos por PG, PA ou algumas operações matemáticas elementares.

2.7.1 Topologia das redes neurais

Segundo Haykin (2001) três classes de topologias de rede fundamentalmente diferentes podem ser identificadas: a) redes Perceptron com uma única camada; b) redes Perceptron com múltiplas camadas; c) redes recorrentes.

a) Redes Perceptron com uma única camada (SLP – Single Layer Perceptron)

Em uma rede alimentada adiante ou acíclica (feedforward), tem-se uma camada de entrada de nós que se projeta sobre uma camada de saída de neurônios conforme ilustrado na Figura 2.20(a). Esta rede é chamada de rede de camada única sendo que esta designação se refere à camada de saída, pois na camada de entrada não é realizado qualquer computação.

b) Redes Perceptron com múltiplas camadas (MLP – Multilayer Perceptron)

Distingue-se pela presença de uma ou mais camadas ocultas (ou intermediárias), cujos nós computacionais presentes nestas camadas são chamados de neurônios ocultos ou unidades ocultas. Os nós da camada de entrada da rede fornecem os sinais de entrada aplicados aos neurônios na segunda camada (ou seja, a primeira camada oculta). Os sinais de saída da segunda camada são utilizados como entradas na terceira camada; este procedimento persiste até a camada de saída da rede. Normalmente, os neurônios em cada camada da rede têm como entrada somente os sinais de saída da camada antecedente. A resposta global da MLP é o conjunto de sinais de saída dos neurônios da última camada

devido ao padrão de ativação fornecido pelos nós da camada de entrada. Na Figura 2.18(b) é representada uma rede de múltiplas camadas. Esta rede possui topologia 10-4-2, visto que tem 10 neurônios de fonte, 4 neurônios ocultos e 2 neurônios de saída. A mesma rede ainda é dita totalmente conectada, uma vez que cada um dos nós de uma camada da rede conecta-se a todos nós da camada posterior. No entanto, caso alguns elos das conexões sinápticas estiverem faltando na rede, mencionamos que esta rede é parcialmente conectada.

c) Redes recorrentes

Uma rede neural recorrente tem como particularidade possuir pelo menos um laço de realimentação, ou seja, o sinal de saída de um neurônio serve como entrada para a mesma camada, uma camada anterior ou entre camadas alternadas.

Na Figura 2.20 é ilustrada uma classe de redes recorrentes com neurônios ocultos. Ressalta-se que a realimentação pode ser realizada tanto para frente quanto para trás.

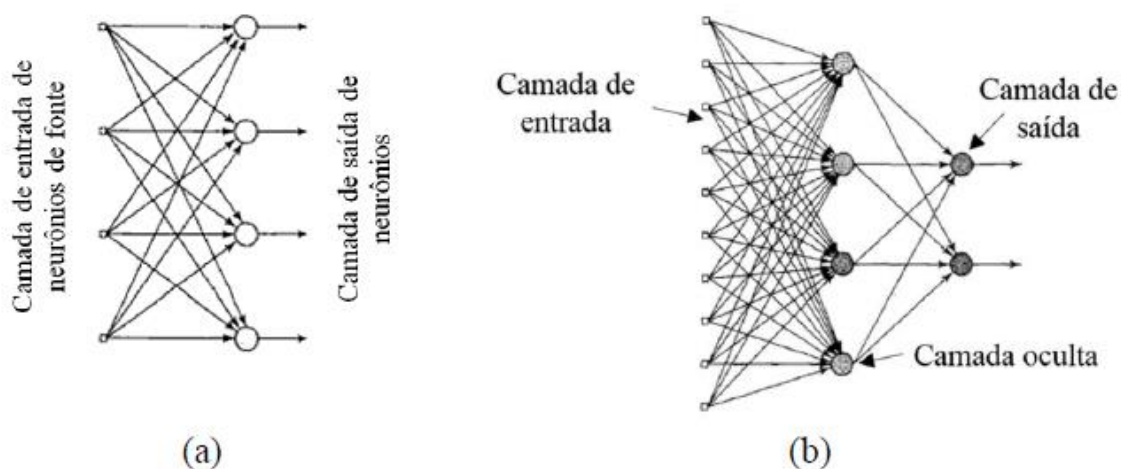


Figura 2.19 - Topologia de uma rede neural (a) Perceptron monocamada; (b) Perceptron multicamadas (HAYKIN, 2001)

2.7.2 Aprendizagem de Redes Neurais Artificiais

O objetivo da aprendizagem é determinar a intensidade das conexões entre os neurônios em uma rede neural artificial (RNA). De acordo com Braga et al. (2000), diversos métodos para treinamento de redes foram desenvolvidos, podendo ser agrupados em dois paradigmas principais: aprendizado supervisionado e aprendizado não supervisionado.

- **Aprendizado supervisionado.** Neste tipo de aprendizagem, a rede possui um “professor” que possui conhecimento a respeito de determinado ambiente. Dessa forma quando a rede recebe uma informação deste ambiente, o “professor” fornece juntamente a resposta esperada para determinado estímulo. Como ilustrado na Figura 2.21(a), a rede utiliza como orientação para o ajuste dos pesos sinápticos um sinal de erro gerado pela discrepância entre a saída esperada (fornecida pelo “professor”) e a saída obtida (calculada). A cada par entrada-saída esperada apresentada à rede, um sinal de erro é gerado e os pesos sinápticos são ajustados de forma a minimizar o erro de saída da rede.

- **Aprendizado não supervisionado.** Neste caso, não há um “professor” externo para supervisionar o processo de aprendizado: a rede neural extrai informações somente dos padrões de entrada sem a necessidade de uma resposta desejada, Figura 2.21(b). A partir do momento em que a rede estabelece uma harmonia com as regularidades estatísticas da entrada de dados, desenvolve-se nela uma habilidade de formar representações internas para codificar características de entrada e criar novas classes ou grupos automaticamente. Este tipo de aprendizado só é possível quando existe redundância nos dados de entrada.

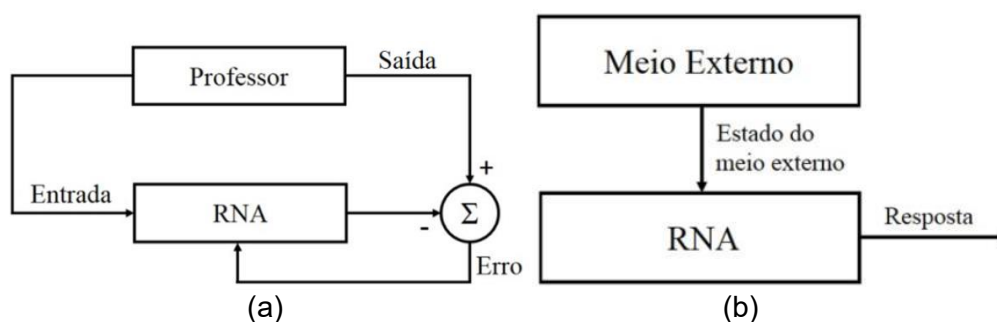


Figura 2.20 - Aprendizado de uma rede neural: (a) Supervisionado (b) não supervisionado (HAYKIN, 2001).

O sucesso de uma máquina autônoma dependeria única e exclusivamente de sua capacidade de lidar com uma variedade de eventos inesperados no ambiente em que opera. Estas máquinas teriam maior capacidade de aprender tarefas de alto nível cognitivo que não são facilmente manipuladas por máquinas atuais, e continuariam a se adaptar e realizar tais tarefas gradativamente com maior eficiência, mesmo que em condições de ambiente imprevisíveis. Então, seriam muito úteis onde a iteração humana é perigosa, tediosa ou impossível; como em reatores nucleares, combate ao fogo, operações militares, exploração do espaço a distâncias em que uma nave espacial estaria fora do alcance do controle na terra, porém enviando informações (TATIBANA e KAETSU, 2016).

Em monitoramento da usinagem, a RNA é treinada através de informações recebidas por sensores de monitoramento de processos acoplados à máquina, que a tornam capaz de identificar estados dos processos, como por exemplo, o desgaste da ferramenta de corte.

Da Silva (2010) estudou monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais. Utilizou como corpo de prova o aço com especificação VP80 na condição solubilizada e ferramenta de metal duro revestida com nitreto de titânio (TiN). O autor demonstrou que o sinal de EA responde bem ao desgaste da ferramenta. O autor também desenvolveu uma arquitetura de redes neurais artificiais para estabelecer as condições da ferramenta com base nas entradas de dados dos sinais de força de corte e EA, alcançando resultados bem fidedignos com a realidade dos testes.

Scheffer et al. (2003) afirmam que a vantagem das redes neurais dinâmicas é poder acompanhar qualquer desenvolvimento de desgaste e proteger o sistema de monitorização contra possíveis perturbações que podem fazer com que ele preveja valores errôneos.

Tansel et al. (1998) afirmam que o conjunto emissão acústica e redes neurais são uma ótima alternativa para detectar o fim de vida de uma ferramenta de corte em micro usinagem, sendo que o sinal de emissão aumenta à medida que a ferramenta perde o corte, pois maior é a energia necessária para uma ferramenta gasta remover o cavaco.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordadas todas as etapas seguidas no desenvolvimento deste trabalho, assim como a escolha da matéria prima, ferramenta de corte, máquina e o sensoriamento utilizados. O fluxograma da Figura 3.1 apresenta a sequência das atividades e dos experimentos desenvolvidos nesse trabalho.



Figura 3.1 - Fluxograma dos experimentos desenvolvidos neste trabalho.

3.1 Materiais e Equipamentos Utilizados

Os testes foram realizados em um torno CNC da marca ROMI linha Multiplic modelo 35D com 11 kW (15 cv) de potência no motor principal e 20 kVA de potência instalada, com velocidade máxima no rotor de 3000 rpm.

O material da peça utilizada no trabalho foi o aço VC131 (AISI D6) com 58 HRC, fabricado pela Villares Metals S.A. Este aço possui alta estabilidade dimensional e excelente resistência ao desgaste, especialmente em condições abrasivas, sendo utilizado principalmente para confecção de moldes e matrizes. Foram utilizadas duas barras com diâmetro inicial de 108 mm e comprimento de 250 mm. Sua composição química está apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Composição química aço VC131 (dados do fabricante)

C	Cr	W	V
2,1	11,5	0,70	0,15

Como o aço é muito duro, o principal critério utilizado para a escolha da ferramenta foi a dureza, logo as ferramentas utilizadas foram insertos de PCBN (Nitreto Cúbico de Boro Policristalino) fabricada pela Sandvik Coromant, classe CB7015, com 50% CBN e ligante cerâmico (indicada para a usinagem de aços endurecidos), com geometria SNGA120412 S01030A CB7015 (Figura 3.2). A aresta de corte possui um chanfro de 0,10 mm x 30°.

A faixa de trabalho indicada pelo fabricante para a utilização da ferramenta na usinagem de aços endurecidos é velocidade de corte (v_c) de 150-250 m/min, avanço (f) 0,05 – 0,30 mm/rot. e profundidade de corte (a_p) de 0,07 – 1,20 mm.

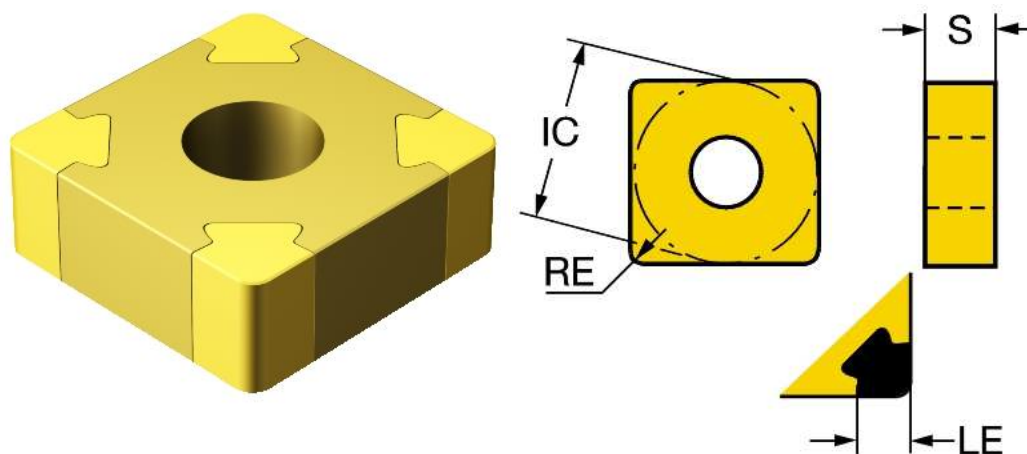


Figura 3.2 - Ferramenta PCBN (IC = 12,7 mm; RE = 1,1906; S = 4,7 mm; LE = 2,8 mm) (SANDVIK, 2016)

O suporte utilizado foi o Sandvik Coromant PSBNR2525 M12 mostrado na Figura 3.3

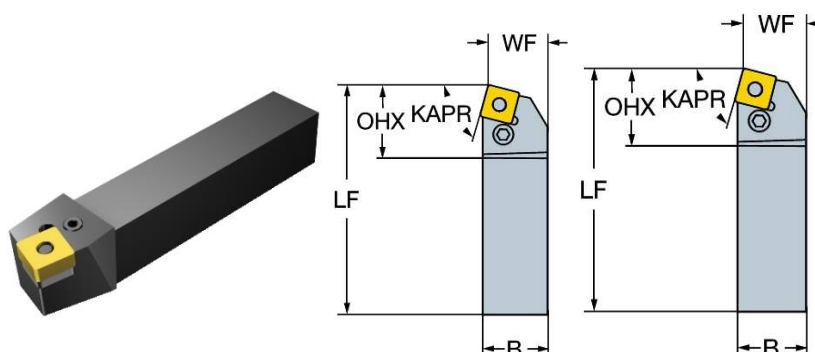


Figura 3.3 - Suporte utilizado (SANDVIK, 2016)

3.2 Aquisição de dados

3.2.1 Medição de força

As componentes de força de usinagem do processo de torneamento foram medidas através de um dinamômetro Kistler modelo 9265B, mostrado na Figura 2.4.

Foram feitas medidas nos eixos X (F_x), Y (F_y) e Z (F_z), que correspondem as componentes das forças de avanço (F_f), passiva (F_p) e força de corte (F_c), respectivamente. A taxa de aquisição utilizada foi de 6 KHz, com um filtro passa baixa de 2 KHz, com tempo de aquisição de 5 s. Estes sinais foram amplificados por um condicionador da marca Kistler, modelo 5070A. Em cada condição de ensaio foi feito uma média online pelo programa

LabView de todos os pontos adquiridos no tempo estipulado, de todas as componentes de força medidas.

Para a aquisição dos dados e conversão A/D foi utilizado uma placa NI USB-6221 da National Instruments, com 16 entradas, 16 bits e capacidade de aquisição de 250 KS/s. A montagem do experimento é mostrada na Figura 3.4.

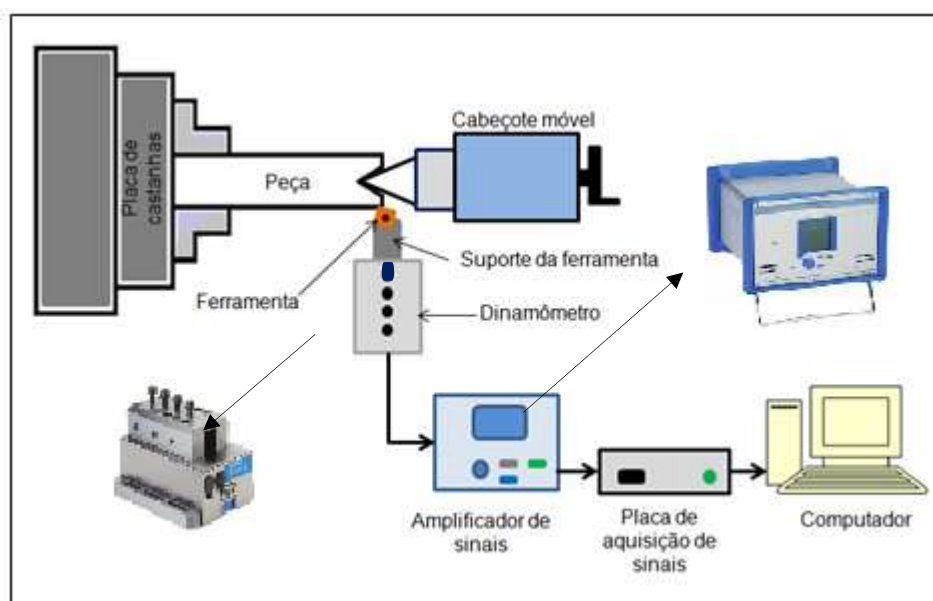


Figura 3.4 - Montagem do sistema de aquisição de força (adaptado de MARQUES, 2015)

3.2.2 Medição de Potência

A medição da corrente elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore do torno, foi obtido através dos valores de tensão e corrente elétrica do motor de indução trifásico (11 kW), monitorado por dois sensores de efeito hall em cada fase do eixo árvore da máquina, um para tensão e outro para corrente. Para medir a corrente é utilizado o sensor HAS 50-600S da marca LEM, que engloba o condutor a ser medido, captando o campo magnético gerado pela corrente, e transformando o sinal em tensão, sendo que a amplitude da tensão de Hall varia com a corrente e o campo magnético. Para a medição de tensão é utilizado o sensor LV-20p (LEM), que entra em paralelo com a diferença de potencial a ser medida. A taxa de aquisição foi de 5kHz, em um tempo de 5 segundos.

Os sinais elétricos gerados nos sensores e transdutores muitas vezes necessitam ser convertidos numa forma apropriada para o equipamento de aquisição, particularmente para o conversor analógico-digital (A/D). O condicionamento de sinal também é responsável pela alimentação de energia necessária para que o transdutor possa operar. Os sinais de baixa intensidade devem ser amplificados para aumentar a resolução e reduzir o ruído. Logo foi feito

um circuito para cada sensor para os devidos fins, utilizando-se de amplificadores operacionais, capacitores e resistores. O circuito que amplifica o sinal é mostrado na Figura 3.5 e o esquema do sistema de medição da potência elétrica é apresentado na Figura 3.6.

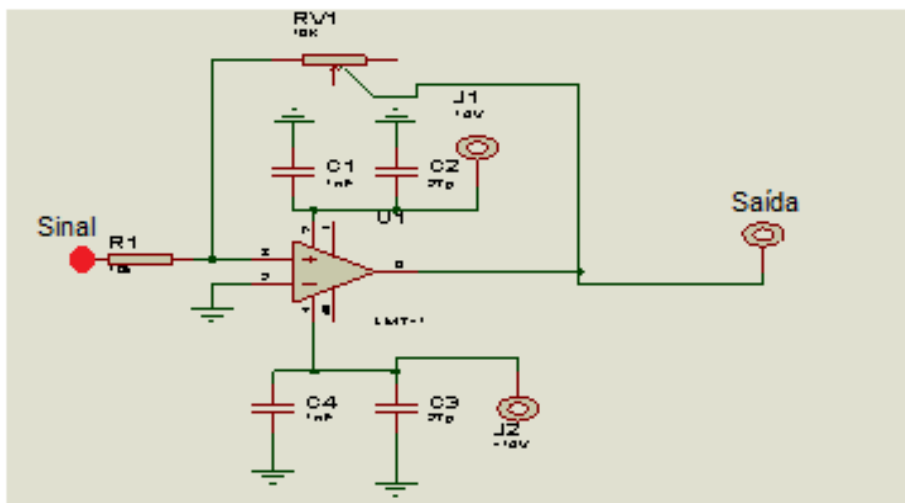


Figura 3.5 - Circuito amplificador de corrente



Figura 3.6 - Medição da potência elétrica.

3.2.3 Emissão Acústica

Para monitorar a emissão acústica durante a usinagem foram utilizados sensores piezoelétricos da marca Sensis, com sinais amplificados por um condicionador Sensis DM42 (com quatro canais de entrada; um canal de saída que fornece sinal RMS e outro canal de saída que fornece o sinal bruto) adquiridos e convertidos por uma placa de taxa de aquisição de 1 GHz, capacidade na qual foi utilizada totalmente no processo. O sensor foi posicionado na lateral do dinamômetro como mostra a Figura 3.7.

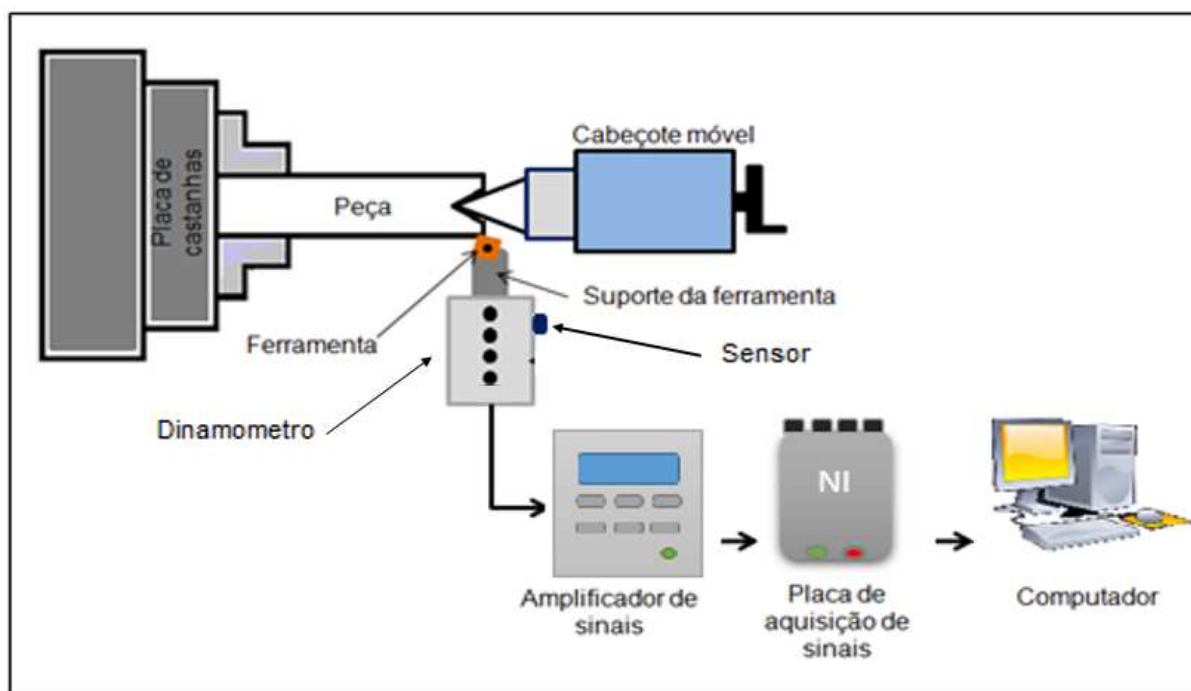


Figura 3.7 - Localização dos sensores de emissão acústica

O sensor de emissão acústica possui um núcleo composto por dois cristais piezoelétricos. A frequência de ressonância de cada cristal individualmente é de 1,0 MHz. Os sinais dos cristais são adquiridos de forma diferencial, a fim de eliminar ruídos. Dessa forma, este sensor fornece um sinal de baixa impedância e grande sensibilidade para o monitoramento.

A alta taxa de aquisição do sinal de EA implicou na necessidade de se reduzir o tempo de aquisição, pois tempos maiores implicam em esforço computacional muito grande, além de um tempo muito maior para o tratamento dos dados. Assim, o tempo de aquisição foi limitado a apenas dois segundos, por si só responsável pela geração de dois milhões de pontos.

Para o condicionamento deste sinal foi utilizado um condicionador da marca Sensis modelo DM42 previamente ajustado com filtro passa alta de 10 kHz, ganho de sinal 1, ganho de entrada 1 e redução de ganho de 10 vezes.

A placa de aquisição utilizada para a medição de emissão acústica foi a NI9223 da National Instruments, com 1 MS/s, 16 bits, 4 canais com faixa de medição de -10 V a 10V na entrada. Apenas um canal foi utilizado para a aquisição e conversão A/D, e o faixa foi reduzida para 4 V a -4V, para melhorar a sensibilidade do módulo, dividindo 16 bits em 8 volts ao invés de 20 V.

A aplicação dos modelos foi feita pelo software LabView (2012) da National Instruments. O software (Figura 3.8) desenvolvido pelo próprio autor ficou responsável por gerar gráficos, analisar modelos estatísticos e salvar os dados adquiridos.

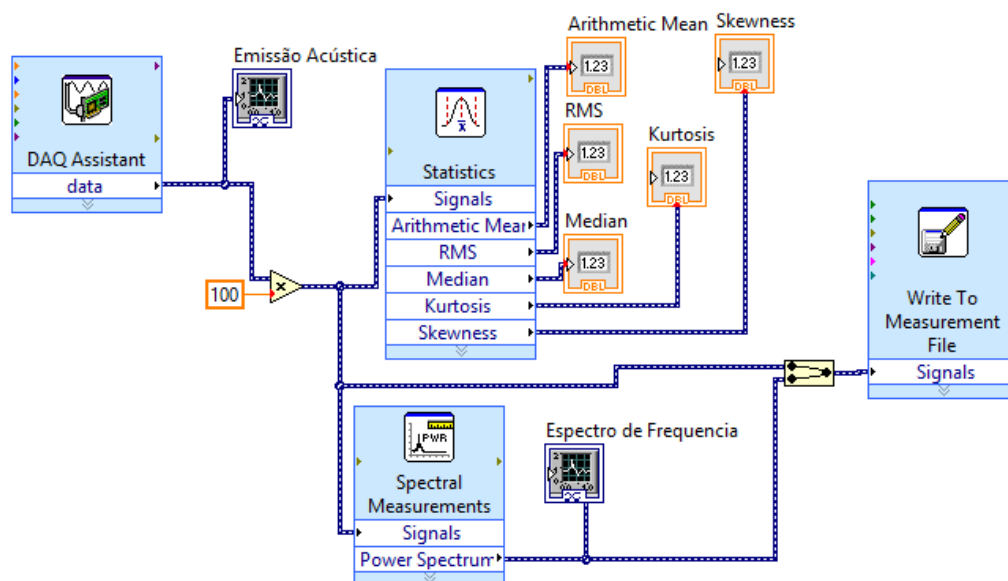
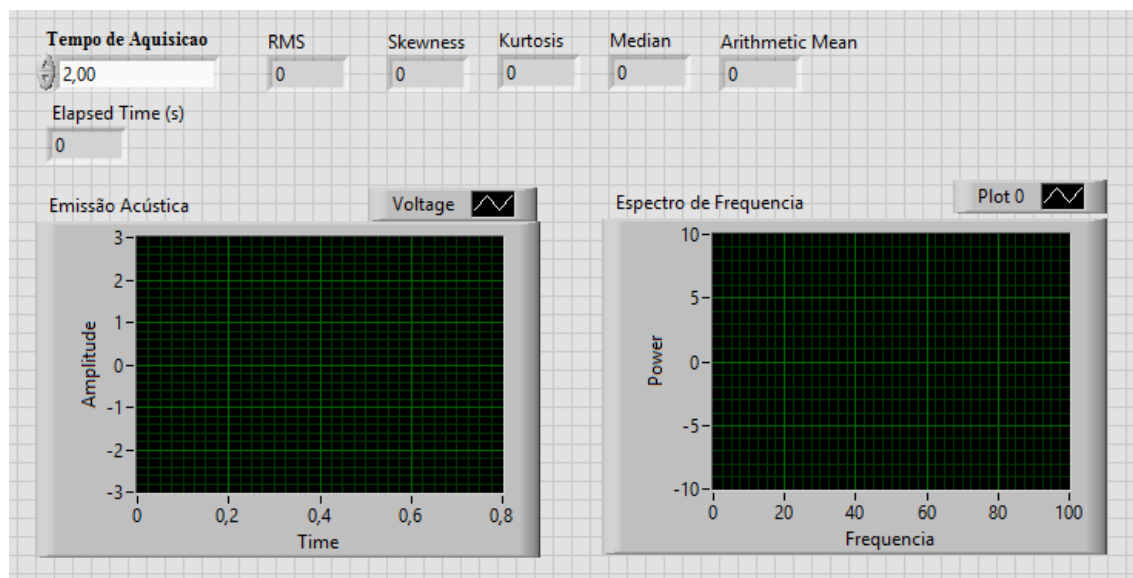


Figura 3.8 - Software para medição dos sinais de EA desenvolvido em LabView

Também foram realizados testes levantando mapas de emissão acústica, porém, o sinal adquirido foi a RMS da emissão acústica, sendo que a modelagem e a geração do mapa também foram feitos pelo software LabView. A cada volta da peça o programa captava 500 pontos, e de acordo com a intensidade destes pontos eram plotadas linhas (quanto mais intenso o sinal, mais claro o ponto gerado). Um *trigger* foi desenvolvido no próprio laboratório

com o intuito de fazer a contagem de voltas e fazer o giro do mapa, saltando para a próxima coluna. O programa utilizado está apresentado na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Programa utilizado na plotagem do mapa acústico

O primeiro passo após a coleta de dados foi determinar qual ou quais desses parâmetros possuíam relação com o desgaste de flanco máximo ($VB_{Bmáx}$) da ferramenta, através da análise dos sinais. Além disso, foi feita a análise dos espectros de potência gerados do sinal, para ferramentas novas e usadas (desgastadas). Foi feita a tentativa também de fixar uma banda de frequência em que há uma diferença significativa entre o espectro de uma ferramenta nova e uma usada e então extraídos os mesmos parâmetros nessa banda de frequência, avaliando-se a relação com o desgaste. Finalmente, após a identificação dos parâmetros que apresentaram correlação melhor com o desgaste, eles foram utilizados como valores de entrada em uma RNA, juntamente com aqueles extraídos do sinal de potência e de força.

3.2.4 Rugosidade

Para a medição de rugosidade foi utilizado um rugosímetro portátil digital da marca Mitutoyo, modelo SJ-201. Foram feitas 3 medidas de rugosidade a cada passo de usinagem e os parâmetros medidos foram R_a , R_q e R_z . O *cut-off* utilizado foi de 0,8 mm. Para garantir o posicionamento do equipamento foi empregado um suporte construído no próprio laboratório (LEPU) como mostrado na Figura 3.10.

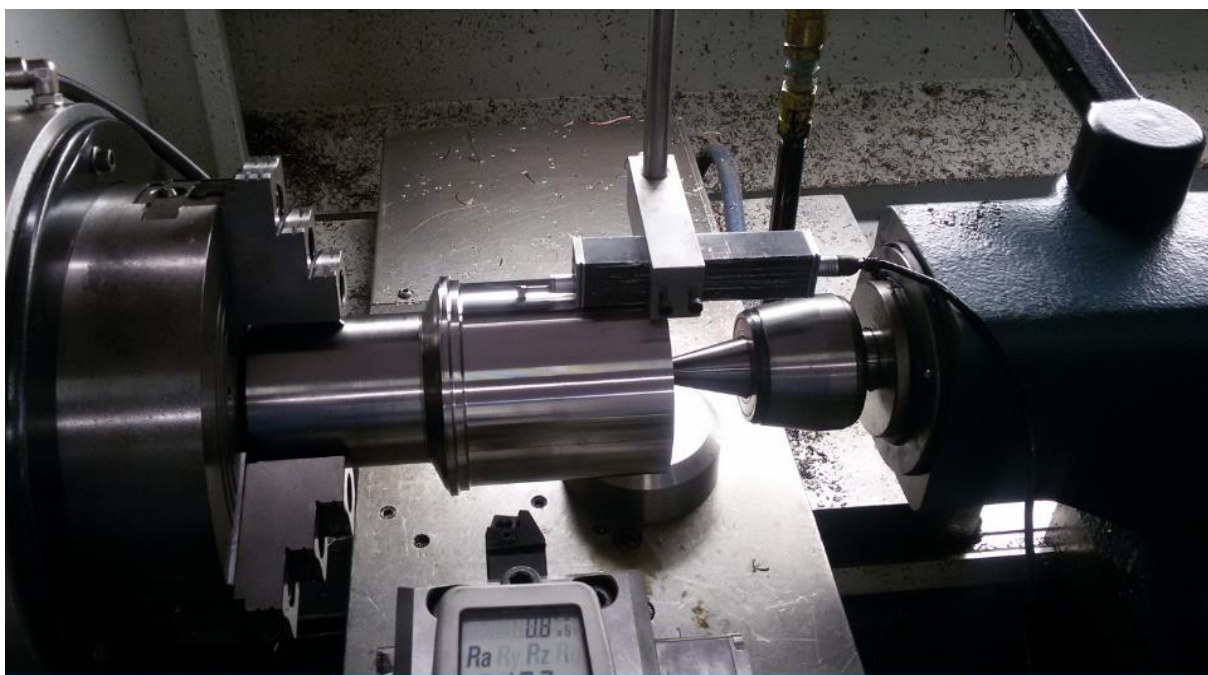


Figura 3.10 - Método de medição da rugosidade

3.2.5 Desgaste

A cada passo do torneamento do aço VC131 a ferramenta era retirada do suporte e submetida à análise no estéreo microscópio, modelo SZ61, marca Olympus, com câmara digital integrada, com ampliação de 2,5 X, onde a sua superfície de folga era fotografada e as medições de desgaste eram realizadas. Para todas as condições avaliadas, foram realizados (testes, réplicas e tréplicas). Antes de cada medição era feita a calibração do estéreo microscópio por meio de uma escala graduada. A câmara digital integrada é ligada a um computador com o software analisador de imagens Image-Pro® Express 5.1.0.12, responsável pela captação, medição do desgaste e armazenamento da imagem selecionada. Ao se utilizar esse conjunto de equipamentos, deve-se tomar cuidado com a calibração das medidas, assim o ideal é, como nesse caso em específico, efetuar a calibração do aparelho. Na Figura 3.11 observa-se uma ferramenta na posição de medição do desgaste.



Figura 3.11 - Estéreo-microscópio utilizado para acompanhamento do desgaste nas ferramentas de corte

3.3 Procedimento Experimental

Antes da realização dos testes foram realizados pré-testes, observando o comportamento da máquina com o aço endurecido, além de conhecer e estabelecer os parâmetros para as medições de força e emissão acústica, a fim de identificar e eliminar os erros sistemáticos do sistema e ajustar as condições de corte e de monitoramento (taxa e tempo de aquisição dos sinais) de modo a possibilitar resultados conclusivos.

Os pré-testes também foram utilizados para identificar o melhor posicionamento dos sensores de emissão acústica, assim como utilizar os dados para uma transformada rápida de Fourier, com o intuito de identificar as melhores frequências a serem analisadas, assim como elaborações de filtros para melhor análise dos resultados.

A velocidade de corte e o avanço são as variáveis de entrada do sistema, sendo que a profundidade de corte é fixa. Os níveis destas variáveis e o valor da profundidade de corte foram determinados seguindo recomendações do fabricante da ferramenta e também por orientação de trabalhos anteriores que utilizaram o mesmo par ferramenta de corte – peça (BONFÁ, 2015).

Em cada teste os parâmetros monitorados (variáveis de saída) foram as componentes de força de usinagem, a corrente e a emissão acústica, além da vida da ferramenta (desgaste) e a rugosidade superficial da peça usinada. A partir dessas informações, foram analisados os

efeitos das variáveis de maior significância em relação ao monitoramento da usinagem. As condições de corte utilizadas neste trabalho são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Condições de corte utilizadas

Condição	V_c (m/min)	f (mm/rot.)	a_p (mm)
1	175	0,1	0,2
2	175	0,2	0,2
3	225	0,1	0,2
4	225	0,2	0,2

Cada teste consiste em utilizar uma ferramenta nova (de PCBN) no torneamento de uma barra do material ABNT D6 (VC 131) no estado envelhecido (dureza de aproximadamente 58 HRC), com monitorando online das variáveis de saída (Força, Emissão Acústica e Potência). Periodicamente o teste é interrompido para medição da rugosidade da peça e do desgaste de flanco (máximo - VB_{Bmax}) da ferramenta, sendo que o teste era considerado concluído quando o desgaste de flanco máximo atingisse um valor pré-estipulado (0,6 mm). Cabe mencionar que cada teste nas condições de corte da Tabela 3.2 teve sua réplica e tréplica e durante a usinagem não foi utilizado fluido de corte (corte a seco).

3.4 Aplicação da Rede Neural Artificial

Após a análise de todos os dados e selecionados aqueles que apresentaram melhor correlação com o desgaste das ferramentas, a etapa seguinte foi a utilização desses dados em uma rede neural artificial, com o intuito de detectar o fim de vida da ferramenta.

O processo de classificação foi repetido para as 12 arestas testadas. Cada variável de entrada foi relacionada com seu respectivo estado de desgaste, com o intuito de receber os pesos da rede neural.

O MatLab® (MATrix LABoratory) é um software voltado para o cálculo numérico, contendo constantes atualizações e aperfeiçoamentos. Ele integra a análise numérica, cálculo com matrizes, processamentos de sinais e construção de gráficos em um ambiente de fácil utilização (THE MATHWORKS INC., 2016).

O processo de criação, treinamento e simulação foi feito no *toolbox* de redes neurais no *software* MatLab®, que nada mais é do que uma biblioteca de funções adaptada para a utilização de RNA. Possui uma ampla versatilidade e flexibilidade permitindo a aplicação dos mais variados tipos de redes e, até mesmo, a modificação de redes já existentes.

Após vários testes feitos em MatLab com diferentes redes neurais, a topologia que melhor representou o desgaste foi a 6 – 5 – 5 – 1, representada na Figura 3.12, e para a

rugosidade foi de 6 – 10 – 1 – 1. Foram feitos testes de 1 a 5 neurônios com uma e duas camadas ocultas.

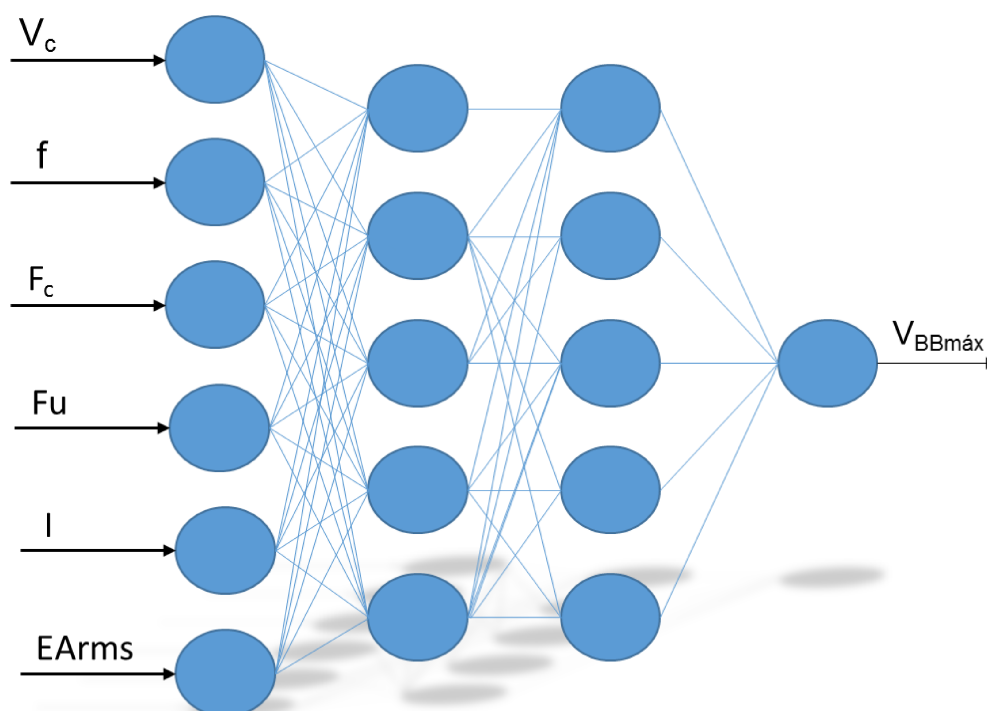


Figura 3.12 - Topologia da rede neural 6 – 5 – 5 – 1

O critério de parada de treinamento da rede utilizado foi aquele que emprega a técnica de parada antecipada com base na validação cruzada. A validação cruzada é uma técnica estatística usada para validar o modelo obtido durante a fase de treinamento da rede utilizando um conjunto diferente de dados de treino (HAYKIN, 2001). O método consiste em acompanhar a evolução do aprendizado nas curvas correspondentes aos subconjuntos de dados de treinamento e de validação. Desta forma, o treinamento é interrompido quando a curva da validação decresce a um erro quadrático mínimo e antes de começar a crescer, conforme o treinamento continua (GUIMARÃES et al., 2007).

A partir do momento em que a rede foi treinada, novos testes foram realizados com condições diferentes das primeiras com o objetivo de validação da rede neural, optou-se por escolher uma condição intermediária e uma condição com maior velocidade e menor avanço indicados para a ferramenta de PCBN. Estas condições se encontram na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Parâmetros de corte dos testes de validação

Condição	V_c (m/min)	f (mm/rot.)	a_p (mm)
5	200	0,15	0,2
6	250	0,05	0,2

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados do presente trabalho, onde se optou por dividi-los em cinco tópicos: i) Desgaste máximo de flanco; ii) força de usinagem e rugosidade superficial; iii) Corrente elétrica de alimentação do motor da máquina ferramenta; iv) Sinal de emissão acústica; v) Aplicação da rede neural artificial (RNA), alimentada com as variáveis analisadas.

4.1 Resultados do desgaste máximo de flanco ($VB_{BMÁX}$)

As Figuras 4.1 a 4.4 apresentam o comportamento típico do desgaste das ferramentas de corte utilizadas no trabalho em função do tempo de usinagem para as quatro diferentes condições de corte testadas, conforme Tabela 3.2. Deve ser ressaltado que os pontos destes gráficos são médias de três medições (teste, réplica e tréplica) e o critério de fim de vida adotado foi o desgaste de flanco máximo de 0,6 mm.

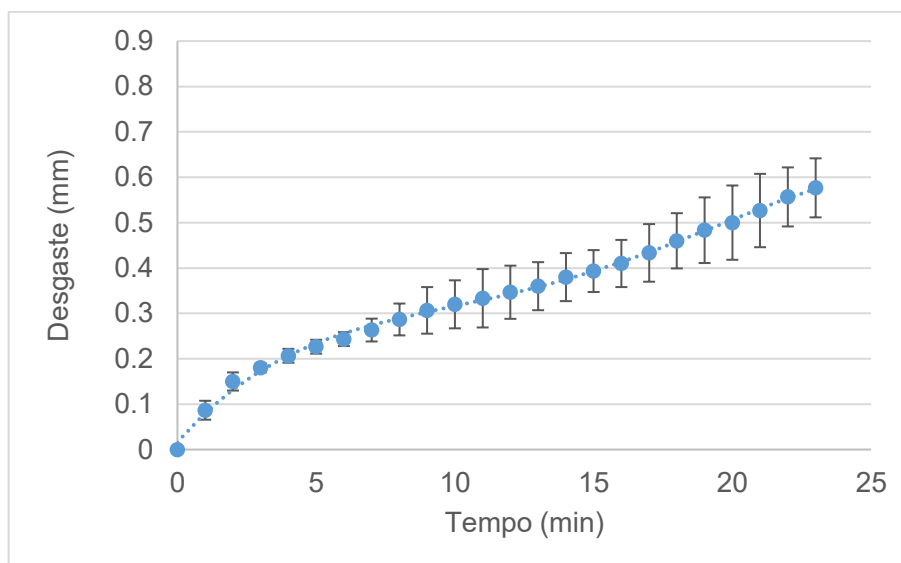


Figura 4.1 - Desgaste de flanco máximo (VB_{BMax}) das ferramentas na condição 1 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

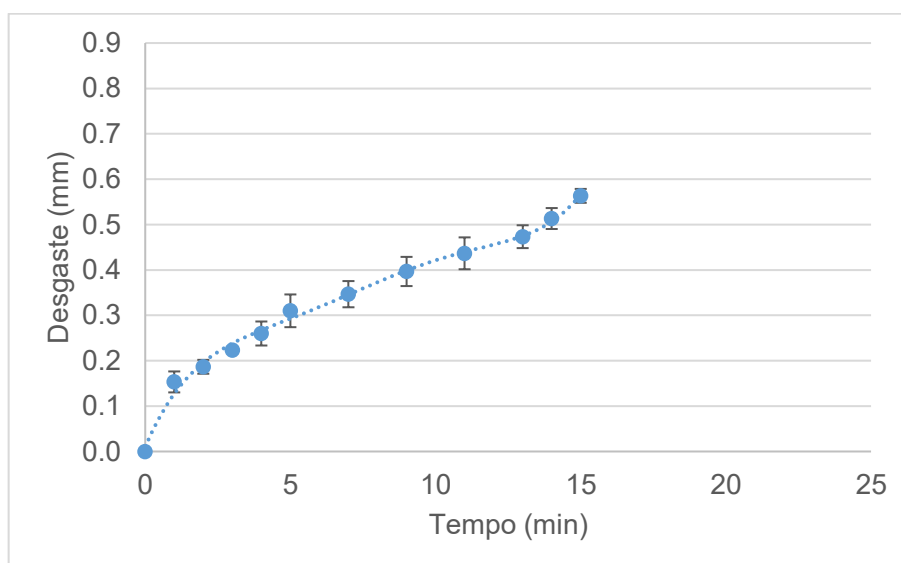


Figura 4.2 – Desgaste de flanco máximo (VB_{BMax}) das ferramentas na condição 2 ($v_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

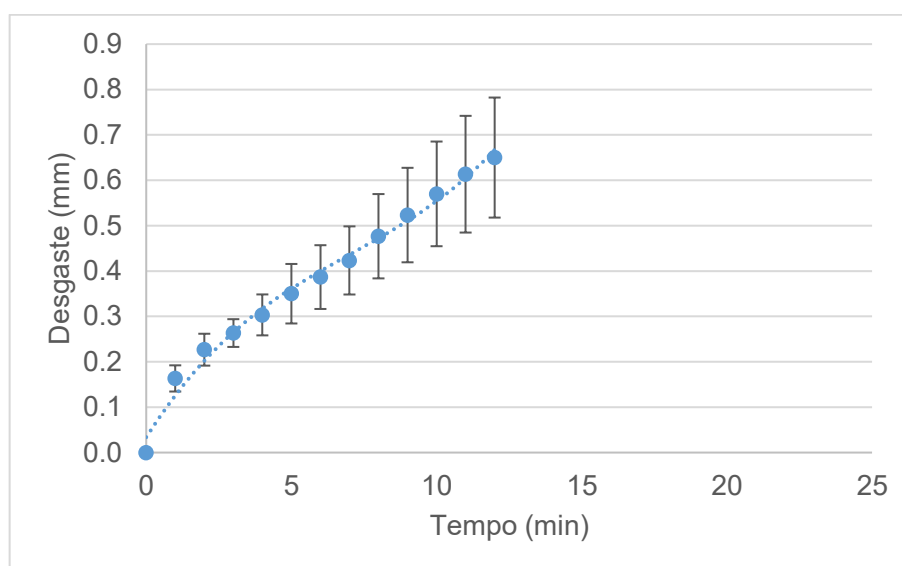


Figura 4.3 - Desgaste de flanco máximo (VB_{BMax}) das ferramentas na condição 3 ($v_c = 225$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

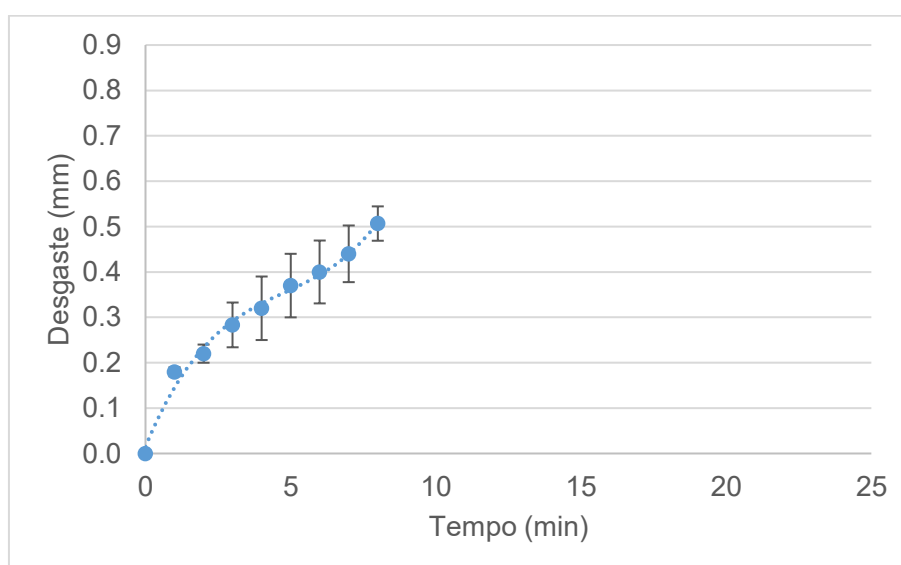


Figura 4.4 - Desgaste de flanco máximo (VB_{BMax}) das ferramentas na condição 4 ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

As Figuras 4.1 a 4.4 mostram que o comportamento do desgaste dos insertos utilizados no trabalho estão de acordo com a literatura sobre o assunto, tema abordado no capítulo de Revisão Bibliográfica. Observa-se que o desgaste em função do tempo de corte segue a tendência típica da curva em “S”, onde no início do corte há uma alta taxa de desgaste, com desaceleração (Estágio I); logo depois o desgaste entre em regime, seguindo uma taxa aproximadamente constante (Estágio II) e finalmente uma nova alta taxa de

desgaste, com aceleração (Estágio III). Em nenhum momento as curvas atingiram o final do Estágio III, onde a quebra da ferramenta é decretada.

Nota-se que a condição que apresentou maior vida da ferramenta é a condição 1 (24 minutos) com os menores parâmetros de corte ($V_c = 175$ m/min, $f = 01$ mm/rot.), porém, considerando o volume de material removido até o fim de vida ($VB_{BMAX} = 0,6$ mm), a condição 2 ($V_c = 175$ m/min, $f = 0,2$ mm/rot.) foi a mais eficiente, como mostra a Figura 4.5.

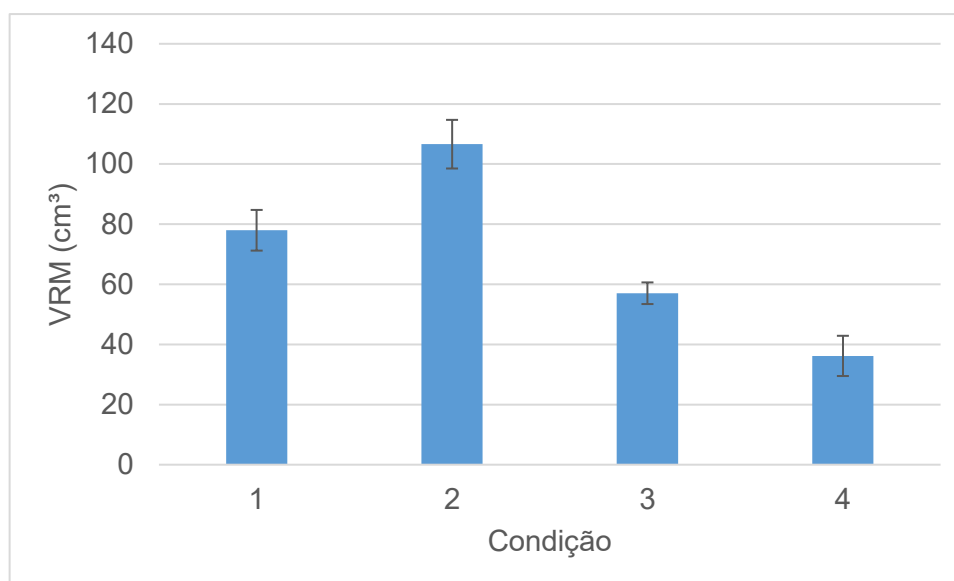


Figura 4.5 - Volume de material removido em cada teste

Na menor velocidade de corte de 175 m/min, o aumento do avanço acelerou o desgaste da ferramenta, reduzindo sua vida para aproximadamente 15 min. Isto acontece porque a área da seção de corte é aumentada (dobro), o que acarreta em aumento no carregamento (tensões) da ferramenta e geração de calor, acelerando o desgaste, como esperado (MACHADO et al., 2015). Entretanto, como o avanço é dobrado, a taxa de remoção de material também o é, promovendo maior o volume removido (VMR), mesmo para um tempo de vida em torno de 37,5% menor.

O aumento da velocidade de corte (condições 3 e 4) para 225 m/min (aumento de 28,6%) faz aumentar a temperatura, que apesar de propiciar uma diminuição da resistência ao cisalhamento do material da peça, acelera o desgaste da ferramenta, reduzindo consideravelmente a sua vida. Neste caso, onde a geração de calor é mais crítica, mesmo dobrando o avanço para 0,2 mm/rot. e, conseqüentemente a taxa de remoção de material, o VRM foi inferior àquele obtido com o menor avanço de 0,1 mm/rot., diferente do que ocorreu com a menor velocidade de corte.

Segundo Wang e Liu (1999), na grande maioria dos casos a temperatura da ferramenta é afetada principalmente pela velocidade de corte enquanto profundidade de corte e o avanço não têm influencias tão severas assim.

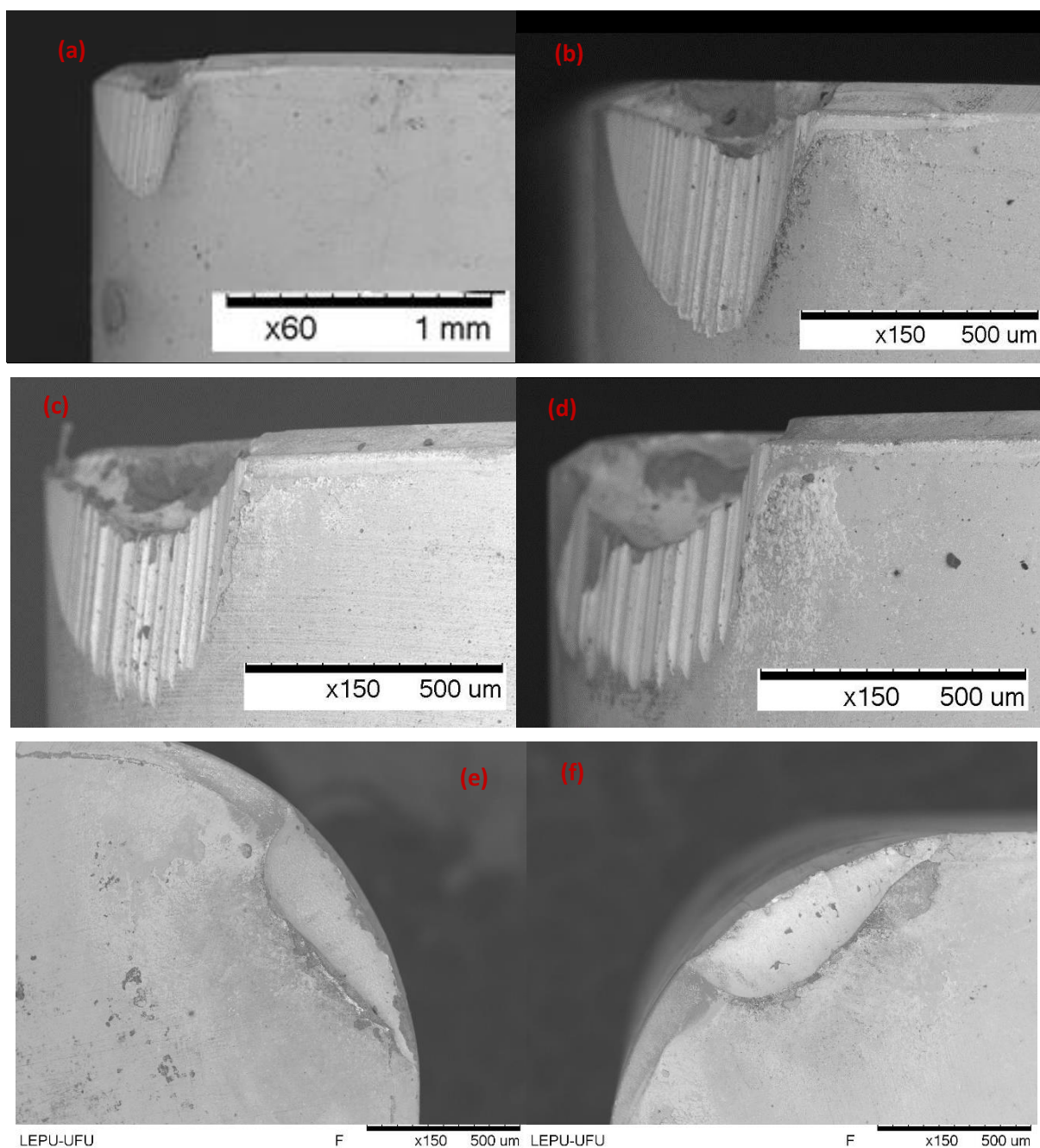


Figura 4.6 - Fotos de algumas ferramentas obtidas no Microscópio Eletrônica de Varredura (MEV) – (a) – Desgaste de flanco, Condição 1; (b) – Desgaste de flanco, Condição 1; (c) – Desgaste de flanco, Condição 2; (d) – Desgaste de flanco, Condição 3; (e) – Desgaste de cratera, Condição 1; (f) – Desgaste de cratera, Condição 2

Em todas as condições testadas, o mecanismo de desgaste predominante no flanco das ferramentas é o abrasivo (sulcos paralelos na superfície, característico de ação de partículas duras abrasivas). Isto se deve, como previsto, ao elevado teor de elementos formadores de carbonetos duros, presentes na microestrutura do aço endurecido. Estes carbonetos duros são capazes de promover abrasão no ligante cerâmico da ferramenta (na composição da ferramenta utilizada tem-se 50% de ligante cerâmico e o mesmo teor de CBN). Não se descarta, entretanto, a possibilidade de a abrasão também ocorrer no CBN, neste caso, por partículas do próprio CBN, eventualmente arrancadas por adesão (*attrition*). Na figura 4.6, a observação da parte superior dos insertos indica que além de microlascamentos, principalmente nas maiores velocidades de corte, ocorreu também o desgaste adesivo, caracterizado pelos aspectos ásperos de algumas regiões desgastadas. Na superfície de saída, o desgaste de cratera apresenta um aspecto mais liso, característico do desgaste difusivo, promovido pelas elevadas temperaturas na interface com o cavaco, mesmo na condição de menor velocidade de corte (175 m/min)

Lahif et al. (2007) mostram que os mecanismos de desgaste mais atuantes em torneamento de peças endurecidas, são a abrasão, a adesão, a difusão e reação química. Huang et al. (2007) afirmam que aços contendo grande quantidade de carbonetos são propensos a desgastar mais as ferramentas, especialmente com o mecanismo de desgaste abrasivo.

4.2 Resultados da força de usinagem e da rugosidade superficial

As Figuras 4.7 a 4.10 mostram o comportamento das componentes de forças de usinagem (F_c , F_p e F_u) e da rugosidade (R_a , R_q e R_z) ao longo da vida da ferramenta. Observa-se que, para todas as condições testadas, tanto as forças como os parâmetros de rugosidade aumentam significativamente com o crescimento do desgaste, porém, para a condição 4 (225 m/min – 0,2 mm/rot.) essa variação é ainda maior, chegando a uma diferença de aproximadamente 280 N para a força de usinagem.

Observa-se que a componente de força passiva (F_p) apresenta valores similares à força de corte (F_c), passando a superá-la quando vai se aproximando do fim de vida dos insertos. A componente de força de avanço sempre apresentou valores bem inferiores que as demais e seu crescimento com o desgaste da ferramenta é relativamente menor. Estes resultados são típicos de usinagem dura, onde a profundidade de corte é bem pequena (0,2 mm), bem inferior ao raio de ponta da ferramenta (neste caso, 1,2 mm). Em todas as condições testadas, entretanto, há uma boa relação das forças com o desgaste da ferramenta.

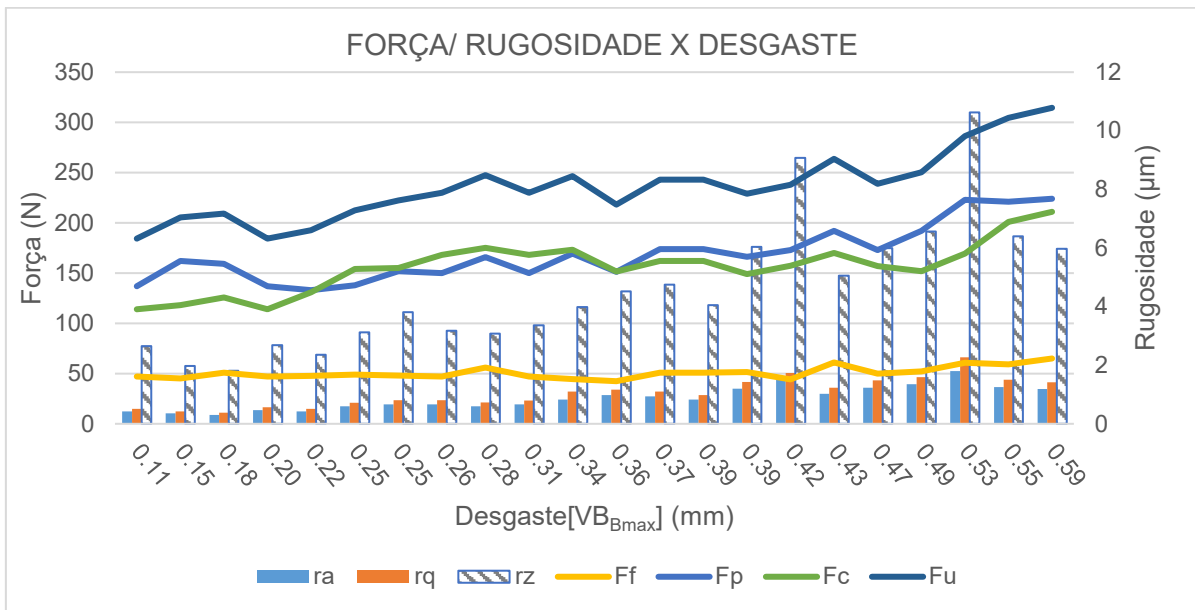


Figura 4.7 - Força e rugosidade em função do desgaste para a condição 1 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

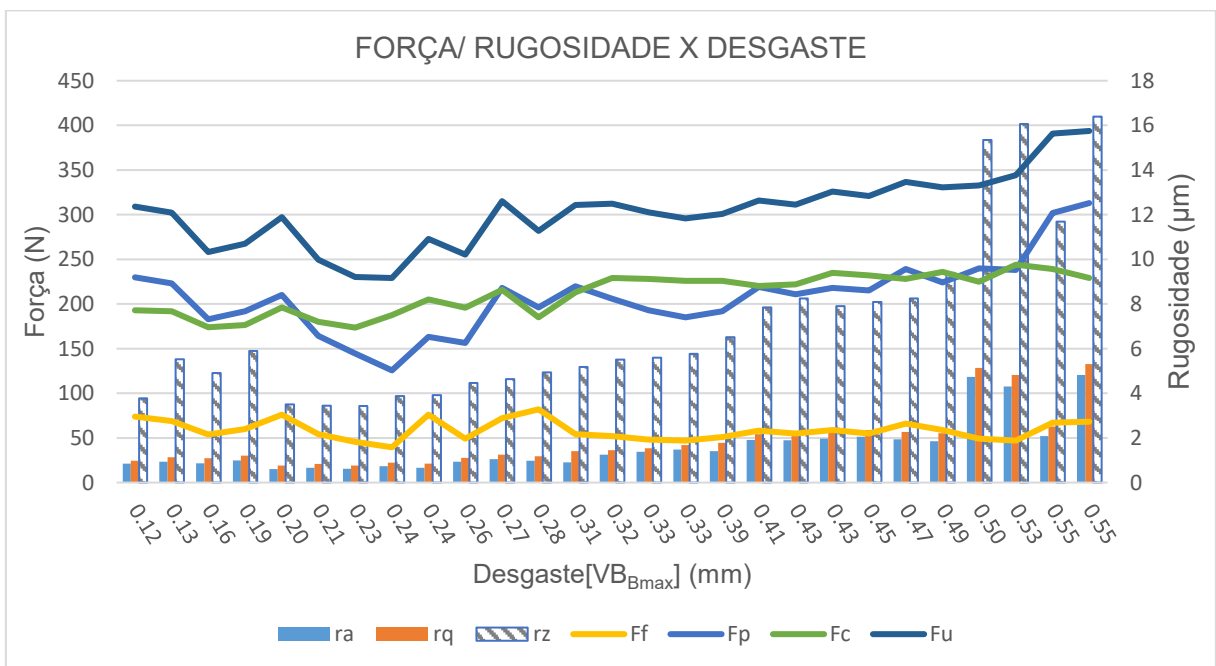


Figura 4.8 - Força e rugosidade em função do desgaste para a condição 2 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

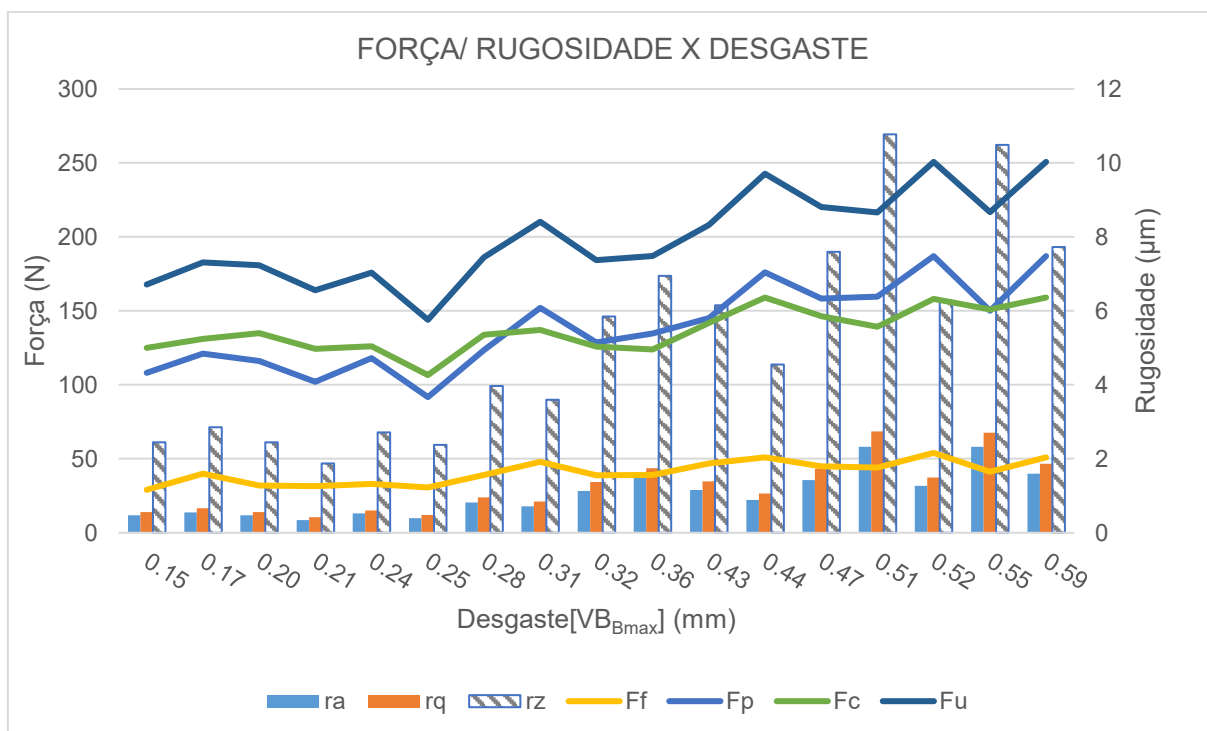


Figura 4.9 - Força e rugosidade em função do desgaste para a condição 3 ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

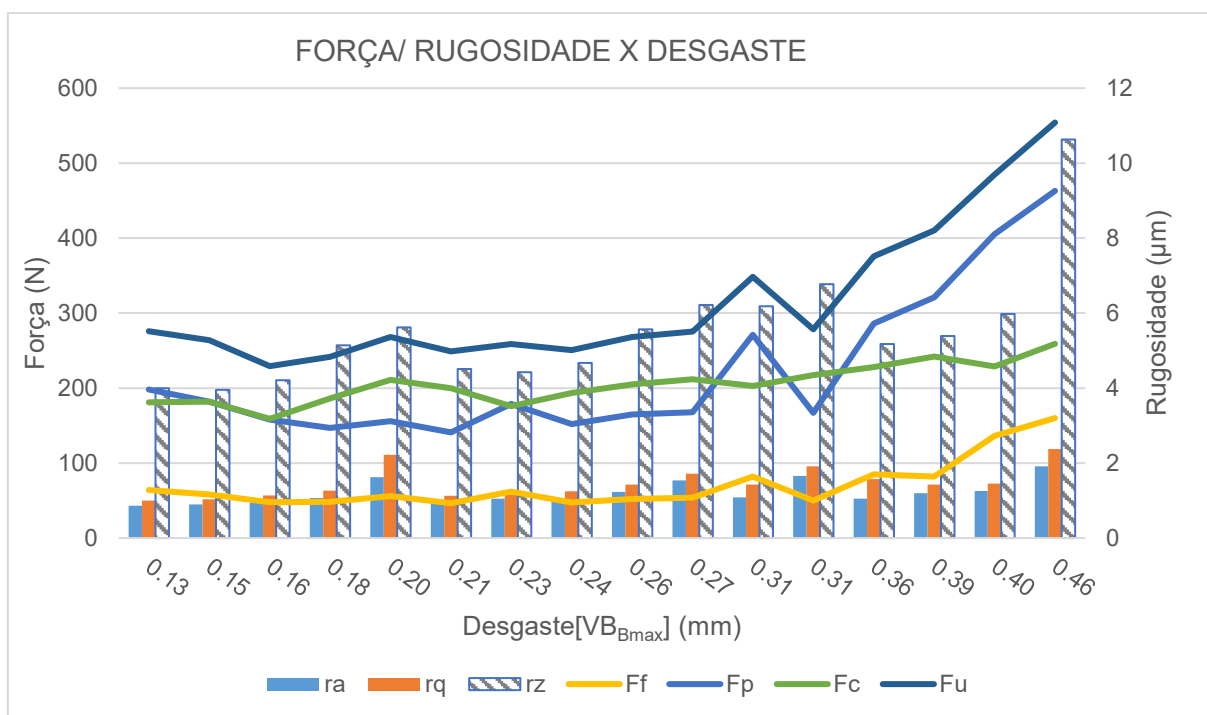


Figura 4.10 - Força e rugosidade em função do desgaste para a condição 4 ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

Note-se que as maiores forças de usinagem estão nas condições 2 e 4, isso se deve ao maior avanço (0,2 mm/volta), resultando em uma maior área de seção de corte. A velocidade de corte não apresentou influência significativa na força de usinagem (F_u).

Segundo a literatura (MACHADO et al. 2015), esperava-se que a condição 3 ($v_c = 225$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.) apresentasse melhor rugosidade, pois possui a maior velocidade de corte (a temperatura gera um “amolecimento” na peça usinada) e menor avanço, porém, a condição 1 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.) também apresentou dados de rugosidade próximos a condição 3, o que mostra que a influência do avanço é maior do que a influência da velocidade de corte para estas condições.

No geral, apesar de algumas oscilações, pode-se observar o efeito nocivo do desgaste nos parâmetros de rugosidade em todas as condições de corte testadas. Há sempre o crescimento destes com o desgaste da ferramenta, sendo mais evidente para o maior dos parâmetros, o Rz.

4.3 Resultados da corrente elétrica de alimentação do motor da máquina ferramenta

A Figura 4.11 mostra a curva de potência de usinagem em vazio em função da rotação do motor principal da máquina, onde é possível observar um aumento de potência a medida que a velocidade aumenta. Essa curva é importante, pois a potência é retirada do eixo árvore do torno, sem isolar o motor principal, logo esse valor deve ser subtraído do sinal extraído do LabView. Além disso, o rendimento do motor é diferente para cada valor de rotação, gerando potências em vazio diferentes para cada valor da velocidade de corte e diâmetro da peça.

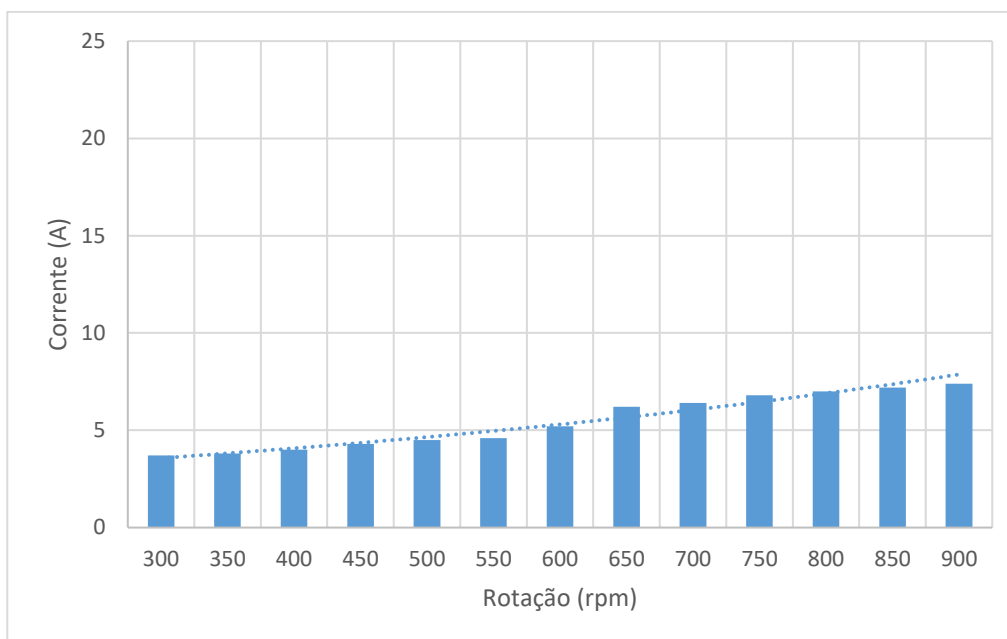


Figura 4.11 - Gráfico da corrente elétrica do torno em vazio, em função da rotação

As Figuras 4.12 a 4.15 mostram o valor da corrente elétrica (com a dedução da corrente em vazio) ao longo da vida da ferramenta de corte (aqui representada pelo desgaste VB_{Max}).

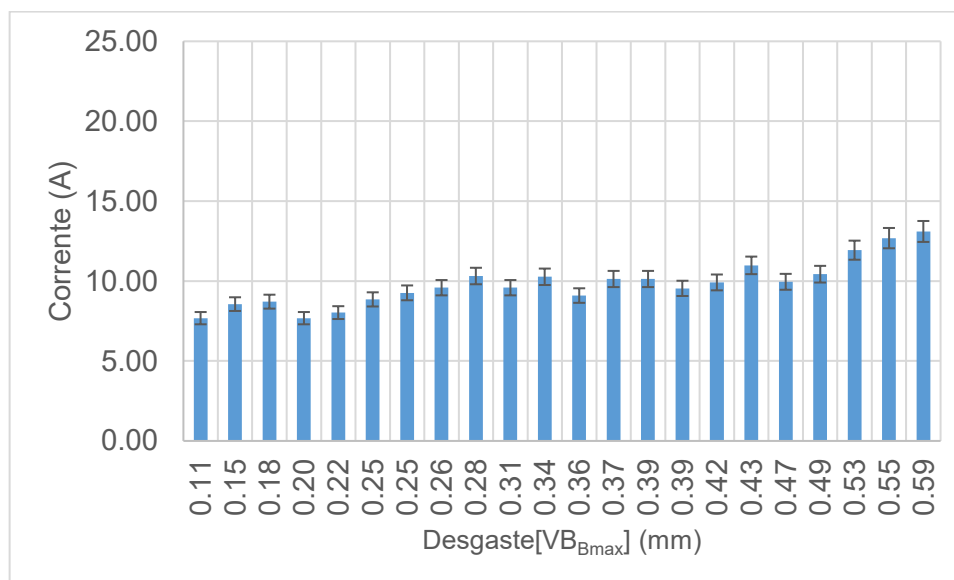


Figura 4.12 - Gráfico de corrente da condição 1 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

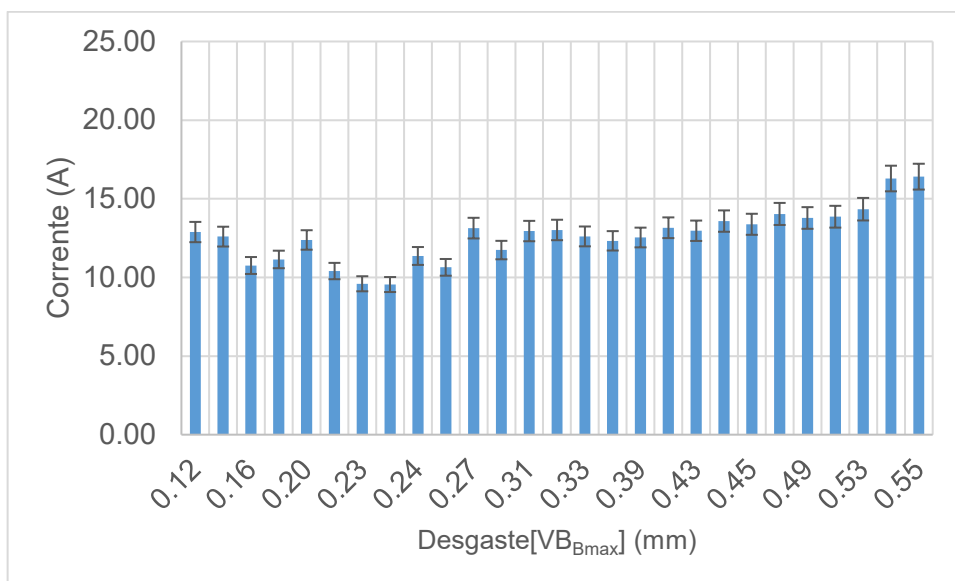


Figura 4.13 - Gráfico de corrente da condição 2 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

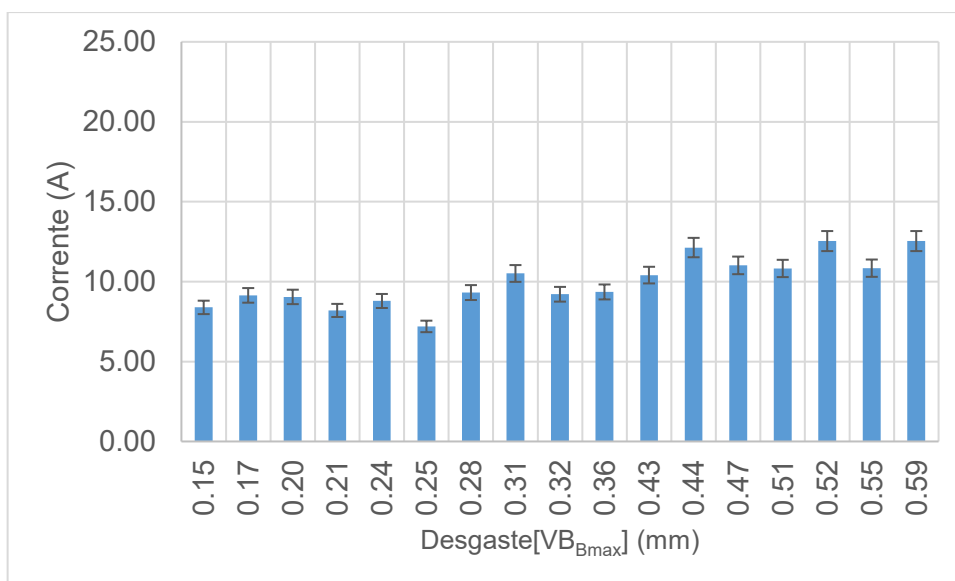


Figura 4.14 - Gráfico de corrente da condição 3 ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

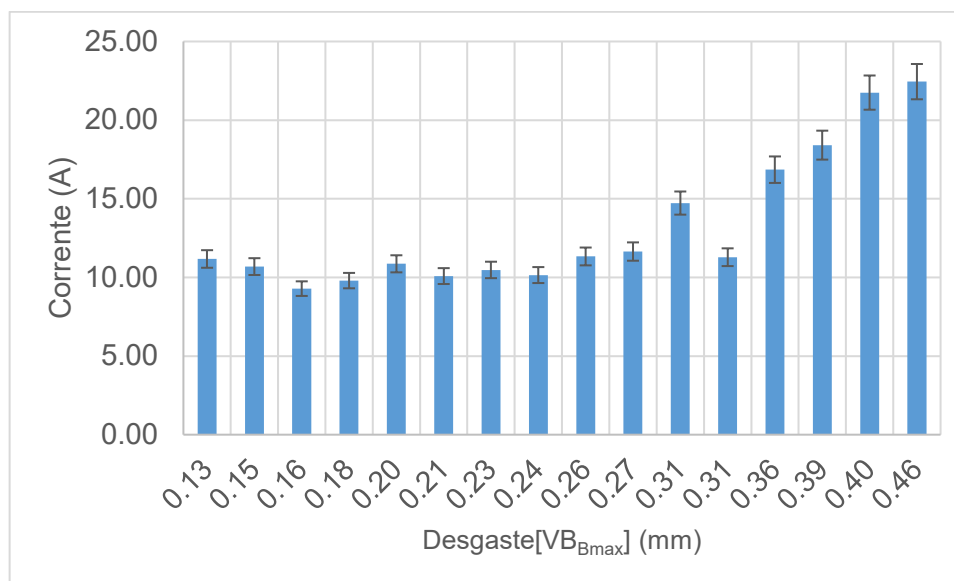


Figura 4.15 - Gráfico de corrente da condição 4 ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

Observa-se uma tendência de comportamento crescente da corrente com o desgaste da ferramenta em todas as condições testadas, embora esta relação seja mais evidente na condição 4, de maior velocidade de corte e avanço. Considerando que a corrente tem uma ligação direta com a potência de usinagem, observa-se um crescente aumento da potência com o desgaste da ferramenta, assim como ocorreu com as componentes de forças de usinagem, visto no item 4.2. As condições em que o avanço é maior (condições 2 e 4) consome-se mais energia para formar o cavaco e conseqüentemente apresentaram uma corrente elétrica superior àquelas com o avanço menor. Comparando com o comportamento da força de usinagem (Figuras 4.7 a 4.10), observa-se uma similaridade de crescimento da corrente do motor da máquina operatriz com o desgaste da ferramenta.

4.4 Resultados da emissão acústica

Os dados de emissão acústica foram divididos em 3 partes: sinal bruto, mapa de emissão acústica e RMS do sinal filtrado.

4.4.1 Sinal Bruto de emissão acústica

O sinal bruto de emissão acústica foi analisado juntamente com seu espectro de frequência e se mostra sensível ao desgaste do material. Nota-se uma maior variação para baixas velocidades e maiores avanços. O sinal foi previamente filtrado com um filtro passa alta com frequência de corte de 20 kHz.

A Figura 4.16 mostra o sinal bruto e seu espectro de frequência da EA na usinagem na condição 2, com uma ferramenta nova, podendo ser notado uma frequência principal de aproximadamente 34 kHz. A medida que a ferramenta se desgasta, novas frequências vão surgindo no espectro, como pode ser observado nas Figuras 4.17 e 4.18.

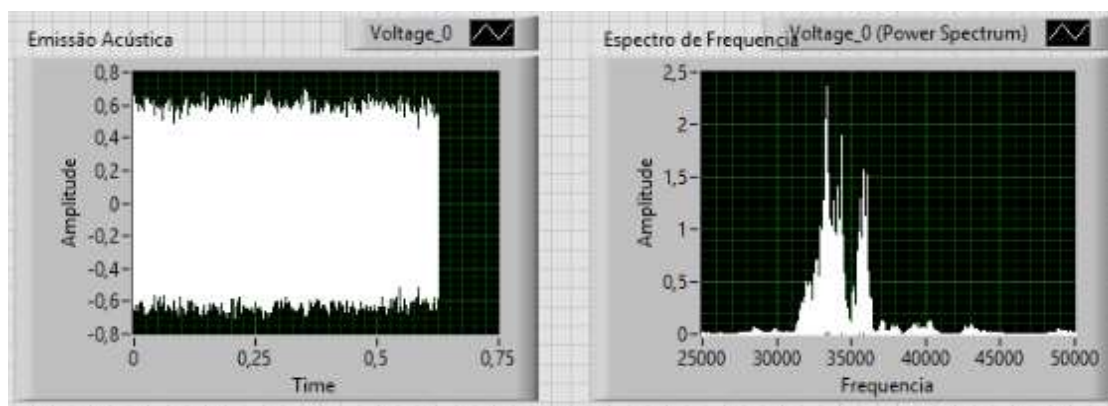


Figura 4.16 - Sinal bruto de emissão acústica e espectro de frequência de uma ferramenta nova ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

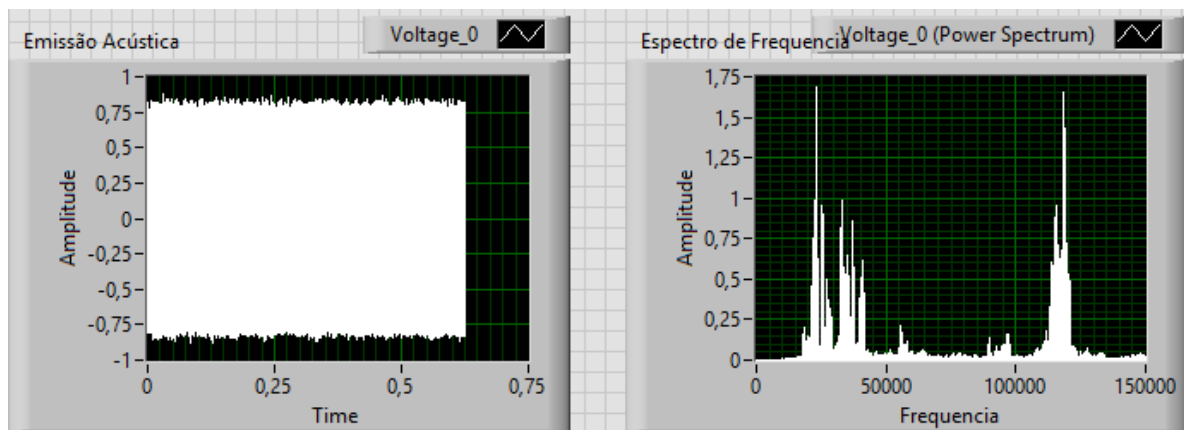


Figura 4.17 - Sinal bruto de emissão acústica e espectro de frequência de uma ferramenta em meia vida ($V_{BMAX} = 0,34$ mm) ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

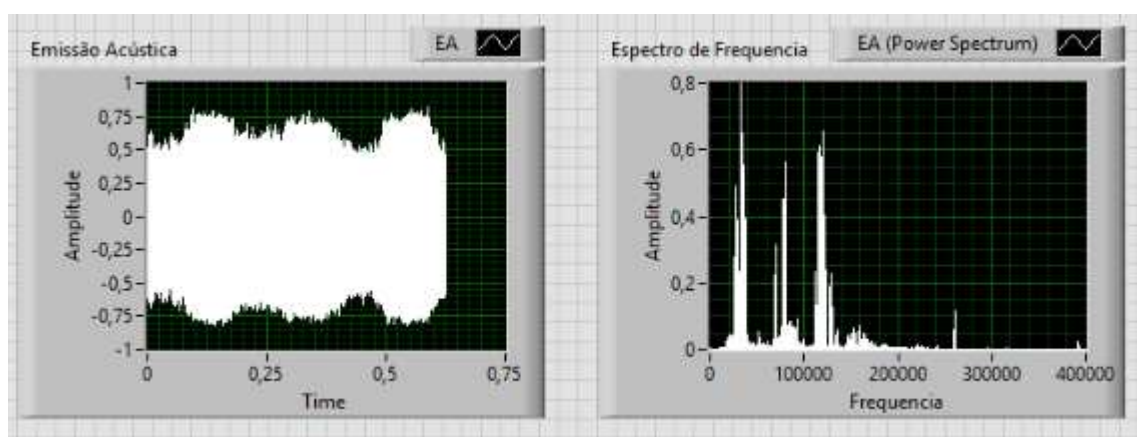


Figura 4.18 - Sinal bruto de emissão acústica e espectro de frequência de uma ferramenta fim de vida ($V_{B_{MAX}} > 0,50$ mm) ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

O espectro de frequências do sinal de EA para a condição 3 são apresentados nas Figuras 4.19 a 4.21, para uma ferramenta nova, meia vida e fim de vida, respectivamente. Essa condição também mostrou uma alteração no espectro à medida que a ferramenta se desgasta.

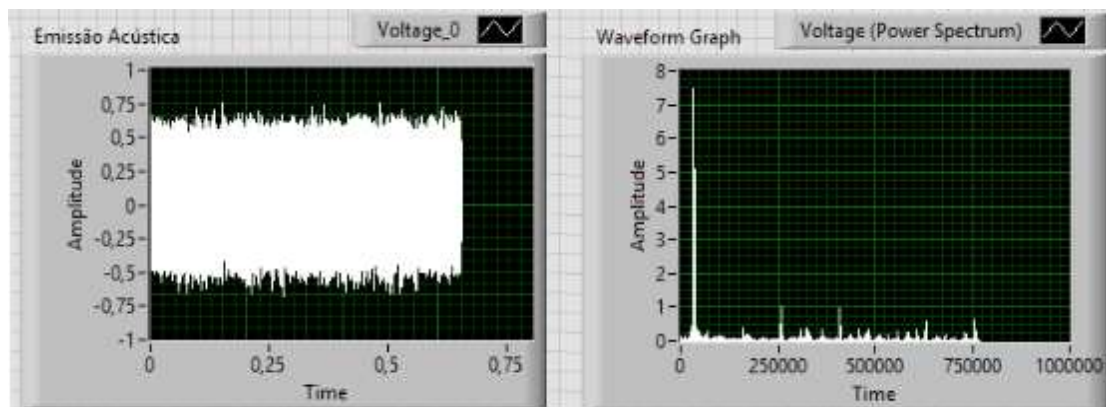


Figura 4.19 - Sinal bruto de emissão acústica e espectro de frequência de uma ferramenta nova ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm) (Condição 3)

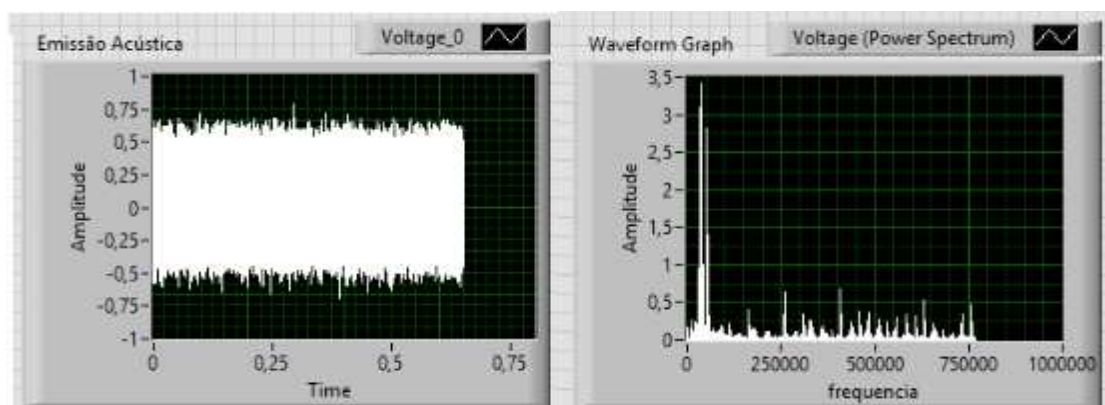


Figura 4.20 - Sinal bruto de emissão acústica e espectro de frequência de uma ferramenta em meia vida ($VB_{MAX} = 0,32$ mm) ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm) (Condição 3)

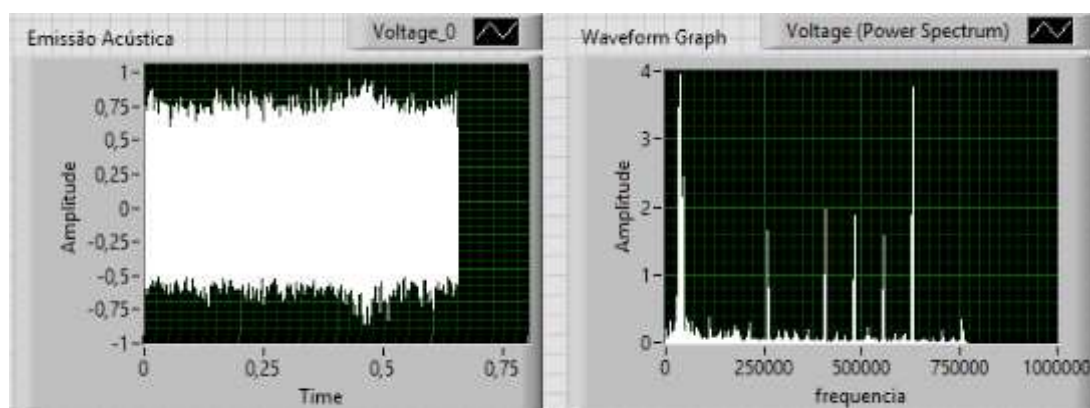


Figura 4.21 - Sinal bruto de emissão acústica e espectro de frequência de uma ferramenta em fim de vida ($VB_{MAX} > 0,50$ mm) ($V_c = 225$ m/min; $f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm) (Condição 3)

Os sinais brutos de emissão acústicas também foram analisados no software MatLab®. As Figuras 4.22 a 4.24 mostram os espectros da condição 2 (mesmos das Figuras 4.16 a 4.18) obtidos por este software, onde os sinais são mais nitidamente identificados. É possível observar diferentes frequências sendo geradas entre 35 kHz e 60 kHz com o desgaste da ferramenta. Foi tentado analisar o sinal RMS nesta faixa de frequência, porém os dados ficam aleatórios do meio para o fim de vida, dificultando a correlação com o desgaste da ferramenta.

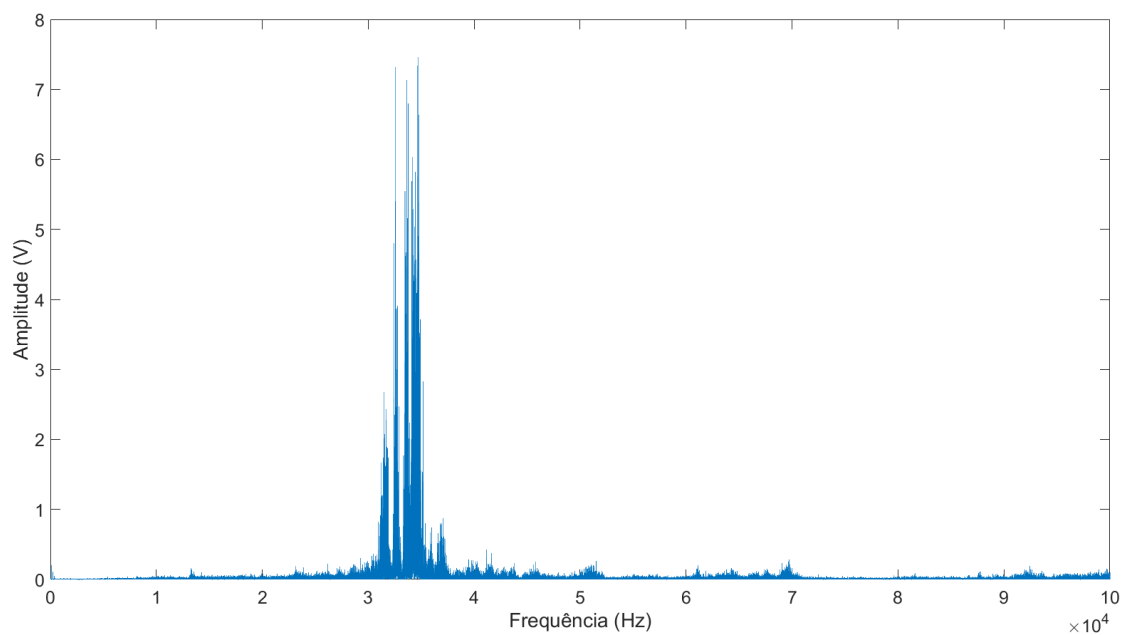


Figura 4.22 - Espectro de frequência de uma ferramenta nova para a condição 2 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

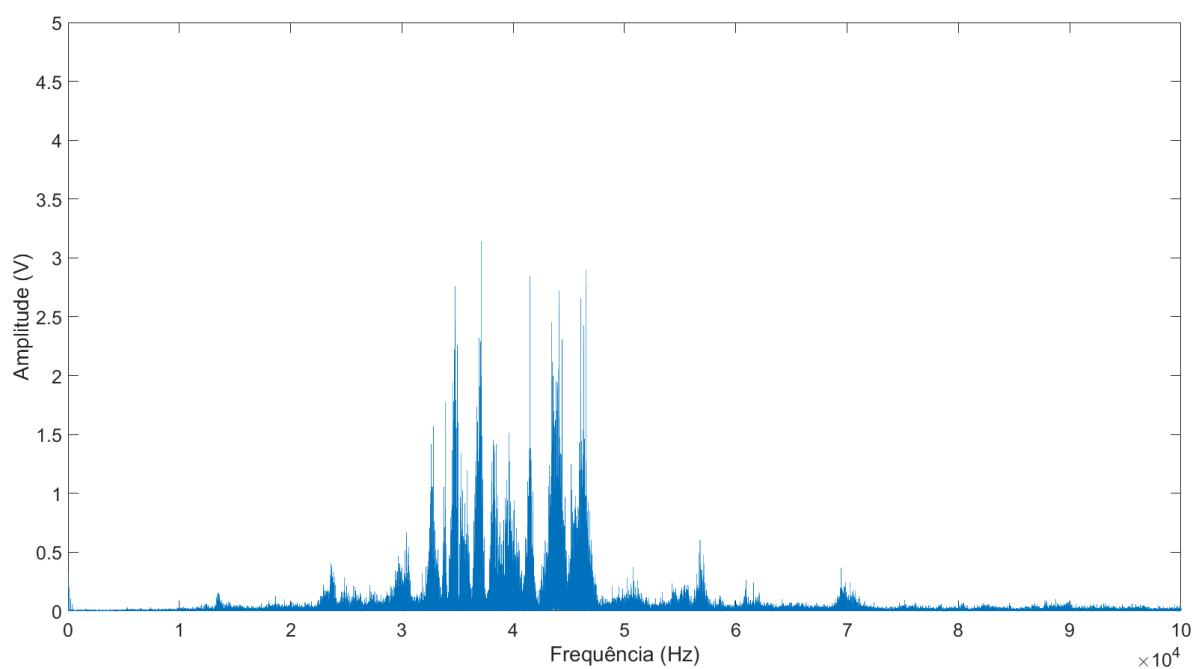


Figura 4.23 - Espectro de frequência de uma ferramenta em meia vida para a condição 2 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

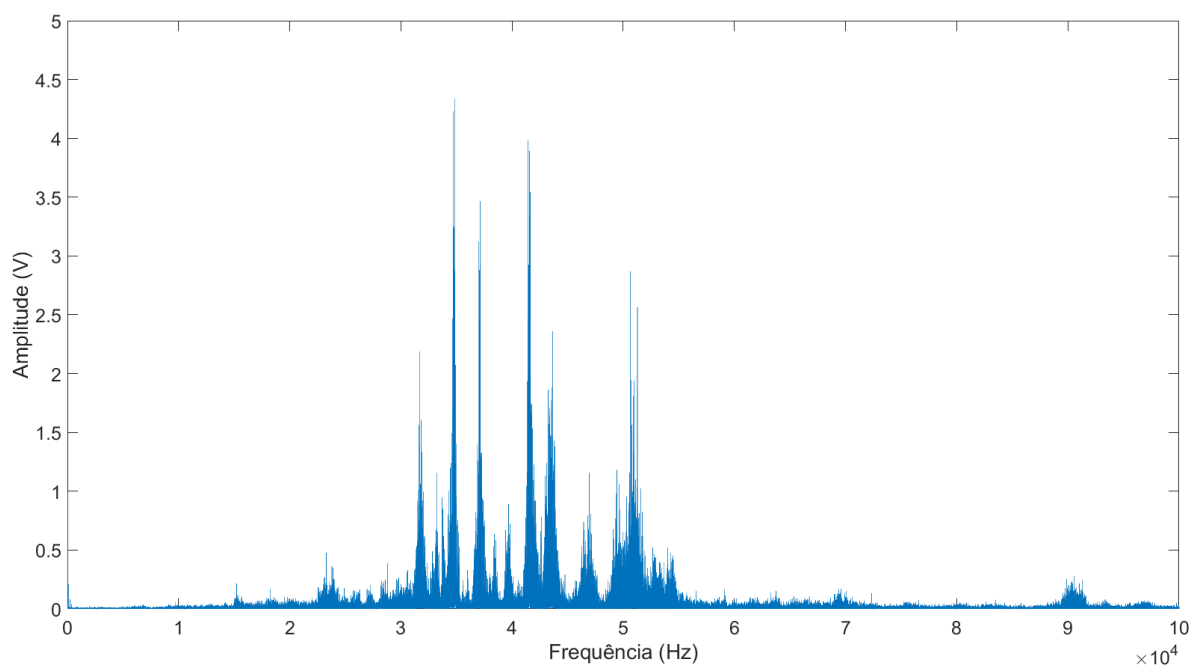


Figura 4.24 - Espectro de frequência de uma ferramenta em fim de vida para a condição 2 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

As Figuras. 4.25 e 4.26 mostram o comportamento do sinal bruto no domínio do tempo, onde se observa grande variabilidade deste sinal.

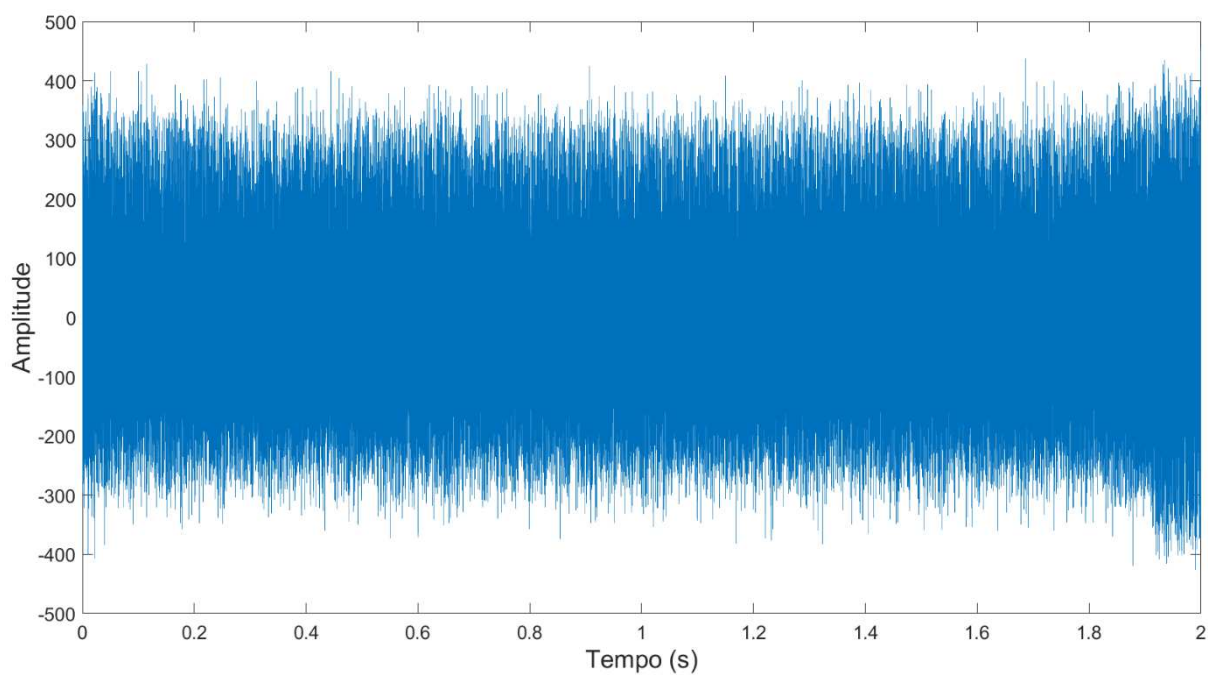


Figura 4.25 – Sinal bruto de uma ferramenta nova para a condição 2 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

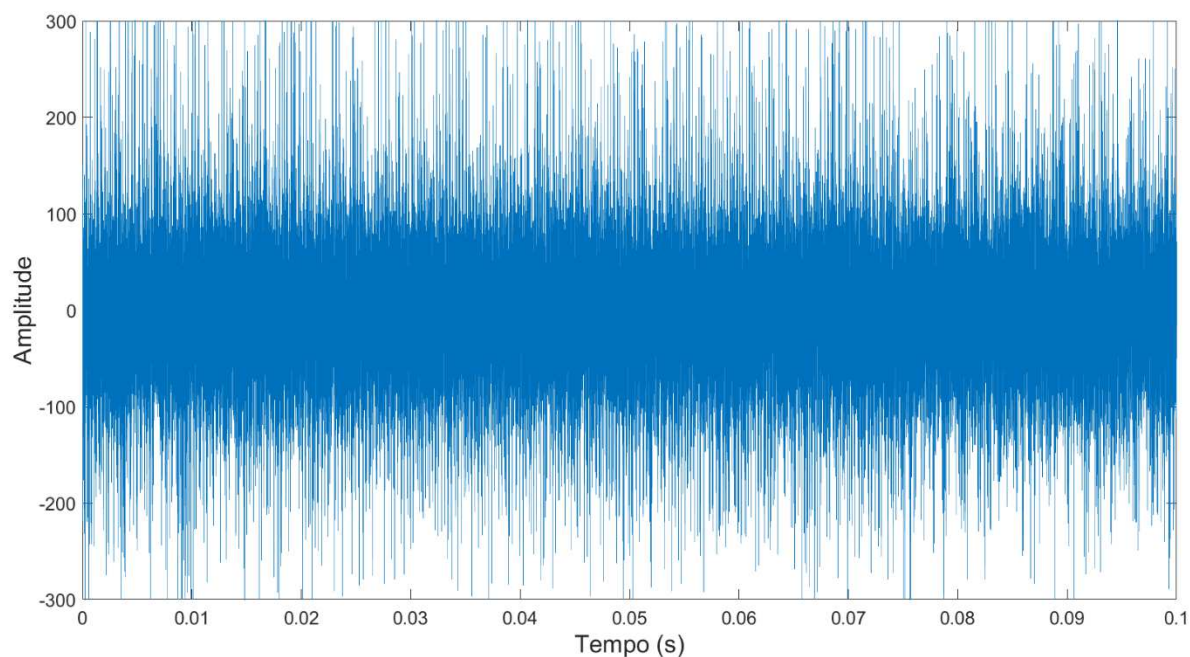


Figura 4.26 - Sinal bruto de uma ferramenta nova para a condição 2 ($V_c = 175$ m/min; $f = 0,2$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

4.4.2 Mapa De Emissão Acústica

O mapa de emissão acústica se mostrou bastante sensível às condições de corte, especialmente quanto à variação do avanço, mas também se mostrou sensível ao desgaste da ferramenta. A Figura 4.27 mostra os mapas com a variação da velocidade de corte e a Figura 4.28 com a variação do avanço.

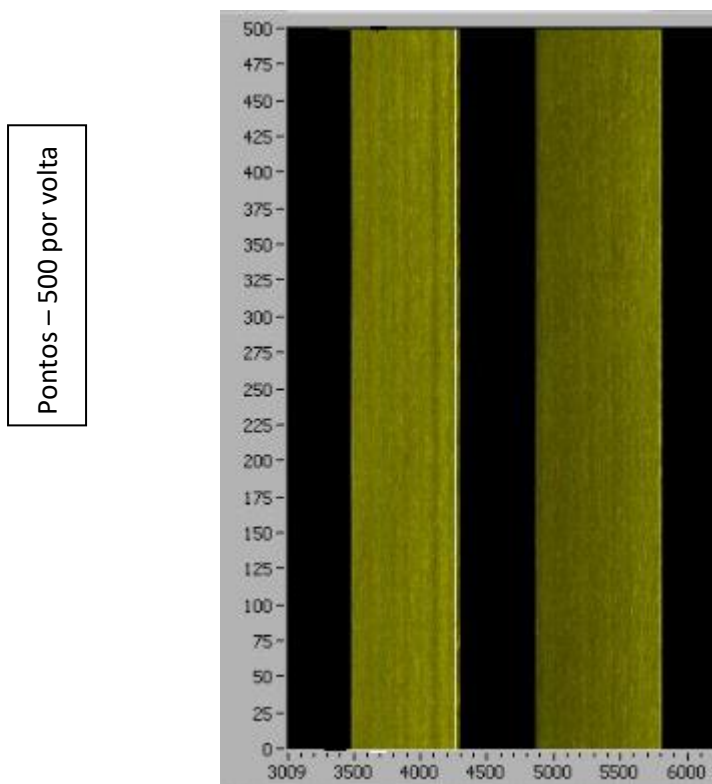


Figura 4.27 - Mapa de emissão acústica para diferentes velocidades ($V_c = 175$ m/min à esquerda e $V_c = 225$ m/min à direita) ($f = 0,1$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

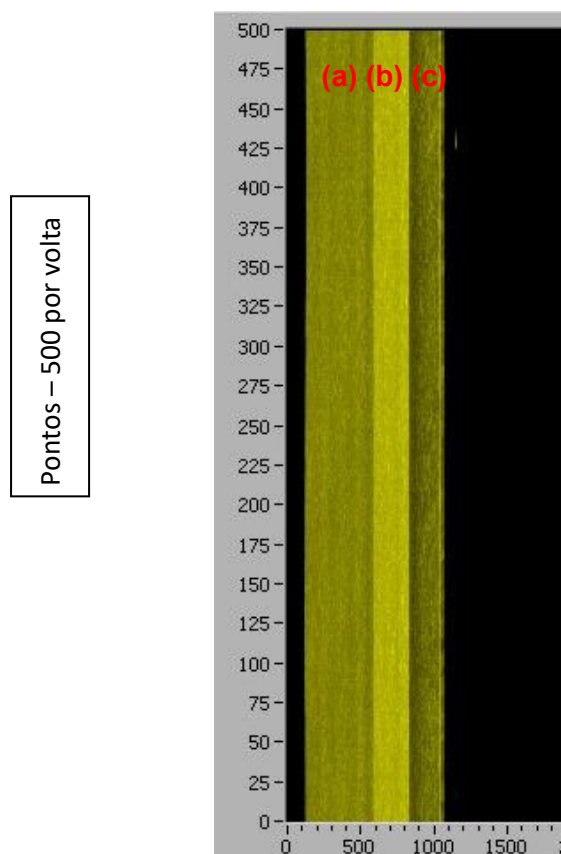


Figura 4.28 - Mapa de emissão acústica para diferentes avanços ((a) $f = 0,10$ mm/rot., (b) $f = 0,20$ mm/rot. e (c) $f = 0,05$ mm/rot.) ($V_c = 175$ m/min, $a_p = 0,2$ mm)

Nota-se que para maiores velocidades, a intensidade (luminosidade) do sinal é ligeiramente menor, isto ocorre devido à temperatura facilitar a usinagem do material, envolvendo deformações mais suaves. Já o avanço torna o sinal mais luminoso à medida que este parâmetro é aumentado, pois com este aumento, aumentam-se junto os esforços do processo e a quantidade de deformação sofrida pelo material, alterando o sinal de EA.

A Figura 4.29 apresenta o mapa de emissão acústica para diferentes estados da ferramenta.

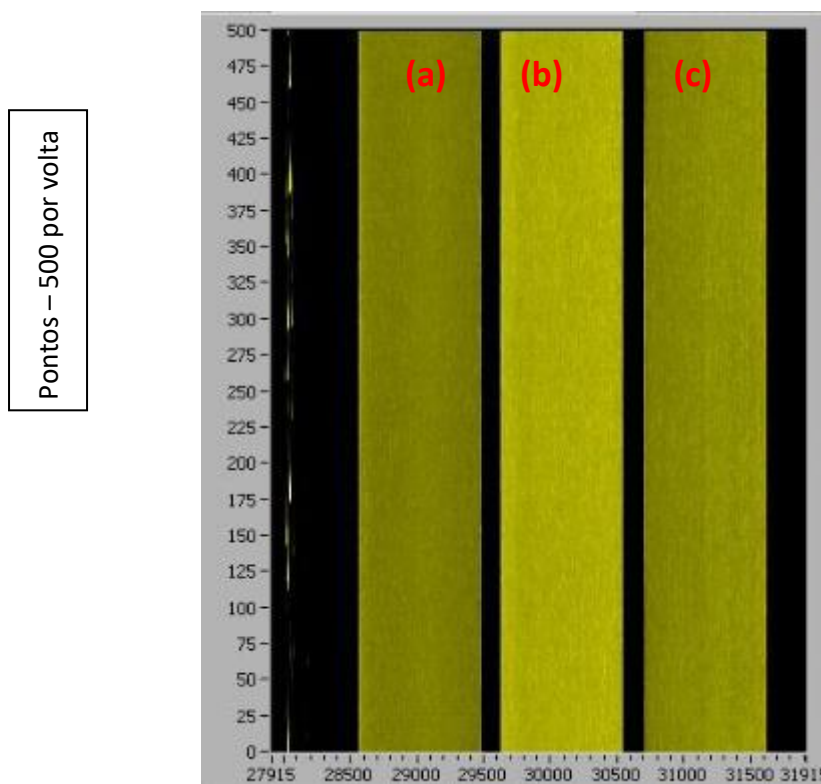


Figura 4.29 - Mapa de emissão acústica para diferentes estados da ferramenta na condição 2 ((a) ferramenta nova; (b) ferramenta em meia vida; (c) ferramenta em fim de vida)

Na Figura 4.29 é possível observar uma intensidade luminosa superior na região II (b) de desgaste em relação a região III (c), isto mostra que o sinal de emissão acústica é superior neste caso.

4.4.3 Resultados do RMS do sinal de emissão acústica filtrado

O sinal de emissão acústica foi filtrado de 30 a 40 kHz, onde se encontra as frequências dominantes do sinal encontradas através da Transformada Rápida de Fourier. O filtro utilizado foi o de Butterworth de coeficiente 3, aplicado em MatLab. As Figuras 4.30 e 4.31 mostra uma comparação entre o sinal bruto e filtrado da emissão acústica. As Figuras 4.32 à 4.35 demonstram o RMS do sinal filtrado para todas as condições.

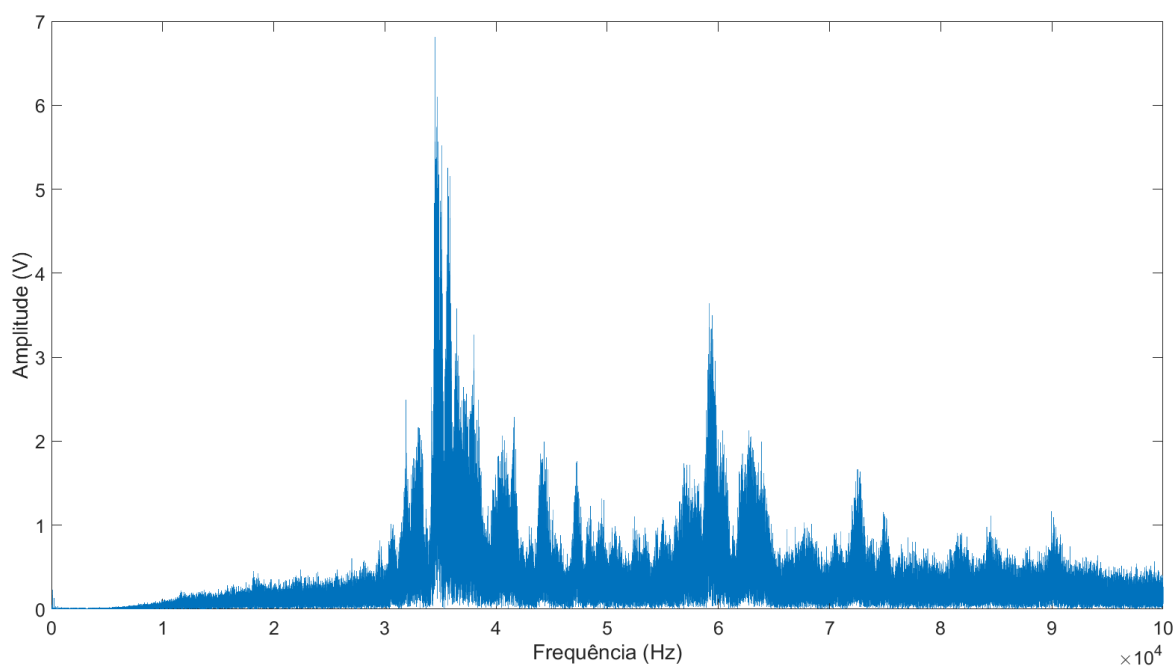


Figura 4.30 – Espectro de um sinal bruto de emissão acústica

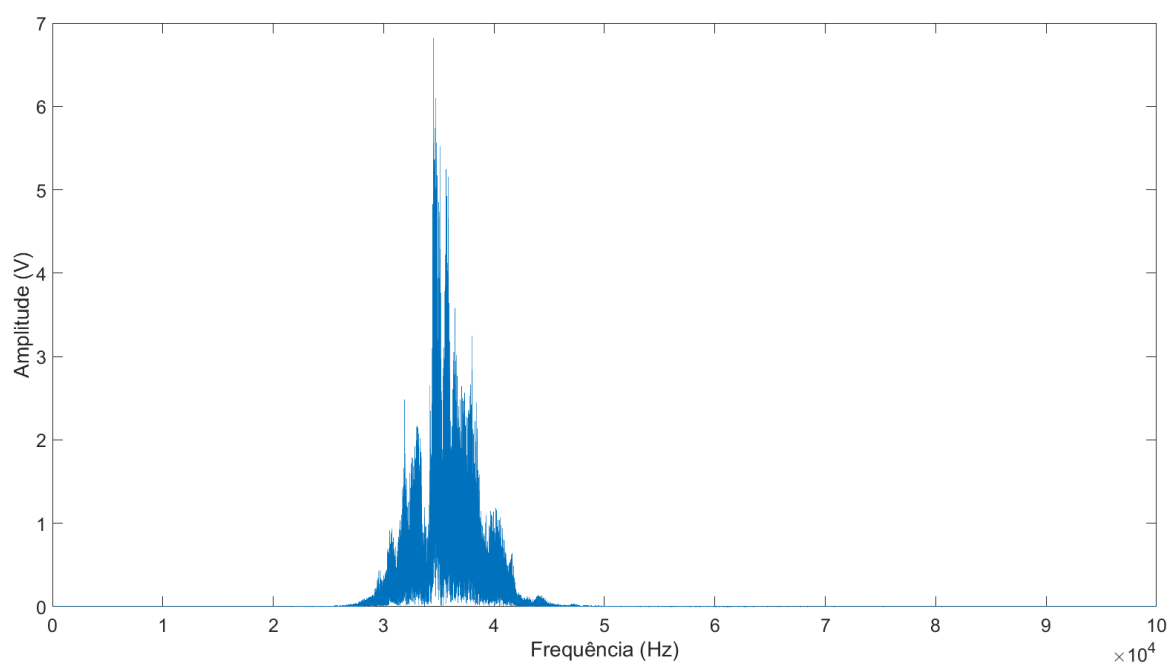


Figura 4.31 - Espectro de um sinal filtrado de emissão acústica de 30 kHz a 40 kHz

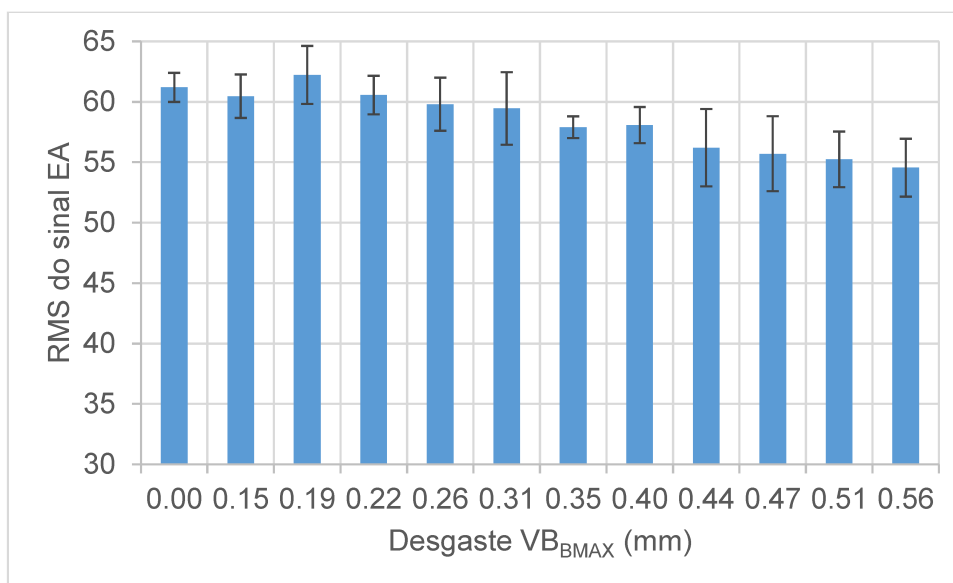


Figura 4.32 - Resultados do sinal de emissão acústica da condição 1

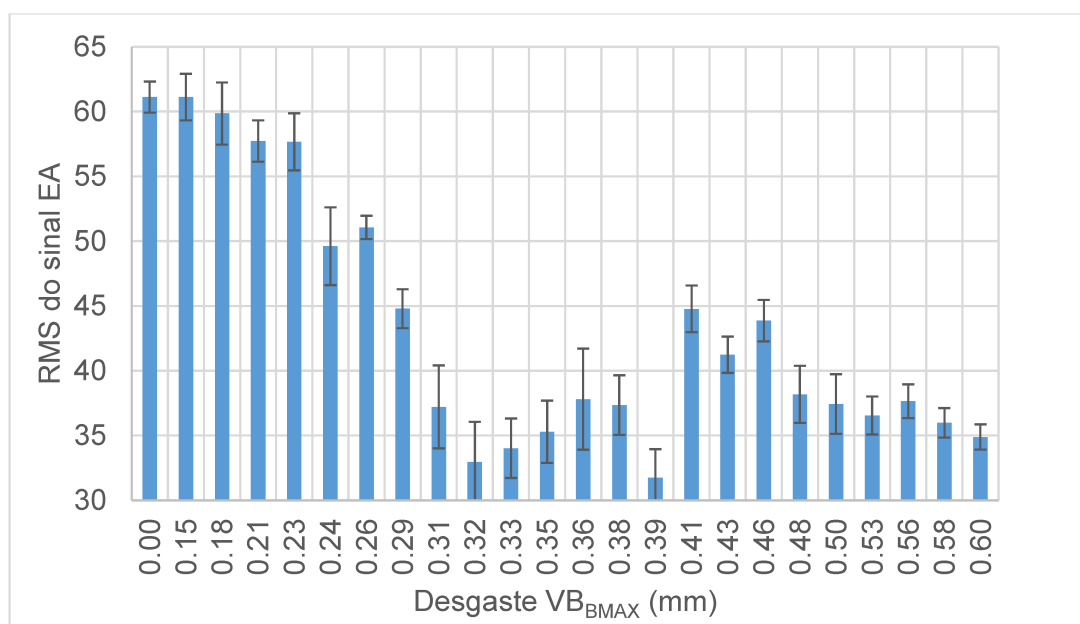


Figura 4.33 - Resultados do sinal de emissão acústica da condição 2

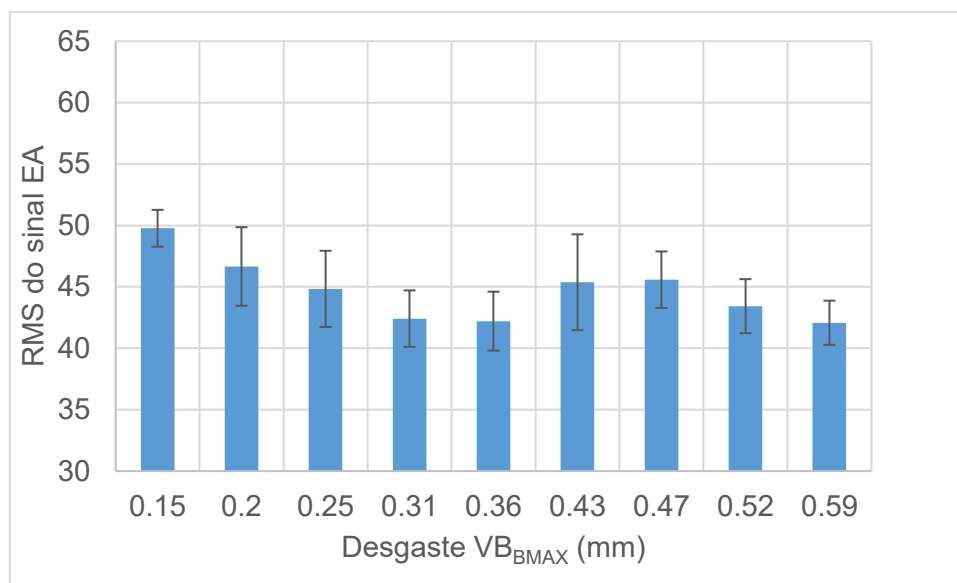


Figura 4.34 - Resultados do sinal de emissão acústica da condição 3

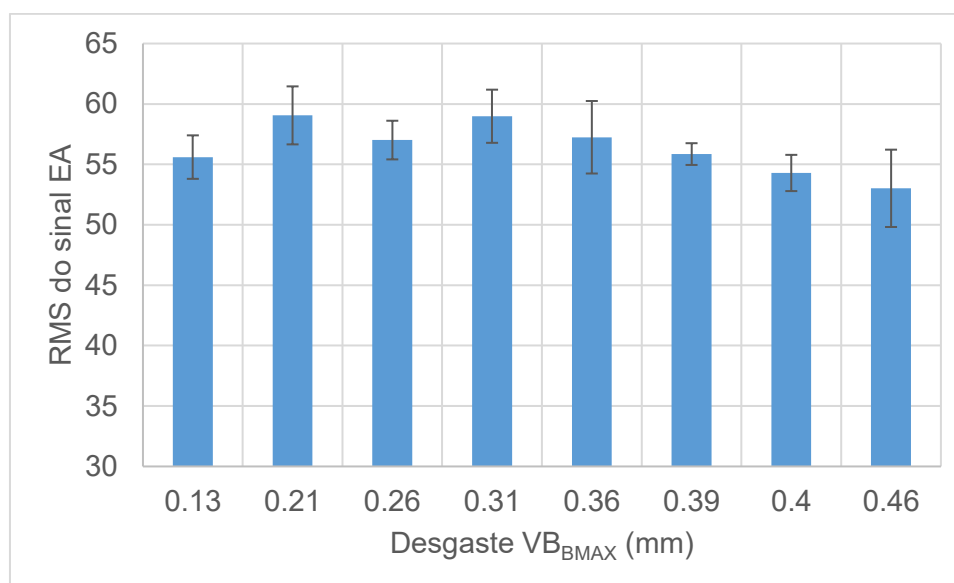


Figura 4.35 - Resultados do sinal de emissão acústica da condição 4

Através das Figuras 4.32 a 4.35 pode-se observar que para todas as condições o sinal RMS tende a diminuir à medida que o desgaste aumenta, isto se deve ao fato de que o desgaste de cratera pode ter ajudado no escoamento do cavaco, diminuindo assim as vibrações no sistema e facilitando as deformações. Na figura 4.35 houve quebra na ferramenta, por isto o desgaste não chegou à 0,50 mm. Nota-se também que para as condições 2 e 4 (em que o avanço é maior, $f = 0,2$ mm/rot.) o sinal aumenta na casa dos 0,40 mm de desgaste. Este comportamento está relacionado com a mudança morfológica do desgaste da ferramenta de corte.

4.5 Resultados Redes Neurais Artificiais para o desgaste

O toolbox de redes neurais do MatLab separa aleatoriamente 70 % dos dados para treinamento, 15 % para validação e 15 % para testes para os conjuntos de Treino, Validação e Teste durante o treinamento da rede 6-5-5-1 para o desgaste em função do número de iterações. A Figura 3.36 ilustra a curva de evolução do erro médio quadrático durante a fase de treinamento. A partir da 205ª iteração o erro quadrática médio começa a aumentar, assim, o valor dos pesos da rede são definidos neste instante.

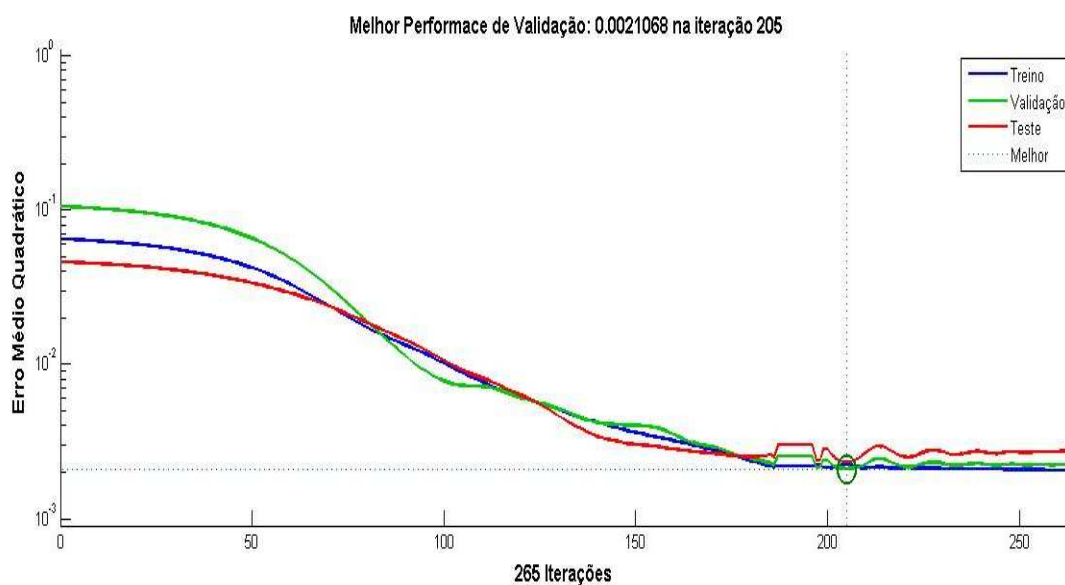


Figura 4.36 - Evolução do erro médio quadrático durante a fase de treinamento.

A Figura 4.37 apresenta o diagrama de dispersão entre os valores do desgaste experimental e o desgaste estimado pela rede 6-5-5-1. Pode-se observar um bom ajuste do modelo, visto que $r > 0,9$ tanto no conjunto de Treino, quanto nos conjuntos de Validação e Teste.

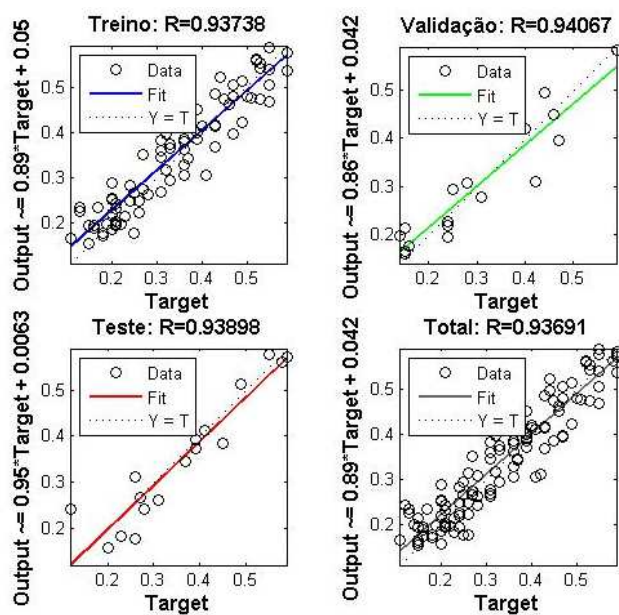


Figura 4.37 - Coeficiente de correlação entre os dados estimados pela RNA.

4.5.1 Validação do Modelo

A validação consiste em testar o modelo usando um conjunto de dados diferente do que foi usado durante a fase de treinamento. A tabela 4.1 demonstra os dados utilizados para este processo. Na coluna RNA é apresentado os valores do desgaste de flanco estimados pela rede, que são confrontados com os valores reais (coluna Desgaste). O desvio (erro) pode, assim, ser calculado.

Tabela 4.1 - Dados do processo de validação

V_c (m/min)	f (mm/rot.)	RMS de EA	Corrente (A)	F_u (N)	F_c (N)	Desgaste (mm)	RNA (mm)	Desvio (mm)
200	0,15	55,27	13,2	212,8	186	0,14	0,23	0,09
200	0,15	43,3	10,3	159,4	131	0,20	0,20	0,00
200	0,15	39,38	9,9	222,5	119	0,22	0,25	0,03
200	0,15	37,52	10,8	212,2	165	0,24	0,31	0,07
200	0,15	36,3	9,7	217,3	185	0,29	0,35	0,06
200	0,15	39,25	11,3	211,1	183	0,32	0,37	0,05
200	0,15	38,7	9,9	226,4	198	0,35	0,34	-0,01
200	0,15	38,6	10,6	240,3	195	0,37	0,38	0,01
200	0,15	37,1	9,8	222,9	198	0,39	0,38	-0,01
200	0,15	39,35	14,7	282,9	182	0,45	0,51	0,06
200	0,15	40,8	14,5	279,1	188	0,50	0,52	0,02
200	0,15	39,9	13,7	264,8	191	0,53	0,52	-0,01
200	0,15	36,9	15,2	292,7	197	0,57	0,58	0,01
250	0,05	33,2	7,1	120,5	90	0,20	0,27	0,07
250	0,05	30,3	7,4	125,8	88	0,30	0,31	0,01
250	0,05	31,6	8,9	150,6	83	0,40	0,37	-0,03
250	0,05	29	9,4	151,3	92	0,48	0,42	-0,06
250	0,05	28,5	9,8	157,8	96	0,56	0,44	-0,12

A rede neural artificial apresentou dados satisfatórios, especialmente para a condição 5 ($V_c = 200$ m/min; $f = 0,15$ mm/rot.) visto que o maior desvio foi de 0,09 mm. Para a condição 6 ($V_c = 250$ m/min; $f = 0,05$ mm/rot.) os resultados foram um pouco menos contundentes devido ao fato de, tanto a velocidade de corte quanto o avanço estarem fora da faixa treinada pela rede. Mesmo assim, podem ser considerados resultados também satisfatórios.

4.6 Resultados Redes Neurais Artificiais para a rugosidade Ra

A Figura 3.38 ilustra a curva de evolução do erro médio quadrático durante a fase de treinamento. A partir da 205ª iteração o erro quadrática médio começa a aumentar, assim, o valor dos pesos da rede são definidos neste instante.

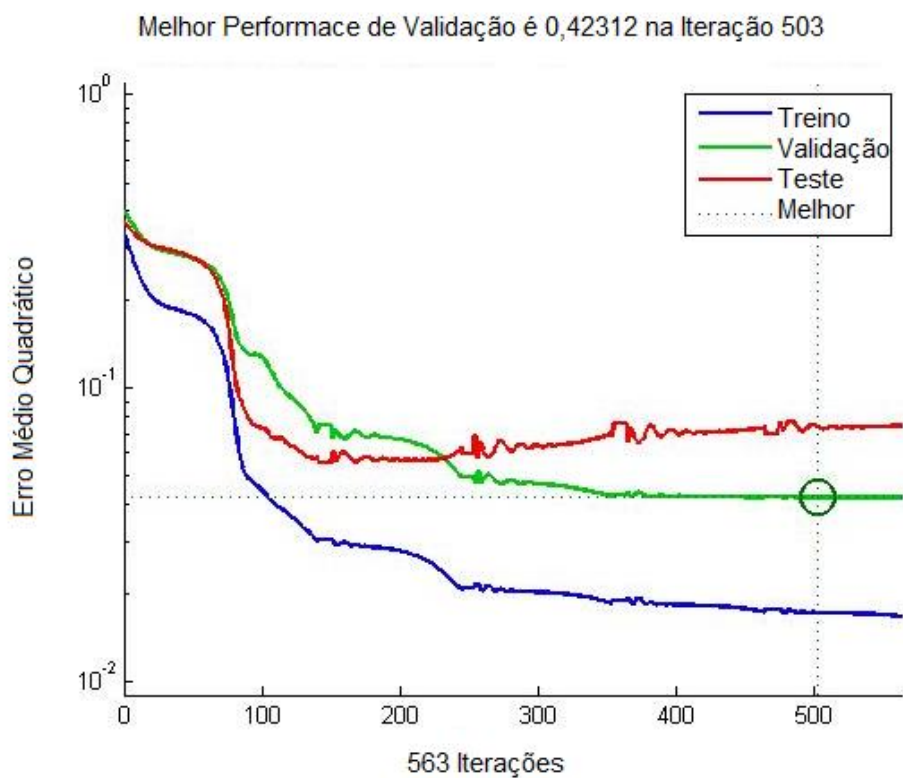


Figura 4.38 - Evolução do erro médio quadrático durante a fase de treinamento

A Figura 4.39 apresenta o diagrama de dispersão entre os valores de rugosidade experimental e a rugosidade estimada pela rede 6 – 10 – 1 – 1. Pode-se observar um bom ajuste do modelo, visto que $r > 0,8$ tanto no conjunto de Treino, quanto nos conjuntos de Validação e no Total.

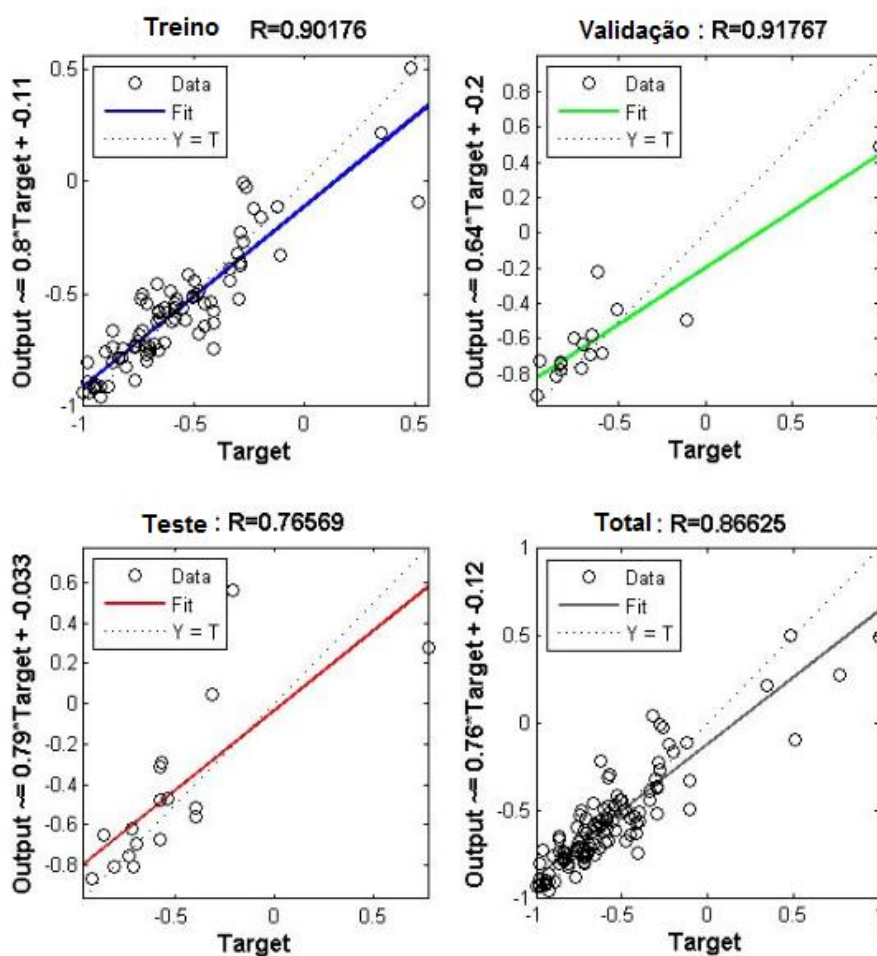


Figura 4.39 - Coeficiente de correlação entre os dados estimados pela RNA.

4.6.1 Validação do modelo

As figuras 4.40 e 4.41 demonstram valores da rugosidade R_a estimadas pela rede, que são confrontados com os valores reais. O desvio (erro) pode, assim, ser calculado.

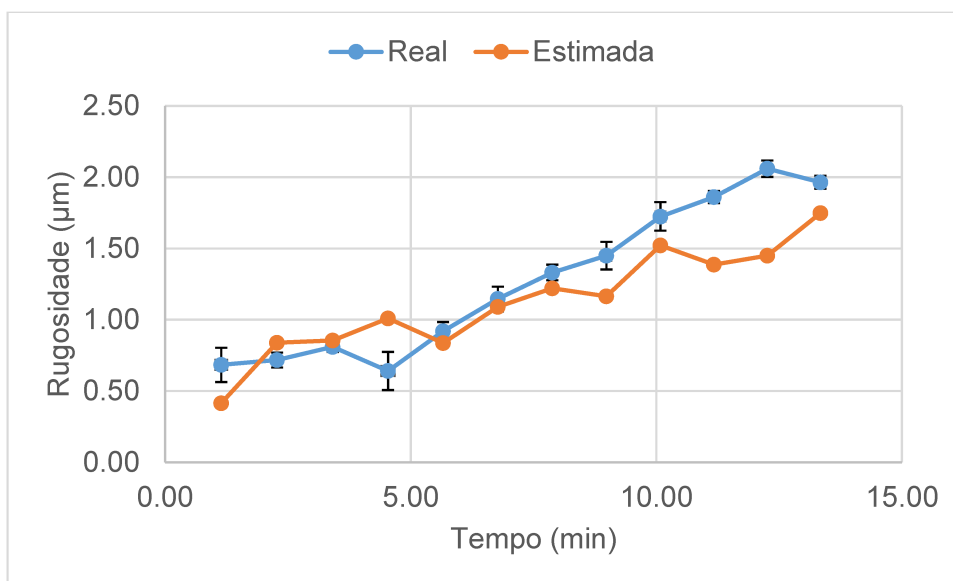


Figura 4.40 – Rugosidade real e estimada pela RNA para a condição 5 ($V_c = 200$ m/min; $f = 0,15$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

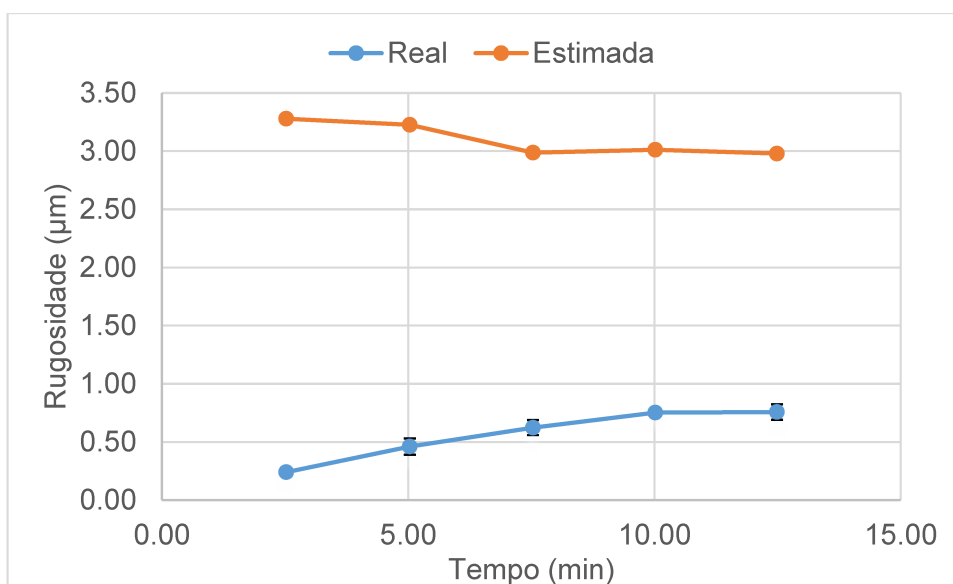


Figura 4.41 - Rugosidade real e estimada pela RNA para a condição 6 ($V_c = 250$ m/min; $f = 0,05$ mm/rot.; $a_p = 0,2$ mm)

A rede neural artificial não apresentou resultados tão bons quanto no caso da rugosidade, especialmente para a condição 6 ($V_c = 250$ m/min; $f = 0,05$ mm/rot.) na qual a velocidade de corte e o avanço estão fora da faixa treinada pela rede. Para a condição 5, os resultados satisfatórios foram apresentados, se considerarmos o desvio padrão o erro é pequeno.

Para uma melhor rede, neste caso, é necessário um número maior de testes, especialmente envolvendo diferentes valores de condições de corte.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A partir dos ensaios e análises realizados sobre o processo de torneamento cilíndrico do aço endurecido VC 131 (ABNT D6), com ferramenta de PCBN e diversas condições de corte, pôde-se concluir que:

- i. Os parâmetros avaliados nos testes realizados com o aço VC 131 mostram que força de corte, força passiva e corrente no motor principal são muito sensíveis ao desgaste, e aumentam com o tempo.
- ii. O mapa de emissão acústica é sensível às variações das condições de corte, como avanço e velocidade de corte. Maiores avanços possuem sinal de maior intensidade luminosa, e maiores velocidades possuem intensidade luminosa menor.
- iii. As frequências dominantes do sinal bruto de EA do processo ficam entre 30 kHz e 40 kHz.
- iv. O sinal filtrado de 30 kHz a 40 kHz de emissão acústica RMS diminui à medida que o desgaste aumenta devido ao desgaste de cratera, que faz com que a ferramenta se torna mais positiva.
- v. Apesar da força de usinagem ser uma boa escolha para o desgaste da ferramenta, o processo é intrusivo, além de ser caro. Por isto, o autor deste trabalho acredita que a melhor combinação para detecção do desgaste seja a emissão acústica juntamente com a corrente do motor principal, por serem não intrusivos e mais baratos.
- vi. Os resultados dos modelos das redes neurais foram muito satisfatórios para o processo, apresentando desvios na estimativa dos desgastes, menores que 0,06 mm, se levarmos em consideração média e desvio padrão.

- vii. Em relação ao acabamento, as redes neurais apresentaram erros em torno de 8% do valor real da rugosidade, desde que o parâmetro esteja dentro do intervalo de treinamento da RNA.
- viii. A rede neural não é satisfatória para prever dados fora do seu intervalo de treinamento.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- i. Estudo do comportamento do sinal de emissão acústica para diferentes materiais e ferramentas de corte no processo de torneamento cilíndrico externo
- ii. Reconhecimento de imagem do mapa acústico para detectar possíveis falhas e rugosidade no material usinado
- iii. Detecção do desgaste da ferramenta de corte em processos de micro usinagem

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÅNMARK, N., Björk, T., Ganea, A., Ölund, P., Hogmark, S., Karasev, A., & Jönsson, P. G. (2015). The effect of inclusion composition on tool wear in hard part turning using PCBN cutting tools. *Wear*, 334, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.04.008>

BANIN JÚNIOR, José Roberto. Análise De Tensões Residuais, Integridade Superficial E Forças De Usinagem No Fresamento De Topo De Aço Sae 4340 Endurecido. 2009. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da Fei, São Bernardo do Campo, 2009.

BLUM, T.; Inasaki, I. A study on acoustic emission from the orthogonal cutting process. *Journal of Engineering for Industry*, v. 112, n. 3, p. 203-211, 1990. <https://doi.org/10.1115/1.2899576>

BONFÁ, Miguel Mandú. Torneamento De Aço Endurecido Aisi D6 Utilizando Mínima Quantidade De Fluido De Corte. 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

BONIFÁCIL, M.E.R; DINIZ, A.E.. Correlating Tool Wear, Tool Life, Surface Roughness and Tool Vibrations in Finishing Turning With Coated Carbide Tools. *Wear*, V. 99, N. 173, pp.137-144, Dez. 1993. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)90266-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90266-6)

Bonifacio, M. E. R.; Diniz, A. E. Correlating tool wear, tool life, surface roughness and tool vibration in finish turning with coated carbide tools. *Wear*, v. 173, n. 1-2, p. 137-144, 1994. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(94\)90266-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90266-6)

BOSHEH, S. S.; MANTIVEGA, P. T. White Layer Formation In Hard Turning of H13 Tool Steel at High Cutting Speed Using CBN Tolling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol: 46, N. 0, pp. 225-233, Manchester: 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.04.009>

BRAGA, A.P.; Carvalho, A.P.L.F. De; Ludemir, T.B. Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações. Rio De Janeiro: LTC Editora, 2007. 238 p. ISBN-10: 8521615647.

BRAGA. D.U., Monitoramento do Processo de Torneamento Via Parâmetros Elétricos do Motor da Máquina, Tese de Mestrado, UNICAMP 1992

BRUSAMARELLO, V. J.; BALBINOT, A., Instrumentação e Fundamentos de Medidas. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

BRUSAMARELLO, Valner Joao; BALBINOT, Alexandre. Instrumentação e Fundamentos de Medidas. LTC, Rio de Janeiro, 2010.

BYRNE G.; DORNFELD D.; INASAKI I.; KETTELER G.; KONING W.; TETI R., Tool Condition Monitoring (Tcm) – The Status of Research and Industrial Application. In: CIRP – Manufacturing Technology, Vol. 44, 2 Ed., 1995. Anais... CIRP, pp. 541-567, 1995. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60503-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60503-4)

C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise", Proc. Institute of Radio Engineers, vol. 37, no.1, pp. 10–21, Jan. 1949. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1949.232969>

CIMM (Org.). Elementos de uma ferramenta de corte. Disponível em: http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3251#.WLSixW8rLIU>. Acesso em: 26 ago. 2015.

COSTA, D. D., Análise dos Parâmetros de Torneamento de Aços Endurecidos. 1993. 110 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, 1993.

Da SILVA L R. H., Monitoramento do Desgaste de Ferramentas no Fresamento de Topo Através dos Sinais de Potência e Emissão Acústica e Redes Neurais. 2010. 126 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

DAN, L., Mathew, J., "Tool Wear and Failure Monitorig Techniques for Turning – A Review". International Jornal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 30, pp. 579-598, 1990. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(90\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0890-6955(90)90009-8)

DEARLEY, P. A., TRENT, E. M."Wear Mechanisms of coated carbide tools" Metal technology, v. 9, 1982, p. 60 – 75. <https://doi.org/10.1179/030716982803285909>

DUARTE, M.A.V., Manutenção Preditiva Via Análise de Vibrações – Apostila Didática. Uberlândia: Laboratório de Vibração e Acústica, FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia, 2005.

FAUSETT, L., Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms and Applications. EUA: Prentice Hall, 1993. 461 p.

FERRARESI, D., Fundamentos da Usinagem dos Metais, 12ª Ed. São Paulo; Edgard Blucher, 2006. 751 p.

FRIGIERI, E. P., Monitoramento da Rugosidade no Processo de Torneamento Duro Utilizando Coeficientes Mel-Cepstrais de Sinais Acústicos e Modelos de Misturas de Gaussianas. 2013. 122 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

GODOY, V. A.; DINIZ, A. E., Turning of Interrupted and Continuous Hardened Steel Surfaces Using Ceramic and CBN Cutting Tools. Journal of Materials Processing Technology. Campinas, pp. 1014-1025. Jun. 2014.

GRIFFIN, J. M. et al., Control of Deviations and Prediction of Surface Roughness from Micro Machining of THZ Waveguides Using Acoustic Emission Signals. Mechanical Systems and Signal Processing, Coventry, pp. 1020-1034. Set. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.09.016>

GRIFFITHS, B. J., Manufacturing Surface Technology. 1. Ed. London: Penton Press, 2001. <https://doi.org/10.1016/B978-185718029-9/50002-0>

GUIMARÃES, A. M.; Mathias, I. M.; Dias, A. H.; Ferrarri, J. W.; Junior, C. R. O. C., 2008, "Módulo De Validação Cruzada Para Treinamento De Redes Neurais Artificiais Com Algoritmos Backpropagation E Resilient Propagation", Publicatio UEPG: Ciências Exatas E Da Terra, Agrárias E Engenharias, Vol. 14, No. 1, 17-14 Pp. <https://doi.org/10.5212/Publ.Exatas.v.14i1.017024>

GUO, Y. B.; Ammula, S. C. Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 45, n. 14, p. 1622-1627, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.02.007>

GUO, Y.B.; AMMULA, S.C.. Real-Time Acoustic Emission Monitoring for Surface Damage in Hard Machining. International Journal of Machine Tools & Manufacture. Alabama, pp. 1622-1627. Fev. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.02.007>

GUYON I. (1991) Neural Networks and Applications Tutorial. Physics Report, V. 17 N° 3, pp. 215 – 259. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(91\)90146-D](https://doi.org/10.1016/0370-1573(91)90146-D)

HABER, R. E. et al. An Investigation of Tool-Wear Monitoring in a High-Speed Machining Process. Sensors and Actuators A: Physical. Madrid, pp. 539-545. 5/2004. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2004.05.017>

HAYKIN, S. Redes Neurais: Princípios E Prática. 2ª Edição. Ontário Canadá: Artmed, 2008. 902 p.

Huang, Y., Chou, Y. K., Liang S. Y., 2007. "PCBN Tool Wear In Hard Turning: A Survey on Research Progresses". International Journal of Advanced Manufacturing Technology, V. 35, pp 443-453; <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0737-6>

INASAKI, I. Application of Acoustic Emission Sensor for Monitoring Machining Processes.

ISO 3685, 1993, "Tool Life Testing With Single-Point Turning Tools"

LAHIFF, C., Gordon, S., Phelean, P., "PCBN Tool Wear Models and Mechanisms in Finish Hard Turning". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, V. 23. pp 638-644; 2007. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2007.02.008>

LEE, D.E.; HWANG, I.; VALENTE, C.M.O.; OLIVEIRA, J.F.G.; DORNFELD, D.A., Precision Manufacturing Process Monitoring With Acoustic Emission. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 46, 2 Ed., pp. 176-188, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.04.001>

LIU, J. J., Monitoring the Precision Machining Process: Sensors, Signal Processing and Information Analysis, PhD Dissertation, Mechanical Engineering Department, University of California at Berkeley, 1991.

MACHADO, A. R.; Da Silva, M. B.; Coelho, R. T.; Abrão, A. M.; Teoria Da Usinagem dos Metais, 3ª Ed. São Paulo; Editora Edgard Blucher, 407 p.; 2015.

MAIA, L. H. A., Avaliação de Desempenho de Recobrimentos em Ferramentas de Metal Duro no Torneamento do Aço ABNT 4340 Temperado por Meio de Sinais de Emissão Acústica. 2015. 255 p. Tese (Doutorado) - Curso De Engenharia Mecânica, Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

MATSUMOTO, H.. Uma Contribuição ao Estudo do Processo de Torneamento de Aços Endurecidos. 1998. 167 p. Tese (Doutorado) - Curso De Engenharia Mecânica, Universidade Federal De Campinas, Campinas, 1998.

MEOLA, T., DUARTE, M. A. V., Da SILVA, M. B., Modelagem do Acabamento Superficial do Processo de Torneamento Via Monitoramento de Vibrações, II CONEM, João Pessoa, Brasil, 12 A 16 Agosto De 2002.

METALS, Villares. "Aços para trabalho a frio VC131." Folheto informativo, 2p (2006).

MITSUBISHI. Rugosidade em função do avanço e do raio de ponta. Disponível em: <www.MITSUBISHI.com.>. Acesso em: 28 abr. 2016.

MITUTOYO. Rugosidade. Disponível em: <www.mitutoyo.com.br>. Acesso em: 25 abr. 2016.

NESLULAN, M. et al. Detection of Tool Breakage During Hard Turning Through Acoustic Emission at Low Removal Rates. Elsevier Measurement. Ostrava, Republica Tcheca, pp. 1-13. Mar. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.035>

Neslušán, M., Mičieta, B., Mičietová, A., Čilliková, M., & Mrkvica, I. (2015). Detection of tool breakage during hard turning through acoustic emission at low removal rates. Measurement, 70, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.035>

NORMA, ABNT NBR ISO. 4287: 2002. Especificações geométricas do produto (GPS)-Rugosidade: Método do perfil-Termos, definições e parâmetros da rugosidade.

PEREIRA, F. B., Monitoramento do Acabamento Superficial da Peça Através de Emissão Acústica na Retificação Centerless de Passagem. 2013. 115 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2013.

PIGARI, A. C., Monitoramento do Desgaste da Ferramenta no Processo de Torneamento Usando Emissão Acústica. 1995. 137 p. Dissertações (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

POULACHON, G.; Bandyopadhyay, B. P.; Jawahir, I. S.; Pheulpin, S.; Seguin, E., Wear Behavior of CBN Tools While Turning Various Hardened Steels. International Journal of Machine Tools & Manufacture, V.256, pp. 310, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00414-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00414-9)

RANGWALA, Sabbir; DORNFELD, David. A study of acoustic emission generated during orthogonal metal cutting—2: spectral analysis. International journal of mechanical sciences, v. 33, n. 6, p. 489-499, 1991. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(91\)90083-F](https://doi.org/10.1016/0020-7403(91)90083-F)

RAVINDRA, H. V.; Srinivasa, Y. G.; Krishnamurthy, R. Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting. Wear, v. 212, n. 1, p. 78-84, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00137-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00137-3)

SAKETI, S. et al. Wear of a High CBN Content PCBN Cutting Tool During Hard Milling of Powder Metallurgy Cold Work Tool Steels. Wear Falun, Suécia, pp. 752-761. Jan. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.073>

SANTOS, A.L., Metodologia Via Redes Neurais para a Estimativa da Rugosidade e do Desgaste de Ferramentas de Corte no Processo de Fresamento Frontal. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. Tese de Doutorado 2001.

SCHEFFER, C. et al. Development of a tool wear-monitoring system for hard turning. International Journal Of Machine Tools & Manufacture. Pretoria, p. 973-985. abr. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00110-X](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00110-X)

SHANNON, Claude E. Communication theory of secrecy systems. Bell Labs Technical Journal, v. 28, n. 4, p. 656-715, 1949. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1949.tb00928.x>

TANSEL, I., Trujillo, M., Nedbouyan, A., Velez, C., Bao, W. Y., Arkan, T. T., & Tansel, B. (1998). Micro-end-milling—III. Wear estimation and tool breakage detection using acoustic emission

signals. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 38(12), 1449-1466. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00017-0](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00017-0)

TATIBANA, C. Y.; KAETSU, D. Y., Departamento de Informática (DIN) Da Universidade Estadual De Maringá (UEM): Homepage Redes Neuraís. Disponível Em: <Http://Www.Din.Uem.Br/Ia/Neuraís/>. Acesso Em: 02 Ago. 2016.

THE MATHWORKS INC (USA). Neural Network Toolbox. 2016. Disponível Em: <Https://Www.Mathworks.Com/Products/Neural-Network.Html?S_Tid=Srchtml>. Acesso Em: 12 Set. 2016.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K., Metal Cutting , Butterworths-Heinemann. 4.Ed. Ltd, London, 2000.<https://doi.org/10.1016/B978-075067069-2/50007-3>

ULTRASONICS. Vol. 36, 1-5 Ed., pp. 273-281, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(97\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(97)00052-8)

WANG, J. Y., Liu C. R., 1999. "The Efect of Tool Flank Wear on the Heat Transfer, Thermal Demange and Cut Mechanics in Finish Hard Turning". Annals of the CIRP, V. 48, pp. 53-58. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63130-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63130-8)

WEIS, W., Aplicações Industriais de Sistemas de TCM. 1994. Universidade de Karlsruhe, Kalsruhe, Alemanha.

ZHANG, G.; Patuwo, B. E.; Hu, M. Y. Forecasting with Artificial Neural Networks: The State of the Art, International Journal of Forecasting, Vol. 14, pp. 35-62, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(97\)00044-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(97)00044-7)