



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU**



**INVESTIGAÇÃO DE NOVAS FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS E
UTILIZAÇÃO DE MICROCONTROLADOR NO MONITORAMENTO DA
QUEIMA NA RETIFICAÇÃO PLANA TANGENCIAL**

MAURÍCIO KHENAIFES

**Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia da UNESP – Campus de Bauru,
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Industrial**

BAURU – SP

Maio / 2006



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU



**INVESTIGAÇÃO DE NOVAS FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS E
UTILIZAÇÃO DE MICROCONTROLADOR NO MONITORAMENTO DA
QUEIMA NA RETIFICAÇÃO PLANA TANGENCIAL**

MAURÍCIO KHENAIFES

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar

Co-Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

**Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia da UNESP – Campus de Bauru,
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Industrial**

BAURU – SP

Maio / 2006

DEDICATÓRIA

Dedico o presente trabalho à minha futura esposa Tatiana, por apreciar, mesmo longe, este sonho com carinho. Aos meus pais, que se foram estrangeiros dessa terra, os quais criaram as raízes do meu caráter.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus irmãos que são perfeitos, que apoiaram e sonharam com essa realização junto a mim.

Agradeço ao Aguiar por ter me apoiado nos momentos que mais precisei, inclusive os pessoais, sendo mais que um orientador.

Ao co-orientador Bianchi, que ajudou muito nos conceitos sobre retificação e como pessoa é formidável. Ao Prof. Dr. Yokio Kobayashi e às secretárias Cássia, Célia e Yara, do departamento da pós-graduação, que me apoiaram muito.

Ao pessoal do LADAPS:

- Ao amigo mestrando Patrick Nascimento Lançoni, pelas noites fazendo a revisão e manipulação de figuras do trabalho.
- Aos alunos Danilo Augusto Boso, que ajudou na retificação, e ao Leonardo Gonçalves Xavier, que fez a figura da bancada no Inventor.
- Ao mestre, professor e amigo, Fábio Romano Lofrano Dotto, pela orientação do tema do mestrado e por dividir sua experiência.

Ao pessoal do LUA:

- Ao técnico Cristiano Angélico, por passar manhãs, tardes e noites fazendo retificações junto a mim;
- Ao técnico Rodrigo Leandro Salvador e ao Osmar por diversas outras informações e ao Lúcio Santana e Carlos Dorigatti, nos ensaios.
- Ao mestre Hamilton José de Mello por saber tanto de engenharia mecânica quanto de retificação e química dos metais que ajudou com diversos materiais;
- Ao futuro bom engenheiro Arthur Alves Fiocchi, pela montagem e acompanhamento da bancada de ensaio.
- Ao Carlos Elias da Silva Junior, que deu vários toques importantes durante a retificação e integrou a qualificação deste trabalho elevando-o.

Ao pessoal do carro:

- Aos mestres professores Cezar José Sant'Anna, Alzira Maria Sant'Anna, Cláudio Vara de Aquino, Rogério de Andrade Flauzino, Letícia, Juliana, Fábio Randi, Alessandro Goedel que são exemplos de pessoas e de determinação.

Ao companheiro Bruno Milhoci, que por incrível que pareça, gosta mais de eletrônica do que eu!

À saúde e à vitória concedida por Deus!

“Se enxerguei além dos outros é por que estava no ombro de gigantes”

Isaac Newton, 1667

ÍNDICE

RESUMO	1
ABSTRACT	2
1 INTRODUÇÃO	3
2 OBJETIVOS	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 INTRODUÇÃO	6
3.2 CONCEITOS DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	6
3.2.1 <i>Características do Processo de Retificação</i>	7
3.2.2 <i>Comportamento da Profundidade de Corte (a)</i>	8
3.2.3 <i>Comportamento da velocidade de corte (V_s)</i>	9
3.2.4 <i>Espessura Equivalente de Corte (h_{eq})</i>	9
3.2.5 <i>Diâmetro equivalente ou de conformidade (d_e)</i>	10
3.2.6 <i>Comprimento de contato (l_c)</i>	10
3.2.7 <i>Espessura teórica máxima de cavaco ($h_{máx}$)</i>	10
3.2.8 <i>Taxas de Remoção</i>	11
3.2.9 <i>Relação G</i>	11
3.2.10 <i>Força, potência e energia específica de retificação</i>	12
3.2.11 <i>Mecanismos de retificação para rebolos convencionais</i>	14
3.2.11.1 Aspectos energéticos	14
3.2.11.2 Modelamento Teórico da Formação do Cavaco e sua Relação com a Energia Específica de Retificação.....	15
a) Forças de deslizamento e energia.....	16
b) Deformação plástica sem remoção de material ("plowing") e a formação do cavaco propriamente dita ("chip formation")	17
3.2.12 <i>Rebolo</i>	23
3.2.12.1 Tipos de abrasivos	24
3.2.12.2 Ligantes	26
3.2.12.3 Dureza	27
3.2.12.4 Granulometria	27
3.2.12.5 Estrutura	27
3.2.13 <i>Operação de Dressagem</i>	28
3.2.13.1 Ferramentas de Dressagem.....	29
3.2.13.2 Influência da Dressagem no Processo de Retificação	30
3.2.13.3 Grau de Recobrimento (U_d).....	31
3.3 RESTRIÇÕES DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	31
3.3.1 Capacidade de potência da máquina	33
3.3.2 Vibrações da máquina-ferramenta.....	33

3.3.3 Danos térmicos	34
3.3.4 Desgaste do rebolo	34
3.3.5 Rugosidade	35
3.3.6 Tolerâncias	37
3.4 INTEGRIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA DE TRABALHO	38
3.4.1 <i>Tipos de danos térmicos nas peças de trabalho</i>	38
3.4.1.1 Queima de oxidação	39
3.4.1.2 Amolecimento térmico.	39
3.4.1.3 Queima de reendurecimento.....	40
3.4.1.4 Tensão residual de tração	40
3.4.2 <i>Frentes de Pesquisas sobre Queima na Retificação</i>	43
3.4.3 <i>Monitoramento de Danos Térmicos do Processo de Retificação</i>	44
3.5 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	46
3.5.1 <i>Sensores</i>	46
3.5.2 <i>Aquisição de Dados e Processamento de Sinais</i>	52
3.6 METODOLOGIAS DE MONITORAMENTO	56
4 MATERIAL E MÉTODO	59
4.1 PREPARAÇÃO E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	59
4.1.1 <i>Preparação dos Corpos de Prova</i>	59
4.1.2 <i>Ajuste da Retificadora</i>	61
4.1.3 <i>Dressagem</i>	63
4.1.4 <i>Bancada de Ensaio</i>	66
4.2 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE	69
4.3 MEDIÇÃO DE MICRODUREZA.....	71
4.4 CONVERSOR ANALÓGICO PARA DIGITAL (ADC)	74
4.5 IMPLEMENTAÇÃO ESTATÍSTICA EM MICROCONTROLADORES	76
4.5.1 <i>Regra do Ponto Médio</i>	77
4.6 CIRCUITO ELÉTRICO - HARDWARE	80
4.7 SOFTWARE	86
4.7.1 <i>Modo de Configuração</i>	86
4.7.2 <i>Modo de Aquisição</i>	92
4.7.3 <i>Cálculos</i>	97
5 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE QUEIMA	100
5.1 RMS DO SINAL DE EA	100
5.2 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)	100
5.3 MÉDIA E DESVIO PADRÃO	101
5.4 DPO	102
5.5 PARÂMETRO DPKS	102
5.6 PARÂMETRO DIFP.....	103
5.7 PARÂMETRO VARPO	103
5.8 AUTOCORRELAÇÃO – COR.....	104

5.9 PARÂMETRO CONVOLUÇÃO – CONVO2	104
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	106
6.1 VISUALIZAÇÃO DAS PEÇAS	106
6.2 RUGOSIDADE MÉDIA	112
6.3 MICRODUREZA	120
6.4 RESULTADOS OBTIDOS NA AQUISIÇÃO DOS ENSAIOS	131
6.5 RESULTADOS UTILIZANDO O MICROCONTROLADOR	148
7 CONCLUSÕES	150
8 PROJETOS FUTUROS	154
9 BIBLIOGRAFIA	155
ANEXO I TRABALHOS PUBLICADOS	161
ANEXO II FILTRO DIGITAL DE FREQUÊNCIA	162
ANEXO III SOFTWARE DESENVOLVIDO E IMPLEMENTADO NO MICROCONTROLADOR – PIC18F452.....	163

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – a) Retificação cilíndrica externa e b) plana (Malkin ,1989)	7
Figura 2 - Componentes de força para retificação cilíndrica	12
Figura 3 - Componentes de força para retificação plana	13
Figura 4 - Ilustração da formação do cavaco por um grão abrasivo, o qual desliza sobre a superfície gerada, apresentando um desgaste de área de topo (Malkin, 1989)	16
Figura 5 - Energia específica de retificação versus taxa de remoção volumétrica, numa operação de retificação plana (Malkin, 1989)	18
Figura 6 - Ilustração da transição do “plowing” para a formação do cavaco através da passagem do grão pela zona de retificação (Malkin, 1989)	19
Figura 7 - Curva hipotética do comportamento tensão-deformação para um cisalhamento adiabático até a fusão do material (Malkin, 1989)	21
Figura 8 - Mínima energia específica versus energia de fusão para diversos materiais metálicos (Malkin, 1989)	22
Figura 9 – Especificação de rebolos com abrasivos convencionais (Stemmer, 1992)	28
Figura 10 – Esquema do processo de dressagem.....	30
Figura 11 - Porcentagem de influência dos fatores: a) Queima b) Vibrações	37
Figura 12 - Relação entre a rugosidade e o número de peças usinadas.....	37
Figura 13 - Componente de Força Normal e Tangencial versus Área de Contato entre o Desgaste Plano de um Grão Abrasivo e a Peça (Malkin, 1989)	38
Figura 14 – Microdureza versus Profundidade abaixo da Superfície com e sem Queima para um aço de rolamento (Malkin, 1989)	40
Figura 15 - Interações entre rebolo e peça (Badger & Torrence, 2000)	42
Figura 16 - Janela de controle com limite estático (Adaptado de Byrne, 1995)	57
Figura 17 - Janela de Controle com Limite Dinâmico(Adaptado de Felipe, 1996).	58
Figura 18 – Corpo de prova tipografado	60
Figura 19 – Corpo de prova em degrau [mm].....	60
Figura 20 – Ajuste da velocidade tangencial da mesa com tacômetro (V_w).....	61
Figura 21 – Refratômetro	62
Figura 22 – a) Operação de dressagem b) Dressador	63
Figura 23 – Projetor de perfil	64
Figura 24 – Fixação do sensor de emissão acústica	67
Figura 25 – Bancada de Ensaio	68

Figura 26 – Subdivisões na peça para medir Rugosidade	69
Figura 27 – Rugosímetro Digital	70
Figura 28 – Medida de Rugosidade	70
Figura 29 – Detalhes do equipamento de medição de microdureza	72
Figura 30 – Identação na medição de microdureza	72
Figura 31 – Subdivisões na peça para medir Microdureza	73
Figura 32 – Entrada do ADC do PIC18F452 (Microchip, 2003)	74
Figura 33 – Área da integral do intervalo [0-T] para cálculo do valor médio	76
Figura 34 – Método de Riemann para o cálculo da área total	77
Figura 35 – Kit MCLab2 da Mosaico	81
Figura 36 – Software MPLab para programação da MCU (Microchip, 2003)	83
Figura 37 – Diagrama em blocos interno do PIC18F452 (Microchip, 2003)	84
Figura 38 - Diagrama elétrico do Hardware - Kit MCLab2.....	85
Figura 39 – Fluxograma dos Modos de Operação	86
Figura 40 - Fluxograma do Modo de Configuração	87
Figura 41 – Software de monitoração da porta serial	88
Figura 42- Configuração padrão do Monitor de Porta Serial <i>siow.exe</i>	88
Figura 43 – Indicação do modo de configuração no LCD	89
Figura 44 – Início e Fim de aquisição da passada do Rebolo	90
Figura 45 – Canais de entradas analógicas (Microchip, 2003)	91
Figura 46 – Botões e conexões com o microcontrolador	92
Figura 47 – Diagrama de um Temporizador do PIC18F452.....	93
Figura 48 – Visualização do início do modo de aquisição	94
Figura 49 – Visualização de um erro de software.....	94
Figura 50 – Fluxograma do Modo de Aquisição	96
Figura 51 – Display sinalizando a captura de dados.....	97
Figura 52 – a) Fluxograma dos Cálculos b) Legenda.....	98
Figura 53 – Exemplos de resultados no display	99
Figura 54 – Ângulo para o cálculo de DIFP.....	103
Figura 55 – Fotografia tirada dos corpos de provas ensaiados	107
Figura 56 - Software de Quantificação de Queima.....	108
Figura 57 – Exemplo de Resultados Obtidos do Software de Quantificação de Queima	108
Figura 58 – Rugosidade Média ao longo das peças ensaiadas com $a = 10\mu\text{m}$	114
Figura 59 – Rugosidade Média ao longo das peças ensaiadas com $a = 22,5\mu\text{m}$	114

Figura 60 – Rugosidade Média ao longo das peças ensaiadas com $a = 30\mu\text{m}$	115
Figura 61 – Rugosidade Média ao longo das peças ensaiadas com $a = 35\mu\text{m}$	115
Figura 62 – Rugosidade Média ao longo das peças ensaiadas com $a = 40\mu\text{m}$	116
Figura 63 – Rugosidade Média ao longo das peças ensaiadas com $a = 50\mu\text{m}$	116
Figura 64 – Rugosidade Média obtida nos ensaios com as diferentes profundidades de corte	117
Figura 65 – Médias das Rugosidades das passadas para as diferentes profundidades de corte	117
Figura 66 – Rugosidade Média ao longo das peças ensaiadas com degraus	118
Figura 67 – Perfil da Microdureza sobre a face da peça;	122
Figura 68 – Perfil da Microdureza sobre a face da peça	123
Figura 69 – Perfil da Microdureza sobre a face da peça	124
Figura 70 – Microdureza ao longo das peças ensaiadas com $a = 10\mu\text{m}$	125
Figura 71 – Microdureza ao longo das peças ensaiadas com $a = 22,5\mu\text{m}$	125
Figura 72 – Microdureza ao longo das peças ensaiadas com $a = 30\mu\text{m}$	126
Figura 73 – Microdureza ao longo das peças ensaiadas com $a = 35\mu\text{m}$	126
Figura 74 – Microdureza ao longo das peças ensaiadas com $a = 40\mu\text{m}$	127
Figura 75 – Microdureza ao longo das peças ensaiadas com $a = 50\mu\text{m}$	127
Figura 76 – Microdureza obtida nos ensaios com as diferentes profundidades de corte	128
Figura 77 – Microdureza das passadas para as diferentes profundidades de corte.....	128
Figura 78 - Perfil da Microdureza sobre a face da peça	129
Figura 79 – Microdureza ao longo das peças ensaiadas com degraus.....	129
Figura 80 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 1ª Amostra para $a = 10,0 \mu\text{m}$;	132
Figura 81 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 2ª Amostra para $a = 10,0 \mu\text{m}$;	132
Figura 82 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 3ª Amostra para $a = 10,0 \mu\text{m}$;	133
Figura 83 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 1ª Amostra para $a = 22,5 \mu\text{m}$;	133
Figura 84 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 2ª Amostra para $a = 22,5 \mu\text{m}$;	134
Figura 85 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 3ª Amostra para $a = 22,5 \mu\text{m}$;	134
Figura 86 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 1ª Amostra para $a = 30,0 \mu\text{m}$;	135
Figura 87 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 2ª Amostra para $a = 30,0 \mu\text{m}$;	135
Figura 88 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 3ª Amostra para $a = 30,0 \mu\text{m}$;	136
Figura 89 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 1ª Amostra para $a = 35,0 \mu\text{m}$;	136
Figura 90 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 2ª Amostra para $a = 35,0 \mu\text{m}$;	137
Figura 91 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 3ª A mostra para $a = 35,0 \mu\text{m}$;	137

Figura 92 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 1ª Amostra para $a = 40,0 \mu\text{m}$;	138
Figura 93 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 2ª Amostra para $a = 40,0 \mu\text{m}$;	138
Figura 94 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 3ª Amostra para $a = 40,0 \mu\text{m}$;	139
Figura 95 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 1ª Amostra para $a = 50,0 \mu\text{m}$;	139
Figura 96 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 2ª Amostra para $a = 50,0 \mu\text{m}$;	140
Figura 97 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 3ª Amostra para $a = 50,0 \mu\text{m}$;	140
Figura 98 – Gráficos das Aquisições e Resultados para peça com Degrau – 1ª Amostra;	141
Figura 99 – Gráficos das Aquisições e Resultados para peça com Degrau – 2ª Amostra;	141
Figura 100 – Gráficos das Aquisições e Resultados para peça com Degrau – 3ª Amostra; ...	142
Figura 101 – Médias e Erros dos valores e resultados dos ensaios;	143
Figura 102 – Parâmetros coletados no display LCD	148
Figura 103 – Filtro passa-baixa digital em 5 KHz utilizado após os cálculos com o sinal bruto	162

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de alguns materiais abrasivos (Malkin, 1989)	26
Tabela 2 – Valores de temperatura máxima e da constante K para dois pares termoelétricos	48
Tabela 3 – Compensação da velocidade tangencial com o desgaste do rebolo	63
Tabela 4 – Compensação da frequência do inversor com o b_d medido.....	65
Tabela 5 – Exemplo do Método das Aproximações Sucessivas	75
Tabela 6 – Fotografias das peças usinadas na retificadora plana.....	106
Tabela 7 – Quantificação das Cores das peças ensaiadas	109
Tabela 8 – Análise do Padrão de Cor	111
Tabela 9 – Rugosidade Média medida nas secções de cada corpo (μm)	113
Tabela 10 – Microdureza medida nas secções de cada corpo ($\text{HV}_{0,1}$).....	121
Tabela 11 – Limites estimados para os parâmetros de queima.....	151
Tabela 12 – Detecção de início de queima	152

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a – profundidade de corte	[μm]
a_d - penetração de dressagem	[μm]
b - largura de retificação	[mm]
b_d - largura de atuação do dressador	[mm]
b_s ou LR – largura do rebolo	[mm]
d_e - diâmetro de equivalente	[mm]
d_s - diâmetro do rebolo	[mm]
d_w - diâmetro da peça	[mm]
F_n - força normal de corte	[N]
F_t - força tangente de corte	[N]
G - Relação entre volume retificado e desgaste do rebolo	[-]
h_{eq} - espessura equivalente de corte	[μm]
$h_{máx}$ – espessura teórica máxima do cavaco	[mm]
h' – profundidade de corte crítica	[μm]
l_c - comprimento de contato	[mm]
L – espaçamento médio entre grãos abrasivos	[μm]
n – rotação do rebolo	[rpm]
P – potência de corte na retificação	[W]
Q_w – taxa de remoção	[mm^3/s]
Q'_w – taxa de remoção por unidade de largura	[mm^2/s]
Ra – Rugosidade média	[μm]
S_d - passo de dressagem	[mm]
u - energia específica de retificação	[J/mm^3]
u_{ch} - energia referente à formação do cavaco	[J/mm^3]
U_d - grau de recobrimento de dressagem do rebolo	[-]
u_{pl} - energia de deslocamento de material por deformação plástica	[J/mm^3]
u_{sl} - energia de deslizamento grão-peça	[J/mm^3]
V_{AV} – tensão média	[V]
V_f - velocidade de mergulho	[m/s]
V_s - velocidade de corte do rebolo	[m/s]
V_{sd} - velocidade de dressagem	[m/s]
V_w - velocidade periférica da peça	[m/s]
μ_X – média das amostras	[unidade]
s_X – desvio-padrão das amostras	[unidade]

ADC – conversor analógico para digital

Austenita - solução sólida do carbono em ferro gama

CBN - nitreto cúbico de boro

Dressagem – operação de re-afiação do rebolo

EA - emissão acústica

Friabilidade – capacidade do grão se fraturar quando submetido á forças de corte

LCD – display de cristal líquido

LED – diodo emissor de luz

Martensita – estrutura básico da têmpera dos aços para aumentar a dureza

MCU – unidade microcontroladora

PIC – microcontrolador da Microchip

POT – potência de corte

Revenir – dar têmpera superficial a um metal

RMS – raiz média quadrática

Hall – efeito eletromagnético

Spark-out - pós-centelhamento na retificação após a retirada do material pelo rebolo

RESUMO

Na indústria moderna, a precisão e o custo são fundamentais para a qualidade do produto e competitividade no mercado. Desenvolver sistemas mais velozes, dinâmicos e auto-ajustáveis aplicando técnicas de controle é um objetivo dos pesquisadores de todas as áreas da engenharia. A retificação de materiais é um sistema complexo que possui muitas variáveis relacionadas, principalmente por possuir múltiplas arestas de corte associado a altas velocidades e potências de retificação. Para aumentar o domínio sobre o processo, sinais de emissão acústica e de potência de acionamento do rebolo têm sido monitorados em várias pesquisas. Nesse trabalho foram realizadas experiências utilizando a retificação plana tangencial com o aço ABNT 1020 e rebolo de óxido de alumínio, onde foi determinado a ocorrência e o início da queima através da variação da profundidade de corte, tendo-se o cuidado de manter os outros parâmetros constantes, inclusive a superfície de corte do rebolo através da operação de dressagem. Os sinais de emissão acústica e de potência elétrica foram adquiridos durante uma passada do rebolo sobre a peça, numa taxa de 2.5 milhões de amostras por segundo, e processados através de um ferramental matemático, onde foram propostos outros parâmetros, para a análise da ocorrência da queima. Observou-se também a detecção do início da queima, onde o parâmetro proposto VARPO obteve bons resultados. Paralelamente foi realizado um estudo sobre os microcontroladores, onde foram inseridos os cálculos de detecção da queima do processo de retificação num PIC18F452, mostrando a viabilidade de um monitoramento.

Palavras-chave: *retificação, detecção de queima, monitoramento, microcontrolador, emissão acústica.*

ABSTRACT

In modern industry, the accuracy and cost are extremely important to the quality of product and market competition. The development of faster dynamic and robust systems by applying control techniques is the goal of researchers of all engineering areas. The grinding process is a complex system which contains many related variables mainly because its multiple cutting edges associated with high speed and power. In order to improve the knowledge on the process, acoustic emission and power signals have been monitored in several research investigations. In this work, surface grinding tests with ABNT 1020 steel and aluminum oxide grinding wheel were carried out in which the burning occurrence as well as the onset of it were studied. This was done by varying the depth of cut and maintaining the other grinding parameters constant, including the grinding wheel surface through the dressing operation. Acoustic emission and electrical power signals were acquired during a single grinding pass of the grinding wheel over the work-piece at 2.5 million of samples per second rate. The signals were digitally processed through many statistic algorithms among which new parameters for burn detection have been proposed. Also, the onset of burning occurrence was observed and remarkably detected for the proposed parameter dubbed VARPO. In addition, a study on microcontrollers was performed, and the implementation of the algorithms previously mentioned were carried out into the microcontroller PIC18F452, showing the monitoring feasibility.

Keywords: *Grinding, burn detection, monitoring, microcontroller, acoustic emission*

1 INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem muito utilizado na indústria metal-mecânica, sendo necessário que sua execução seja de forma apropriada para gerar resultados satisfatórios sem afetar as características metalográficas do material, mantendo baixa rugosidade e conformidade com suas tolerâncias dimensionais. Entretanto o processo deve ser otimizado nos tempos de operação (uso da máquina-ferramenta), vida útil da ferramenta (rebolo) e emprego do fluido de corte, para minimizar os custos do processo.

Com pouco domínio tecnológico, o desenvolvimento dessa área é imprescindível para a indústria metal-mecânica. Como o rebolo apresenta em seu corpo múltiplas arestas de corte e geometria irregular, combinados a alta velocidade tangencial da superfície cortante, torna o processo atrativo aos pesquisadores dessa área. Aliado ao desgaste constante das dimensões do rebolo e de suas arestas, e, ao empastamento de seus vãos, as variáveis de processo estão constantemente em modificação, dificultando a escolha das condições ideais de retificação para gerar os resultados desejados.

Devido à estreita relação entre as variáveis intrínsecas do processo o sistema se torna muito complexo para obter um padrão definido. Uma das dificuldades é que o rebolo apresenta múltiplas arestas de corte sujeitas ao desgaste e alterações de forma com o uso associado a altas velocidades e potências de retificação. O estudo empírico desse processo deve ser amplamente abordado com o objetivo de estender o domínio, resultando em produtos mais aperfeiçoados e baratos ao consumidor.

Danos causados na peça de trabalho são de alto custo, uma vez que todo processo anterior, além da própria retificação, é perdido quando uma parte é danificada neste estágio. Altas temperaturas geradas na zona de retificação podem causar vários tipos de danos térmicos à peça, como por exemplo, queima (em aços), têmpera excessiva da camada superficial com possível reendurecimento e aumento da fragilidade, indesejáveis tensões residuais de tração, redução da resistência à fadiga, e trincas (em cerâmicas). A aplicação de fluido de corte ajuda a refrigerar o sistema, contudo com algumas dificuldades de penetração devido à camada de ar que se forma perifericamente ao rebolo. A aplicação do rebolo recomendado pelo fabricante, para o tipo de aço e finalidade da máquina-ferramenta indicada, auxilia na realização da melhor retificação de materiais.

A dificuldade fundamental de controlar os danos causados no processo de retificação é a falta de um método confiável em fornecer realimentação em tempo real durante o processo.

Sinais de emissão acústica e potência de corte combinados têm sido utilizados com sucesso na determinação de parâmetros indicativos da queima. Estes sinais tratados e combinados podem possibilitar a implementação de um sistema de controle em tempo real da queima, otimizando o processo de retificação (Wang et. al, 2001; Aguiar, 2003; Aguiar et. al, 2006; Dotto et. al, 2006).

Diversas formas de avaliação, como o mapeamento digital da superfície do rebolo, condução de calor sobre a peça e sobre o rebolo, variações na velocidade de corte e otimização do fluido de corte têm sido estudadas para aumentar o domínio do processo.

O presente trabalho investiga novos parâmetros para a detecção e controle da queima no processo de retificação e sua implementação num microcontrolador. Para a viabilização da pesquisa, várias etapas foram realizadas:

- § O primeiro capítulo apresenta a introdução do trabalho, discorrendo sobre a importância da automação no processo de retificação e a necessidade de controlar os danos térmicos ocorridos nesse processo.
- § O segundo capítulo mostra os objetivos principais e os meios utilizados e desenvolvidos ao longo do trabalho.
- § O terceiro capítulo apresenta a revisão bibliográfica sobre o sistema de retificação, com foco no monitoramento e controle de danos térmicos ocorridos nesse processo. Discorre sobre a aquisição de dados e processamento de sinais, devido à necessidade do presente trabalho.
- § O quarto capítulo reporta a metodologia utilizada, com a implementação de cálculos num microcontrolador e a preparação e a realização dos ensaios de retificação, de rugosidade e de microdureza.
- § O quinto descreve os parâmetros estatísticos de queima.
- § O sexto capítulo, resultados e discussões, ilustra e descreve as análises visuais, de rugosidade e de microdureza, assim como de todos os sinais adquiridos durante os ensaios aplicando-os as ferramentas estatísticas. Também mostra os resultados apresentados no monitoramento com o microcontrolador.
- § Finalmente, o sétimo capítulo traz as conclusões.
- § A Bibliografia consultada e referenciada bem como os anexos finalizam o trabalho.

2 OBJETIVOS

O trabalho atual tem como objetivo investigar a aplicabilidade de ferramentas estatísticas no monitoramento da queima do aço ABNT 1020 com o emprego de rebolo de óxido de alumínio no processo de retificação plana tangencial, utilizando sinais de emissão acústica e potência elétrica do motor de acionamento do rebolo, sendo também propostos outros novos parâmetros. Estes cálculos foram inseridos num microcontrolador introduzindo ao monitoramento do processo, com o objetivo de informar quantitativamente a qualidade do produto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos os requisitos de qualidade e funcionalidade dos componentes fabricados industrialmente tem aumentado significativamente. Sendo assim, componentes têm sido fabricados com melhor qualidade e mais rapidamente para compensar o custo do material utilizado e do processo de usinagem.

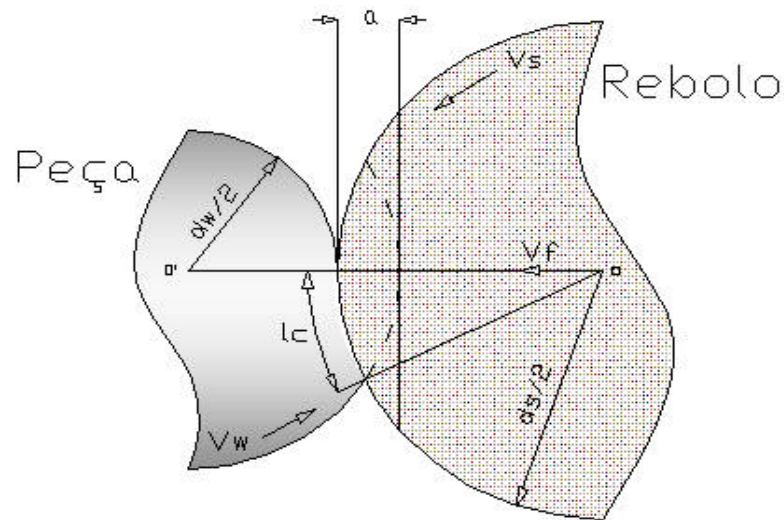
A retificação é uma operação de usinagem de alto custo que deveria ser utilizada tão eficientemente quanto possível. Ao contrário dos processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, como o fresamento ou torneamento, na retificação a remoção de cavaco é realizada por uma infinidade de arestas de corte geometricamente não definidas. Além disto, tem-se seções e comprimentos de cavaco variáveis e distintos. Procedendo a uma análise estatística dos processos de remoção de cavaco, obter-se-ão leis equivalentes as que podem ser deduzidas da cinemática do processo. A pesquisa bibliográfica descrita a seguir objetiva a formação de uma base teórica para aplicação no procedimento experimental desta pesquisa.

3.2 CONCEITOS DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

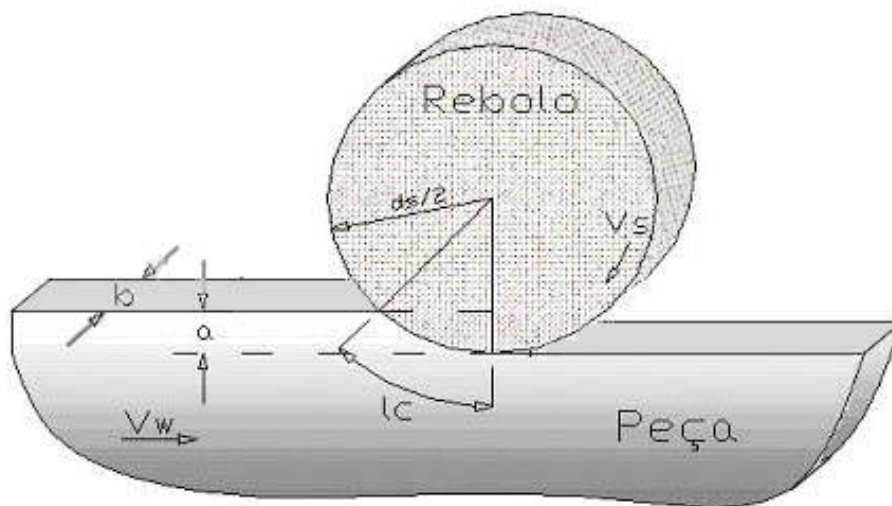
Existem muitos tipos de retificação: de “desbaste” e “precisão”; interna, externa, plana e centerless; utilizando-se superabrasivos ou abrasivos convencionais. Segundo King (1986), todos os tipos agem de uma maneira semelhante. Quando uma superfície abrasiva em movimento entra em contato com a peça, e se a força é alta o bastante, o material é removido da peça e o rebolo se desgasta. Estes dois fatores sempre irão ocorrer, contudo, o nível da força determina o quão rápido as taxas de remoção de material serão, qual será a rugosidade resultante, e se a peça será metalurgicamente danificada ou não. Os tópicos a seguir revisam alguns parâmetros selecionados envolvidos no processo de retificação, de forma a ampliar o entendimento sobre os mesmos.

3.2.1 Características do Processo de Retificação

A operação de retificação cilíndrica externa de mergulho e plana e alguns de seus parâmetros estão ilustrados na Figura 1.



(a)



(b)

Figura 1 – a) Retificação cilíndrica externa e b) plana (Malkin ,1989)

Dentre as características geométricas e cinemáticas do processo podemos destacar: a profundidade de corte a , a velocidade de corte da ferramenta V_s , velocidade de mergulho V_f , velocidade periférica da peça V_w , comprimento teórico do cavaco l_c , diâmetro da ferramenta d_s , diâmetro da peça d_w e largura do contato rebolo-peça b .

3.2.2 Comportamento da Profundidade de Corte (a)

Segundo Bianchi et al. (1996), a deflexão entre o rebolo e a peça aumenta quando a área de contato e, conseqüentemente, o número de grãos em contato com a peça aumentam. Sendo assim, a temperatura durante o processo também aumenta. Portanto, um aumento na profundidade de corte provoca um aumento no número de grãos ativos e no tempo de contato, fazendo com que cada grão abrasivo remova uma quantidade menor de metal. Os cavacos resultam mais alongados e finos. Há uma maior parcela de atrito e riscamento, desde o início da formação do cavaco até a sua expulsão. Desta forma, o atrito e riscamento entre os cavacos removidos e a peça elevam a temperatura na região de corte tendo como conseqüência a elevação de rugosidade, do nível de emissão acústica e da força de corte (normal e tangencial).

No processo de retificação, tem sido observado que a força de retificação é geralmente proporcional à quantidade de material removido, e, se a profundidade de corte é reduzida, a força diminui. Outro fator que influencia a força de retificação são as propriedades do material ser retificado, a área de contato entre o rebolo e a peça, e a velocidade do eixo do rebolo (Hekman & Liang, 1999).

Srivastava et al. apud Hassui (2002) apresentou em seu trabalho um modelo teórico para avaliar o empastamento do rebolo relacionando o mesmo com variáveis de processo. Este modelo baseia-se na adesão que ocorre na interface do grão abrasivo com o cavaco. Os autores concluem que o empastamento aumenta com o aumento da profundidade de corte, mas não é influenciado pela velocidade da peça.

Segundo Lee (1998), com pequenas profundidades de corte, materiais frágeis estão num regime dúctil gerando cavacos mais contínuos. Quando a profundidade de corte é aumentada excedendo esse regime dúctil, começam a surgir danos a estrutura da subsuperfície do material. Esse ponto é conhecido como profundidade de corte crítica que não é uniforme ao longo do material. Os exatos conceitos físicos da formação do regime dúctil não são ainda claramente explicados.

Uma retificação fica livre de danos quando o volume de material, espessura teórica do cavaco h_{eq} , forçado por cada grão do rebolo é pequeno o bastante com um melhor rendimento da fratura exposta do grão. Na prática, isto significa manter a profundidade de corte de cada grão abaixo da transição dúctil-frágil. A fim de reduzir o tempo de manufatura e seus custos elevados, o processo necessita ser automatizado visando uma retirada maior de material,

acelerando o processo através de profundidades de corte maiores. Para automatizar o regime dúctil, no caso de cerâmicas, a máquina deve ser equipada com sensores de emissão acústica bastante sensíveis à quebra da microestrutura cerâmica (Akibari et al., 1996).

3.2.3 Comportamento da velocidade de corte (V_s)

A velocidade de corte V_s exerce uma substancial influência sobre o comportamento das forças de corte, desgaste do rebolo, acabamento e queima da peça, vibrações da máquina, entre outros. Quando a velocidade de corte é elevada, um mesmo grão abrasivo passa a remover um menor volume de cavacos, pelo aumento da sua frequência de contato com a peça. Portanto, o número de grãos ativos é maior e a espessura do cavaco removido é menor, diminuindo as forças de corte, rugosidade da peça e desgaste do rebolo, pela menor solitação de cada grão. Em contrapartida, pelo aumento da intensidade de contato dos grãos com a peça, ocorre uma elevação da temperatura que pode ocasionar um dano térmico na peça. Aumentando-se a velocidade de corte pelo aumento da rotação do rebolo, há um aumento da potência de corte consumida, já que a potência de corte é diretamente proporcional à rotação do eixo árvore. (Bianchi et al., 1996)

3.2.4 Espessura Equivalente de Corte (h_{eq})

Segundo Bianchi (1990), a espessura equivalente de corte h_{eq} [μm] representa a espessura da camada de metal que é arrancada pelo rebolo numa volta completa. Trata-se de um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho a partir das variáveis V_s e V_w , sendo, portanto, muito importante no processo de retificação. A espessura equivalente é expressa por:

$$h_{eq} = \frac{V_w}{V_s} \times a = \frac{Q'_w}{V_s} \quad (1)$$

$$h_{eq} = p \times d_w \times \frac{V_f}{V_s} \quad (\text{para retificadora cilíndrica}) \quad (2)$$

O parâmetro h_{eq} está diretamente relacionado com o comportamento do processo de retificação em função de variáveis envolvidas como forças de corte, rugosidade, vida da ferramenta, entre outros. Q'_w é a taxa de remoção por unidade de largura (Equação 8).

3.2.5 Diâmetro equivalente ou de conformidade (d_e)

Segundo Oliveira (1989), o diâmetro equivalente é o parâmetro criado por Hahn que representa o grau com que a superfície do rebolo e a peça se adaptam, ou se conformam. Pode-se dizer que o diâmetro equivalente é aquele que o rebolo deve ter numa operação ideal plana para proporcionar a mesma geometria de corte da operação em estudo.

O diâmetro equivalente é dado por:

$$d_e = \frac{d_s}{1 \pm \frac{d_s}{d_w}} \quad (3)$$

Os sinais (+) e (-) na equação, referem-se à retificação cilíndrica externa e interna respectivamente. Sendo $d_w = \infty$ para retificação plana, a equação resulta:

$$d_e = d_s \quad (4)$$

3.2.6 Comprimento de contato (l_c)

Segundo Malkin (1989), é um parâmetro entre o comprimento de contato entre peça e o rebolo, e pode ser descrito pela seguinte relação:

$$l_c = \sqrt{a \cdot d_e} \quad (5)$$

3.2.7 Espessura teórica máxima de cavaco ($h_{máx}$)

Segundo Bianchi (1992) a espessura teórica máxima do cavaco é diretamente proporcional ao parâmetro espessura equivalente de corte, sendo determinada pela equação:

$$h_{m\acute{a}x} = \frac{2L}{l_c} \times h_{eq} = \frac{V_w}{V_s} \times \sqrt{\frac{a}{d_w}} \quad (6)$$

onde: L = espaçamento médio entre os grãos abrasivos (difícil de ser fornecido).

3.2.8 Taxas de Remoção

É mais conveniente usar taxas volumétricas de remoção que taxas radiais. Isto permite relacionar sistemas de tamanhos diferentes entre si. Taxas volumétricas de remoção têm sido classificadas de Z (e mais recentemente Q) em publicações internacionais.

Convencionou-se internacionalmente usar quantidades “primárias” para ilustrar fatores “por unidade de largura”. Dessa forma taxas volumétricas de remoção por unidade de largura seriam escritas como: Q'_w e Q'_s (ou Z'_w e Z'_s).

Sendo a profundidade de corte a e a largura de contato b , a taxa de remoção é dada por:

$$Q_w = V_w \times a \times b = p \times d_w \times V_f \times b \quad (7)$$

E a taxa de remoção por unidade de largura é:

$$Q'_w = V_w \times a = p \times d_w \times V_f \quad (8)$$

3.2.9 Relação G

Segundo Bianchi (1992), o parâmetro G foi definido como sendo a relação entre o volume de metal retificado e o correspondente desgase volumétrico do rebolo. Este parâmetro é representado pela equação:

$$G = \frac{Q_w}{Q_s} \quad (9)$$

Onde:

Q_w é o volume de metal retificado (mm^3/s)

Q_s é o volume de rebolo gasto (mm^3/s)

Esta relação caracteriza o desgaste de um rebolo sob determinadas condições de trabalho. Se o desgaste do rebolo for grande, a relação G é pequena. Isto significa que está havendo auto-afiação e, portanto, o rebolo permanece agressivo pela renovação dos grãos abrasivos. Se o desgaste do rebolo for pequeno, a relação G é alta e, desta forma, não há liberação dos grãos gastos e o rebolo perde a agressividade pelo desgaste do topo dos grãos.

3.2.10 Força, potência e energia específica de retificação

Segundo Malkin (1989), forças são desenvolvidas na interface rebolo-ferramenta devido a ação do processo de retificação. Para operações de retificação cilíndrica externa (Figura 2) retificação plana (Figura 3), o vetor resultante da força total de retificação exercida pela peça sobre o rebolo pode ser decomposto em uma componente de força tangencial (F_t) e uma componente de força normal (F_n)

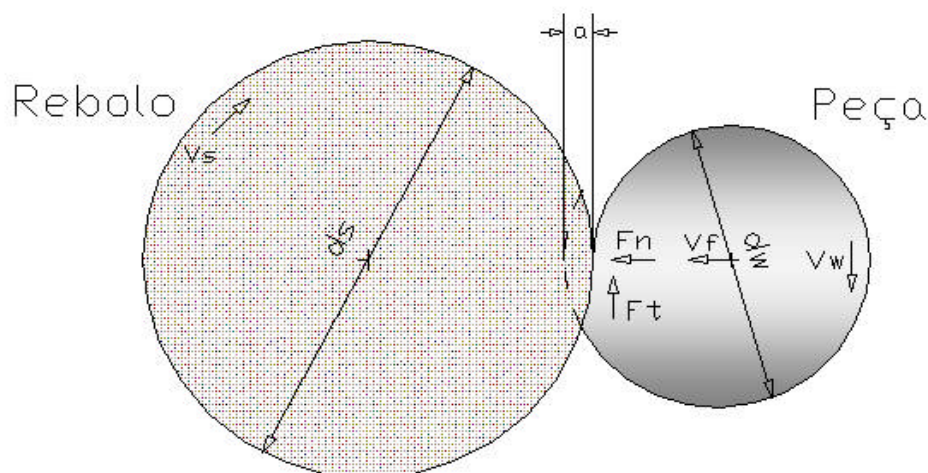


Figura 2 - Componentes de força para retificação cilíndrica

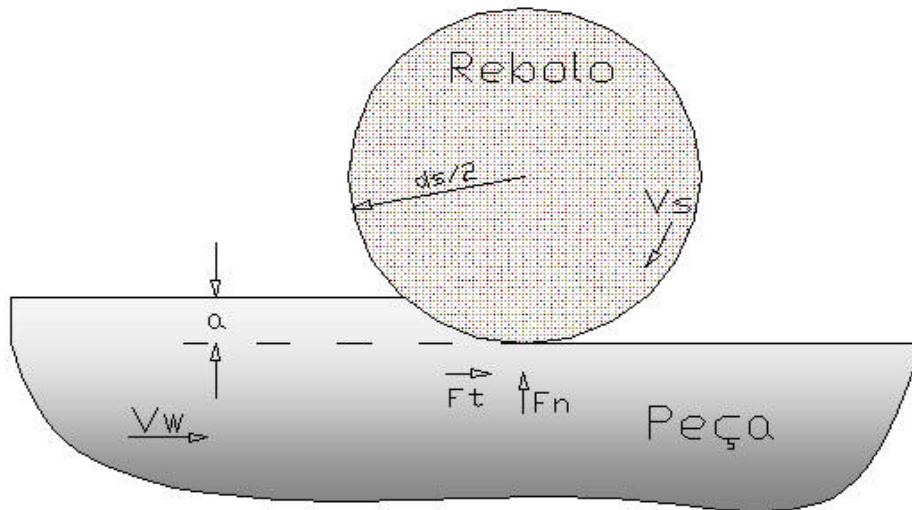


Figura 3 - Componentes de força para retificação plana

A potência de retificação (P) pode ser escrita da seguinte forma:

$$P = F_t (V_s \pm V_w) \quad (10)$$

O sinal de "+" na equação é para retificação discordante (V_s e V_w tem direções opostas na região de corte) e o sinal de "-" é utilizado para retificação concordante, com ambas as velocidades na mesma direção. Como V_w é, usualmente, muito menor que V_s , a potência (P) pode ser escrita como:

$$P = F_t \times V_s \quad (11)$$

Um parâmetro fundamental derivado da potência e das condições de usinagem é a energia específica de retificação (u), expressa em J/mm^3 , a qual é obtida pela equação:

$$u = P / Q_w \quad (12)$$

Onde Q_w é a taxa de remoção volumétrica [mm^3/s].

Durante o processo de retificação, os grãos abrasivos se desgastam, os topos dos mesmos começam a perder suas "cristas", ou seja, seu grau de afiação, tornando os grãos "cegos". Devido à perda da afiação dos grãos ocorre um aumento nos esforços de remoção do

material, originando deformações na superfície do material ao invés de sua efetiva remoção. Com o aumento destes esforços e das deformações citadas ocorre o aumento da força tangencial de corte, em consequência de maiores atritos do topo do grão abrasivo com a superfície do material gerando elevadas temperaturas e calor envolvidos no processo.

Assim, com a elevação da força de corte tangencial há, conseqüentemente, a elevação da temperatura, com possibilidades de danos térmicos, podendo afetar também a rugosidade superficial final da mesma. Isto é confirmado por Schwarz (1999), afirmando que quando um rebolo está gasto, sua tendência é produzir um acabamento mais liso ocorrendo, porém, um aumento na probabilidade do aparecimento de danos térmicos, formação de lóbulos e trepidação. Esta variável permite também analisar o desempenho das ferramentas abrasivas, detectar a ocorrência de macro e micro-desgaste, a capacidade de fixação dos grãos abrasivos pelo ligante, a elevação da temperatura na região de corte, o estado de tensão residual, dentre outras.

3.2.11 Mecanismos de retificação para rebolos convencionais

3.2.11.1 Aspectos energéticos

Segundo Marshall et al. (1952) e Backer et al. (1952), os estudos das forças e da energia específica de retificação começaram no início dos anos 50 e mostraram que as energias específicas envolvidas eram muito maiores que as encontradas em outros processos de usinagem.

Quando estes estudos foram realizados, um modelo clássico de formação de cavaco foi formulado por Merchant (1945), o qual foi amplamente utilizado para vários processos de corte de materiais metálicos. De acordo com este modelo, a formação do cavaco ocorria através de um intenso processo de cisalhamento em uma camada extremamente fina, seguido de um processo de atrito, como se o cavaco deslizesse sobre a face de incidência da ferramenta. Tipicamente, de toda a energia gerada no processo, o cisalhamento do cavaco era responsável pela geração de 75% da energia total e os 25% restantes eram devido ao atrito cavaco-ferramenta. Entretanto, muitos outros efeitos secundários foram observados ao longo dos anos. Porém, ainda hoje, este modelo é ainda considerado uma forma precisa de descrição da formação do cavaco.

Como em outros processos de corte de metais, segundo Backer et al. (1952), uma tentativa foi feita visando interpretar as forças de retificação, em função dos mecanismos de

formação do cavaco. Através de considerações pertinentes referentes a geometria típica dos grãos abrasivos, estimativas da tensão de cisalhamento devido a deformação plástica do material durante a formação do cavaco foram obtidas. Entretanto, estes cálculos mostraram que as tensões de cisalhamento excediam, em muito, as tensões de escoamento dos materiais retificados. Além disso, as maiores tensões eram obtidas para condições de retificação extremamente finas, isto é, para pequenas espessuras de cavaco, levando aos maiores valores de energia específica de retificação.

A fim de relacionar estes resultados discrepantes, segundo Malkin (1989), algumas teorias foram relacionadas. Entretanto, o maior fator de distúrbio para a aplicação da formulação clássica de formação de cavaco é a magnitude da energia específica de retificação encontrada. Virtualmente, toda energia gasta no processo de retificação é convertida em calor. Como o processo de formação do cavaco é extremamente rápido, devido às altas velocidades de corte e altas deformações envolvidas, o processo deve ser praticamente adiabático, significando que não existe tempo suficiente para que uma quantidade significativa de calor gerado pela deformação plástica do material seja trocada com o meio durante a deformação. Sob condições adiabáticas, a energia plástica introduzida, por unidade de volume é limitada pela quantidade de energia necessária para elevar, da temperatura ambiente à temperatura de fusão, uma unidade de volume do material. Para o ferro, a energia por unidade de volume é de $10,5 \text{ J/mm}^3$ e este valor é representativo também para os aços. A energia específica associada a retificação de aços é muito maior que o valor acima mencionado, variando, na faixa de 20 à 60 J/mm^3 . Valores superiores a estes não são difíceis de serem obtidos, especialmente em retificações extremamente finas (pequena remoção de material por volta de rebolo). Isto torna inconcebível que a energia específica de deformação plástica associada a formação do cavaco possa ser tão superior à energia específica de fusão do material.

3.2.11.2 Modelamento Teórico da Formação do Cavaco e sua Relação com a Energia Específica de Retificação

Segundo Malkin (1989), o mecanismo de formação cavaco engloba três etapas: deslizamento ("sliding"), deformação plástica sem remoção de material ("plowing") e a formação do cavaco propriamente dita ("chip formation"), as quais são detalhadas a seguir:

a) Forças de deslizamento e energia

Apesar da remoção de material ocorrer principalmente por formação de cavaco, devido ao relatado nos itens anteriores, uma grande parte da energia de retificação deve ser despendida em outros mecanismos distintos à formação do cavaco. Segundo Malkin (1989), um destes mecanismos pode envolver grãos abrasivos “cegos”, com topos de grão achatados, deslizando contra a peça, sem remover nenhuma quantidade de material. Este cegamento dos grãos, com perda da aresta cortante, pode ser gerado por processos de dressagem pouco agressivos, por desgaste do grão abrasivo durante o processo de corte ou por adesão de material usinado na superfície do rebolo. A presença de grãos com área de topo desgastadas, caracterizada pelas marcas estriadas observadas na direção de corte na superfície retificada, indicam que parte da energia gasta na retificação deve-se ao deslizamento dos grãos “cegos” contra a peça. Na Figura 4 é mostrado, de forma esquemática, o mecanismo de deslizamento dos grãos abrasivos com desgaste de topo.

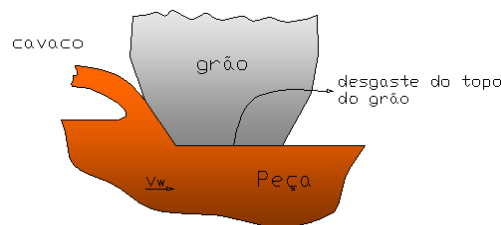


Figura 4 - Ilustração da formação do cavaco por um grão abrasivo, o qual desliza sobre a superfície gerada, apresentando um desgaste de área de topo (Malkin, 1989)

Segundo Malkin (1989), existe uma relação direta entre o aumento das forças de retificação (tangencial e normal) com o aumento da área de desgaste do topo dos grãos. A partir de resultados experimentais, para os aços, as forças de usinagem aumentam linearmente com o aumento do desgaste de área do topo dos grãos, até se atingir um ponto crítico, para o qual ocorre a queima da peça. Segundo Malkin e Cook (1971), as forças de usinagem e, conseqüentemente, a energia específica de retificação, podem ser constituídas de componentes de corte e de deslizamento, sendo que o desgaste do topo do grão é influenciado

pelas condições de dressagem, pela grade do rebolo (dureza do ligante) e pela influência do tipo de fluido de corte utilizado.

As forças tangencial e normal podem ser escritas da seguinte forma:

$$F_t = F_{t,c} + F_{t,sl} \quad (13)$$

e

$$F_n = F_{n,c} + F_{n,sl} \quad (14)$$

Onde $F_{t,c}$ e $F_{n,c}$ são as forças tangencial e normal de corte, respectivamente. $F_{t,sl}$ e $F_{n,sl}$ são aquelas para o deslizamento.

$$F_t = F_{t,c} + \mu \cdot p \cdot b \cdot (d_e \cdot a) / 2 \cdot A \quad (15)$$

Também podendo ser escritas na forma expandida:

$$F_n = F_{n,c} + p \cdot b \cdot (d_e \cdot a) / 2 \cdot A \quad (16)$$

Onde μ é o coeficiente de atrito entre os grãos abrasivos desgastados e a peça, p é a tensão média de contato entre os grãos abrasivos desgastados e a peça, d_e é o diâmetro equivalente e A é o percentual do rebolo constituído de grãos cegos.

b) Deformação plástica sem remoção de material (“plowing”) e a formação do cavaco propriamente dita (“chip formation”)

Segundo Malkin (1989) a energia específica de retificação para o corte (u_c), a qual corresponde à energia remanescente da subtração do valor da energia específica devido ao deslizamento (u_{sl}) do valor total da energia específica de retificação (u), pode ser calculada pela expressão:

$$m_c = \frac{F_{t,c} \times V_s}{b \times V_w \times a} = \frac{P}{Q_w} \quad (17)$$

O numerador representa a potência requerida para o corte e o denominador a taxa de remoção volumétrica de material. A força tangencial de corte ($F_{t,c}$) é equivalente àquela realizada por um rebolo totalmente afiado, sem desgaste de área de topo de grão ($A=0$). A Figura 5 apresenta os resultados referentes à energia específica de retificação versus a taxa de remoção específica (Q_w' ou $V_w a$), para o aço de alto carbono AISI 1095.

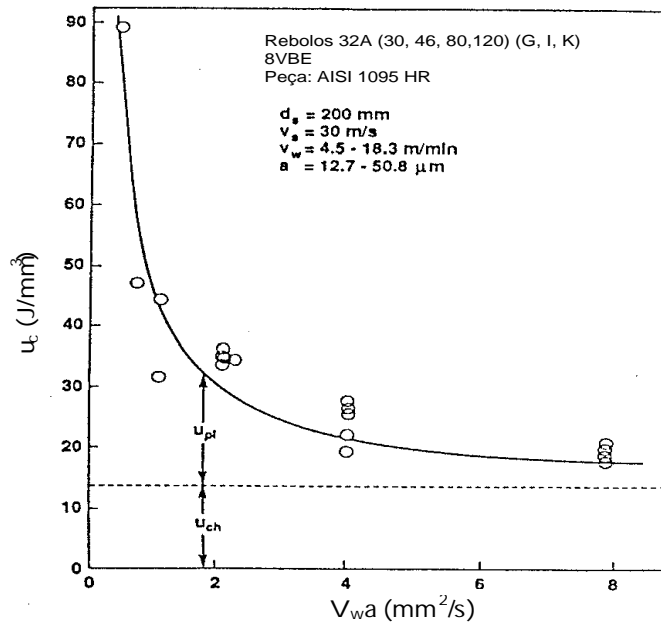


Figura 5 - Energia específica de retificação versus taxa de remoção volumétrica, numa operação de retificação plana (Malkin, 1989)

Segundo Malkin (1989), todos os resultados, mesmo para diferentes tamanhos de grãos, resultavam em curvas semelhantes. À pequenas taxas específicas de remoção, os valores obtidos para a energia específica de corte eram extremamente grandes, mas decaíam para maiores valores de ($V_w a$), tendendo a um valor mínimo limite de $13,8$ J/mm³.

Mesmo após subtrair-se o valor da energia específica referente ao deslizamento (Figura 5), torna-se aparente que ainda existe um “efeito residual”. À pequenas taxas específicas de remoção de material, correspondendo a finas espessuras de cavaco, a energia específica de retificação torna-se extremamente elevada e sua magnitude não pode ser adequada ao modelo clássico de formação do cavaco. Isto sugere que somente uma parte da energia específica de retificação é realmente associada à formação de cavaco, sendo que, deva existir, pelo menos, um outro mecanismo responsável pela geração da energia remanescente.

Outro mecanismo associado ao processo abrasivo é a deformação plástica sem remoção de material (“plowing”), o qual relaciona a energia gasta para a realização desta deformação. A este mecanismo é associado o escoamento lateral do material, em forma de “cristas”, ao longo da trajetória de corte do grão abrasivo, ainda incluindo a deformação plástica do material passando por baixo do gume abrasivo (Abebe, 1981). O “plowing” ocorre conforme ilustrado na Figura 6.

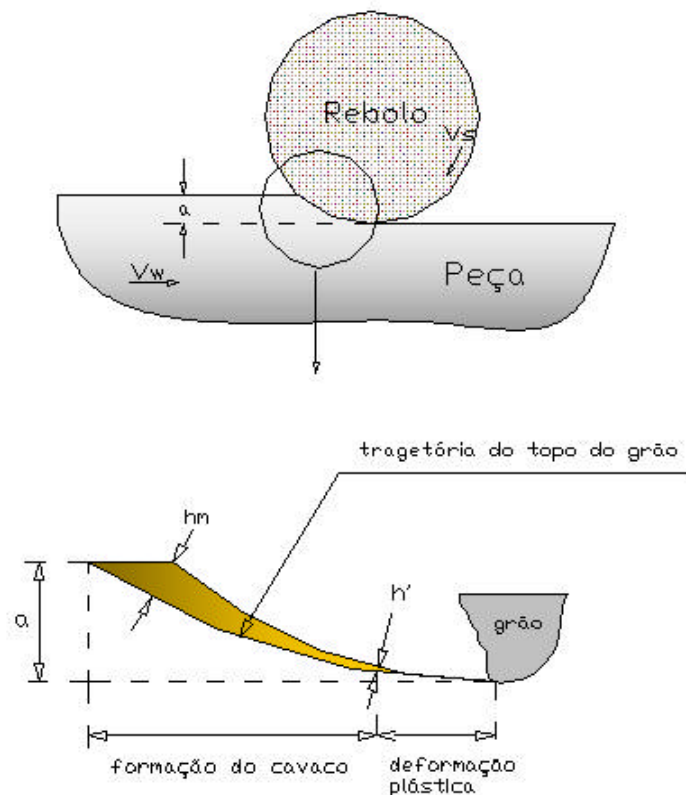


Figura 6 - Ilustração da transição do “plowing” para a formação do cavaco através da passagem do grão pela zona de retificação (Malkin, 1989)

Quando a aresta cortante do grão abrasivo passa através da zona de retificação, sua profundidade de corte aumenta de zero até o valor máximo h_m (espessura máxima do cavaco), no final do corte. Inicialmente, o grão abrasivo realiza um contato elástico, cujo gasto energético é considerado desprezível para o cômputo total da energia de corte, seguido da deformação plástica (“plowing”) do material da peça. Em média, o corte só é iniciado quando o grão abrasivo atingir uma profundidade de corte crítica h' . Os fatores que afetam a magnitude incluem: o desgaste de área de topo de grão do rebolo (seu grão de afiação), a orientação e ângulo de incidência do grão e o coeficiente de fricção (atrito). Após o corte se

iniciar, o “plowing” pode ainda persistir, com alguma parcela de material ainda escoando, em forma de cristas, ao invés de ser removido em forma de cavaco.

Uma forma de controle do “plowing” é através do controle da espessura máxima do cavaco, onde um aumento nesta espessura (pelo aumento de a ou V_w), permitirá uma diminuição do material escoado plasticamente, atingindo-se mais rapidamente o valor de h' crítico para início do corte, diminuindo assim a energia específica de “plowing”. No limite, esta energia tende a zero, sendo que a energia específica tende à energia específica de retificação (u_{ch}), a qual é assumida como constante. Os resultados mostrados na Figura 5, implicam em $u_{ch} = 13,8 \text{ J/mm}^3$ e uma relação inversa entre a energia específica de “plowing” e a taxa de remoção específica de material (Q'_w).

Em resumo, a energia específica de retificação consiste dos componentes referentes a formação do cavaco, “plowing” e ao deslizamento do grão sobre a peça, conforme a equação abaixo (Malkin, 1989) :

$$u = u_{ch} + u_{pl} + u_{sl} \quad (18)$$

Somente u_{ch} é responsável pela remoção efetiva de material, sendo então a mínima energia envolvida ($u_{ch} = 13,8 \text{ J/mm}^3$). Entretanto, este valor ainda é muito superior à energia específica obtida em outros processos de corte de metais em larga escala. Além disto, diferente dos requerimentos de força e energia de outros processos de corte, para o aço suas ligas com ou sem tratamento térmico, a mínima energia específica de retificação é insensível à adição, sendo necessária a mesma energia mínima para a retificação de um aço no estado recozido e um aço ferramenta temperado (Kannappan & Malkin, 1972).

A fim de explicar este comportamento anormal na retificação, torna-se interessante comparar a magnitude da mínima energia de retificação com a energia necessária para a fusão do material que está sendo retificado. Como 75% da energia total gasta na formação do cavaco é associada a tensões de cisalhamento, sendo que os 25% restantes são gerados pelo atrito cavaco-ferramenta, estes 75% geram uma energia mínima de retificação de $10,4 \text{ J/mm}^3$, a qual é virtualmente idêntica à energia necessária para a fusão de uma unidade de volume de ferro. Esta igualdade pode ser atribuída às elevadas deformações envolvidas e às condições adiabáticas de formação do cavaco. O elevado ângulo de incidência negativo dos gumes cortantes (-60°) é responsável por grandes deformações na região de corte. Estas deformações são obtidas em altas velocidades, sendo que esta deformação plástica é praticamente adiabática e a energia gasta nesta deformação não deve exceder a energia necessária para a

fusão do material. Isto é demonstrado na Figura 7, onde uma curva hipotética tensão-deformação é mostrada para um cisalhamento adiabático.

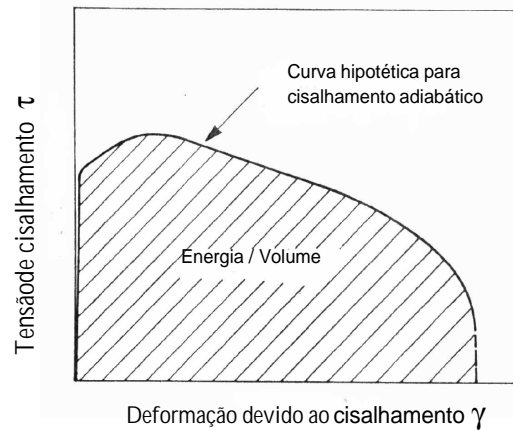


Figura 7 - Curva hipotética do comportamento tensão-deformação para um cisalhamento adiabático até a fusão do material (Malkin, 1989)

A área abaixo da curva é o trabalho plástico por unidade de volume, o qual é, virtualmente, totalmente transformado em calor. A deformação inicial é acompanhada de um acréscimo na tensão de cisalhamento, a qual atinge um valor máximo decrescendo posteriormente a uma taxa constante, apresentando uma resistência à deformação plástica nula, quando é atingido o ponto de fusão do material. Além disso, a área total abaixo da curva tensão-deformação é igual à energia por unidade de volume necessária para a fusão do material. Isto não implica na fusão do material, mas somente que a energia de cisalhamento gasta na formação do cavaco se aproxima da energia necessária para a fusão do material. De fato, somente os cavacos que aparentemente entram em ignição, ao contato com o ar, após a retificação mostram algum sinal de terem atingido o seu ponto de fusão (fenômeno de centelhamento durante a retificação).

Esta correlação entre as energias de retificação e de fusão não é apenas limitada aos aços, conforme visualizado na Figura 8, a qual apresenta resultados experimentais da energia específica mínima de retificação (u_{min}) versus a energia específica de fusão ($u_{fusão}$) para alguns metais.

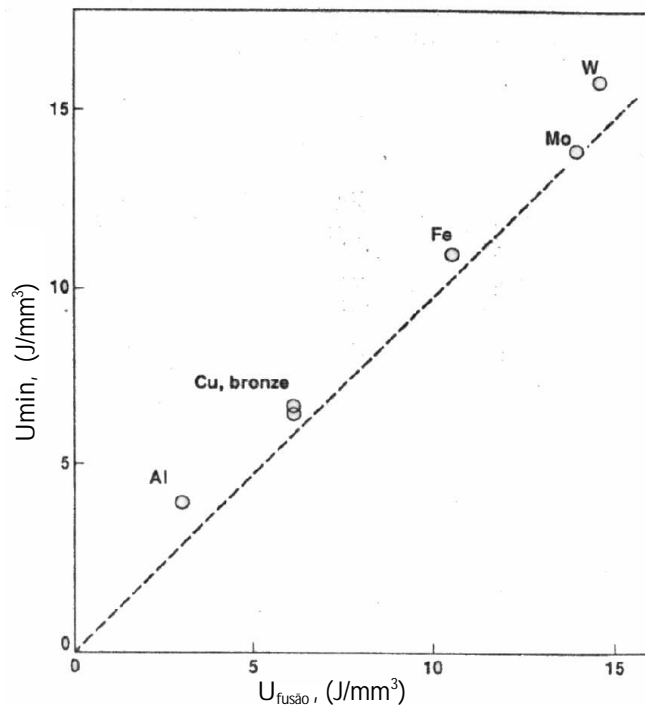


Figura 8 - Mínima energia específica versus energia de fusão para diversos materiais metálicos (Malkin, 1989)

Estes experimentos foram conduzidos com rebolos altamente afiados e sob condições ótimas de lubrificação, usando um óleo com aditivos sob extrema pressão, visando minimizar, nos resultados finais, a contribuição da parcela da energia de deslizamento. A energia específica de fusão indicada para cada metal é a diferença entre os valores de entalpia, no estado líquido, à temperatura de fusão e à temperatura ambiente. Considerando a complexidade do processo, é possível encontrar-se que para cada caso analisado, os valores da energia mínima de retificação sejam ligeiramente superiores aos valores da energia de fusão.

De acordo com esta teoria apresentada, a energia mínima excede a energia de fusão devido ao atrito cavaco-ferramenta, o qual gera um gasto de energia adicional à energia cisalhante para a formação do cavaco, sendo que ainda possa restar uma pequena contribuição do "plowing" nos valores desta energia mínima. O tratamento térmico e a presença de elevada aditivção com elementos de liga não alteram a energia mínima para a formação do cavaco, devido a não influência desses na energia necessária para a fusão do material.

3.2.12 Rebolo

O rebolo original foi feito de argila e pó abrasivo, torneado e aquecido por Frank B. Norton no final de 1800. O rebolo é uma pedra artificial moldada denominada vulgarmente esmeril. É uma ferramenta de corte múltipla, formada por aglomeração compacta de cristais duríssimos que cortam o metal, raspando-os com suas pontas agudas. São constituídos de abrasivos e aglomerantes.

Segundo Stemmer (1992), na usinagem com gumes de geometria de corte não definida, a remoção do material é feita com ferramentas constituídas de grão abrasivos de materiais duros que podem atuar livres ou unidos por um ligante. São necessárias cinco características para que se defina o tipo de rebolo, elas são: tipo de abrasivo, ligante, dureza dos grãos, granulometria e estrutura.

Abrasivos são as ferramentas de corte ou produtores de cavaco do rebolo de retificação. O elemento abrasivo é um cristal natural ou artificial em forma de pontas-agudas. Os principais abrasivos são: óxido de alumínio, carbetto de silício, nitreto de boro cúbico e diamante.

As características dos abrasivos que determinam sua eficiência na remoção de material são: dureza do cristal, estrutura do cristal, forma do grão, a friabilidade ou durabilidade do grão, a química do abrasivo, e se foi tratado ou revestido.

Segundo King (1986), a dureza de um grão relativa à dureza do material a ser retificado é um fator na capacidade do rebolo de remover material. O diamante ainda é o abrasivo mais duro disponível, e sua dureza o torna extremamente eficiente em algumas operações de retificação. Outras características do diamante, como suas propriedades químicas, o tornam ineficiente em outras operações. De qualquer forma um abrasivo que é significativamente mais duro que o material a ser retificado tenderá a remover mais material antes de se desgastar.

A estrutura do cristal de um grão abrasivo afeta o modo do desgaste do grão. O grão abrasivo monocristalino tende a se desgastar mais consistentemente que uma partícula abrasiva que pode ter vários cristais fundidos juntos. Grãos abrasivos apresentam enormes variações em sua microestrutura (King, 1986).

A dureza do abrasivo, estrutura do cristal, e a forma do grão contribuem inteiramente para a relativa friabilidade ou durabilidade do abrasivo. Um grão friável é definido como um grão que fratura e expõe novos pontos agudos dentro do mesmo grão. Um grão durável pode

resistir a altas forças na operação de retificação sem um desgaste muito alto. Estes dois termos (friabilidade e durabilidade) não são exatamente opostos, a medida que alguns grão sofrem microfraturas que expõem novos pontos agudos de corte.

A química do abrasivo afeta a capacidade de corte do grão em algumas maneiras. Em alguns tipos de rebolos ocorre uma ligação química entre o abrasivo e o ligante. A química do abrasivo pode também afetar sua capacidade de retificar materiais com os quais pode interagir em uma região de alta temperatura e alta pressão. A tendência de o diamante oxidar em altas temperaturas, por exemplo, tanto quanto sua tendência de baixa resistência ao impacto, impede seu uso para operações de altas temperaturas e altas forças.

3.2.12.1 Tipos de abrasivos

Os abrasivos usados na retificação podem ser subdivididos em 3 grupos: abrasivos naturais, abrasivos convencionais e superabrasivos (Krar, 1995).

Os abrasivos naturais não normalmente usados nos rebolos de retificação, pois não possuem durabilidade para resistir às altas pressões da retificação. Estes abrasivos ainda são usados em algumas aplicações onde pressões baixas e abrasivos baratos e afiados têm utilidade.

Abrasivos convencionais são primariamente colocados em um forno e fundidos, contudo alguns abrasivos não-fundidos estão disponíveis. Os três abrasivos principais são óxido de alumínio, alumina com zircônio e carbeto de silício.

O óxido de alumínio é usado em rebolos para retificar materiais ferrosos. É o abrasivo convencional mais mole, mas é relativamente resistente ao impacto. Existem alguns tipos de grão de óxido de alumínio, suas variações são devido à pureza química, forma do grão, fundido ou não-fundido, estrutura cristalina e revestimento.

A alumina com zircônio é usada para desbaste de metais, particularmente metais ferrosos. Tem a maior resistência ao impacto dos abrasivos convencionais. Existem dois tipos básicos de alumina com zircônio: uma liga de 15% de zircônio e uma outra com maior percentagem de zircônio (de nome comercial Norzon). O primeiro tem um maior durabilidade e maior resistência ao impacto. O segundo é mais friável, com capacidade de microfratura e geração de novas superfícies agressivas. Alumina com zircônio não são geralmente usadas nas operações de acabamento devido a sua ineficiência sob forças pequenas.

O rebolo de carbeto de silício é geralmente usado para retificar materiais não-ferrosos. É o mais duro dos abrasivos convencionais, mas tem menor resistência ao impacto que o

óxido de alumínio. Existem dois tipos básicos de carbeto de silício: preto e verde. Carbeto de silício preto é menos puro, levemente mais durável, e geralmente mais barato que o tipo verde. Carbeto de silício verde tem pureza maior, é o abrasivo convencional mais agressivo e relativamente caro. O carbeto de silício não é normalmente utilizado na retificação de aços, pois não é tão eficiente quanto o óxido de alumínio (não remove muito material antes do desgaste de suas arestas). Teoricamente, isto ocorre devido à composição química do abrasivo e o conteúdo de carbono dos aços e/ou a necessidade de resistência ao impacto na retificação dos mesmos.

Os superabrasivos são: diamante e CBN (Cubic Boron Nitride). O diamante está disponível tanto como abrasivo natural e abrasivo artificial. O alto custo e disponibilidade limitada do diamante natural têm estimulado a sua troca pelo diamante artificial ou sintético. O diamante é usado para retificar carbeto, cerâmicas, vidros e outros materiais refratários. Há muitas formas e purezas de diamantes disponíveis. O CBN é um abrasivo artificial. É usado para retificar materiais ferrosos, particularmente aços duros e ligas.

Embora não sejam utilizados neste trabalho, os rebolos superabrasivos são de grande importância em qualquer estudo referente à retificação.

O termo "superabrasivos" é usado para diferenciar os abrasivos de diamante e CBN (nitreto de boro cúbico) dos "convencionais" carbeto de silício (SiC) e óxido de alumínio (Al_2O_3). A principal propriedade de um abrasivo que diferencia o superabrasivo de um abrasivo convencional é sua dureza. Outras propriedades importantes são: resistência ao impacto, afinidade química e estabilidade térmica.

O diamante é o material mais duro conhecido e é usado extensivamente na retificação de carbeto de tungstênio e não metálicos, como rocha, concreto, cerâmicas e vidro. Segundo King (1986), o diamante tem alguma utilidade em materiais ferrosos, mas sua afinidade química geralmente limita sua performance. Os materiais ferrosos têm uma afinidade com o carbono e na temperatura do processo de retificação há uma erosão química da partícula do abrasivo de diamante, desde que ele seja feito primariamente de carbono. Este fenômeno é conhecido como "grafitização do diamante". As arestas de corte arredondam deixando-os cegos, causando fricção e formação de cavacos ineficiente. Isto requer maiores forças de retificação que podem causar danos metalúrgicos na peça a ser retificada. Por isso o diamante, geralmente, não é o superabrasivo escolhido para materiais ferrosos.

CBN é feito de boro e nitrogênio, que previne o problema de afinidade do carbono na retificação de materiais ferrosos. É o segundo material mais duro conhecido, não é encontrado na natureza e é de 2 a 3 vezes mais duro que o abrasivo de óxido de alumínio. Devido à sua

estabilidade química, é o superabrasivo de escolha nas ligas ferrosas tanto quanto nas ligas de níquel e cobalto. O CBN é sintetizado a alta temperatura e pressão no mesmo processo usado para fazer diamantes sintéticos.

O CBN foi sintetizado pela primeira vez em 1958, mas não foi comercializado até 1969. Foi rapidamente adotado para afiação de ferramentas de corte de aço rápido, mas sua penetração nas aplicações de produção em retificação têm levado mais tempo, pois é mais complexo adotar o CBN do que os abrasivos convencionais. Contudo o uso do CBN na retificação tem se desenvolvido rapidamente no Japão, Europa e Estados Unidos. O consumo de rebolos e pedras de afiar de CBN usados para retificação de produção já excede significativamente o gasto usado para manutenção de ferramenta (King, 1986). Acredita-se que o CBN seja economicamente viável em uma faixa estimada de 25% do mercado de retificação de precisão, mas seu atual uso está bem acima disso e crescendo rapidamente. Comparado ao diamante, o CBN tem resistência ao impacto, resistência ao calor e é quimicamente menos ativo.

A Tabela 1 mostra algumas características importantes de rebolos para diferentes tipos de abrasivos:

Tabela 1 - Propriedades de alguns materiais abrasivos (Malkin, 1989)

	Material			
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	Carbeto de silício (SiC)	Nitreto de boro cúbico (BN)	Diamante (C)
Estrutura cristalina	Hexagonal	Hexagonal	Cúbica	Cúbica
Densidade (g/mm ³)	3.98	3.22	3.48	3.52
Ponto de fusão	~2040 °C	~2830 °C	~3700 °C à 13 kbar (ponto triplo)	~3700 °C à 130 kbar (ponto triplo)
Dureza Knoop (Kg/mm ²)	2100	2400	4700	8000

3.2.12.2 Ligantes

O ligante ou aglutinante tem a função de manter o grão preso, até que este esteja cego o suficiente ou perca a capacidade de corte em decorrência do processo de usinagem. O ligante deve satisfazer três exigências (Stemmer, 1992):

- 1- O material ligante deve ser suficientemente resistente;
- 2- O ligante deve formar pontes entre grãos com seções transversais suficientemente grandes para suportar os esforços de corte;
- 3- Entre o grão abrasivo e o ligante deve existir uma energia de ligação suficientemente elevada para garantir a fixação do grão;

Os ligantes se dividem em dois grupos: ligantes inorgânicos e ligantes orgânicos.

3.2.12.3 Dureza

A dureza de um rebolo é a resistência oposta ao arrancamento dos grãos, ou seja, uma capacidade de reter os grãos. Essa capacidade depende do tipo de ligante, do tamanho do grão e dos vazios, da espessura das pontes de ligantes. Um rebolo macio solta facilmente os grãos e se desgasta mais rapidamente, logo, um rebolo duro retém fortemente os grãos abrasivos.

A dureza ideal a ser utilizada é aquela que os grãos gastos e arredondados são arrancados por si só, de modo que o rebolo se reafia automaticamente, com mínima necessidade de utilizar a operação de re-afiação do rebolo (Krar, 1995).

1.2.12.4 Granulometria

As dimensões dos grãos e sua uniformidade são características importantes nos processos de usinagem com abrasivos. Grãos mais grossos são utilizados em rebolos para operações de corte e limpeza, enquanto os mais finos são utilizados para polimento e lapidação (Krar, 1995).

3.2.12.5 Estrutura

A estrutura do rebolo tem relação direta com a densidade e com o espaçamento médio entre os grãos abrasivos. A estrutura fechada é indicada pelos números 0, 1, 2, 3; a estrutura média pelos números 4, 5, 6 e de 7 a 12 a estrutura é aberta. Uma estrutura fechada determina um aumento no número de arestas cortantes na periferia do rebolo. Rebolos com estrutura aberta oferecem mais espaços para alojamentos do cavaco reduzindo a tendência ao entupimento de porosidades.

Na seleção do tipo de estrutura utilizada na operação, deve-se analisar três fatores: material a ser usinado, o acabamento desejado e o tipo de trabalho.

A Figura 9 mostra a identificação padronizada de um rebolo convencional, o qual leva em conta as características do rebolo citadas acima:

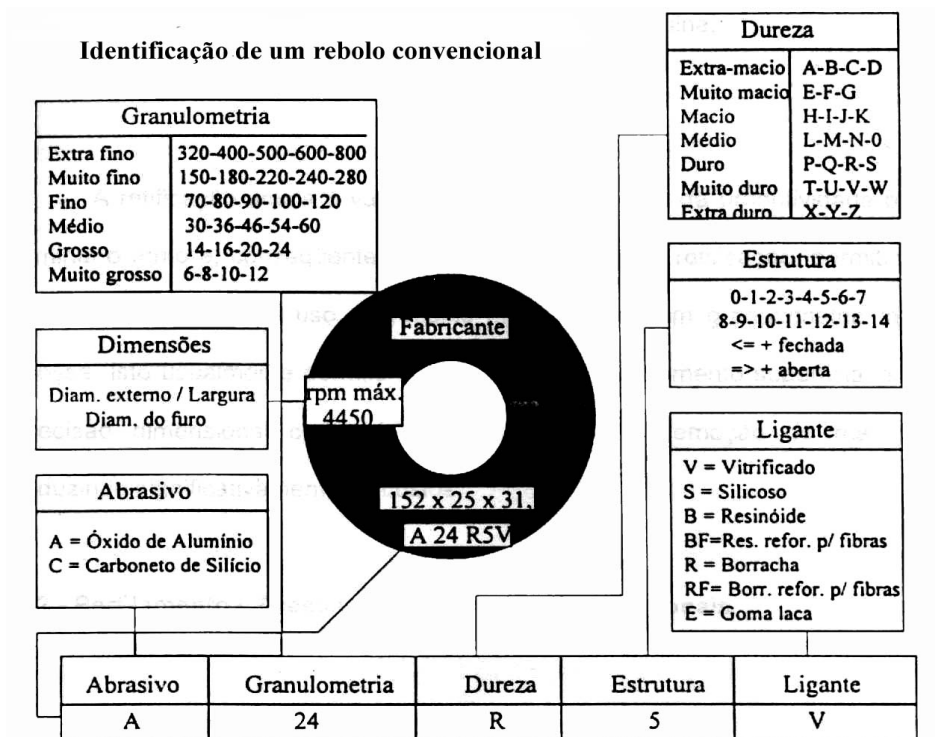


Figura 9 – Especificação de rebolos com abrasivos convencionais (Stemmer, 1992)

3.2.13 Operação de Dressagem

Após a fabricação e uso, ferramentas para retificação não se encontram em condições normais para nova utilização. Podem apresentar gumes cegos, não estar numa forma desejada e os poros podem estar impregnados de cavaco, de modo que a absorção de novos cavacos com sucessiva remoção de material fica dificultada.

A operação conjunta de perfilamento e afiação dos rebolos convencionais na retificação é denominada operação de dressagem.

Para tal operação, são utilizados diversos tipos de ferramentas denominadas dressadores ou retificadores que incluem: cortadores metálicos (rosetas), bastões retificadores, rodas retificadoras, pontas simples de diamante, dressadores de diamantes múltiplos e em matriz, roletes estacionários e giratórios de diamante e roletes de esmagamento. Cada tipo apresenta vantagens específicas.

As principais finalidades da operação de dressagem são (Bianchi et. al, 1994):

- obtenção de concentricidade da face de trabalho do rebolo com o eixo de rotação;
- perfilamento da face de trabalho do rebolo para uma operação de forma;
- arrancamento dos grãos abrasivos gastos para melhorar a agressividade da face de trabalho do rebolo.

3.2.13.1 Ferramentas de Dressagem

Segundo Aguiar apud König (1997), as ferramentas de dressagem se distinguem de acordo com o princípio cinemático de ação: ferramentas estáticas e ferramentas rotativas. Para as ferramentas estáticas, ao contrário das rotativas, não existe um movimento de rotação da ferramenta, apenas translação.

As ferramentas de dressagem fixas trabalham da mesma forma que uma ferramenta de torneamento onde o rebolo seria a peça a ser torneada. Esta ferramenta é geralmente fixa à mesa de trabalho ou sobre um dispositivo especial de dressagem e é deslocada com uma velocidade de avanço constante (V_{sd}). Entre dois passos de dressagem, a ferramenta é avançada de um valor de profundidade (a_d). As ferramentas com contato pontual ou na forma de uma linha também são adequadas para o perfilamento. O perfil é produzido pelo movimento da ferramenta de dressagem que é guiada por um sistema copiador. Podem-se encontrar atualmente ferramentas de dressagem comandadas numericamente.

A ferramenta rotativa trabalha da mesma forma que a ferramenta estática, sendo avançada longitudinalmente ao longo do rebolo. As demais ferramentas não necessitam de um movimento de avanço, uma vez que têm uma largura de trabalho (b_d) que é maior ou igual a largura do rebolo (b_s). A velocidade de penetração (V_{fd}) pode ser realizada através de um movimento intermitente nas ferramentas em bloco ou na forma de um movimento contínuo de dressagem por rolo. Em ambos os casos a ferramenta executa movimento de penetração radial em relação ao rebolo. O perfil da ferramenta de dressagem é reproduzido de forma recíproca na superfície do rebolo.

Para que durante a dressagem seja possível a remoção de material do rebolo, as ferramentas de dressagem devem ser mais duras que o material do rebolo. Em decorrência disso, para a dressagem de rebolos convencionais são empregadas ferramentas de diamante. Além da dressagem do rebolo por corte, também é usual empregar-se uma sobrecarga de retificação sobre o rebolo, produzindo um efeito de remoção de material de sua superfície. Este procedimento permite que, retificação de materiais extremamente duros e sob condições

extremas de usinagem, sejam produzidas grandes forças de cortes nos contornos dos grãos abrasivos. Estas forças fazem com que os grãos abrasivos cegos lasquem ou sejam expulsos do ligante.

3.2.13.2 *Influência da Dressagem no Processo de Retificação*

Ainda é pouco conhecida em sua totalidade a influência das condições de dressagem na retificação, pois a geometria do dressador é um fator de grande influência que freqüentemente não é levado em conta. A maioria dos trabalhos encontrados na bibliografia utiliza como variáveis do processo a profundidade de dressagem (a_d) e o passo de dressagem (S_d).

Segundo Bianchi (1992), são dois os efeitos resultantes da operação de dressagem: o macroefeito e o microefeito.

O macroefeito é formado em função do formato do dressador, da profundidade de penetração deste e do passo de dressagem em que é realizada a operação. Este fenômeno determina a posição na qual as arestas dos grãos abrasivos estão localizadas. Pode-se dizer que o macroefeito é a “rosca” que o dressador produz na face do rebolo. A Figura 10 representa o esquema do processo de dressagem.

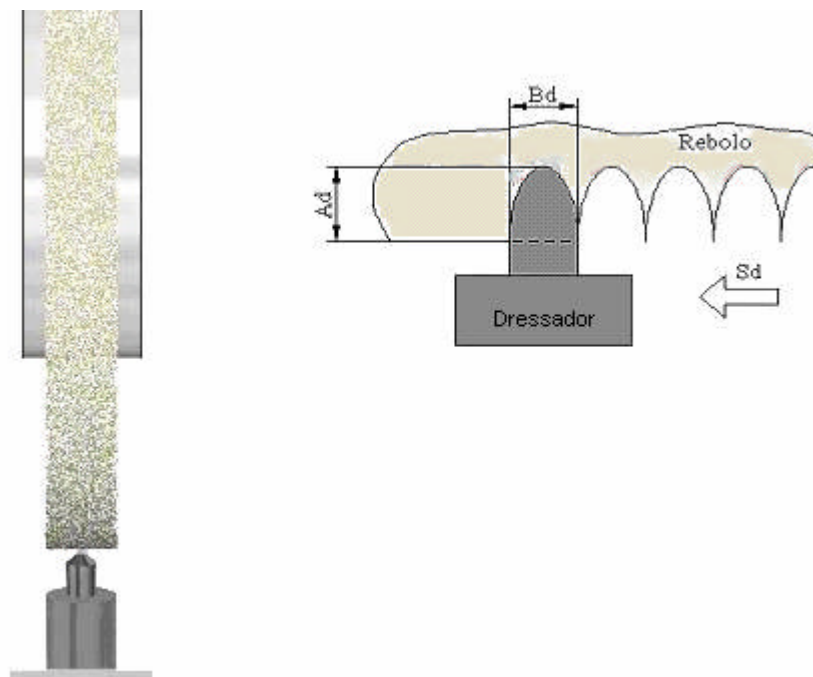


Figura 10 – Esquema do processo de dressagem.

3.2.13.3 Grau de Recobrimento (U_d)

Segundo Aguiar apud König (1997), a forma de afiação que usualmente é utilizada, ou seja, ajustando-se o avanço do dressador em função do seu tipo, é inadequada, pois não leva em conta a largura de atuação deste no instante da operação. Tal largura varia ainda devido ao desgaste da ponta do dressador durante várias operações de dressagem.

König (1980) definiu o parâmetro denominado por grau de recobrimento (U_d) como sendo a relação entre a largura de atuação do dressador (b_d) e o passo de dressagem (S_d), conforme a expressão:

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (19)$$

As condições de dressagem influenciam diretamente na taxa de remoção de material que por sua vez interfere na rugosidade da peça produzida. Em dressagens grossas, onde o grau de recobrimento é pequeno e o número de arestas atuantes é reduzido, é provocado um aumento na profundidade dos sulcos que, conseqüentemente, provoca valores mais elevados na rugosidade. Na dressagem fina, com valores maiores de grau de recobrimento, um número significativamente maior de arestas atuantes divide os esforços e cada grão abrasivo penetra menos na peça, reduzindo assim os valores de rugosidade.

3.3 RESTRIÇÕES DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

A queima da peça no processo de retificação é um dos tipos mais comuns de dano térmico. Este fenômeno tem sido investigado recentemente por vários pesquisadores, porém não existem ainda métodos de medida que permitam o monitoramento on-line da queima de peças. O usuário industrial é forçado a confiar em testes destrutivos de peças que são obtidas randomicamente. Isto resulta em perda de tempo e custo alto de produção, conflitando com os procedimentos atuais de crescente demanda por mínimo custo (König 1990).

Através da realização de medições de microdureza na subsuperfície de aços temperados verificou-se que a queima induzida pelo processo de retificação é acompanhada por um processo de re-austenitização do material. Para aços temperados retificados sem queima, existe geralmente um amolecimento do material próximo à superfície, por terem sido

atingidas temperaturas inferiores às de austenitização. Com a queima ocorre a re-têmpera do material, a qual é consequência da re-austenitização do mesmo, seguida da formação de martensita não revenida. Esta pode ser constatada através da análise metalográfica, resultando no aumento da microdureza superficial. Evidências metalúrgicas e medições de microdureza indicam que o limite para início da queima visível coincide com o valor limite da temperatura para início da austenitização do material. Segundo Malkin (1989), a queima da peça, observada para aços de rolamentos, traz um aspecto adverso quanto ao limite de resistência à fadiga e consequente diminuição do número de ciclos destes aços após a retificação. Este comportamento é atribuído a formação de martensita não-revenida, gerada no processo de queima, em função do aquecimento à temperatura de austenitização e resfriamento rápido sem posterior alívio de tensões (revenimento).

A melhoria de processos de usinagem usualmente requer a identificação de parâmetros operacionais que irão satisfazer um objetivo ou critério específico. Métodos analíticos de máquina-ferramenta-economia são frequentemente usados para otimizar processos de corte de larga escala, como torneamento e fresamento, de acordo com um critério de máxima taxa de produção ou mínimo custo, podendo também ser aplicada uma aproximação similar à retificação. Para o uso destes métodos, é necessária uma relação entre a vida da ferramenta e os parâmetros operacionais, similar à equação de vida da ferramenta de Taylor para torneamento ou fresamento. Para retificação de precisão, a vida da ferramenta pode ser interpretada como o tempo útil de retificação entre os redressamentos do rebolo, no entanto, geralmente é mais conveniente expressar a vida da ferramenta em termos da quantidade de material removida entre o redressamento do rebolo ou número de peças por dressagem (Malkin, 1989).

As taxas de produção que podem ser alcançadas pela retificação são limitadas por vários obstáculos. Algumas restrições comumente encontradas incluem: capacidade de potência da máquina, vibrações da máquina-ferramenta, danos térmicos na peça, desgaste excessivo do rebolo, rugosidade e tolerâncias dimensionais e geométricas. Enquanto não é possível prever com exatidão a combinação de parâmetros operacionais prévias à retificação, a transgressão de restrições pode ser identificada tanto durante a retificação ou após a mesma na inspeção da peça. É especialmente importante a prevenção quanto a restrições de produção e a possibilidades de relaxá-las (Malkin, 1989). As restrições citadas anteriormente serão analisadas detalhadamente a seguir:

3.3.1 Capacidade de potência da máquina

Segundo Malkin apud Aguiar (1989), a potência líquida disponível na retificadora é um pouco menor que sua potência total avaliada devido a ineficiência no sistema de transmissão. Para a operação da máquina no seu limite de potência do eixo, é necessário reduzir a energia específica do processo para relaxar as restrições e prosseguir para uma taxa de remoção mais rápida. Isto pode ser feito dressando o rebolo mais grosseiramente, por exemplo, aumentando o avanço no caso de dressador de diamante, mas isto resultará em uma superfície mais rugosa, e esta aproximação para reduzir a energia específica só é possível se a superfície é mais lisa do que necessário. Outra maneira de diminuir a energia específica para relaxar as restrições de potência inclui o uso de um rebolo mais macio ou um fluido de corte que lubrifique melhor. Uma desvantagem do uso de um rebolo mais macio é a possibilidade de aumento do desgaste.

Para a determinação da potência de acionamento do motor principal é necessário obter com o registro da potência de entrada. Ela é composta em:

- Potência do motor em vazio (existente devido ao atrito e perdas);
- Potência de corte como decorrência das forças de retificação.

A potência de usinagem é obtida pelo produto da força tangencial e da velocidade de corte. Tanto a força tangencial como a força normal diminuem com o aumento da velocidade de corte, a evolução da potência de usinagem depende do fato de o aumento da velocidade de corte poder compensar a diminuição da mesma. De uma forma geral, a potência de usinagem aumenta com o aumento da velocidade de corte. O aumento da potência de corte com o aumento da velocidade de corte leva a temperaturas mais elevadas.

3.3.2 Vibrações da máquina-ferramenta

A vibração pode causar baixa qualidade superficial e limita a capacidade de produção. As vibrações são classificadas em dois tipos: vibrações forçadas e vibração auto-excitada (regenerativa). Vibrações forçadas podem ser eliminadas ou minimizadas, eliminando ou isolando a origem da vibração. Vibrações auto-excitadas não podem ser eliminadas na maioria dos casos, exceto em operações de baixas taxas de remoção. Contudo pode ser possível impedir o crescimento da vibração para prolongar o tempo de retificação livre de vibração. Isto usualmente requer a redução das forças ou potências de retificação, que pode ser alcançado por uma dressagem áspera, baixa friabilidade (facilidade para fraturar o grão em

pedaços, sob uma determinada força ou impacto) do rebolo, ou melhor, lubrificação (Malkin, 1989).

3.3.3 Danos térmicos

As altas temperaturas geradas na zona de retificação podem causar vários tipos de danos térmicos à peça, como por exemplo, queima (no caso de aços), têmpera excessiva da camada superficial com possível reendurecimento e aumento da fragilidade, indesejáveis tensões residuais de tração, redução da resistência à fadiga, e trincas. Para atenuar a restrição de danos térmicos, é geralmente necessário reduzir a potência de retificação. Isto pode ser obtido utilizando um rebolo mais macio ou uma dressagem mais grosseira, ambas tem suas desvantagens. O fluido de corte também tem um importante efeito como lubrificante. Lubrificação direta com fluidos de retificação torna-se importante principalmente na retificação creep-feed. Algumas análises de transferência de calor indicam que o uso de uma velocidade de trabalho mais rápida, mantendo a mesma taxa de remoção deveria abaixar a temperatura e reduzir o dano térmico, mas isto nem sempre ocorre na prática (Malkin, 1989).

3.3.4 Desgaste do rebolo

O desgaste do rebolo de retificação pode ser classificado em três tipos: atrito, fratura do grão e fratura do ligante. Todos os tipos de desgaste ocorrem simultaneamente, em maior ou menor grau. O desgaste total pode ser expresso em termos da relação G , que é a taxa volumétrica de material removido em contraposição ao desgaste do rebolo. Para operações típicas de retificação de precisão com rebolos convencionais (óxido de alumínio ou carbetto de silício) o custo do rebolo é geralmente insignificante, e mais rebolo pode ser consumido pela dressagem do que pelo processo de retificação em si. Em tais casos o menor desgaste do rebolo, com a maior relação G pode não ser a melhor situação, pois pode exigir maiores forças e energias e isso conduz a temperaturas excessivas (Malkin, 1989).

Segundo Malkin (1989), restrições de desgaste do rebolo são frequentemente associadas à rugosidade e tolerâncias necessárias. Com taxas de remoção mais rápidas, a relação G tende a decrescer, levando a uma mais rápida deterioração na forma e no acabamento da superfície. Se maiores forças e altas temperaturas podem ser toleradas, estas restrições de produção podem ser relaxadas usando um rebolo de desgaste lento, que usualmente significa uma maior friabilidade. Um fluido de corte melhor deve aumentar a relação G , diminuindo as forças e temperatura.

O desgaste total do rebolo aumenta com o tempo de corte. Ele pode ser dividido em uma diminuição de raio e em desgaste de quina do rebolo. Se o desgaste radial não é compensado durante a retificação por um sistema de medição adequado, pode-se ter um erro de medida ou eventualmente surgir vibrações na superfície da peça.

Têm-se assim dois mecanismos de desgaste:

- Cegamento do grão isolado por desgaste abrasivo mecânico, adesão, corrosão, difusão, bem como micro e microfissuras, em decorrência de tensões térmicas;
- Quebra de grãos integrais ou grupos de grãos por uma sollicitação mecânica demasiada do ligante ou em decorrência da deterioração térmica ou química do ligante.

A interligação desses dois mecanismos de desgaste caracteriza o comportamento de desgaste do rebolo. Fala-se em um efeito de auto-afiação quando as arestas cegas, em virtude de uma maior ação da força, quebram no tempo certo para fora do ligante e permitem a ação de novos gumes.

3.3.5 Rugosidade

Processos de retificação são frequentemente selecionados devido à necessidade de satisfazer requerimentos de rugosidade e tolerâncias. A rugosidade é gerada pela interação da topografia da superfície do rebolo com a peça sob movimentos cinemáticos impostos pela máquina. O acabamento obtido depende, de uma maneira complexa, da rugosidade do rebolo (dressagem), parâmetros de retificação e interações tribológicas entre a peça e pontos de corte do abrasivo (Xiao & Malkin, 1996).

Segundo Carpinetti apud Fusse (2005) a rugosidade superficial caracteriza-se pelas micro-irregularidades geométricas da superfície do material usinado. A rugosidade consiste basicamente de marcas regulares oriundas do perfil da ferramenta combinada a outras irregularidades, podendo ser variáveis conforme o material e o tipo de ferramenta utilizada. As micro-irregularidades são em geral sobrepostas a outras irregularidades geométricas, com ordem de grandeza crescentes.

Segundo Malkin (1989) quando existe restrição de acabamento superficial, a taxa de remoção pode ser aumentada mantendo a mesma, ou mesmo melhor acabamento dressando o rebolo mais finamente. Dressagem mais fina pode causar maiores forças, então relaxando a restrição da rugosidade. Isto só é praticável se as restrições de potência de retificação e danos térmicos não são violadas. Superfícies mais lisas podem também ser obtidas usando rebolos

de grãos mais finos, contudo este pode também conduzir a maiores forças ou maiores taxas de desgaste do rebolo.

O controle da rugosidade nos processos de usinagem é realizado pelo gerenciamento e otimização dos processos e condições de usinagem. O tipo de rebolo (CBN ou óxido de alumínio) pode também influenciar nos valores de rugosidade, pois rebolos de CBN apresentam um maior poder de corte ao longo do processo, resistindo mais ao desgaste abrasivo, se comparado ao rebolo convencional. Já para o rebolo convencional de óxido de alumínio tal comportamento se difere, pois os rebolos de óxido de alumínio não apresentam a característica de auto-afiação (no caso de elevada dureza utilizada na retificação de precisão), gerando, portanto grãos cegos com maior frequência e conseqüentemente elevando os valores da força tangencial de corte e temperatura, que facilitam o entupimento das porosidades do rebolo gerando maiores valores de rugosidade (Fusse, 2005).

Segundo Kwak & Song (2000), a operação de retificação tem sido usada como etapa final de um produto por causa da sua capacidade de cortes mínimos e por causa do êxito com exigências de rugosidade. Se um dano ocorre, um valor aceitável de rugosidade não poderá ser mantido. Danos na retificação são afetados por influência de diversos fatores que são principalmente classificados dentro das condições de usinagem, do rebolo, das condições de dressagem e do fluido de corte. A Figura 11-a descreve a porcentagem de influência dos fatores sobre a queima. A Figura 11-b mostra a porcentagem de influência dos fatores sobre vibrações do rebolo. É observado que as condições de usinagem afeta mais as condições de queima do que de outros danos. Além disso, uma escolha correta das condições de usinagem é muito importante para evitar os danos. A Figura 12 é um bom exemplo para mostrar quanto um dano deteriora a rugosidade da superfície. De acordo com o número de peças usinadas, os valores da rugosidade são ligeiramente aumentados sob condições normais de usinagem, mas aumenta rapidamente quando um dano ocorre. Assim, segundo o autor, um produto é manufaturado satisfatoriamente se os danos, como queima e vibrações, são diagnosticados o mais cedo possível.

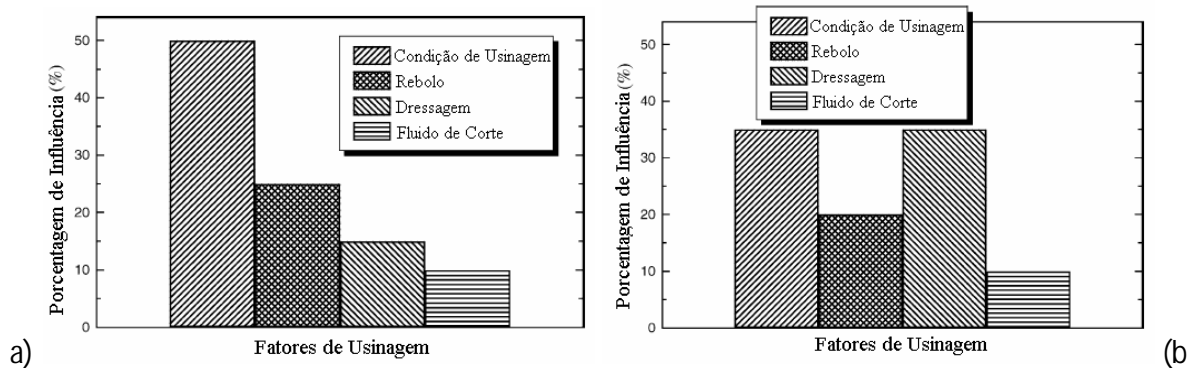


Figura 11 - Porcentagem de influência dos fatores:
 a) Queima b) Vibrações (Adaptado de Kwak & Song, 2000)

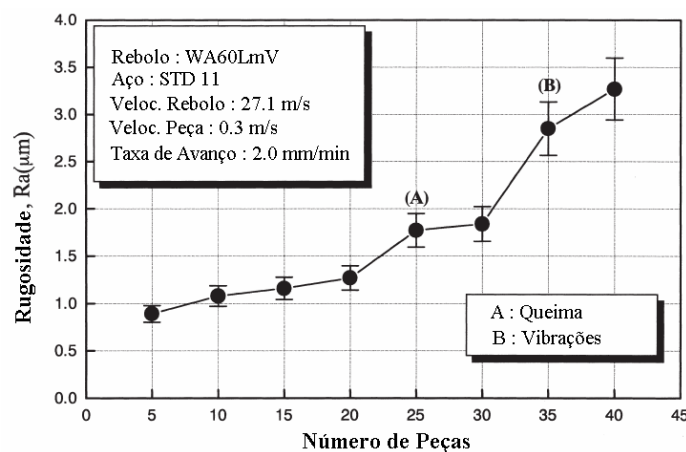


Figura 12 - Relação entre a rugosidade e o número de peças usinadas
 (Adaptado de Kwak & Song, 2000)

3.3.6 Tolerâncias

Tolerâncias dimensionais são de interesse principalmente com comprimentos medidos de uma superfície acabada para outra. Enquanto que a rugosidade de uma superfície acabada é a medida de uma incerteza na especificação exata de sua localização, há freqüentemente uma relação direta entre a tolerância e a rugosidade combinadas nos pontos de medidas. Entretanto, é geralmente necessário exigir acabamentos mais finos para manter melhores tolerâncias. O requerimento da rugosidade é freqüentemente uma consequência do requerimento de tolerâncias, e ambos os fatores podem ser similarmente afetados pelas condições de retificação. Outros fatores que afetam tolerâncias dimensionais incluem deflexões da máquina, expansão e distorção térmica da máquina e da peça, desgaste do rebolo e vibrações. Muitos dos fatores que afetam as tolerâncias dimensionais também afetam tolerâncias de forma. Contudo os erros de forma mais significantes são usualmente associados com desgaste excessivo do rebolo, especialmente quando se retifica formas em seções

transversais com canais ou quinas. Melhores formas de fixação geralmente necessitam desgastes mais lentos de rebolos, que geralmente significam maiores forças (Malkin, 1989).

3.4 INTEGRIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA DE TRABALHO

3.4.1 Tipos de danos térmicos nas peças de trabalho

No início da queima, existe uma tendência de adesão de partículas de metais nos grãos abrasivos do rebolo, causando o aumento da força de corte, a deterioração da superfície da peça e o aumento da taxa de desgaste do rebolo (Malkin & Cook, 1971). Uma descontinuidade na força versus a relação área de desgaste plana também ocorre, conforme Figura 13, a qual indica uma mudança abrupta no mecanismo de usinagem, possivelmente relacionado com uma transformação metalúrgica (Malkin, 1989).

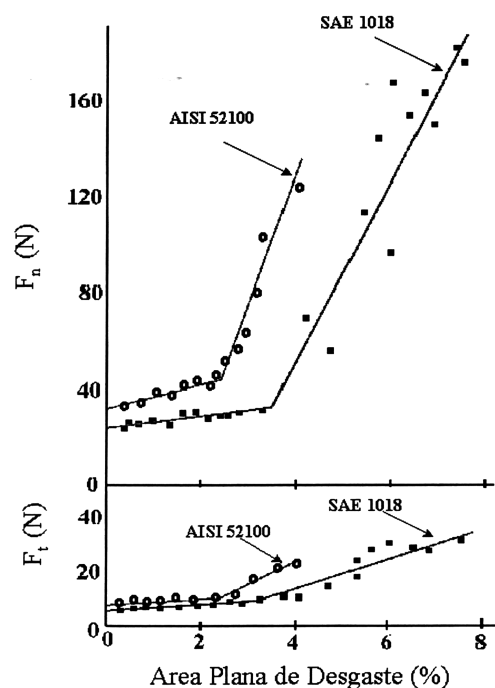


Figura 13 - Componente de Força Normal e Tangencial versus Área de Contato entre o Desgaste Plano de um Grão Abrasivo e a Peça (Malkin, 1989)

As mudanças que ocorrem durante a retificação também devem ser levadas em conta. Por exemplo, a superfície de uma peça brandamente retificada (e, portanto, a baixas temperaturas) irá apresentar um estado de tensão residual compressiva. Isso é causado por uma deformação plástica na superfície da peça pelos grãos abrasivos. Isto pode realçar as propriedades mecânicas da peça, com uma notável melhora na resistência à fadiga. Todavia com o aumento das taxas de remoção a temperatura do arco de corte tende a subir. Isto pode causar peças com perda de resistência, tensões de tração ou eventuais fissuras.

Segundo Malkin (1989) e Badger & Torrence (2000) são encontrados os seguintes danos térmicos:

3.4.1.1 Queima de oxidação

Causada por uma fina camada superficial de metal e fluido de corte oxidados, causa descoloração na peça. Esta descoloração é normalmente superficial e ocorre normalmente sem as peças sofrerem algum dano metalúrgico. A queima de oxidação pode ser vista sobre uma superfície retificada e/ou próximo à região de retificação onde as temperaturas são altas devido a condução. A queima de oxidação é um mau indicador da ocorrência do dano térmico pela sua imprevisibilidade.

3.4.1.2 Amolecimento térmico.

Os aços são freqüentemente retificados no estado temperado. O amolecimento térmico ocorre quando a temperatura de retificação ultrapassa a temperatura de revenimento do aço. O sobre-revenimento causa amolecimento da superfície da peça.

Segundo Malkin (1989) o revenimento da superfície de aços endurecidos ocorre freqüentemente durante a retificação em condições típicas de produção, mas seus efeitos podem ser minimizados. A profundidade da camada revenida pode ser reduzida principalmente pelo uso de maiores velocidades da peça, o que resulta numa menor penetração do calor e em menores tempos de aquecimento. Têm-se como exemplo as curvas de microdureza da Figura 14, as quais foram obtidas na retificação plana tangencial, com uma velocidade da peça relativamente baixa ($V_w = 6,1$ m/min), isso causou uma camada termicamente afetada relativamente profunda. Camadas revenidas similares, mas mais rasas são obtidas com velocidades da peça maiores, como as que são tipicamente utilizadas na retificação cilíndrica.

Ainda segundo Malkin (1989) algumas ou mesmo todas as camadas revenidas produzidas durante a retificação em desbaste com altas taxas de remoção do cavaco, podem

ser removidas por uma operação posterior de retificação em acabamento, com “spark out” no fim do ciclo de retificação.

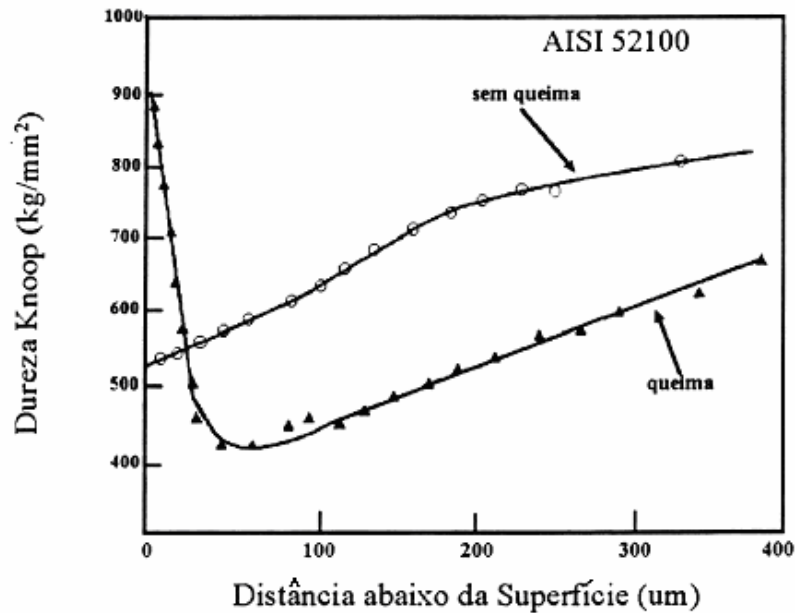


Figura 14 – Microdureza versus Profundidade abaixo da Superfície com e sem Queima para um aço de rolamento (Malkin, 1989)

3.4.1.3 Queima de reendurecimento

Um exemplo deste comportamento em um aço para rolamento temperado é mostrado pela curva “com queima” da Figura 14. Segundo Malkin (1989), a queima da peça, observada para aços de rolamentos, traz um aspecto adverso quanto ao limite de resistência à fadiga e conseqüente diminuição do número de ciclos destes aços após a retificação. Este comportamento é atribuído a formação de martensita não-revenida, gerada no processo de queima, em função do aquecimento à temperatura de austenitização e resfriamento rápido sem posterior alívio de tensões (revenimento).

Para acentuar mais o problema, a queima de reendurecimento é também acompanhada por uma tensão residual secundária, por que o novo material formado tem uma densidade maior que o material original (Badger & Torrence, 2000).

3.4.1.4 Tensão residual de tração.

É causada pela expansão térmica da peça além de sua tensão limite elástica, o que coloca o material próximo à superfície sobre uma constante tensão. Esta tensão degrada a

resistência à fadiga do material, e em casos extremos causa imediata fraturação. A profundidade e severidade da fissura dependem da temperatura de retificação e do material.

O desenvolvimento da tensão residual de tração é complicado e influenciado por muitas variáveis. Durante a retificação, muito calor é gerado e este penetra na peça. Como as temperaturas sobem, a superfície quente da peça sendo retificada quer expandir para cima e para o redor. A expansão térmica para cima não é restringida. Todavia, o material ao redor restringe a expansão em sua direção. Quando a superfície quente tenta expandir para o seu redor é restringida ela está efetivamente em um estado de compressão. Se a temperatura é alta o suficiente, a tensão compressiva irá exceder a tensão limite elástica do material e o mesmo irá permanecer deformado (Badger & Torrence, 2000).

Quando o material esfria após a retificação, ele tende a encolher para um tamanho menor que o original (devido a deformação compressiva permanente). Mas a continuidade do material restringe esse encolhimento (ele está sendo puxado pelo material circundante), o que resulta em uma superfície de material sob tração. A tensão residual trativa pode diminuir a resistência à fadiga da peça durante sua vida prevista e, se severa o suficiente pode causar fratura imediata. Se a fraturação ou fissuração não estão presentes, tensões residuais podem ser aliviadas por um tratamento térmico pós-retificação. Tensões residuais não podem ser vistas a olho nu, mas a detecção é possível com difração de raios X, método de Barkhausen ou banho de ácido (Badger & Torrence, 2000).

Kruszynski & Wojeik (2001) estudou a relação entre a tensão residual máxima (B) e as variáveis potência de acionamento do rebolo, largura de contato e velocidade da peça. De posse destas variáveis foi calculado um parâmetro definido como:

$$B = \frac{P}{b_d \times v_w} \quad (26)$$

onde:

P é a potência total de retificação.

b_d é a largura de retificação.

V_w é a velocidade da peça.

No trabalho de Kruszynski & Wojeik (2001) encontrou-se uma relação linear deste parâmetro com a tensão residual máxima, de forma que o monitoramento destas variáveis pode ser útil no seu controle. Da mesma forma o pesquisador cita a possibilidade da predição de trincas, mudanças de microestrutura e da queima com este parâmetro.

Durante a retificação, três interações primárias ocorrem entre o rebolo e a peça: deslizamento e atrito ("*sliding*" ou "*rubbing*"), deformação plástica sem remoção de material ("*plowing*") e o corte do material propriamente dito ("*chip formation*"). A Figura 15 ilustra essas interações.

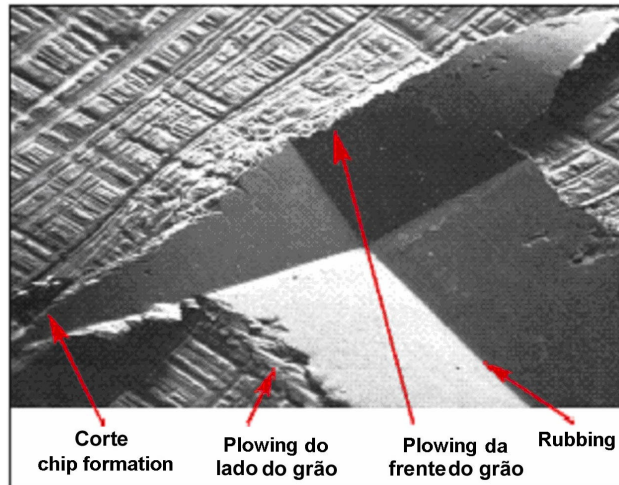


Figura 15 - Interações entre rebolo e peça (Badger & Torrence, 2000)

Todos os três geram calor e ocorrem em grau variável durante a operação. Um rebolo afiado corta mais material enquanto um rebolo cego tende a deformar e deslizar mais. O cegamento do rebolo é consequência do atrito desgastando a ponta dos grãos. Retificando nessa condição o excessivo deslizamento e deformação gera mais calor e aumenta a probabilidade de dano térmico.

O aço é composto por dois constituintes principais: a matriz e os carbeto (tungstênio, molibdênio e vanádio). Todos combinam com o carbono para formar carbeto duros dentro da matriz. Segundo Badger & Torrence (2000) estes grandes carbeto refratários tendem a cegar os grãos, o que resulta em excessivo deslizamento, menor eficácia da operação, maior consumo de potência, maiores temperaturas, desgaste excessivo e perda de forma do rebolo. O carbeto de tungstênio, de molibdênio e particularmente o de vanádio têm valores de dureza próximos aos dos abrasivos convencionais. Tipicamente, uma maior quantidade de elementos de liga e uma maior porcentagem de carbeto duros (geralmente a quantidade relativa de vanádio, tungstênio, molibdênio e carbono dentro de um material) determina a taxa na qual o rebolo de retificação se torna cego.

3.4.2 Frentes de Pesquisas sobre Queima na Retificação

Existem dois tipos diferentes de frentes de estudos que visam minimizar ou eliminar o dano térmico e, portanto, melhorar a produtividade. O primeiro, que é o mais convencional, acredita que o fluido de corte aplicado ao processo tem pouco ou nenhum efeito no dano térmico na retificação convencional. Pesquisadores deste grupo, tais como Malkin (1989) afirmam que uma quantidade significativa de potência entra na peça como calor, independente se a peça está ou não sendo refrigerada, e eles usam o critério de reendurecimento para definir queima em aços. Nessa frente, pesquisadores se empenham em encontrar uma relação entre os parâmetros do processo de retificação (Velocidade do rebolo, Velocidade da Peça, Profundidade de Corte, Energia e Taxa de Remoção) e os campos térmicos na peça. O conhecimento dos campos térmicos permite a estimação de danos térmicos, tais como a transformação de fase e trinca.

Existe outra frente de pesquisas que defende o fenômeno do “film-boiling” como causa do aumento da temperatura na zona de usinagem. Shafto (1975) postulou que o aumento rápido na temperatura é característica de um fenômeno conhecido como ‘burn-out’, o qual ocorre em tubos de ebulição. Para uma temperatura crítica, referente à temperatura de ‘burn-out’, existe um colapso no mecanismo de transferência de calor, o qual resulta num rápido crescimento da temperatura. Quando a temperatura atinge valores por volta de 100 °C, a água entra em ebulição causando bolhas na superfície do aquecedor. Um aumento além da temperatura de ebulição faz com que todas as bolhas se juntem, formando uma camada de vapor sobre a superfície conhecida como “Film-boiling”. A transferência de calor através deste filme é muito mais difícil, causando assim um aumento repentino da temperatura. Yasui & Tsukuda (1983) mediram a temperatura na superfície da peça utilizando-se como fluidos de corte: óleo, água e também a seco. Ele verificou que a uma temperatura acima do ponto de ebulição de cada fluido, a superfície da peça atingia rapidamente a temperatura correspondente àquela verificada para a retificação à seco. Em outras palavras, os fluidos deixavam de ser efetivos. Num estudo posterior, Salmon (1988) observou experimentalmente a formação de um filme de vapor na superfície da peça, imediatamente abaixo da zona de contato.

Modelos baseados na abordagem anterior limitam a aplicação de controle no processo de retificação, porque o critério da queima do modelo depende somente da temperatura a qual é difícil de ser medida no processo. A predição do campo térmico pode também não ser perfeita porque o modelo requer um parâmetro empírico do processo, isto é, a parte da

potência gerada no processo responsável pelo calor que entra na peça, o qual é difícil de determinar. Além disso, esses modelos não consideram o dano na forma de tensão residual, o qual pode ocorrer mesmo abaixo da temperatura crítica de austenitização.

No trabalho de Lyau (2000) foi desenvolvido um modelo térmico para o processo de retificação que considerava o efeito térmico da interface grão-peça e o plano de cisalhamento entre a peça e o cavaco. Obtendo-se todos os parâmetros necessários para o referido modelo a partir de resultados experimentais, foi possível a predição da temperatura na zona de corte. Nesse trabalho, o referido pesquisador mostrou que a vazão de fluido de corte sob condições gerais de usinagem é suficiente para cobrir a camada limite térmico do fluido de corte na zona de corte. Alguns resultados experimentais obtidos para condições gerais de usinagem foram comparados com as temperaturas calculadas pelo modelo. Os resultados obtidos não foram satisfatórios apenas para a retificação Creep-Feed com fluido de corte a base de água. As diferenças entre os resultados teóricos e experimentais são atribuídas a propriedades térmicas constantes e desconsideração da condução térmica transversal no modelo.

Pesquisa semelhante foi realizada por Saravanapriyan et al. (2001) com um sistema multisensores, incluindo monitoramento de potência, vibração, emissão acústica e temperatura. No método estudado uma rede neural foi treinada de forma a predizer a temperatura da zona de usinagem para um dado número de ciclos.

3.4.3 Monitoramento de Danos Térmicos do Processo de Retificação

A dificuldade fundamental em controlar os danos causados no processo de retificação é a falta de um método confiável em fornecer realimentação em tempo real durante o processo. Webster (Webster et al., 1994) tem mostrado que a medida do sinal de emissão acústica é significativamente mais sensível às variações das condições de retificação do que medidas de força e potência e fornece uma técnica mais promissora para o monitoramento 'on-line' do processo em tempo real. A emissão acústica (EA) pode ser definida como sendo ondas de tensão elástica gerada como um resultado da liberação rápida de energia de deformação dentro de um material submetido a um estímulo externo, devido ao rearranjo de sua estrutura. Estas ondas de tensão produzem deslocamentos na superfície do material o que pode ser detectado por um sensor piezelétrico que transforma estes deslocamentos em sinais elétricos (Diniz et al, 1991).

Sua faixa de frequência gira em torno de 50 kHz a 1000kHz, que está acima da faixa de muitos ruídos vindo de fontes exteriores ao próprio processo de retificação. Sendo assim, é

um método sensível e adequado para monitorar o processo de retificação (Dornfeld, 1992; Kluff, 1994).

As origens da emissão acústica no processo são decorrentes principalmente da fratura do grão e do ligante, fissura do grão e fricção entre o grão abrasivo e a peça, todos diretamente ligados ao processo de formação de cavaco e desgaste do rebolo. Com o sinal de emissão acústica é possível determinar o fim do spark-out, que é muito importante para diminuir o ciclo de retificação (Oliveira, 1998). Spark-out é o pós-centelhamento na retificação após a retirada do material pelo rebolo devido à relaxação das tensões remanescentes da retificação do material.

Nos últimos anos, artigos técnicos da Alemanha, Japão e EUA têm mostrado pesquisas que tentam relacionar sinais de emissão acústica a aspectos relativamente complicados do processo de retificação, incluindo a detecção de quebra (Chang & Dornfeld 1993), queima e trincas (Koenig & Klumpen 1993), e a transição do modo dúctil/frágil (Bifano & YI, 1992). Estudos têm sido realizados também no monitoramento do desgaste da ferramenta (Waschkies et al. 1994) e na detecção de trincas devido à fadiga (Berkovits & Fang 1995).

O parâmetro predominantemente estudado em pesquisas prévias usando emissão acústica tem sido o valor da raiz média quadrática (RMS) do sinal de EA filtrado (EA_{rms}) sobre uma banda de frequência cuidadosamente selecionada. Este sinal tem sido um parâmetro razoável de estudo, pois o processo de retificação é muito rico em ondas sonoras, contendo, portanto, muita informação acústica disponível, sendo por isso utilizado como foco de pesquisas anteriores e atuais e também por limitações tecnológicas.

Shi et al. (1996) estudou a aplicação de uma rede neural na identificação on-line da queima e do desgaste do rebolo na retificação. Os diferenciais de seu estudo estão na possibilidade de identificação da queima e desgaste para qualquer peça e rebolo e na utilização de aprendizado não supervisionado no treinamento da rede. Seus resultados experimentais mostraram que as redes neurais são métodos apropriados com alta acuracidade de identificação

Aguiar (1997) tem demonstrado que o sinal RMS de emissão acústica e o sinal de potência de corte combinados podem fornecer parâmetros expressivos para a indicação da queima da peça na retificação plana. O referido pesquisador tem usado uma configuração onde se utilizou um sensor fixo de EA acoplado próximo da peça obra e um sensor de potência elétrica do motor de acionamento do rebolo para as medidas da força de corte. Da combinação entre os sinais, obteve um parâmetro indicativo para a queima da peça, denominado DPO, o qual consistia da relação entre o desvio padrão do sinal RMS de emissão

acústica e a potência média de corte por passada do rebolo. Embora para a maioria dos ensaios realizados, o parâmetro denominado DPO tenha se mostrado um indicador da queima, para alguns casos não se comportou da mesma maneira.

O sinal bruto de emissão acústica também tem sido explorado recentemente no monitoramento do processo de retificação. Artigos técnicos (Jemielniak 1997 e Wang et al. 2001) mostram que a utilização de ferramentas de processamento de sinais e redes neurais são eficientes no monitoramento da retificação.

Segundo Bianchi et al. (1996), os métodos industriais usuais para testar a superfície da peça usinada são os testes visuais e os de inspeção de fraturas. Com estes métodos, é impossível uma avaliação quantitativa da superfície e da região subsuperficial. Técnicas laboratoriais de medidas de alta resolução, como difração de raios X, testes de dureza com identificadores e inspeção metalográfica, consomem muito tempo e não são realizados em tempo real. Em muitos casos, a peça ainda tem que ser destruída para se obter informações sobre o estado da subsuperfície. Sendo assim, esforços para medição rápida de integridade superficial ganharão maior importância devido às maiores exigências sobre o comportamento funcional de peças retificadas.

3.5 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Segundo Inasaki (1999), existem três importantes objetivos no monitoramento do processo de retificação: detectar problemas que ocorrem durante o processo, fornecer informações para otimizar o processo e contribuir com o estabelecimento de um banco de dados.

3.5.1 Sensores

São necessários múltiplos sensores para o monitoramento e controle do processo de retificação, tomando como exemplo a determinação da vida do rebolo (Inasaki, 1999).

Os sensores são dispositivos que mudam seu comportamento sob a ação de uma grandeza física, podendo fornecer diretamente ou indiretamente um sinal que indica esta grandeza. Quando operam diretamente, convertendo uma forma de energia neutra, são chamados transdutores. Os sensores de operação indireta alteram suas propriedades, como a

resistência, a capacitância ou a indutância, sob ação de uma grandeza, de forma mais ou menos proporcional.

O sinal de um sensor pode ser usado para detectar e corrigir desvios em sistemas de controle, e nos instrumentos de medição, que freqüentemente estão associados aos sistemas de controle de malha aberta (não automáticos), orientando o usuário.

As principais características de um sensor são (Doebelin, 1990; Miner & Comer, 1992):

- **Linearidade:** É o grau de proporcionalidade entre o sinal gerado e a grandeza física. Quanto maior, mais fiel é a resposta do sensor ao estímulo. Os sensores mais usados são os mais lineares, conferindo mais precisão ao sistema de controle. Os sensores não lineares são usados em faixas limitadas, em que os desvios são aceitáveis, ou com adaptadores especiais, que corrigem o sinal.
- **Faixa de atuação:** É o intervalo de valores da grandeza em que pode ser usado o sensor, sem destruição ou imprecisão. Existem variados tipos de sensores, cada qual com sua aplicação específica. Os principais e mais empregados em processos de monitoramento da retificação são definidos a seguir.

Sensores de Temperatura

O controle de temperatura é necessário em processos industriais ou comerciais, como a refrigeração de alimentos e compostos químicos, fornos de fusão, produção de metais e ligas, destilação fracionada (produção de bebidas e derivados de petróleo), usinas nucleares e aquecedores e refrigeradores domésticos (fornos elétricos e microondas, freezers e geladeiras). Na retificação, estes sensores são importantes na medição da temperatura da superfície usinada.

Os principais e mais utilizados sensores de temperaturas são os chamados termopares ou pares termoelétricos. Existem materiais que quando encostados e submetidos a uma temperatura, produzem nos extremos deles uma tensão proporcional à temperatura. Este fenômeno é denominado efeito "Seebeck". A equação seguinte representa a proporcionalidade entre tensão e temperatura (Doebelin, 1990; Dally et al., 1993).

$$V = K.T \quad (20)$$

Onde K é uma constante para cada par de metais, que é utilizável até seu limite térmico. A Tabela 2 mostra os valores de temperatura máxima e da constante de proporcionalidade K para dois pares termoeletricos.

Tabela 2 – Valores de temperatura máxima e da constante K para dois pares termoeletricos

Metal	Temperatura Máxima	Constante K
Cobre-constantán	375°C	0.1mV/°C
Ferro-constantán	750°C	0.0514mV/°C

Outro dispositivo de medição de temperatura muito utilizado é o termômetro infravermelho do tipo usado nesta pesquisa. Os termômetros infravermelhos podem medir a temperatura de objetos sem tocá-los, remotamente. Existem muitos casos em que a medição de temperatura sem contato é crítica: quando o objeto a ser medido é pequeno, em movimento ou inacessível; para processos dinâmicos que necessitam de uma resposta rápida; ou para temperaturas $>1000^{\circ}\text{C}$ (1832°F). Termômetros infravermelhos são usados para produção de vidro, fabricação de filmes finos de plástico, fabricação de telas LCD, entre outras aplicações. A maioria dos termômetros mais conhecidos (tal como de vidro com mercúrio ou álcool ou um termopar) devem ser postos em contato direto com o objeto ou ambiente a ser medido, a fonte da temperatura, e medir temperaturas de -100°C à 1500°C . Em contraste, termômetros infravermelhos determinam a temperatura da superfície de um objeto pela intercepção e medição da radiação infravermelha emitida. O alcance típico de um desses termômetros é de -50°C à 3000°C de um local remoto. A distância de trabalho pode variar de milímetros à vários quilômetros em aplicações aéreas.

A tecnologia subjacente para pirômetros de radiação infravermelha é baseada no princípio que todos os objetos emitem radiação com ondas na região infravermelha do espectro de radiação eletromagnético. O infravermelho é uma porção do espectro eletromagnético invisível ao olho humano com frequência abaixo do vermelho, emitido proporcionalmente pela temperatura dos objetos. Termômetros infravermelhos medem esta radiação e produzem sinais de saída calibrados em diversas escalas (K , $^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{F}$).

Sensores de Luz

Além de seu uso em fotometria (incluindo analisadores de radiações e químicos), é a parte de sistemas de controle de luminosidade, como os relés fotoeletricos de iluminação pública e sensores indireto de outras grandezas, como velocidade e posição (fim de curso).

São utilizados na retificação para determinar existência de contato ou afiação do rebolo devido a faiscamentos.

O LDR (light dependent resistor) é um sensor de luz que tem sua resistência diminuída ao ser iluminado. É composto de um material semicondutor, o sulfeto de cádmio, CdS. A energia luminosa desloca elétrons da camada de valência para a de condução (mais longe do núcleo), aumentando o número destes, diminuindo a resistência. Portanto, a resistência é alta no escuro e baixa na presença de luz. (Dally et al., 1993)

Os usos mais comuns do LDR são em relés fotoelétricos, fotômetros e alarmes. Sua desvantagem está na lentidão de resposta, que limita sua operação.

Os sensores de luz denominados foto diodos possuem um diodo semicondutor em que a junção está exposta à luz. A energia luminosa desloca elétrons para a banda de condução, reduzindo a barreira de potencial pelo aumento do número de elétrons, que podem circular se aplicada polarização reversa.

A corrente nos fotodiodos é da ordem de dezenas de miliampères com alta luminosidade, e a resposta é rápida. Há fotodiodos para todas as faixas de comprimentos de onda, do infravermelho ao ultravioleta, dependendo do material.

O fotodiodo é usado como sensor em controle remoto, em sistemas de fibra óptica, leitoras de código de barras, scanner (digitalizador de imagens, para computador), canetas ópticas (que permitem escrever na tela do computador), leitores de CDs (Compact Disc), fotômetros e como sensor indireto de posição e velocidade.

As células foto-voltáicas são outros tipos de sensores de luz que convertem energia luminosa em elétrica.

O diodo iluminado intensamente na junção pode reverter a barreira de potencial em fonte de elétrons, produzindo energia. A eficiência do processo é baixa devido a pouca transparência da junção (somente as camadas superficiais são iluminadas). Seu uso principal está nos painéis solares.

Outro dispositivo é a foto-célula de selênio (um semicondutor), de operação similar. Usa-se em medidores de luminosidade e aparelhos de análise química (como fotocolorímetros).

Sensores de Velocidade

Empregam-se nos controles e medidores de velocidade de motores dentro de máquinas industriais, eletrodomésticos como videocassete e leitores de CDs, unidades de disquetes e de

discos rígidos de computadores, na geração de eletricidade, entre outros. Na retificação são utilizados para detectar vibrações e cinemática dos sistemas móveis da máquina.

O tacogerador é um pequeno gerador elétrico de corrente contínua, com campo fornecido por imã. A tensão gerada, pela Lei de Faraday é proporcional à velocidade com que o fluxo magnético é cortado pelo enrolamento do rotor. Assim, o Tacogerador é um transdutor mecânico elétrico linear cuja equação característica é:

$$V = K n \quad (21)$$

Onde K é uma constante que depende do campo do imã, do número de espiras e pólos e das dimensões do rotor; n é a rotação do eixo por minuto [rpm], ou segundo [rps]. A polaridade da tensão gerada depende do sentido de rotação (Khazan, 1994).

O sensor de velocidade conhecido como interruptor de lâminas ou reed-switch, compõe-se de duas lâminas de ferro próximas, dentro de um pequeno envoltório de vidro. Ao se aproximar um imã ou solenóide as duas lâminas se encostam, fechando os contatos externos.

Instalando-se um imã na periferia de uma roda, que gira poucos mm em frente ao interruptor de lâminas, este fechará os contatos a cada volta. Se este for ligado a uma tensão contínua, gerará pulsações numa frequência proporcional à rotação da roda.

Além de seu uso como sensor de velocidade, é encontrado em alarmes, indicando porta ou janela fechada (um imã é instalado nesta, e o reeds-witch no batente), e em sensores de fim-de-curso, em máquinas industriais, leitores de CDs e videocassete, etc.

Sensores de Posição

Em aplicações em que se necessita monitorar a posição de uma peça, como tornos automáticos industriais, ou contagem de produtos, ou verificar a posição de um braço de um robô ou o alinhamento de uma antena parabólica com outra ou um satélite, usam-se sensores de posição.

Os sensores se dividem em posição linear ou angular. Também se dividem entre sensores de passagem, que indicam que foi atingida uma posição no movimento, os detectores de fim-de-curso e contadores, e sensores de posição que indicam a posição atual de uma peça, usados em medição e posicionamento.

Os chamados sensores de fim de curso são interruptores que são acionados pela própria peça monitorada. Há diversos tipos e tamanhos, conforme a aplicação. (Dally et al., 1993; Khazan, 1994)

Como exemplo, existem as gavetas de leitores de disco à laser e videocassetes onde há chaves fim-de-curso que indicam que a gaveta está fechada, ou que haja disco. Estas informações são necessárias ao microcontrolador, para o acionamento dos motores. Também se usam com motores, na limitação do movimento, como no caso de um plotter ou impressora, ou abertura / fechamento de um registro.

O sensor *reed-switch* é composto de duas lâminas que entram em contato com a presença de um campo magnético próximo, como um ímã ou um eletroímã.

Os dois últimos também se usam como sensores de posição angular. Uma aplicação interessante é o motor de corrente contínua sem escovas ("brushless"), onde a comutação é eletrônica, feita quando o rotor, com ímãs, passa por um sensor Hall, que envia um sinal a um respectivo circuito, invertendo os pólos do motor. É usado em videocassetes, leitores de CDs e unidades de disco de computadores, pela grande precisão e facilidade de controle da velocidade.

Outro importante tipo de sensores de posição são os sensores ópticos. Há duas formas básicas de usar estes: por reflexão, onde detectam a posição pela luz que retorna a um fotosensor (fotodiodo ou fototransistor), emitida por um LED (diodo emissor de luz) ou lâmpada e refletida pela peça, e. por interrupção, no qual a luz emitida é captada por um fotosensor alinhado, que percebe a presença da peça quando esta intercepta o feixe.

Este sensor é usado para contagem de peças, numa linha de produção, além das aplicações como fim-de-curso.

Encoders

São sensores que atuam por transmissão de luz. Além dos já vistos, os encoders (codificadores) determinam a posição através de um disco ou trilho marcado. Em processos de retificação são muito utilizados para medir a velocidade do rebole.

Dividem-se em relativos, nos quais a posição é demarcada por contagem de pulsos transmitidos, acumulados ao longo do tempo, e absolutos, onde há um código digital gravado no disco ou trilho, lido por um conjunto de sensores ópticos (fonte de luz e sensor). Os códigos adotados são os de Gray, nos quais de um número para o seguinte só muda um bit, o que facilita a identificação e correção de erros.

A demarcação do disco ou trilho é feita através de furo ou ranhuras, ou por pintura num disco plástico transparente, que podem ser feitos através de técnicas fotolitográficas, permitindo grande precisão e dimensões micrométricas.

A fonte de luz é geralmente o LED, e o sensor um fotodiodo ou fototransistor. Estes sensores são muito precisos e práticos em sistemas digitais (encoder absoluto), e usam-se em robôs, máquinas-ferramenta, CNC e outros.

Sensores de Corrente de Efeito Hall

Em 1879, E. H. Hall descobriu o aparecimento de uma diferença de potencial entre os lados de um condutor através do qual passava uma corrente simultaneamente à aplicação de um campo magnético. Este fenómeno foi chamado de Efeito Hall em mérito ao descobridor. Uma das aplicações práticas deste fenómeno é o sensor de corrente que fornece uma tensão de saída proporcional à corrente que circula através do condutor, sendo que este passa através de um núcleo magnético semelhante neste aspecto aos transformadores de corrente. Este sensor é utilizado no processo de retificação para medir potência de corte.

Sensores Piezelétricos

Utilizado, por exemplo, para medir emissão acústica, força e aceleração. Possuem uma pastilha de cerâmica piezelétrica montada em uma cápsula metálica, sendo que alguns sensores deste tipo possuem blindagem de proteção. Os sensores piezelétricos se baseiam na propriedade de certos cristais que, quando excitados, geram um sinal de tensão elétrica. São largamente empregados no monitoramento de processos de retificação para medição de emissão acústica.

3.5.2 Aquisição de Dados e Processamento de Sinais

O sistema de aquisição de dados de um processo se baseia na coleta e condicionamento de sinais provenientes dos sensores. A implementação de sistemas de aquisição de dados é feita utilizando microcomputadores e placas de aquisição de dados.

No processo de retificação, os sinais provenientes dos sensores geralmente são analógicos. Para que se torne possível a manipulação e interpretação destes dados, é necessário que sejam convertidos na forma digital. Para fazer a conversão analógico/digital se faz necessário o uso de placas de conversão A/D. A placa trabalha com sinais de tensão e isto ocorre da seguinte forma: um sinal de tensão aplicado numa das entradas da placa de

aquisição é transformado em um número pela placa de conversão de acordo com a escala unipolar ou bipolar.

Segundo Johnson (1997), o processo de selecionar um canal da placa e iniciar a entrada de dados, necessita de uma interface entre o sistema de aquisição e o microcomputador. Esta interface é facilitada por um software criado pelo usuário com a definição da frequência de amostragem, número de pontos a serem adquiridos e arquivos onde serão armazenados os dados. Um dos softwares mais utilizados atualmente para aquisição de dados é o LABVIEW. Ele permite a comunicação, manipulação e armazenamento dos dados coletados através de rotinas compactas e facilmente implementáveis.

Além de serem coletados e convertidos em sinais digitais, os dados provenientes dos sensores devem ser condicionados ou tratados de forma que se obtenha um sinal tão fiel quanto possível, ou seja, sem ruídos indesejáveis causados por outros elementos do sistema, e também num nível de tensão elétrica compatível com os instrumentos de aquisição de dados (Aguiar, 1997).

Existem muitas ferramentas e formas de condicionamento e processamento de sinais, sendo que algumas das principais são descritas a seguir.

Amplificação

Promove um ganho do sinal através de amplificadores operacionais e transistores para que este fique compatível com o sistema de aquisição de dados.

Filtragem

Para eliminar ruídos provenientes da medição, é necessário a utilização de circuitos que bloqueiam certas frequências ou bandas de frequência. Estes circuitos são denominados filtros e são constituídos basicamente por resistores e capacitores (Johnson, 1997). A filtragem procura extrair a característica física do sinal mais relacionada com o fenômeno.

Retificação

Consiste em transformar o sinal alternado em um sinal contínuo ou pulsante, geralmente utilizando diodos retificadores para esse tratamento.

Valor RMS

É a raiz média quadrática de uma banda de frequência selecionada do sinal. Este tratamento de sinal é muito utilizado em sinais de emissão acústica.

Transformada Rápida de Fourier (FFT)

As amostras de sinais obtidas por um sistema de aquisição de dados constituem na representação do domínio do tempo. Esta representação fornece as amplitudes do sinal nos instantes de tempo em que cada sinal é captado. Entretanto, em muitos casos necessita-se conhecer o conteúdo da frequência do sinal ao invés das amplitudes de amostras individuais. A representação de um sinal em termos dos componentes de sua frequência individual é conhecida como representação no domínio da frequência. O domínio da frequência pode dar mais informações sobre o sinal e sobre o sistema em que ele é gerado. A Transformada Rápida de Fourier é expressa por:

$$X_k = \sum_{i=1}^k x_i \cdot e^{\frac{-2j\pi k i}{N}} \quad (22)$$

onde: x_i são os valores das amostras do sinal e N é o número total de amostras

Média e Desvio Padrão

Empregados para a determinação do valor médio e a dispersão do sinal, respectivamente. Deseja-se descrever muitas vezes a amplitude da distribuição, a simetria e a sua forma. Todas essas características são resumidas pelos momentos da distribuição, ou derivadas. (Spiegel, 2003)

Skew

É o terceiro momento da média e está relacionado com a assimetria de uma distribuição (Spiegel, 2003). Uma primeira distribuição pode apresentar uma distorção (skew) positiva. Isto significa que ela possui uma longa "cauda" na direção positiva. Do mesmo modo, uma distribuição pode apresentar uma distorção negativa, uma vez que sua "cauda" está na direção negativa. Esta estatística é calculada por:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^3}{N \cdot s_x^3} \quad (23)$$

onde: x_i é o elemento i da amostra

μ_x é a média da amostra; s_x é o desvio-padrão da amostra

Kurtosis

O quarto momento da média está relacionado com a forma da área da distribuição, que pode ser alongada ou achatada em relação a uma distribuição normal (Spiegel, 2003). Pode ser utilizado como indicador de variações no sinal de emissão acústica. A kurtosis é calculada por:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^4}{N \cdot S_x^4} - 3 \quad (24)$$

Estatística de Nuttall

Segundo Aguiar et al. (1999), uma ferramenta de processamento de sinais que vem sendo muito estudada é a chamada Estatística da Lei da Potência de Nuttall. A forma desta estatística é a seguinte:

$$T(x) = \frac{\sum |X_k|^5}{\left(\sum |X_k|^2\right)^{2.5}} \quad (25)$$

Onde cada elemento X_k representa o k-ésimo elemento da Transformada Rápida de Fourier.

Essencialmente, a Estatística de Nuttall mede o momento do domínio de frequências. De fato, se os expoentes forem 4 e 2, e não 5 e 2.5, observa-se que a estatística se torna uma Kurtosis. A Estatística de Nuttall é derivada da Kurtosis e pode realçar eventos transientes (de qualquer natureza) presentes no bloco de dados a serem processados. Na retificação, fenômenos físicos como film-boiling, quebra, e afiação natural dos grãos (mecanismo de desgaste natural), podem ser considerados eventos transientes de “explosão” de energia.

Após a aquisição de dados e do processamento dos sinais, deve-se determinar métodos de diagnósticos para o monitoramento do processo. Deve-se determinar uma condição de comportamento normal para o sinal e observar quando este comportamento se desvia do normal, indicando então um problema. A partir daí, um modelo é determinado entre a saída do sensor e a mecânica do processo utilizando as informações coletadas, para detectar algum problema e até mesmo prever o comportamento do processo.

Dois métodos promissores de monitoramento de processos industriais são Redes Neurais (Wang et al., 2001) e Lógica Fuzzy (Inasaki, 1999). Estes métodos utilizam multisensores para obter um modelo do comportamento do processo e analisam a relação entre as entradas e as saídas deste processo podendo, por exemplo, prever fenômenos ocorridos na retificação como queima, quebra, trincas e tensões residuais.

3.6 METODOLOGIAS DE MONITORAMENTO

Inicialmente as principais características do monitoramento do processo de retificação eram descritas apenas como a detecção de distúrbios severos no processo e o rápido desligamento da máquina, reduzindo os danos a um mínimo, protegendo o operador e a máquina. Atualmente os objetivos do monitoramento do processo vão além da proteção operador-máquina, onde se procura otimizar o próprio processo. O objetivo do monitoramento atualmente é sobre a máquina (diagnóstico e monitoramento do desempenho), ferramentas (estado do desgaste, lubrificação, alinhamento), a peça (geometria e dimensões, características da superfície e rugosidade, tolerâncias, danos metalúrgicos) ou sobre o próprio processo (formação de cavaco, temperatura, consumo de energia).

Existem diversos métodos de monitoramento que podem ser utilizados no processo de retificação. Dependendo do que se deseja monitorar, pode-se escolher qual o melhor método disponível ou qual o mais adequado às condições particulares de cada problema e de cada empresa.

Para determinar qual o método de monitoramento a ser utilizado deve-se primeiro fazer uma análise do problema a ser enfrentado. Depois de identificado o problema, é feita então a escolha dos meios e técnicas a serem utilizadas no monitoramento. O papel do sistema de monitoramento é o de fornecer ao controle o estado de problemas ou fenômenos relacionados ao ciclo de trabalho.

A filosofia de métodos de qualquer sistema de monitoramento, seja para diagnóstico ou para monitoramento de processo pode ser dividido em duas abordagens. A primeira usa a técnica do sensoreamento para a qual a saída tem alguma relação com as características do processo. Após a determinação da saída do transdutor e o comportamento para a condição normal de operação, deve-se observar então, o comportamento do sinal até que este se desvie do normal, indicando assim um problema. Em outra abordagem, deve-se determinar um

modelo entre a saída do transdutor e a mecânica do processo, e assim, com a informação proveniente do transdutor, prever o comportamento do processo. (Byrne, 1995).

O sinal que é obtido pelo transdutor deve ser processado para detecção de distúrbios do processo. Este processamento pode ser feito através de técnicas, sendo que as mais conhecidas são descritas a seguir.

- Janela de limite estático: O sinal deve permanecer acima ou abaixo de um limite estabelecido, ou em alguns casos deve ficar entre dois limites. Uma janela de tempo determinada previamente deve ser programada para ser inicializada, tal que a avaliação do sinal seja realizada. A Figura 16 mostra um exemplo deste tipo de janela de monitoramento para um sinal de Emissão Acústica (Byrne, 1995).

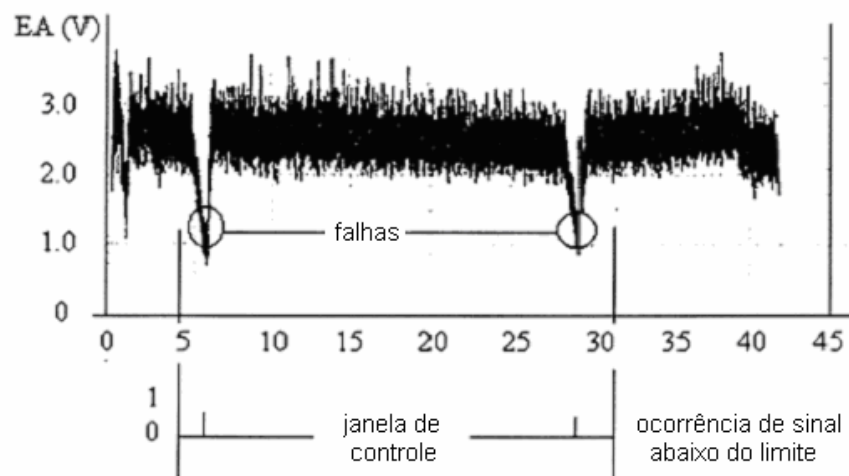


Figura 16 - Janela de controle com limite estático (Adaptado de Byrne, 1995)

- Janela com limite dinâmico: Neste tipo de janela, o sinal deve ficar dentro de uma faixa de tolerância pré-estabelecida. Esta variação pode ser obtida através de uma análise do desvio padrão do sinal em cada posição de tempo para uma condição normal de operação. Se algum distúrbio ocorre devido a uma falha no processo, o nível do sinal estará fora da faixa normal de trabalho, e um sinal de controle é estabelecido. Um exemplo de monitoramento utilizando a janela dinâmica é mostrado na Figura 17 (Felipe, 1996).

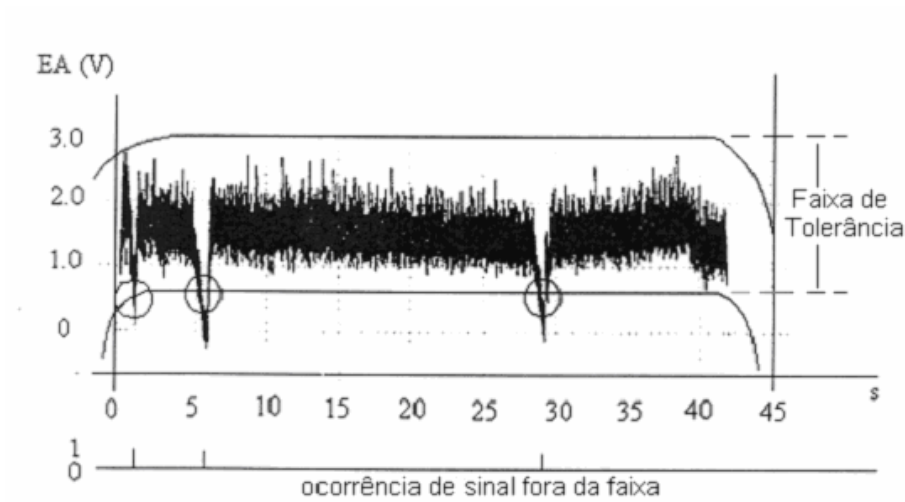


Figura 17 - Janela de Controle com Limite Dinâmico(Adaptado de Felipe, 1996).

Redes Neurais, Lógica Fuzzy e Reconhecimento de Padrões: Multisensores são utilizados para obter um modelo do comportamento do processo. Uma vez conhecidas as relações entre as saídas ou estados do processo e os valores das entradas, o modelo é estabelecido. Assim, um fenômeno a ser monitorado pode ser associado ao estado de um conjunto de variáveis. (Felipe, 1996).

Multijanelas (booleana): diversos sensores são utilizados, monitorando simultaneamente diferentes fenômenos. Uma tabela de decisões é elaborada com os dados do comportamento dos fenômenos, pois com as possíveis combinações entre os sinais de cada sensor pode-se determinar o que deve ser feito em cada situação. (Felipe, 1996).

Baseado nos estudos realizados neste capítulo sobre monitoramento do processo de retificação pode-se concluir que os métodos de monitoramento são vários, porém a maioria deles não funcionais (Byrne, 1995), sendo que o tipo de sensoriamento a ser escolhido para um dado processo depende das grandezas físicas que se deseja controlar.

4 MATERIAL E MÉTODO

Para obter os resultados contidos no presente trabalho foram necessárias algumas etapas para implementar cálculos num Microcontrolador, desenvolver o software, preparar e realizar ensaios na retificadora.

Neste capítulo serão vistos a montagem e os equipamentos que foram necessários para a realização dos ensaios na retificadora. A preparação das peças, do fluido, o ajuste do sensor de emissão acústica e correções de velocidade estão detalhados dentro do conteúdo.

Também é mostrado como foram feitas as medições de rugosidade e microdureza das peças após o ensaio na retificadora.

Consta um detalhamento completo sobre aquisições de sinais analógicos em microcontroladores e a aplicação dele sobre a utilização de um PIC18F452 em cálculos estatísticos com um circuito extremamente simples. O seu software é discutido na íntegra de como foi realizada a detecção do início e fim da retificação, calculando ao final do processo os valores de queima na retificação.

4.1 PREPARAÇÃO E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

4.1.1 Preparação dos Corpos de Prova

Para realizar os ensaios utilizou onze corpos de prova (vinte e uma faces) em forma de prisma de dimensões 152x45x12 mm, Aço ABNT 1020 – 3 faces na mesma profundidade de corte x 6 profundidades diferentes + 3 faces em degrau.

Essas peças tiveram que ser faceadas com o torno uma vez que para cortar essas peças foram feitas por maçarico, processo muito utilizado na preparação de materiais. O torno deve desbastar grande quantidade para que a face libere uma parte da camada que se alterou com a temperatura excessiva do maçarico. Uma outra opção seria a de fresar a superfície. As peças foram retiradas da mesma chapa pois isso garante que elas tenham a mesma procedência. Isso aproxima a dureza das peças por terem aproximadamente a mesma quantidade de carbono.

Em seguida, suas bordas foram limadas, retirando as rebarbas que ficaram nas peças. As peças foram tipografadas em cada uma de suas duas faces, lateralmente, indicando naquela face o sentido da usinagem e o valor da profundidade de corte a ser realizado, exemplificado

na Figura 18. As peças foram lubrificadas com óleo para evitar a oxidação destas superfícies trabalhadas.

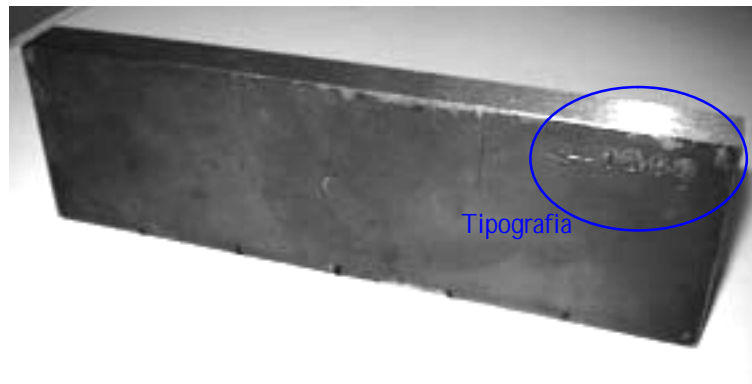


Figura 18 – Corpo de prova tipografado

Para retirar as marcas do *bit* do torno (ferramenta de desbaste), antes de realizar o ensaio, foi preciso passar o rebolo com uma profundidade de corte mínima algumas vezes até que a superfície não apresentasse mais essas irregularidades.

Três faces (duas peças) foram trabalhadas para obter uma superfície diferente das anteriores. Os **Degraus** foram feitos conforme a Figura 19, retirando de dois terços do comprimento da peça uma profundidade de 20•m e, dentro destes dois terços, um terço foi retirado mais 20•m, ficando assim com 40•m. Pretende-se com essas peças ter quase todas as profundidades de corte ao passar o rebolo com 10•m abaixo da superfície inferior, totalizando 50•m na superior.

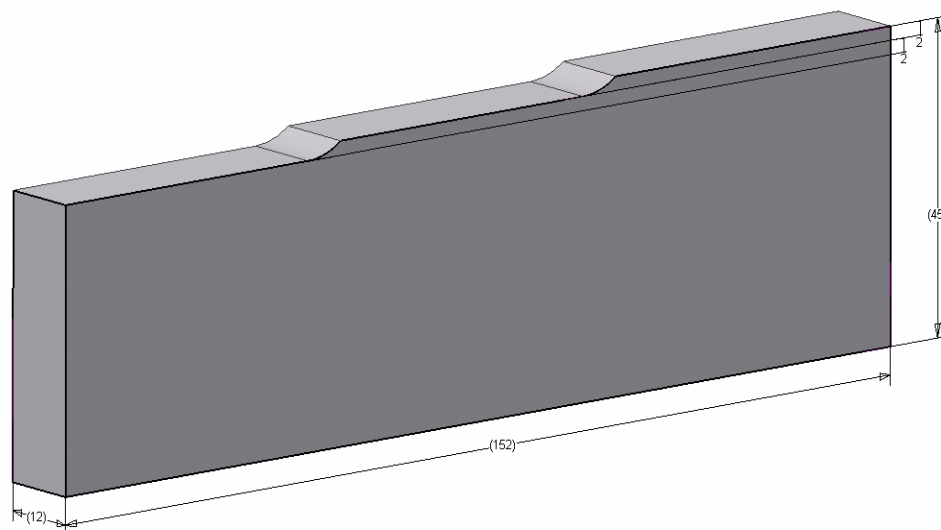


Figura 19 – Corpo de prova em degrau [mm]

4.1.2 Ajuste da Retificadora

Para ajustar a velocidade tangencial da retificadora em $V_w = 0,044\text{m/s}$ utilizou o tacômetro digital da Lutron, modelo DT-2235B, o qual mostra velocidade tangencial em metros por minuto. Esse valor foi adotado para gerar um tempo suficiente para a análise dos sinais: nem muito rápido com poucas amostras e variações do sinal, nem muito lento para que não estourasse o buffer da placa de aquisição. Inclusive esse valor garante uma relação de queima durante os ensaios, pois varia diretamente o h_{eq} (Equação 2).

O tacômetro possui uma pequena polia esférica emborrachada que encaixa em sua ponta para garantir atrito com o corpo. Esta peça possui uma relação constante que transforma o deslocamento numa rotação correta de seu eixo. Colocando a ponta do tacômetro num ponto móvel como na Figura 20, mediu-se a velocidade tangencial da mesa da retificadora e, através do botão de ajuste da velocidade de deslocamento da mesa alterou-se a velocidade até atingir o valor desejado. O operador deve ter bastante sensibilidade para alterar a velocidade, pois é regulada internamente pela pressão de uma bomba de óleo, sutil a qualquer variação.



Figura 20 – Ajuste da velocidade tangencial da mesa com tacômetro (V_w)

O **fluido de corte**, que serve para lubri-refrigerar o corpo de prova durante a retificação, segundo a Indústria Microquímica, deve ter uma proporção de 4% de óleo emulsificante. Foi usado o óleo da Shell, tipo DMS 3200 F-1, dissolvido em água. Para acertar a concentração, é utilizado o **Refratômetro** N-1E da Atago, Figura 21, que mede a

quantidade de óleo através da refração da luz incidente na lente de medição. Ele mede 0%Brix para a água, por meio de uma coluna branca que aparece no seu visor. Caso não apareça a linha no zero, deve ajustá-lo por meio de um pequeno parafuso de calibração. Caso seja colocado óleo puro na lente o aparelho mostra 30%Brix por ser o máximo que a coluna pode mostrar.



Figura 21 – Refratômetro

Basta colocar, depois de calibrado o zero, a amostra da emulsão sobre a lente e fechar sua tampa. Caso fique menor que 4%, deve-se adicionar óleo emulsificante até completar essa proporção. Como o reservatório de fluido de corte é muito grande, deve fazer a bomba do fluido bombeá-lo até sua completa diluição.

O **inversor de frequência**, CFW -02 de 7,5cv da WEG, controla a velocidade da ferramenta de corte V_s , que é a velocidade tangencial do rebolo sobre a peça, conforme a Equação 27. Foi utilizado como frequência inicial do inversor 60Hz. Porém, com o uso da ferramenta de corte, o rebolo vai perdendo seu diâmetro, diminuindo a velocidade tangencial. Deve-se então, monitorar o diâmetro inicial do rebolo e ir alterando os valores da frequência conforme o valor do diâmetro. A Tabela 3 mostra os ajustes da frequência do inversor, conforme o tamanho do diâmetro do rebolo durante os ensaios.

$$V_s = \frac{2\pi f \cdot R}{n} = cte \quad (27)$$

$$f_{FINAL} = f_{INICIAL} \frac{R_{INICIAL}}{R_{FINAL}}$$

onde:

f : é a frequência do inversor que gera a velocidade tangencial do rebolo V_s

R : é o raio (ou diâmetro) do rebolo

n : é o numero de par de pólos

Tabela 3 – Compensação da velocidade tangencial com o desgaste do rebolo

Código	a [° m]	Diâmetro [m]	Freq [Hz]	
A	5,0	167,80	60,99964	Diâmetro Inicial
B	7,5	167,80	60,99964	
C	10,0	167,80	60,99964	
D	12,5	166,17	61,59986	
E	15,0	166,17	61,59986	
F	17,5	163,80	62,48926	
G	20,0	163,80	62,48926	
H	22,5	159,90	64,01338	
I	25,0	159,90	64,01338	
J	27,5	178,65	57,29493	Diâmetro Inicial (novo rebolo)
K	30,0	174,99	58,49329	
L	35,0	166,70	61,40216	
M	40,0	166,70	61,40216	
N	45,0	166,70	61,40216	
O	50,0	166,70	61,40216	

4.1.3 Dressagem

Para afiar as pontas micrométricas do rebolo de óxido de alumínio, foi necessário fazer a operação de dressagem (Figura 22-a). Antes de tudo, deve-se levar o dressador (Figura 22-b) ao projetor de perfil e fazer a medição da ponta de dressagem.

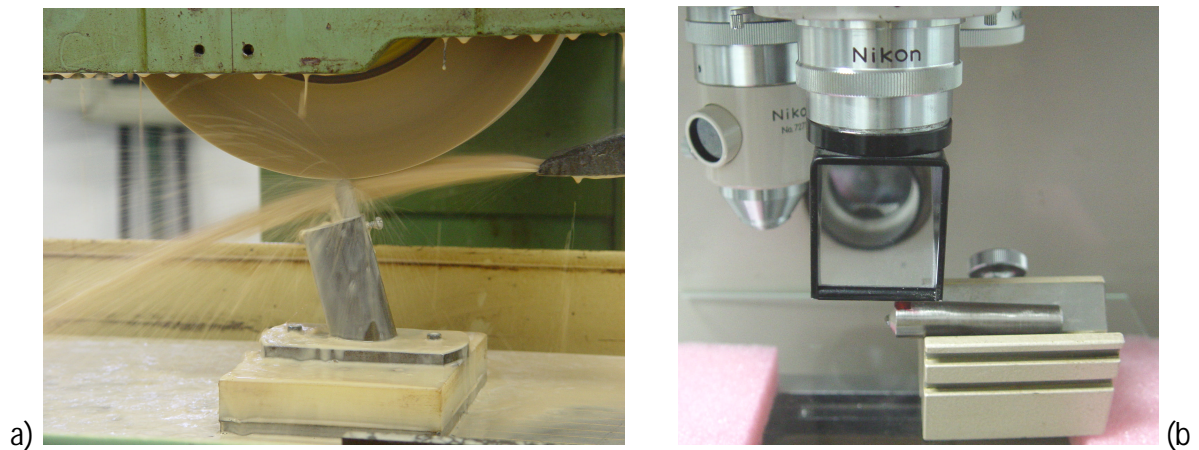


Figura 22 – a) Operação de dressagem b) Dressador



Figura 23 – Projetor de perfil

O **projektor de perfil** da Nikon modelo 6C que se encontra no LUA, Laboratório de Usinagem por Abrasão da Unesp-Bauru, amplia a ponta de diamante do dressador, que com a ajuda de duas linhas que cruzam o centro do painel, pode-se medir o tamanho de sua ponta em micrometros. Para a medição correta se coloca sempre o dressador com uma marca no seu corpo numa posição predefinida, pois, caso fosse girado o dressador na base, que tem seu corpo cilíndrico, a largura de atuação do dressador, b_d , seria visivelmente diferente sendo preciso compensar a velocidade na dressagem.

O projetor possui manivelas vertical e horizontal que desloca a peça. Esse deslocamento deve ser medido absolutamente gerando assim o valor da largura do dressador b_d . A Figura 23 mostra a ponta do dressador no cruzamento central das duas linhas do painel. Aprofunda-se 50•m da peça na horizontal, que é a profundidade de dressagem utilizada, e através da manivela vertical mede-se o deslocamento.

$$td = \frac{LR \cdot Ud \cdot 60}{n \cdot b_d} [s] \quad (28)$$

onde,

td = tempo de atuação do dressador em segundos

$LR = 31,75\text{mm}$ à Largura do Rebolo Norton – ART-FE 38A80-PVH (paquímetro)

$U_d = b_d/Sd = 5,0$ à grau de recobrimento de dressagem (ver Equação 19)

$n = 1799$ rpm à rotação do rebolo (tacômetro) - inversor à 60Hz

$b_d = 1,535$ mm à largura de atuação do dressador (projeto de perfil)

Mas como $v_{sd} = \frac{LR}{t_d}$, substituindo na Equação 28, tem-se:

$$v_{sd} = 10^{-3} \frac{n \cdot b_d}{U_d} [m/min] \quad (29)$$

Após medir o b_d , aplica-se a Equação 29 e obtém a velocidade de deslocamento do dressador pela superfície do rebolo. Através do tacômetro digital mede-se a velocidade de deslocamento da mesa, controlado pelo inversor de frequência CFW-02 de 5,0cv da WEG, e ajusta-se a frequência até acertar a velocidade.

Foi tomado $U_d = 5,0$ por ser um valor de dressagem onde a queima seria evidente durante o processo de retificação (Bianchi, 1990). Para os ensaios utilizados, com o desgaste da ferramenta de dressagem, foi necessário medir b_d diversas vezes e compensar a velocidade de dressagem através do inversor de frequência que controla o deslocamento transversal do rebolo sobre o dressador por meio de um fuso da retificadora.

Tabela 4 – Compensação da frequência do inversor com o b_d medido

Código	a [• m]	b_d [mm] Medido	V_d [m/min]	f_d [Hz]
A	5,0	1,38	0,49	41,24277
B	7,5	1,48	0,53	41,31985
C	10,0	1,48	0,53	41,31985
D	12,5	1,61	0,57	44,6
E	15,0	1,7	0,60	46,4
F	17,5	1,52	0,54	42,6
G	20,0	1,88	0,67	52,4
H	22,5	1,51	0,54	42,6
I	25,0	1,57	0,66	41,62048
J	27,5	1,95	0,69	55,4
K	30,0	2	0,71	55,6
L	35,0	2,5	0,89	60
M	40,0	2,5	0,89	60
N	45,0	1,95	0,69	55,4
O	50,0	1,95	0,69	55,4

4.1.4 Bancada de Ensaio

Para os ensaios foi utilizada a Retificadora Plana SULMECÂNICA, localizada no LUA - Laboratório de Usinagem por Abrasão da Unesp-Bauru, que contém uma base magnética para fixação da peça e controle de velocidade tangencial (V_w). Na retificadora estão acoplados dois motores:

- § Motor de rotação do Rebolo (2 pólos): controlado pelo inversor de frequência WEG modelo CFW-02 380V de 7,5cv. Responsável pela velocidade tangencial do rebolo – V_s .
- § Motor do Fuso: controlado pelo inversor de frequência WEG modelo CFW-02 de 5,0cv. Responsável pela velocidade do fuso (deslocamento transversal), acionado para se fazer a dressagem.

O rebolo utilizado foi o de óxido de alumínio branco ART-FE-38A80PVH da NORTON indicado para operação de retificação plana com aços. Suas dimensões originais são 203,2x25,4x31,75mm. (Saint Gobain, 2006)

- § ART – Tipo Reto
- § FE – Ferramentaria
- § 38A – óxido de alumínio branco – indicado para aços extremamente sensíveis à queima.
- § 80 – Granulometria média
- § P – Dureza (duro)
- § VH – Liga Vitrificada (evolução da VS)

A corrente e a tensão do inversor de frequência são monitoradas pelo módulo desenvolvido pelo LADAPS – Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais da Unesp-Bauru. De acordo com Aguiar (2003) o módulo converte os valores na potência conforme a Equação 30:

$$P_{ELÉTRICA} = 765.2 \cdot V - 3,37 \quad (30)$$

onde: V: é a tensão na saída do módulo [V];

P: é a potência elétrica do motor [W].

O sensor de emissão acústica utilizado foi o 'Sensor de EA parafusado' da Sensis Industrial, Figura 24, acoplado ao módulo de monitoramento DM42 do mesmo fabricante que condiciona o sinal em uma tensão proporcional.



Figura 24 – Fixação do sensor de emissão acústica

Após seus respectivos condicionadores os sinais de Emissão Acústica e de Potência entram no **Bloco Terminal** NI BNC-2110 da National Instruments, que faz a interface dos módulos com a placa de aquisição. Foi utilizada uma **placa de aquisição de dados, DAQ**, com 12 bits de precisão do fabricante National Instruments, modelo PCI-6111, com máxima frequência de amostragem é 5.000.000 amostras por segundo (5MSPS), que é acoplada num microcomputador desktop. Além da instalação física, a placa deve ser iniciada via software LABView para armazenamento dos dados em arquivos do tipo texto (Aguiar, 2003).

Ajustes:

- § Velocidade Tangencial de deslocamento da mesa retificadora: $V_w = 0,044\text{m/s}$
 - § Velocidade Tangencial V_s : 60Hz inicial para $D_{\text{REBOLO}}=167,80\text{mm}$ de rebole: $V_s = \pi f \cdot D/2 = 15,81\text{m/s}$
 - § Módulo EA (DM42):
 - § Ganho de sinal = 1
 - § Ganho de Entrada = 10
 - § Redução de Ruído = 0
 - § Filtro Passa Alta = 200Hz
 - § Sem Filtro passa baixa
 - § Constante de tempo = 1ms
 - § Repetibilidade dos ensaios = 3 faces por profundidade de corte utilizada
- A bancada de ensaio é exibida na Figura 25.

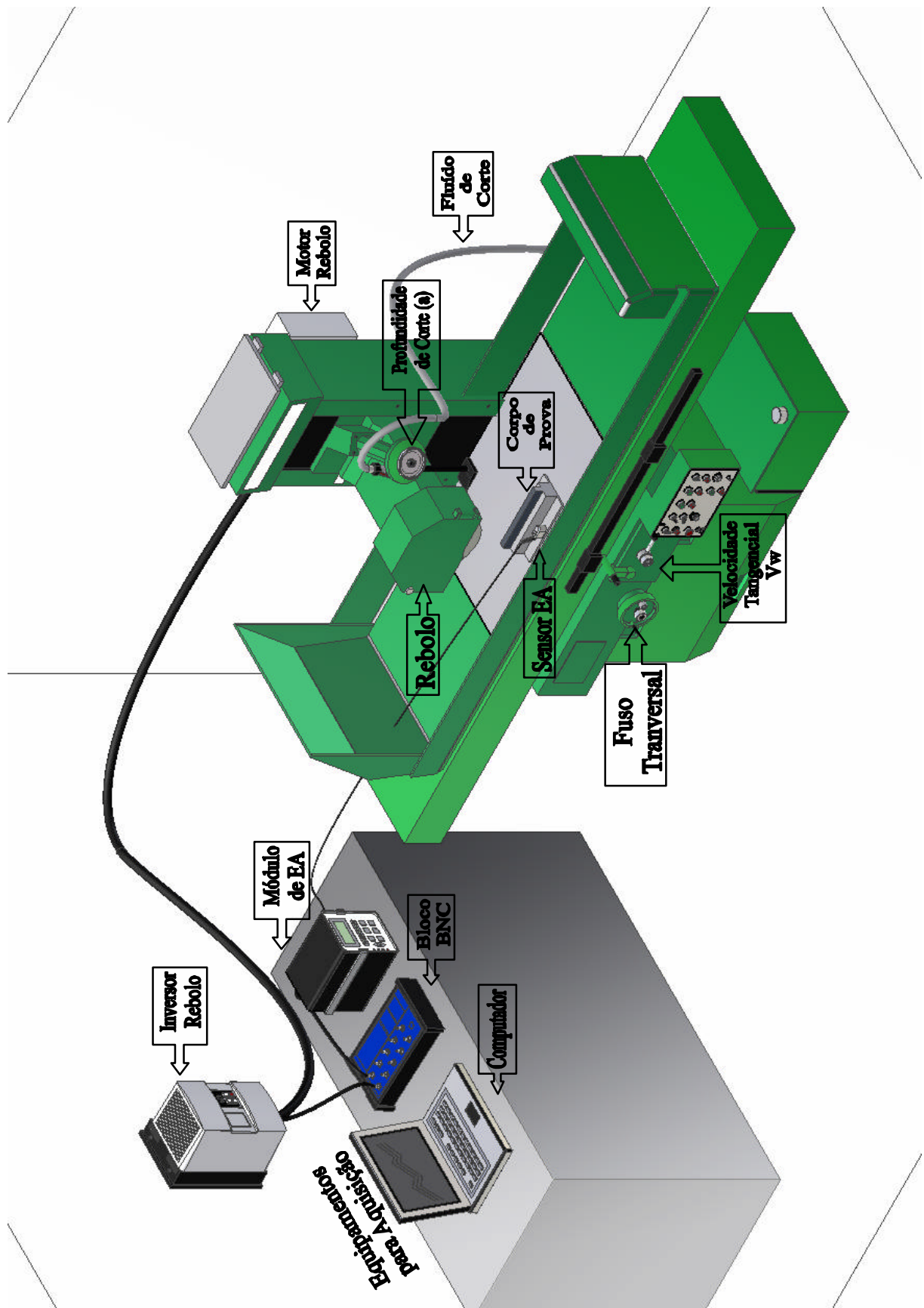


Figura 25 – Bancada de Ensaio

4.2 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

O uso de rugosímetros para análise das peças usinadas é muito freqüente, pois se torna possível conhecer a rugosidade e, conseqüentemente seus efeitos produzidos pelo processo de retificação.

Na ocorrência da queima, devido aos efeitos térmicos, freqüentemente ocorre mudança na integridade superficial da peça com alterações na rugosidade. Devido a esta característica, a rugosidade vem sendo usada em conjunto com outros parâmetros para quantificar a queima no processo de retificação.

Neste trabalho, utilizou-se um rugosímetro disponível no Laboratório de Usinagem por Abrasão do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da UNESP - Bauru e adotou-se uma metodologia de ensaio para analisar o comportamento da superfície da peça na presença de queima.

A Figura 26 mostra como foram feitas as medidas com o uso do rugosímetro.

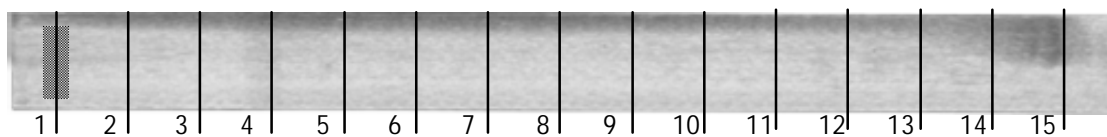


Figura 26 – Subdivisões na peça para medir Rugosidade

Como o rugosímetro Taylor Robson, modelo Surtronic 3+, somente consegue realizar leituras em um único eixo, sendo necessária a subdivisão da peça em quinze partes igualmente espaçadas. A região marcada com a cor vermelha mostra a extensão que o braço do rugosímetro percorre para a coleta dos pontos de rugosidade. Nota-se que esta região deveria ser maior para abranger toda a largura da peça, entretanto, isto não é possível porque o deslocamento do braço do rugosímetro é limitado a apenas uma pequena região L, deixando, portanto, as bordas da peça fora da coleta dos dados.

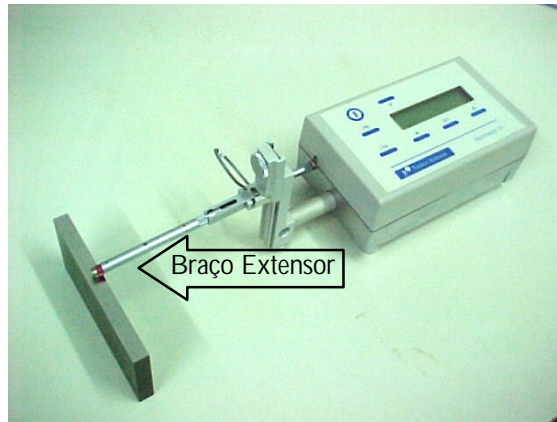


Figura 27 – Rugosímetro Digital

Cada valor R_a , Average Roughness, é o cálculo do valor médio, Figura 32-b, realizado pelo rugosímetro da Figura 27. A região varrida pelo extensor possui uma largura L , configurável, em 1.25 e 25mm. Entretanto, tomadas de tempo de aceleração e retardo são necessários nas extremidades, não possuindo o braço extensor do equipamento velocidade constante. Então é necessário retirar uma pequena medida dessa extremidade, ou filtro de cutoff, para que o cálculo tenha o valor mais correto da rugosidade. Os valores de comprimento de amostragem vão de 0.25 à 8mm, configuráveis pelo instrumentista. Para os ensaios foram tomados valores de cutoff de 8mm.

A ponta micrométrica perfeitamente regular de diamante, Figura 28-a, varre a superfície da peça com a movimentação do braço ao longo de L , adquirindo valores para o cálculo. Ao terminar, o equipamento fornecerá o valor de R_a em seu display.

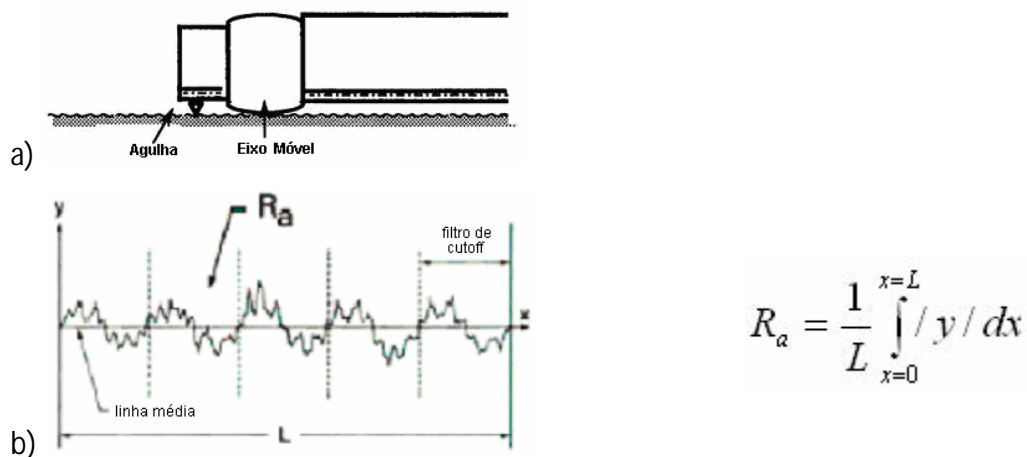


Figura 28 – Medida de Rugosidade

- a) Eixo do braço extensor e ponta micrométrica
- b) Gráfico exemplo de aquisição da rugosidade e cálculo de R_a

Nesse modelo de equipamento, o diâmetro da agulha de diamante é de 5•m, garantindo uma resolução de 0.01•m nas medidas.

Para evitar erros nas medições, devido a grande sensibilidade do equipamento, realizaram-se três medidas na mesma faixa da peça. Assim, obtém-se uma média dos valores de *Ra* e seus respectivos desvios-padrão.

4.3 MEDIÇÃO DE MICRODUREZA

Os testes de microdureza foram realizados na Faculdade de Odontologia da USP de Bauru, no Laboratório de Materiais Dentários, sob a coordenação do Professor Dr. César Antunes de Freitas, que gentilmente cedeu a máquina para os ensaios.

Estes testes consistiram em medir a microdureza ao longo da superfície da peça a fim de que se pudesse conhecer melhor o comportamento da transformação metalúrgica do material quando houve ocorrência de queima. Esse tipo de ensaio, junto com as medidas de rugosidade e inspeção visual, auxilia as informações condizentes sobre a integridade da peça, facilitando sobremaneira as comparações do processamento digital dos sinais de emissão acústica, e assim, ajudando a encontrar a melhor ferramenta para a detecção da queima no processo de retificação.

As medidas foram realizadas num aparelho da marca Otto Wolpert-Werke, tipo M-Testor, Baujahr, 1962 (Figura 29-a), onde se utilizou a escala Vickers para a medição da rugosidade por ter sido essa a mais indicada ao tipo de metal e a dureza envolvida. A carga utilizada foi de 100 gramas durante um tempo de 20 segundos e o espaçamento entre os pontos ao longo do comprimento da peça (longitudinal) foi de aproximadamente 10mm. O espaçamento transversal entre os pontos ficou em 4mm, com uma distância de 2mm nos dois pontos próximos à extremidade da peça, totalizando os 12mm da peça.

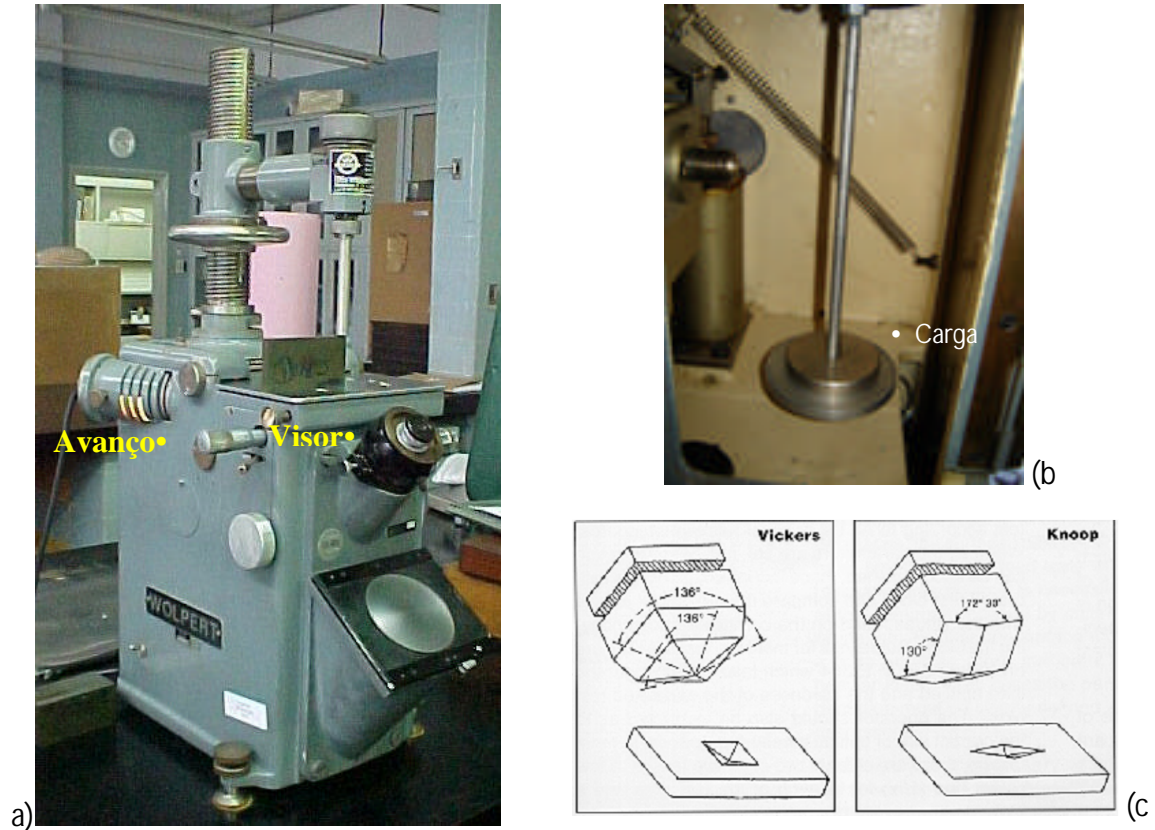


Figura 29 – Detalhes do equipamento de medição de microdureza

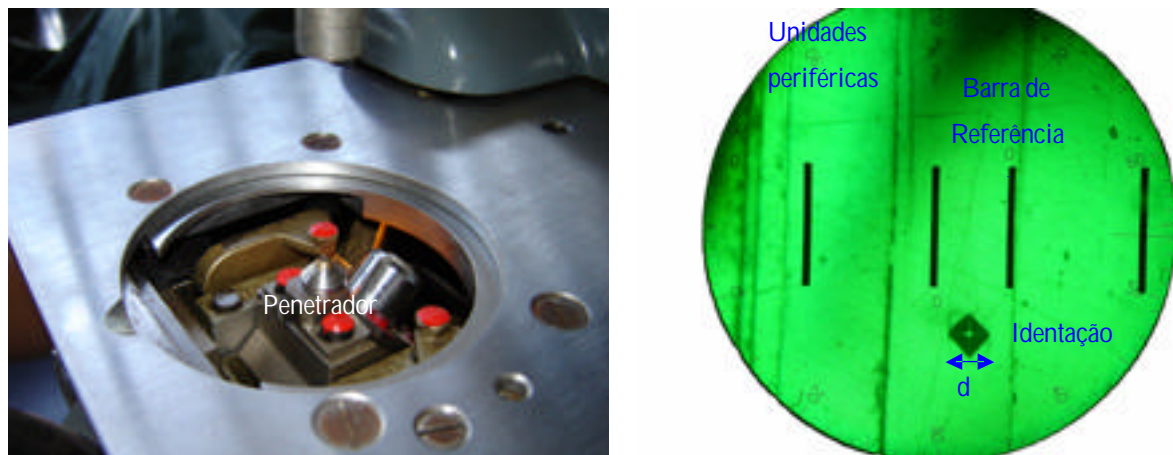


Figura 30 – Identação na medição de microdureza

A medição de microdureza consiste num penetrador que é pressionado com uma certa força sobre o material a ser testado. Sobre uma base põe-se a carga P , em gramas ou em Newton, necessário para fazer a força constante sobre o material. Empurra-se a alavanca de indentação e marca-se a peça com o formato Vicker ou Knoop. Dependendo se o material for muito macio ou muito duro, tal indentação vai penetrar mais ou menos, respectivamente.

Através do seu visor, gira-se o avanço até que a da barra de referência '0' posicione-se no início da indentação. Mede-se o valor referência através da linha horizontal nos números posicionados na periferia do visor. Gira-se novamente o avanço até que a barra de referência posicione-se no final da indentação. Mede-se novamente o valor dos números da periferia pela linha horizontal. A diferença é o valor d , desejado.

Pela Equação 31 ou através de uma tabela, pode-se determinar a relação de microdureza do material estudado. Estes valores têm constante direta para a transformação na unidade g/mm^2 .

$$HV = \frac{0.189 \cdot P}{d^2} \quad \text{ou} \quad HK = \frac{14.2 \cdot P}{d^2} \quad (31)$$

Para minimizar erros nas medições, devido à variação da microdureza pelo material, realizaram-se três medidas na mesma faixa perpendicular da peça, conforme Figura 31.

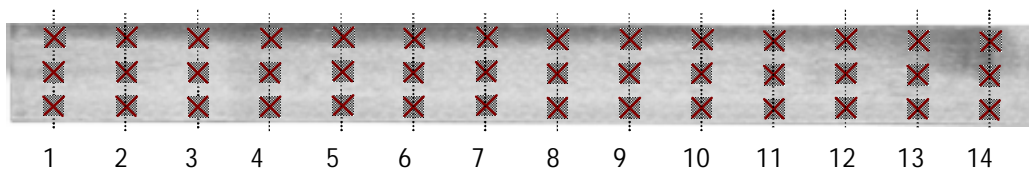


Figura 31 – Subdivisões na peça para medir Microdureza

4.4 CONVERSOR ANALÓGICO PARA DIGITAL (ADC)

No processo de aquisição, os valores de tensão são lidos pelo ADC – Analog to Digital Converter. Frequentemente é utilizado o método das aproximações sucessivas nos ADCs, que é semelhante ao método da bissecção (Ruggiero & Lopes, 1997).

A Figura 32 mostra um ADC com um circuito Sample/Hold (Amostra/Retém).

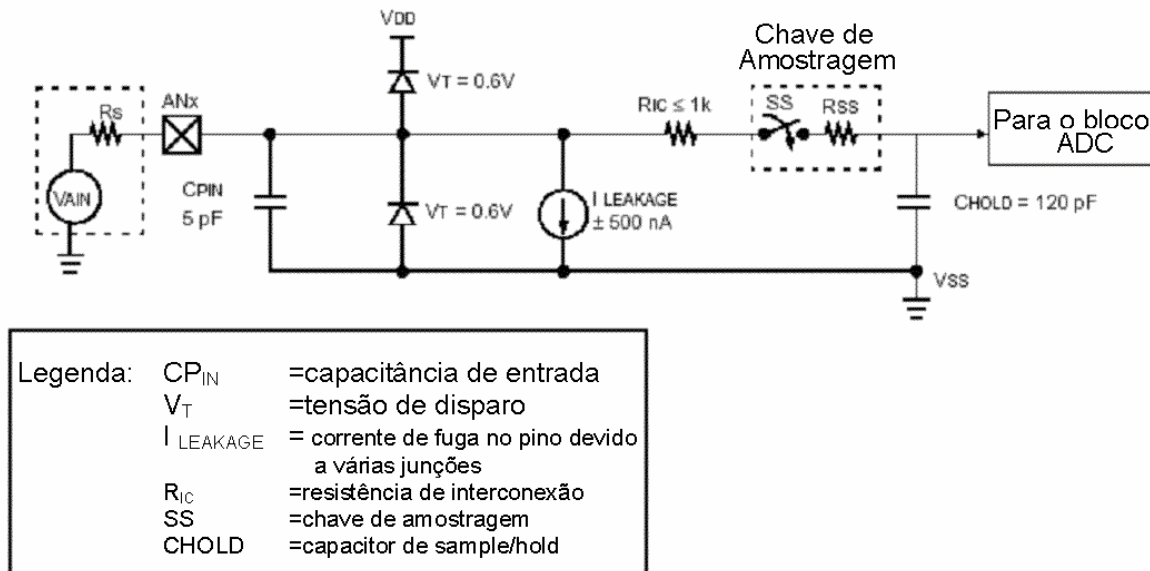


Figura 32 – Entrada do ADC do PIC18F452 (Microchip, 2003)

A chave SS é do tipo analógica que permite a passagem ou não da corrente de carga do capacitor C_{HOLD} . Ao fechar tal chave, o capacitor que tem baixíssimo valor (120pF) carrega-se quase que totalmente a um tempo de aproximadamente $t_{CARGA} \cdot 5 \cdot (R_{IC} + R_s + R_{SS}) \cdot C_{HOLD}$. Para o PIC18F452 esse tempo, seguindo as recomendações do fabricante, fica sempre menor que $10 \cdot s$. A chave SS deve ficar fechada durante todo esse tempo, no mínimo, e depois abrir para que o capacitor fique carregado com esse valor de tensão analógica de entrada durante toda a conversão, garantindo valores corretos.

O conversor por aproximação sucessiva opera, para o PIC18F452 que tem 10 bits de precisão no valor convertido, como mostra a Tabela 5, que exemplifica uma conversão de 2,0V de tensão de entrada em seu valor respectivo binário e com tensão de referência de $V_{ref}=5,0V$.

Tabela 5 – Exemplo do Método das Aproximações Sucessivas

Ciclo	bit9 512	Bit8 256	Bit7 128	bit6 64	bit5 32	bit4 16	bit3 8	bit2 4	bit1 2	Bit0 1	Valor Calculado	Tensão Volts
	valor início											
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$V_x = 0xR_m$	= 0
	• Troca Do bit											
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$V_x = 512xR_m$	= 2.5
	• valor calc. > valor lido (2V)											
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	$V_x = 256xR_m$	= 1.25
	• valor calc. < valor lido											
3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	$V_x = 384xR_m$	= 1.875
	• valor calc. < valor lido											
4	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	$V_x = 448xR_m$	= 2.1875
	• valor calc. > valor lido											
5	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	$V_x = 416xR_m$	= 2.03125
	• valor calc. > valor lido											
6	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	$V_x = 400xR_m$	= 1.953125
	valor calc. < valor lido •											
7	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	$V_x = 408xR_m$	= 1.992188
	valor calc. < valor lido •											
8	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	$V_x = 412xR_m$	= 2.011719
	valor calc. > valor lido •											
9	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	$V_x = 410xR_m$	= 2.001953
	valor calc. > valor lido •											
10	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	$V_x = 409xR_m$	= 1,99707
	valor calc. < valor lido •											
Fim	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	$V_x = \mathbf{409xR_m}$	= 1,99707

$R_m = V_{ref} / 2^{N_{bits}}$ é a Resolução Mínima para um único bit. Como a tensão referência V_{ref} é de 5,0 Volts para o ADC de 10 bits do PIC, a resolução mínima é de 4,8828125 mV. Significa que o conversor é insensível a variações de tensão menores que esta resolução.

Inicialmente o ADC zera todos os bits. Depois converte os valores calculados em bits no seu respectivo valor de tensão. Ao comparar essa tensão com o valor da tensão de entrada caso seja maior ou menor, ativa ou não o bit que está sendo testado. Ao testar todos os bits, do mais significativo ao menos significativo, gera um valor binário de saída correspondente ao seu valor de entrada relacionado por R_m .

Observa-se que, para um ADC de 10 bits, gastam-se 10 ciclos de instruções. Para um ADC de 16 bits levaria 16 ciclos (Tocci & Widmer, 2003). Como o ADC sempre gasta um tempo para responder a mudança dos bits, devido ao tempo de atraso de propagação dos

transistores internos do seu circuito, o conversor possui uma limitação natural de frequência, não conseguindo nestes ciclos ter um tempo zero.

Resumidamente, para converter um valor se gasta um tempo de conversão o que limita a frequência de conversão, ou seja, a taxa de amostragem, relativo ao seu número de bits de precisão. Para o PIC18F452, o máximo da taxa de amostragem é aproximadamente de 200.000 amostras por segundo.

4.5 IMPLEMENTAÇÃO ESTATÍSTICA EM MICROCONTROLADORES

Para calcular a média deve-se resolver a Equação 32:

$$V_{AV} = \frac{1}{T} \int_0^T v_i(t) \cdot dt \quad (32)$$

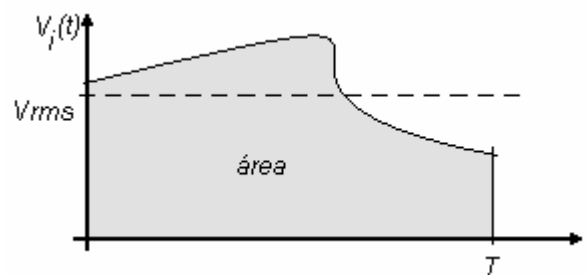


Figura 33 – Área da integral do intervalo [0-T] para cálculo do valor médio

onde: V_{AV} – é o valor médio para o intervalo medido;

$v_i(t)$ – é a variável de função contínua de medição (valores);

T – é o período ou intervalo de medição;

t – é a variável independente.

A Equação 32 calcula a área da variável $v_i(t)$, exemplificado na Figura 33, e a divide pelo período T , resultando seu valor médio V_{AV} (Average). Para a aquisição de dados, onde os sinais são discretos, ao invés do método acima onde os valores são para variáveis contínuas, deve-se alterar a integral para seu equivalente utilizando o método da Integral de Riemann, conforme Equação 33 (Munem e Foulis, 1982).

$$V_{AV} = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^N v_i(t) \cdot \Delta t \quad (33)$$

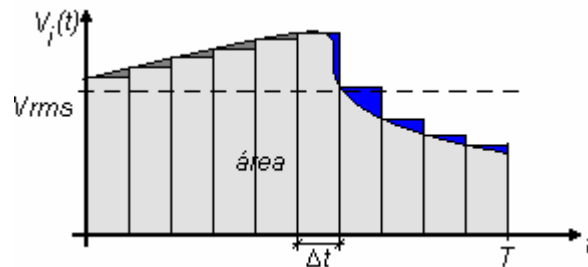


Figura 34 – Método de Riemann para o cálculo da área total

onde: V_{AV} – é o valor médio *aproximado* para o intervalo medido;

$v_i(t)$ – é a variável *discreta* de medição (valores);

T – é o período ou intervalo de medição;

N – é o número de subintervalos (retângulos) ou o número de aquisições feitas;

$\Delta t = \frac{T}{N}$ – é um subintervalo constante;

$t = i \cdot \Delta t$ – é a variável independente discreta.

Através desta conversão, a Equação 33 faz um somatório de N retângulos de alturas variáveis. Essas alturas são os valores de $v_i(t)$ coletados no sistema, visíveis na Figura 34. Porém, observa-se um erro inerente a este método: durante o intervalo são considerados valores constantes (patamares) e que não segue a variação da forma de onda contínua. Para amenizar esse erro, os retângulos devem ser menores com $\Delta t \rightarrow 0$.

Conforme visto nos ADCs, Δt não consegue ser zero, devido a uma limitação natural dos circuitos eletrônicos. Para uma frequência de conversão de 200KHz, Δt seria de 50ns entre cada conversão. O somatório ocasionará perdas de valores que é reduzido à medida que a frequência é aumentada.

4.5.1 Regra do Ponto Médio

Usar a Equação 33 para um processamento de sinais, multiplicando toda vez que capturar um valor por Δt seria lento e inviável. Deve-se então transformá-lo na Equação 34,

conhecida como Regra do Ponto Médio (MacKichan, 2005), desde que o sistema de aquisição tenha um tempo fixo para conversão: $\bullet t = constante$.

$$V_{AV} = \frac{\Delta t}{T} \sum_{i=0}^N v_i(t) = \frac{1}{T} \frac{T}{N} \sum_{i=0}^N v_i(t)$$

$$V_{AV} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N v_i(t) \quad (34)$$

Destaca-se então que, para o cálculo da média V_{AV} de um sinal de tensão mais rápido, soma-se todas as aquisições convertidas a um tempo $\bullet t$ constante e, depois de todo o processo ou em intervalos fixados T , divide-se por N .

Poderia-se utilizar a Regra dos Trapézios ou as Regras de Simpson (Ruggiero & Lopes, 1997), que calculam uma integral com maior precisão, entretanto, para grandes valores de N , a Regra dos Trapézios não surtiria efeitos tão favoráveis e o erro para a Regra do Ponto Médio é realmente reduzido para a condição de $N > 100$. Isso faz reduzir o tamanho do código fonte compilado introduzido no Microcontrolador.

Por exemplo, para um sinal senoidal adquirido durante um segundo, com uma frequência de aquisição de apenas 100Hz, ou seja, $N=100$ pontos de aquisição, seu erro máximo seria de apenas $8,3 \bullet V$ para a Regra do Ponto Médio.

Para se fazer os outros cálculos deve utilizar as mesmas técnicas. A Equação 35 mostra o cálculo do valor eficaz de um sinal (RMS – Root Mean Square), utilizando variáveis contínuas no tempo.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_i^2(t) \cdot dt} \quad (35)$$

Utilizando o método da Integral de Riemann, obter-se-á a Equação 36 onde é substituída a integral por um somatório.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=0}^N v_i^2(t) \cdot \Delta t} = \sqrt{\frac{1}{T} \frac{T}{N} \sum_{i=0}^N v_i^2(t)}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N v_i^2(t)} \quad (36)$$

Então, para obter o valor eficaz de uma forma de onda, deve-se, durante as aquisições, calcular o valor quadrático do sinal e somar aos seus acumulados anteriormente. Ao terminar esse passo, poderá então capturar outro valor. No final da aquisição ou em tempos fixados T , divide o resultado desse somatório por N e então extrai a sua raiz quadrada.

Para fazer o cálculo do desvio-padrão utiliza-se a Equação 37. (Spiegel, 1983)

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2}{N - 1}} \quad (37)$$

onde: $\bullet_x = V_{AV}$ – é a média da amostra

x_i – valores do instante t_i da amostra

Nota-se que o desvio-padrão tem um termo quadrático dentro do somatório. É inviável para um microcontrolador coletar todos os valores, memorizá-los e, após isso, calcular a média para então subtrair de todos os valores guardados o valor da média \bullet_x . Isso é muito comum quando se tem grandes capacidades de memória e rápida armazenagem dos *buffers*, salvando-os para depois processar seus cálculos, tal como ocorre em sistemas de Tempo Real, como as placas de aquisição computacionais ou nos processadores DSP, inseridos num sistema com co-processador matemático e ADC periféricos velozes e bancos de memória RAM gigantes.

Para isso, expandindo a Equação 37 em somatórios, aproximando $N-1$ à N sendo o mesmo maior que 100, e aplicando as propriedades dos somatórios, obtém a Equação 38:

$$S_x \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 - 2m_x x_i + m_x^2)}{N}} = \sqrt{m_x^2 - \frac{2}{N} m_x \sum_{i=1}^N x_i + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

$$S_x \approx \sqrt{m_x^2 - \frac{2}{N} m_x^2 N + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

$$S_x \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N} - m_x^2} \quad (38)$$

Assim, para calcular o desvio-padrão de um sinal, somam-se todos os valores das aquisições para calcular a média das amostras, soma-se todos os valores quadráticos das aquisições e, de posse destes valores e da quantidade de amostras N , aplica-se a Equação 38 ao final do processo ou em intervalos fixados.

4.6 CIRCUITO ELÉTRICO - HARDWARE

Para o devido estudo e utilização do microcontrolador PIC, recorreu-se ao uso de um Kit MCLab2, fabricado pela Mosaico Engenharia, visto na Figura 35. (Mosaico, 2005)

Este Kit possui a MCU PIC18F452 como núcleo principal e alguns periféricos para aplicações. Seu principal periférico é o LCD alfanumérico, Display de Cristal Líquido, de 2 linhas por 16 colunas de caracteres com matriz de pontos para cada caractere de 8x5. Sua função é que, através dessa matriz de pontos pode-se representar qualquer número, letra ou caractere personalizado.

Os displays devem ser iniciados para sua correta aplicação. Essa iniciação é feita por um procedimento que envia uma seqüência de instruções. Para este display é enviada a seqüência hexadecimal: 30, 30, 06, 0E e 01, sendo as duas primeiras atrasadas em 15ms.

Após a iniciação, através de instruções específicas no display, pode-se ligar ou desligar o cursor, torná-lo piscante, limpar o LCD, retornar o cursor ao início da primeira ou da segunda linha, posicionar o cursor ou personalizar um caractere especial.

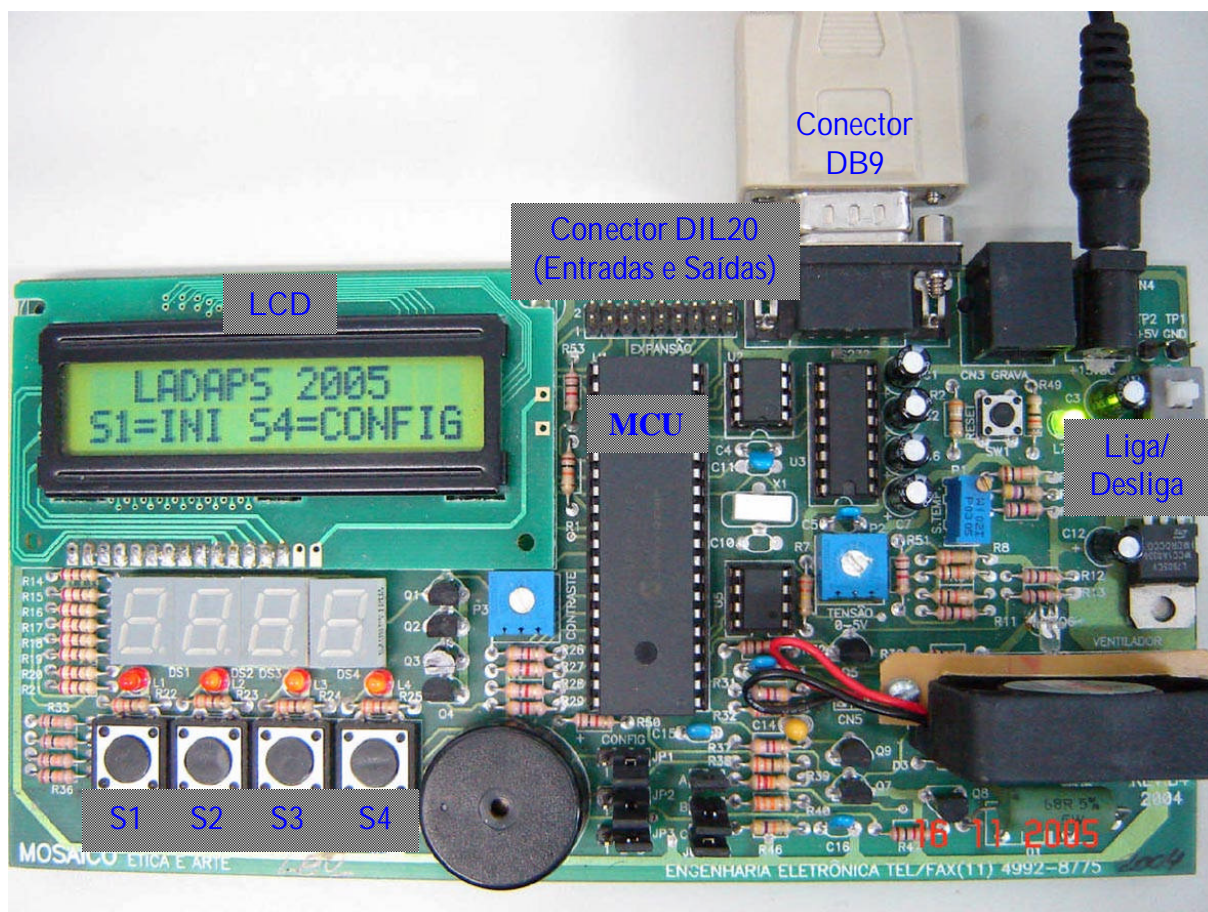


Figura 35 – Kit MCLab2 da Mosaico

A escrita de um caractere no LCD leva cerca de 40•s para que fixe o valor em seu *latch* interno. Entretanto com 20•s se consegue bons resultados.

Há um potenciômetro ligado a entrada de um amplificador operacional o qual entra no pino RA1 (Pórtico A – pino 1) da MCU, Figura 38, onde, com a devida configuração do MCU este pino torna-se uma entrada analógica em seu ADC. Este dispositivo foi utilizado na elaboração do programa para testá-lo freqüentemente em suas compilações.

Os quatro botões (S1, S2, S3 e S4) e quatro leds (L1, L2, L3 e L4) acima dos botões são para intervenção ou visualização do usuário, configuráveis por software. Foram utilizados apenas 2 botões, um para iniciar as aquisições e outro para configuração ou abortar as aquisições.

O circuito integrado MAX232 é um duplo driver/receptor para a interface TIA/EIA-232, protocolo também conhecido como RS-232, que compatibiliza as tensões e correntes com as normas V.24, V.28 e ISO 2110, revisão F. (Pereira, 2003). Este circuito faz a interface de comunicação serial do MCU com a porta serial do microcomputador, COM_x, por meio de um conector DB9 usando apenas três fios – TX, RX e terra.

O PIC18F452 contém internamente um módulo USART, Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter, que se comunica com o MAX232. Este módulo contém *buffers*, registradores, controles e temporizações (*baud rate*) necessárias para a conversão paralelo-serial, para transmissão, e serial-paralela, para recepção, sem que a MCU pare suas funções, sendo tudo configurado via software interno.

Possui um conector *strip* DIL -20 para a expansão do kit com circuitos exteriores. Ele conecta os pinos RA2 e RE2 que foram utilizadas para as entradas analógicas de emissão acústica (canal 2) e de potência (canal 7). Também faz conexão aos pinos RC3, RC4, RC5 e a todo o pórtilco D (RD0 à RD7) da MCU. Caso um dos parâmetros for ultrapassado, o pino RC3 foi usado para sinalizar ao operador que uma queima ocorreu. Se necessário a um circuito externo, caso consuma uma corrente baixa, pode-se utilizar as tensões +5V ou +12V também disponível nesse conector, não necessitando de uma fonte externa. Estas tensões são fornecidas pela fonte de +12V que vem com o Kit, que entra através do conector P2, e é regulada para +5V por um LM7805 para alimentar a MCU.

O sistema é sincronizado por um cristal de 10MHz, que foi multiplicada por 4 vezes por um PLL (Phase Locked Loop) interno à MCU.

Outros dispositivos que não foram utilizados e que constam no Kit são: uma memória EEPROM serial 24C04, de 512 bytes, um conjunto para controle *PID* e um *buzzer* piezelétrico. O conjunto PID é composto por um ventilador, um transmissor/receptor infravermelho, um resistor de aquecimento e um circuito com um diodo 1N4148, que através de sua tensão de barreira de potencial fornece a medida da temperatura do resistor. Através de uma programação correta, consegue-se controlar a velocidade do ventilador para resfriar o diodo ou a corrente sobre o resistor para aquecê-lo, fazendo com que a temperatura fixe em um determinado valor.

Internamente à MCU, Figura 37, foi amplamente utilizado sua memória EEPROM, de 256 bytes, para salvar as constantes do programa. Para operação normal do software, a MCU tem dois blocos de memória RAM que totalizam 1.5 Kbytes (1536 bytes).

Seu ADC, Analog to Digital Converter, de 10 bits de resolução, possui internamente um circuito de Sample/Hold, amostra e mantém, e lógica de conversão por aproximação sucessiva. Possui tensão de referência ajustável por software, mas foi usado o seu padrão de +5V. Os canais são configuráveis por software. Foi usado para ler os valores de tensão da emissão acústica e da potência, alternando-se os canais.

Também possui quatro temporizadores – TMR0 de 8 bits ou 16 bits, TMR1 de 16 bits, TMR2 de 8 bits e TMR3 de 16 bits. Foi somente utilizado o TMR1 de 16 bits, para a sincronização do sistema de aquisição.

O módulo MSSP, Master Synchronous Serial Port, serve para comunicação serial síncrona, padrão SPI, com outras MCU ou periféricos – EEPROM serial, registradores de deslocamentos, *drivers* de display, CADs, etc. Este módulo não foi utilizado no projeto.

O módulo CPP, Capture/Compare/PWM, que também não foi utilizado, funciona no modo de Captura e Comparação para detectar a borda de subida ou de descida de sinais externos injetados nos pinos de entrada da MCU, e no modo PWM (Pulse Width Modulation) para controlar o *duty-cycle*, largura do pulso digital em alto, para controle de velocidade de motores ou potência em resistências, por exemplo.

A gravação da memória interna de programa, memória FLASH, de 32 Kbytes, foi realizada pelo software MPLab versão 7.2, distribuído gratuitamente pela Microchip Technology Inc. (Microchip, 2003), que se comunica ao Kit por meio de um conector RJ11 com a porta serial, COM_x, do computador. Este software compila códigos fonte em Assembler para arquivos hexadecimais (*.hex). O arquivo em hexadecimal, gerado pelo compilador CCS-PICC, é carregado pelo MPLab e através deste, faz a gravação na memória de programa da MCU.

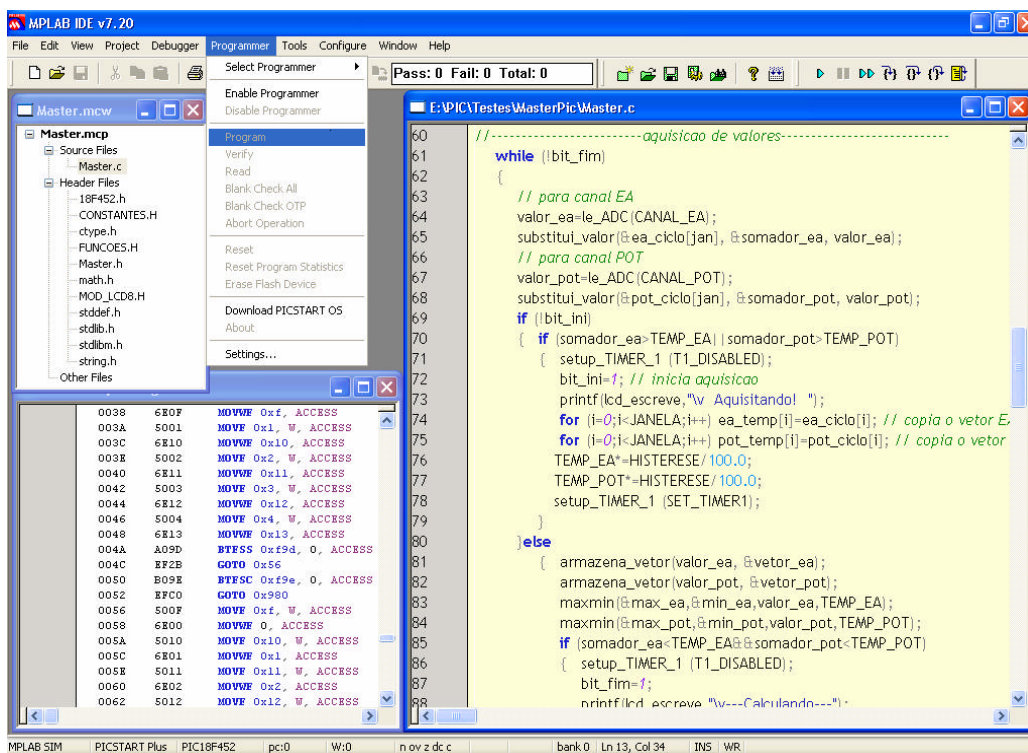
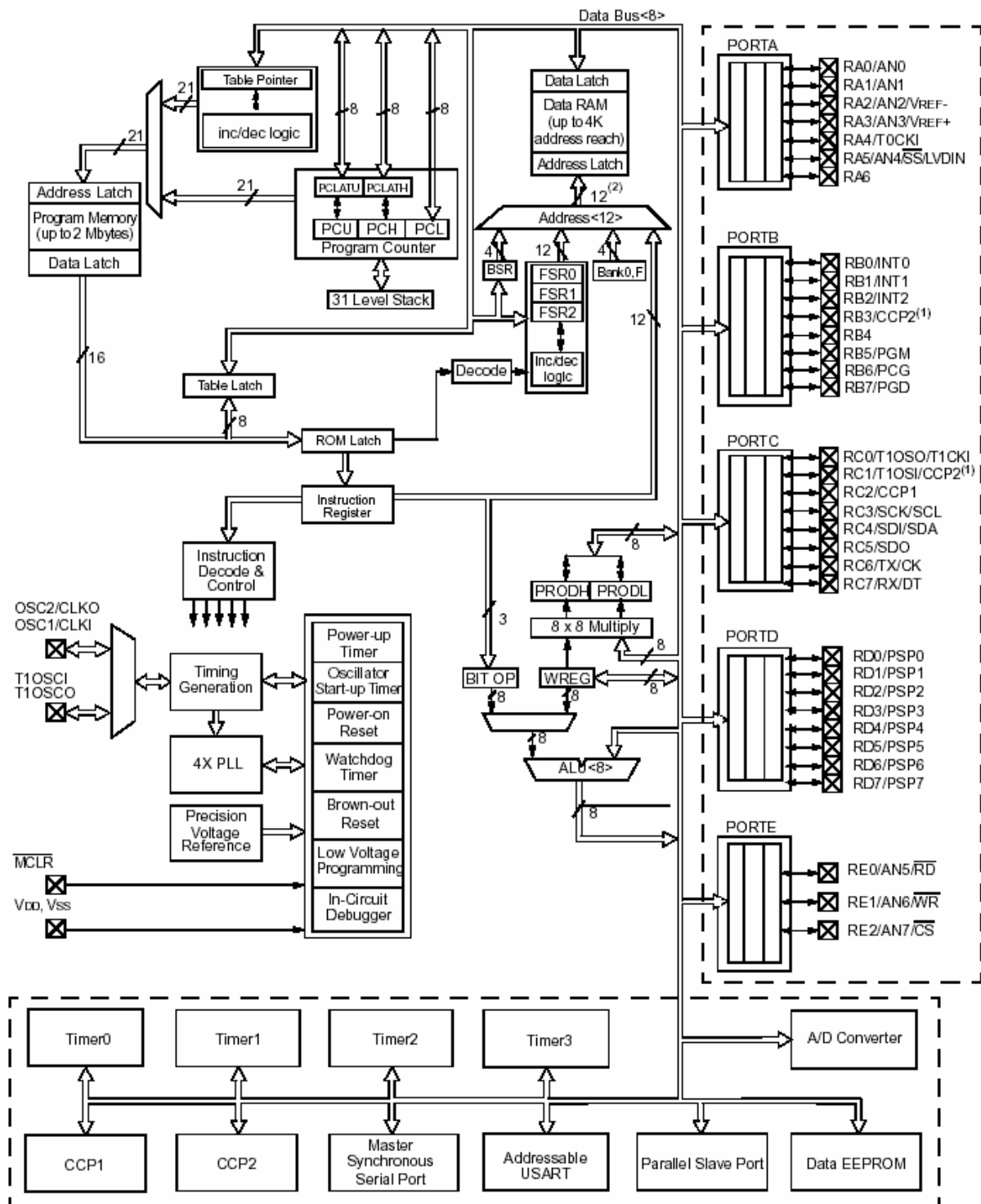


Figura 36 – Software MPLab para programação da MCU (Microchip, 2003)



- Note**
- 1: Optional multiplexing of CCP2 input/output with RB3 is enabled by selection of configuration bit.
 - 2: The high order bits of the Direct Address for the RAM are from the BSR register (except for the *MOVWF* instruction).
 - 3: Many of the general purpose I/O pins are multiplexed with one or more peripheral module functions. The multiplexing combinations are device dependent.

Figura 37 – Diagrama em blocos interno do PIC18F452 (Microchip, 2003)

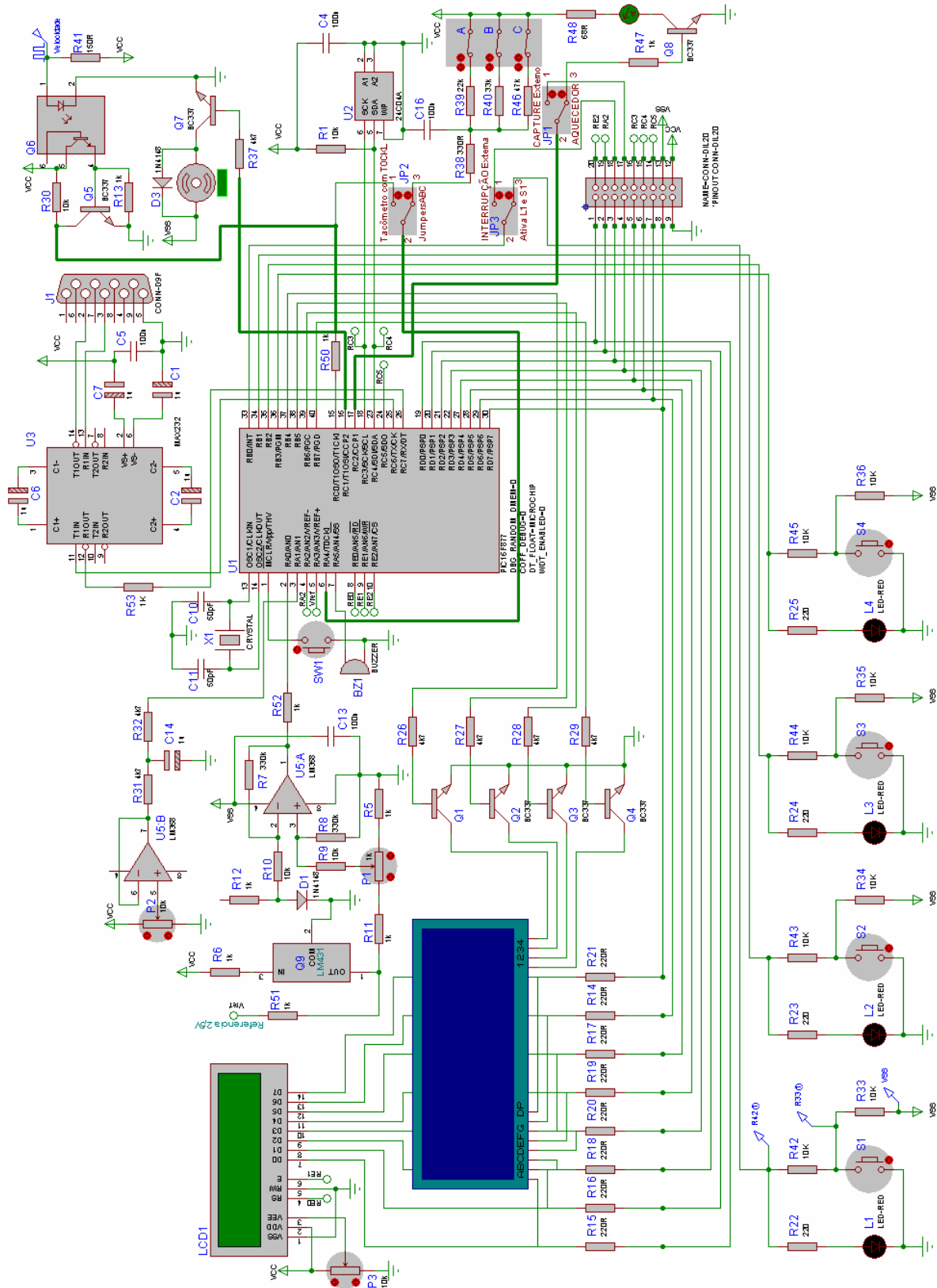


Figura 38 - Diagrama elétrico do Hardware - Kit MCLab2

4.7 SOFTWARE

O software interno ao microcontrolador PIC18F452 foi desenvolvido para o compilador da CCS – Custom Computer Service – classe PCW, Versão 3.180, que utiliza a linguagem C própria para PIC. O ambiente de programação, que faz a gravação interna no microcontrolador é o MPLab versão 7.20, software freeware da própria Microchip, fabricante dos microcontroladores PIC.

Primeiramente, o software carrega na RAM, memória volátil, interna ao MCU os valores salvos na EEPROM, memória não-volátil, necessários para o processamento. Então, o software divide-se em duas partes principais: Modo de Configuração e Modo de Aquisição. Ele fica aguardando uma decisão do usuário para a escolha do modo de operação.

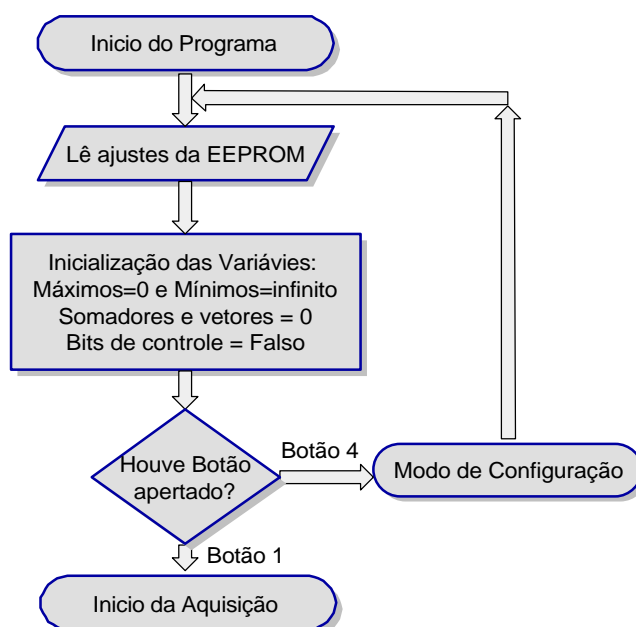


Figura 39 – Fluxograma dos Modos de Operação

4.7.1 Modo de Configuração

Caso o operador aperte a tecla S4 o software envia uma informação ao LCD do Kit e uma outra ao computador dizendo que ele se encontra no Modo de Configuração. O processamento é executado segundo o fluxograma da Figura 40.

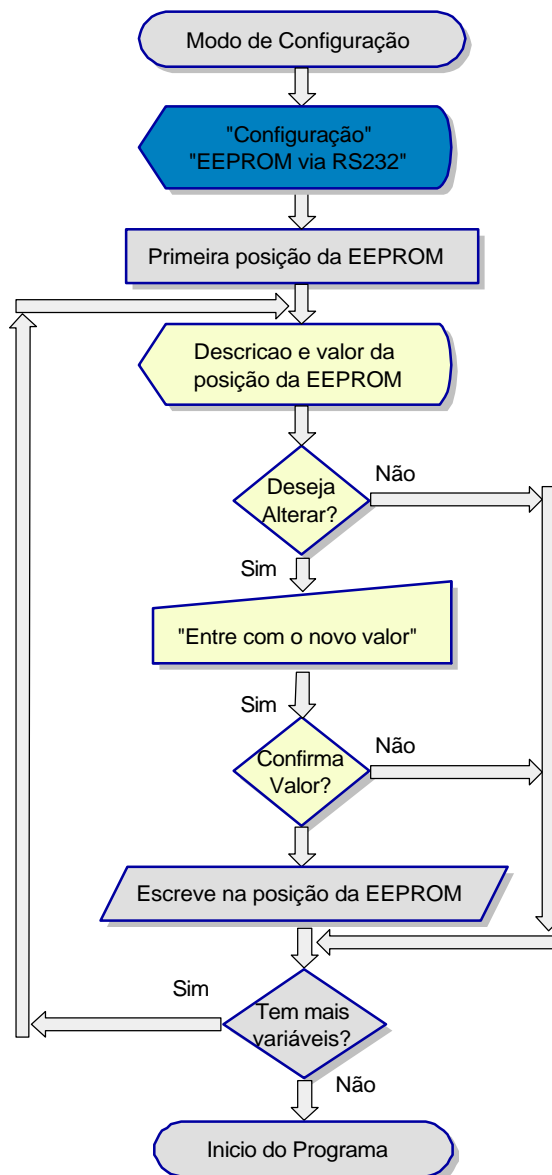


Figura 40 - Fluxograma do Modo de Configuração

É necessário que um computador esteja conectado à entrada DB9 do kit por um cabo com a porta serial do computador RS-232, COM_x. Existem vários softwares "Monitores para Porta Serial" grátis disponíveis na Internet, que são arquivos pequenos e simples de serem instalados. Foi utilizado o programa *Siow.exe*, Serial Input/Output Monitor, com 1.08 Mbytes, que vem com o pacote do programa CCS-PICC. (Ver Figura 41)

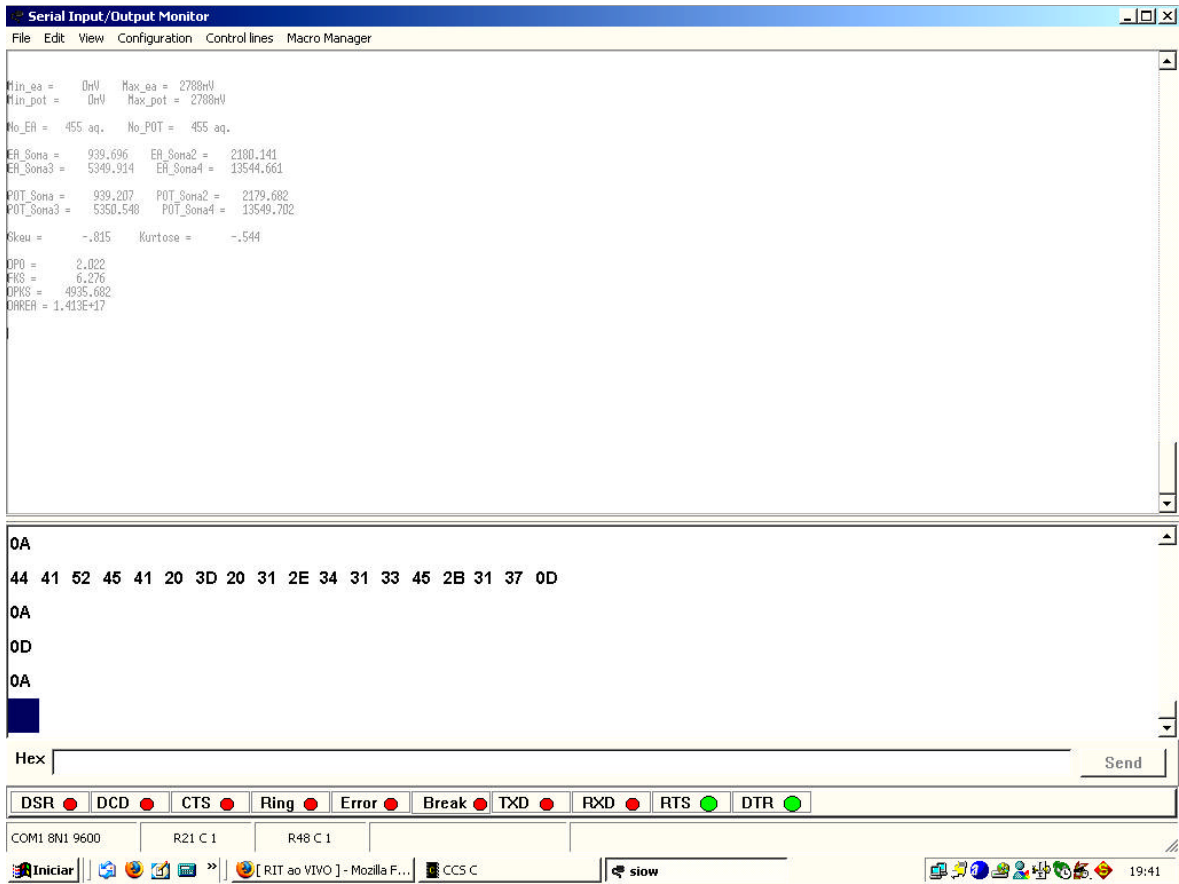


Figura 41 – Software de monitoração da porta serial

Através do programa se pode configurar qual a porta do computador, a velocidade (*baud rate*), a paridade, a quantidade de bits enviados e a quantidades de bits de parada. Para a operação correta, deve-se configurar o software para a velocidade de 9600, nenhuma paridade, oito bits de dados e um único bit de parada, sendo essa a configuração padrão visto na Figura 42.

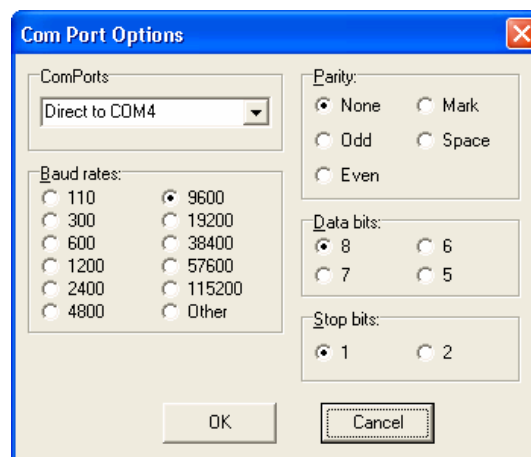


Figura 42- Configuração padrão do Monitor de Porta Serial *siow.exe*

Após o hardware informar na tela do computador sobre o estado de configuração e informar ao LCD (Figura 43), irá colocar os parâmetros salvos na memória EEPROM na tela do computador previamente carregado em variáveis globais internas à MCU. (Pereira, 2003).

Os parâmetros são:

- § tempo de aquisição
- § número de elementos da janela
- § limiar de EA
- § limiar de potência
- § histerese
- § canal de EA
- § canal de potência.

O primeiro parâmetro é o tempo entre cada aquisição. Em outras palavras, é a frequência máxima de aquisição do sinal de tensão. O valor é um inteiro em microssegundos. Sua variação está restrita ao valor máximo de $2^{16}-1 = 65535 \cdot s$, o que fornece uma frequência mínima de aquisição de $1/65535\mu s = 15,26 \text{ Hz}$, limite imposto pelos valores inteiros de 16 bits. A frequência máxima será o maior valor que não ocorrerá erro nas aquisições. O software está resguardado desse problema, parando o processo e avisando ao operador o tempo que ultrapassou para depois fazer a correção desse parâmetro, adicionando esse tempo com o valor armazenado. Este parâmetro está intimamente ligado à frequência do cristal oscilador, indicado que se utilize a frequência máxima de 10MHz.



Figura 43 – Indicação do modo de configuração no LCD

Para o processo não ser interrompido por extrapolação do tempo de aquisição, achou-se um valor de $2500 \cdot s$, frequência de 400 Hz, com o cristal oscilando em 10 Mhz com o PLL ligado, multiplicado internamente por 4 vezes, ou seja, 20 MHz.

O próximo parâmetro salvo dentro da EEPROM é o número de elementos da janela. Tem limites entre 0 à 63. Se fossem analisadas as aquisições ponto a ponto e se, por acaso,

uma delas ultrapassasse um valor fixo que determina um limiar mínimo, o processo poderia iniciar antes mesmo do rebolo tocar o corpo de prova ou mesmo sem o processo começar. Este valor lido no ADC pode surgir de um sinal espúrio gerado por uma fonte externa de ruído, como um motor de indução trifásico, um ligar/desligar de lâmpadas ou até uma EMI (interferência eletromagnética). Para se terminar o processo ocorreria o mesmo problema, se por acaso o valor lido fosse menor que esse limiar. Isso geraria um erro se, num certo instante curtíssimo em que os grãos abrasivos não tocassem o rebolo, parasse o processo antes de realmente ele terminar.

A solução para isso é utilizar janelas cíclicas, que dentro da janela é calculado a média dos últimos n valores, dado pelo valor do segundo parâmetro. Dessa forma, somente valores muito altos de ruído ou valores que perdurem por um tempo maior ultrapassam o limiar (n x tempo de cada aquisição), disparando ou parando o processo, evitando que ruídos causem erros no sistema.

A Figura 44 esclarece graficamente um processo de aquisição de dados microcontrolado durante uma passada do rebolo sobre a peça, utilizando a janela cíclica.

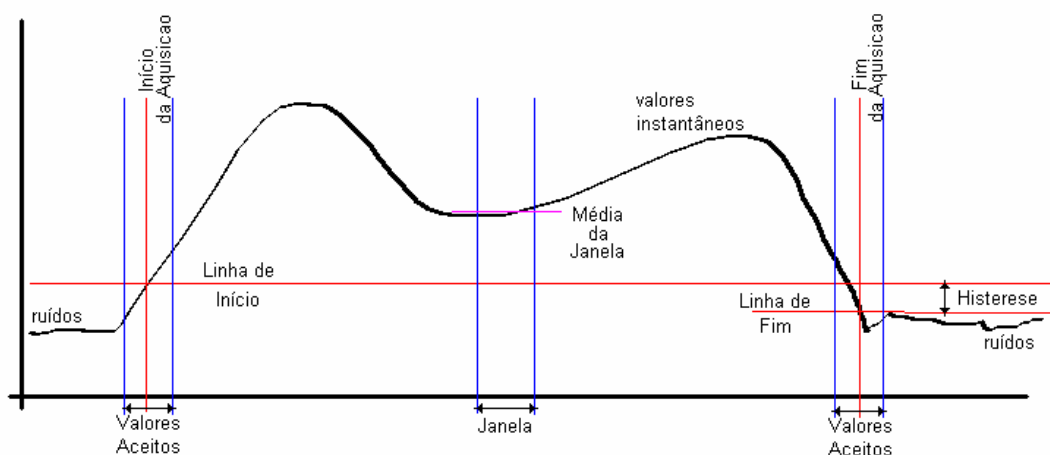


Figura 44 – Início e Fim de aquisição da passada do Rebolo

O terceiro parâmetro é esse limiar de emissão acústica, em mV, conforme descrito como necessário para o início e fim da aquisição. Está compreendido dentro da faixa de 0 à 5000mV, pois o ADC adota como tensão de referência a tensão de +5V.

O próximo valor ajustável é o limiar de potência, idêntico ao anterior, que também está compreendido dentro da faixa de tensão de 0 à 5000mV, conforme a tensão de referência do ADC ajustada na programação.

O parâmetro de histerese, em percentagem de 0 a 100, diz qual é a redução do limiar para parar o processo de aquisição e passar para a próxima etapa. A janela cíclica calculando a média dos últimos n valores pode, durante o processo, transpor abaixo do limiar, mas deve garantir que este seja realmente o fim do processo. A histerese é um parâmetro que, multiplicando-se ao limiar, determina qual o ponto de parada do processo.

O sexto valor ajustável da EEPROM é o canal de EA do ADC, configurado conforme Figura 45.

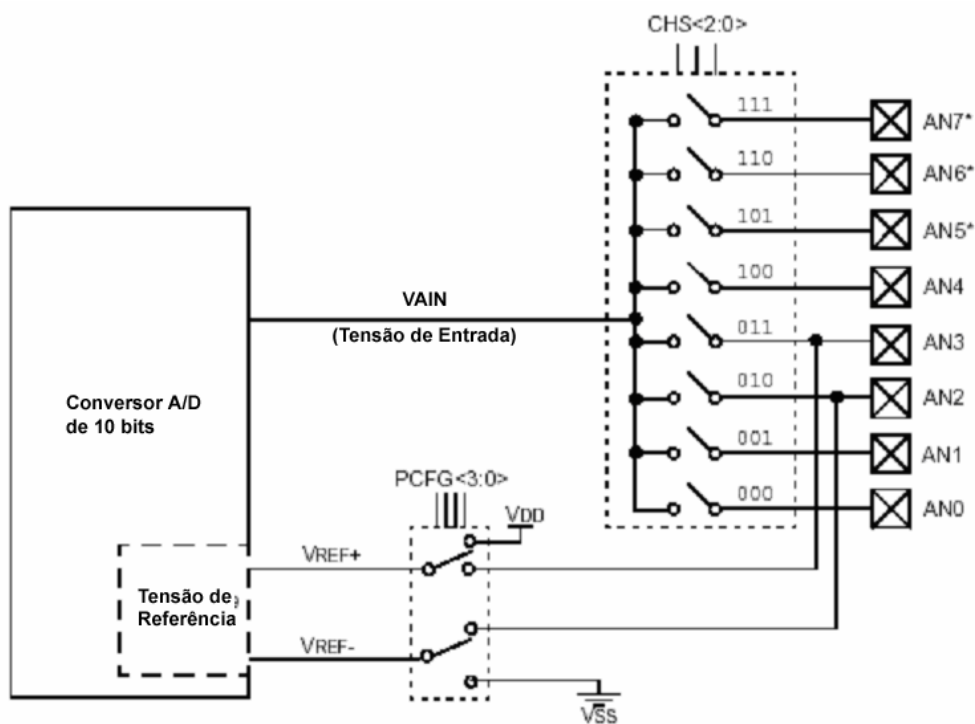


Figura 45 – Canais de entradas analógicas (Microchip, 2003)

O parâmetro altera o pino da MCU que o seu ADC interno lê a entrada de emissão acústica. O PIC18F452 possui oito entradas multiplexadas no ADC, de 0 a 7. Entretanto, verifica-se que para fazer uma varredura de maior quantidade de canais, como cada conversão leva um tempo para disponibilizar os dados, o processo de leitura das entradas ficará mais lento proporcionalmente diminuindo a taxa de amostragem. Como o hardware em questão está lendo apenas o sinal de emissão acústica e de potência, o que também é possível a medição de outros sinais, a velocidade cai pela metade.

O último parâmetro ajustável na EEPROM é o canal de potência elétrica, sinal gerado pelo módulo de potência, que pode ser de 0 à 7 e diferente do canal de EA. Para o Kit

MCLab2, os canais disponíveis para EA e potência no conector de expansão é o canal 2 e o canal 7.

Para todos os parâmetros configuráveis o software pergunta ao usuário se deseja alterar o valor e confirma se ele deseja realmente alterá-lo definitivamente. Se o operador não digitar nada em 20 segundos, o software escreve o próximo valor, um após o outro. Ao terminar, ele escreve “Fim da Configuração” caso não haja mais parâmetros.

Após configurar os valores da EEPROM o software se reinicia automaticamente. Assim ele copia novamente todos os valores guardados na EEPROM para suas variáveis globais na RAM. Então, o software, retorna a opção inicial do modo de configuração ou de aquisição com os valores atualizados.

4.7.2 Modo de Aquisição

Caso o operador aperte a tecla S1, o software entrará no processo de aquisição sendo possível abortá-lo a qualquer momento apertando a tecla S4, em destaque na Figura 46.

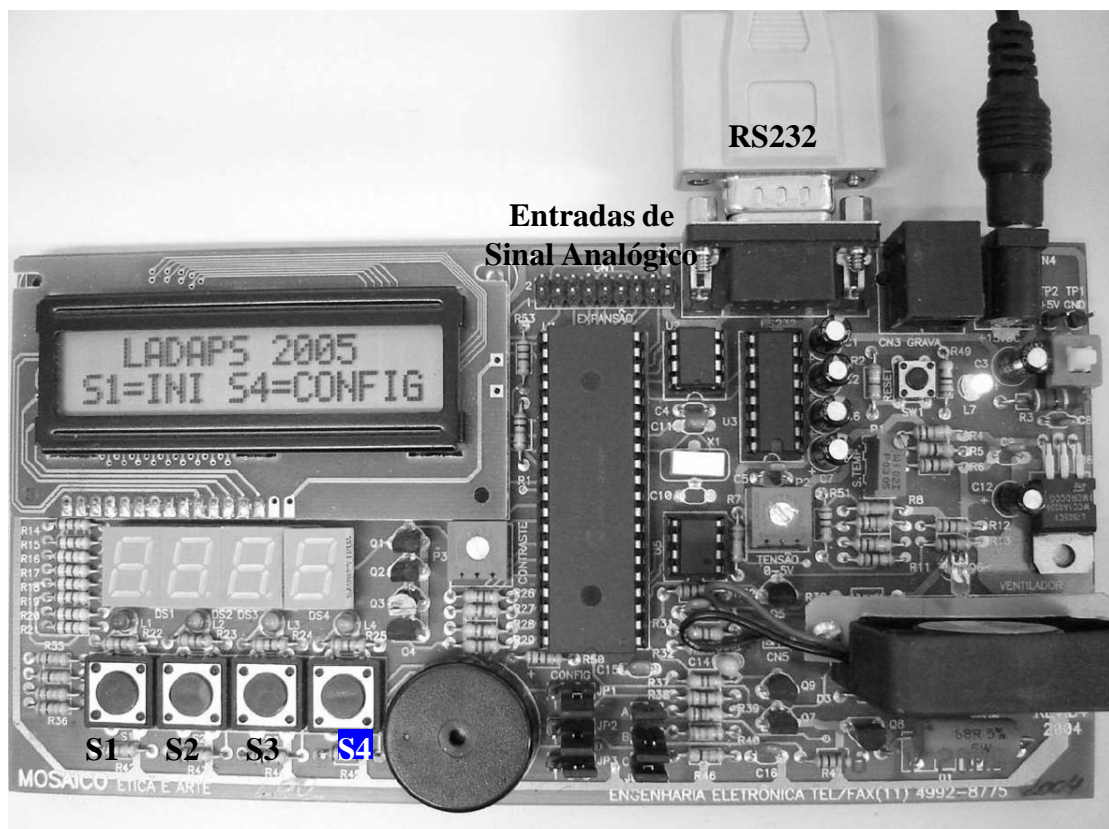
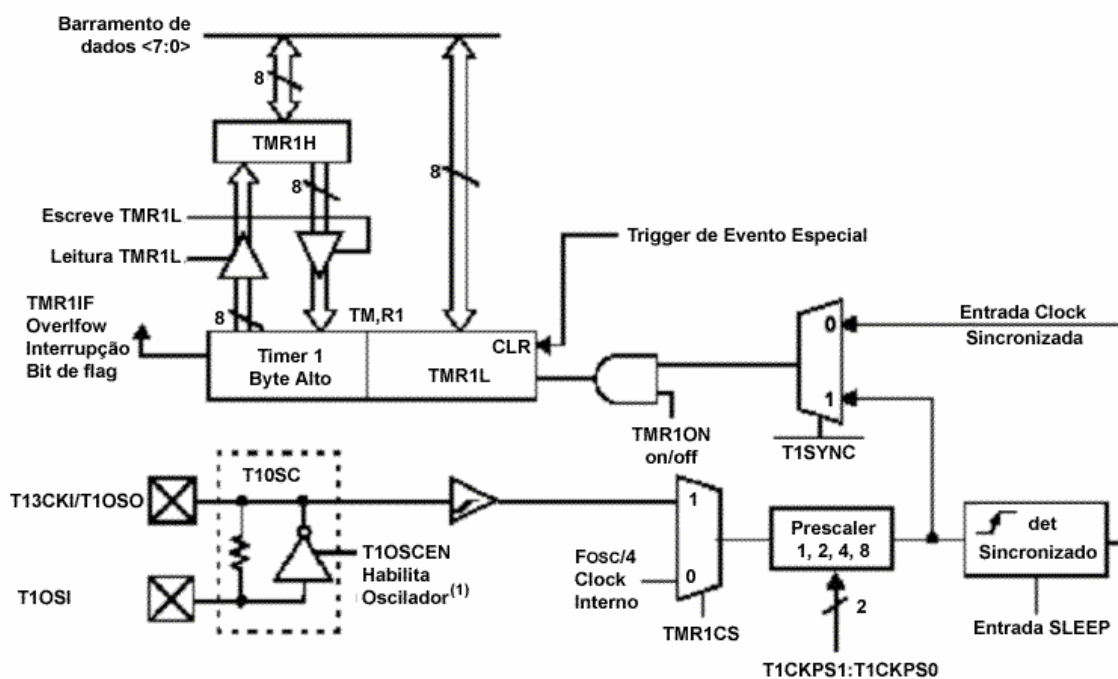


Figura 46 – Botões e conexões com o microcontrolador

Para capturar um valor deve-se primeiramente ler o ADC, depois deve salvar os valores significantes, acima do limiar predefinido nas configurações, para os cálculos estatísticos que serão realizados logo após se findar as aquisições.

O software está configurado com um sincronismo de tempo durante as aquisições de emissão acústica e potência, fazendo o salvamento desses dados estatísticos. Isso garante que o ADC leia os valores de seus canais em tempos rigorosamente fixos, ajustados pelo primeiro parâmetro configurável da EEPROM para que as equações do item 4.2 sejam válidas. Os temporizadores de uma MCU funcionam através da contagem de registradores internos (*latches* de 8 bits), vistos na Figura 47.



Nota 1: Quando o bit T10SCEN é zerado, o inversor e o resistor de realimentação são desligados. Isto elimina a corrente de dreno.

Figura 47 – Diagrama de um Temporizador do PIC18F452

O temporizador que foi utilizado é o Timer1 de 16 bits que conta de 0 até $65535 = 2^{16} - 1$. Esta contagem é de forma independente do processamento das instruções da MCU por ser circuitos internamente independentes. Este temporizador foi configurado para obter incrementos a cada $1 \cdot s$ através de seu *prescaler*. O *prescaler* é um divisor de frequência configurável por software que pode dividir a frequência do processador de instruções em 2, 4, 8 ou 16 vezes. Todos os processadores PIC utilizam uma arquitetura do sistema de instruções chamado *pipeline* que divide por quatro a frequência do oscilador do sistema, gerada pelo cristal e pelo PLL. É dividido por quatro pois a cada um desses pulsos a MCU executa várias

tarefas: lê a instrução, interpreta, aciona o dispositivo interno para essa instrução específica, coleta os dados resultantes desse dispositivo (memória, temporizador, USART, ADC, etc) e os armazena num outro registrador (Souza, 2000). Então, para dividir o tempo da frequência de 16 MHz em 1•s (1 MHz) deve-se dividir por 16 – 4 vezes do *preescaler* e 4 da arquitetura pipeline.

Como o temporizador conta até 65535 e depois retorna a zero, nesse exato momento ele gera um pulso de interrupção. Então para temporizar em 2500•s (primeiro parâmetro da EEPROM) o software subtrai $65535-2500\cdot s=63035\cdot s$ (Pereira, 2003). Interrupção é um artifício utilizado pelos microprocessadores e microcontroladores, distinguido por interrupções por software ou por hardware, mascaráveis ou não-mascaráveis e suas priorizações. Mas, basicamente, interrupções têm comportamento de interromper a execução normal do software e desviar para outra parte do programa, para executar uma função específica para aquele evento. Um exemplo muito comum de interrupção é a do mouse do computador que, enquanto o processador está abrindo uma janela, o mouse ainda continua lendo o que o usuário está fazendo.

Neste software, a cada período de tempo especificado pelo primeiro parâmetro registrado na EEPROM, também ocorre uma checagem da situação da tecla S4 – abortar as aquisições – caso seja pressionada ou não, destacado na Figura 48.

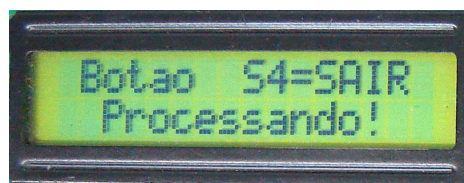


Figura 48 – Visualização do início do modo de aquisição

Caso o tempo para ler e salvar os valores estatísticos seja maior que o tempo fixado deste parâmetro, a interrupção será ativada e, ainda não terminado os processos de leitura e salvamento, o software percebe que faltou um certo tempo e indica este tempo no display da Figura 49, parando o processamento.



Figura 49 – Visualização de um erro de software

Certos *flags* binários, que ocupam apenas um bit de um registrador de 8 bits, sinalizam situações do programa. Um desse *flags* sinaliza se houve transbordo de tempo, que checa se o temporizador atingiu seu tempo de 1•s. Outros *flags* utilizados sinalizam se houve ou não início ou fim da aquisição. Enquanto não for sinalizado o fim da aquisição o processo continua lendo os valores do ADC.

O processo de aquisição começa capturando o valor da emissão acústica e de potência pelo canal determinado pelo sexto e sétimo parâmetro da EEPROM. Supondo que a janela possua 10 elementos (configurado pelo segundo parâmetro da EEPROM) todos seus elementos inicialmente começam o processo com zero. Após a primeira leitura do ADC, supondo diferente de zero, como por exemplo, 95mV teremos a média de $95mV/10 = 9,5mV$. Esta média não é maior que o limiar de 500mV, também sendo um exemplo, configurado pelo terceiro e quarto parâmetro da EEPROM. Assim, esse valor é tratado como ruído. Após ler outros valores, sua média vai-se alterando:

{95mV, 47mV, 150mV, 25mV, 800mV, 0mV, 0mV, 0mV, 0mV, 0mV}(Média = 111,7mV)

Quando é preenchido o ultimo valor, a janela retorna a posição inicial, substituindo o primeiro valor da janela cíclica:

{95mV, 47mV, 150mV, 25mV, 800mV, 100mV, 105mV, 75mV, 193mV, 214mV} (Média = 180,4mV)

••

250mV

Para calcular a média não é necessário ficar lendo e somando todos os elementos da janela. Basta apenas subtrair o valor que está se retirando e somar o valor que se está inserindo:

$$Média = \frac{1804mV - 95mV + 250mV}{10} = 195,9mV$$

Nota-se que usando esse artifício, caso houver ruídos (como o de 800mV do exemplo) não dispara espontaneamente o salvamento das aquisições, antes mesmo do rebolo tocar a peça. Para o exemplo, enquanto a média continuar menor que 500mV, os valores serão descartados.

Para calcular a frequência de corte deste filtro, que é a frequência que o sistema atenua 3dB ou 50% do sinal, utiliza-se a Equação 39:

$$f_c = \frac{1}{2 \times N^\circ \text{elementos_Janela} \times \text{Tempo_entre_aquisições}} \quad (39)$$

Para este exemplo, uma janela de 10 elementos e um tempo entre cada aquisição de $2500 \cdot s$, f_c será igual à 20Hz. Ou seja, se um ruído de frequência igual a 40Hz entrar no ADC, o software fará a média destes valores, mas se o sinal for de 20Hz simétrico é atenuado pela metade esse sinal para que não dispare o processo. Caso a janela possua apenas um único elemento, um sinal de 400Hz poderia disparar as aquisições ($2 \cdot f_c$).

Para o caso da média dos elementos da janela para os últimos valores coletados ser maior que o limiar fixado pelo terceiro parâmetro da EEPROM, estes últimos têm relevância para os cálculos estatísticos, devendo ser salvos no vetor de n valores da janela. Este valor salva na memória os seguintes valores: a quantidade total de pontos coletados, o somatório dos valores binários coletados – $\bullet x_i$, o somatório quadrático dos valores binários coletados – $\bullet x_i^2$, sendo todos estes valores necessários para os parâmetros estatísticos, vistos no item 4.2.

Fazer o quadrado de um número em formato de ponto flutuante, se gasta um tempo considerável de processamento, assim como tamanho na memória de programa. Esse foi o principal motivo de conseguir um mínimo de $2500 \cdot s$ no primeiro parâmetro da EEPROM. Para diminuir o tempo de processamento desse cálculo pode-se, ou aumentar a frequência do cristal, melhorar o sistema através de uma Unidade Lógica Aritmética mais avançada, também conhecida como co-processador matemático, ou utilizar um DSP.

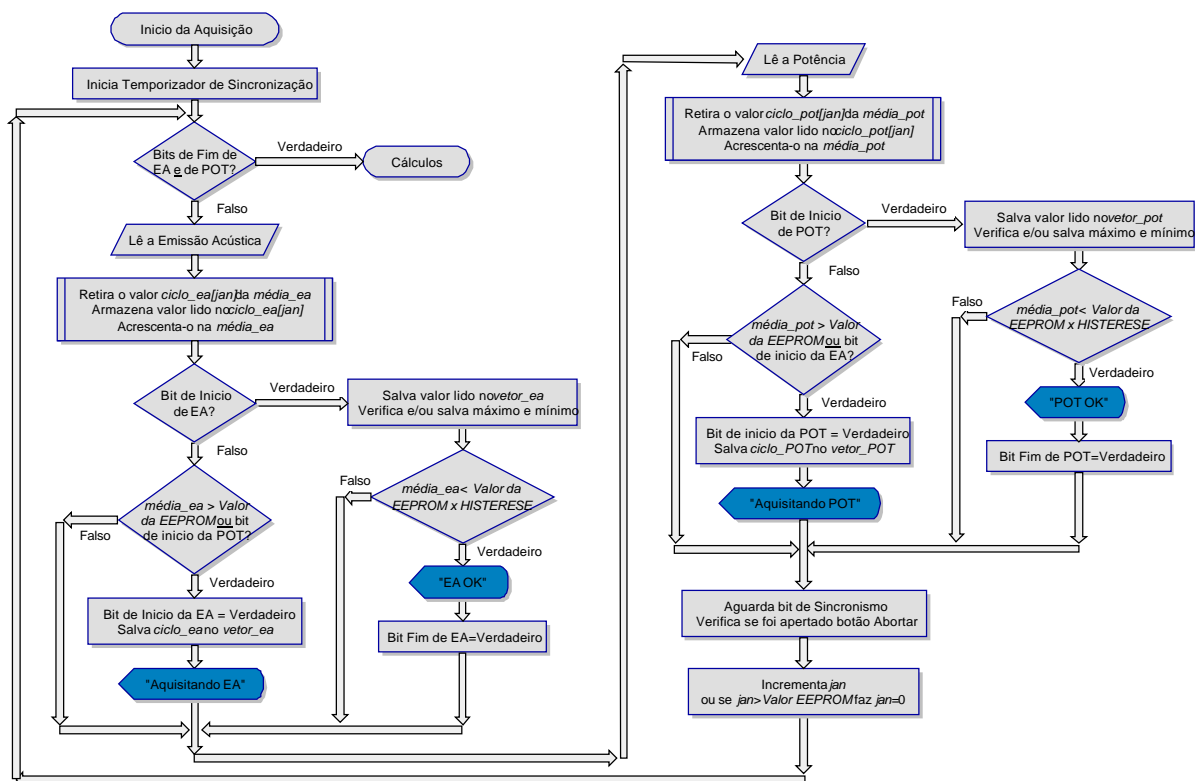


Figura 50 – Fluxograma do Modo de Aquisição

Durante todo o processamento do algoritmo, Figura 50, a janela cíclica fica monitorando os últimos n valores e mostrando no display a imagem da Figura 51. Se ocorrer da média da janela ficar abaixo do limiar fixado, deveria sinalizar o fim da aquisição no seu respectivo *flag*. Entretanto, para evitar problemas pode-se alterar a Histerese no quinto parâmetro da EEPROM para que o sistema não pare indevidamente de capturar, garantindo que os últimos sinais lidos no ADC sejam realmente menores. Esse parâmetro, em percentagem, reduz o limiar do terceiro e quarto parâmetro da EEPROM, evitando ruídos ou depressões (*damping*) do sinal.



Figura 51 – Display sinalizando a captura de dados

O processo de aquisição é idêntico tanto para a emissão acústica quanto para a potência do motor e cada um sinaliza o seu respectivo *flag*. Assim que não houver mais nenhum dos dois sinais, o hardware sairá do *loop* (laço) de aquisição.

4.7.3 Cálculos

Após terminar as aquisições o temporizador de aquisição é imediatamente desligado do sistema e a memória RAM terá dois vetores, um de emissão acústica e outro de potência, contendo os valores da quantidade total de pontos, do somatório dos valores binários total – $\bullet x_i$ e do somatório quadrático dos valores binários total – $\bullet x_i^2$.

Como são valores binários, converte-se em tensão multiplicando todos os somatórios pela constante da Equação 40:

$$V_{ref} / (2^{10} - 1) = 5.0V / 1023 \quad (40)$$

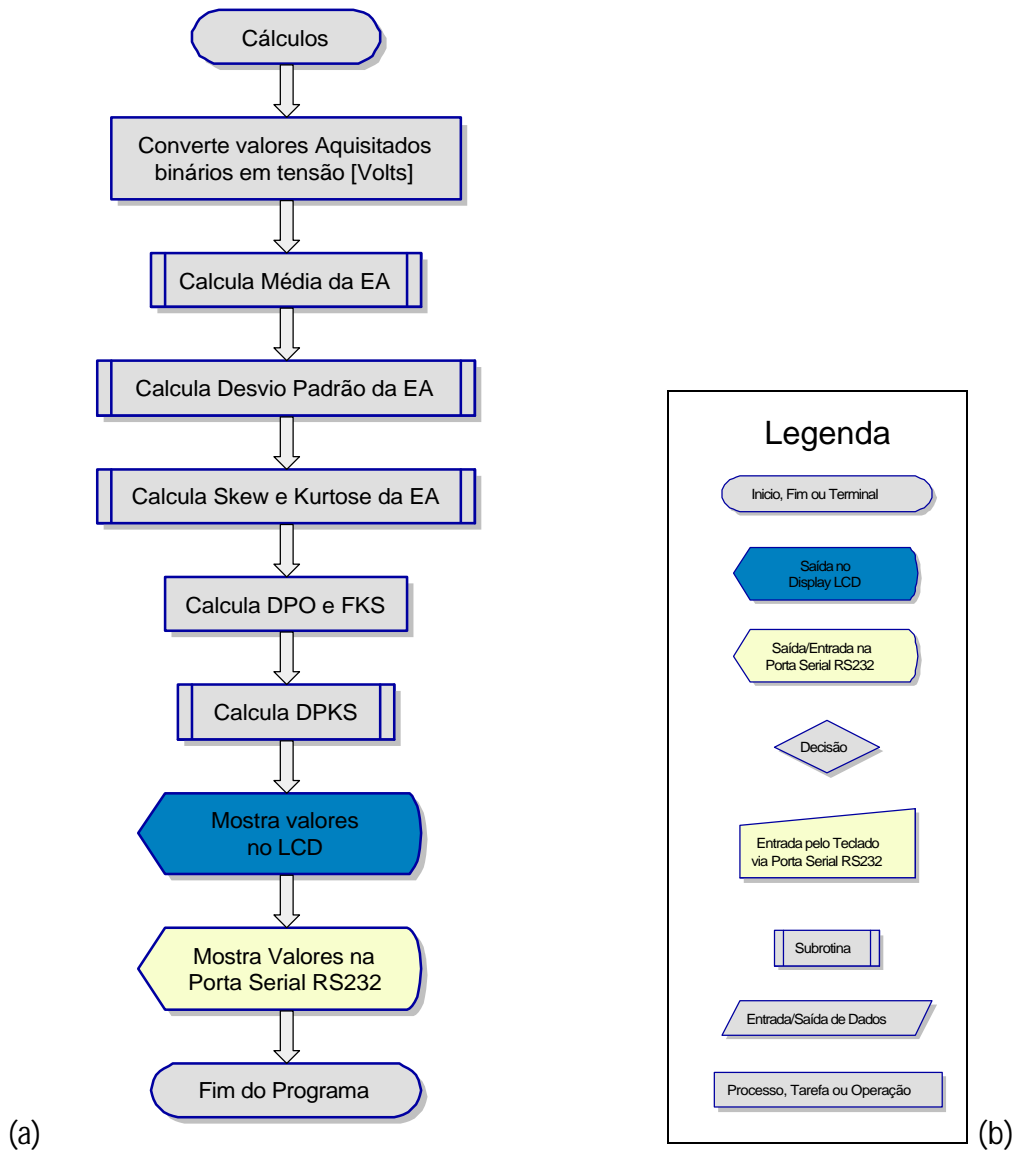


Figura 52 – a) Fluxograma dos Cálculos b) Legenda

Através das funções matemáticas do item 4.2 calcula-se: a média, o desvio-padrão e o valor RMS dos sinais. Em seguida são calculados os parâmetros indicadores de queima: EA_{RMS} , POT, DPO, DPKS, DIFP e VARPO.

Os resultados calculados são colocados na porta de saída serial RS-232 e depois no display (Figura 53). Não é, entretanto, necessário conectar a um computador para funcionar o hardware ou ver os resultados, pois se não estiver conectado, o software segue em frente, sendo somente necessário a conexão com um computador quando estiver no modo de configuração dos parâmetros da EEPROM.



Figura 53 – Exemplos de resultados no display

A implantação de um alarme no conector de expansão, ligado ao pino RC3, sinaliza caso um desses parâmetros estatísticos de queima fora ultrapassado, indicando ao operador que houve a queima da peça, sendo ajustáveis na programação do software.

5 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE QUEIMA

Uma vez capturados os dados de emissão acústica e potência elétrica disponíveis em arquivos binários, foi utilizado o software MatLAB para o processamento dos sinais onde se utilizou um número considerável de ferramentas estatísticas, tais como valor RMS, desvio padrão, autocorrelação, fft, entre outros, como descritas a seguir.

5.1 RMS DO SINAL DE EA

Entre um certo intervalo $\bullet t$, o valor RMS do sinal puro de emissão acústica pode ser expresso pela equação 41 (Liu, 1991; Webster et al., 1996).

$$AE_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t AE_{RMS}^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N AE_{RMS}^2(i)} \quad (41)$$

onde: T é o tempo de integração

N é o número discreto de dados de EA no intervalo de T

AE_{rms} é a emissão acústica obtida através do uso de filtro analógico ou digital RMS.

5.2 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)

A Transformada Discreta de Fourier (DFT) é largamente utilizada hoje em dia devido ao amplo alcance dos processamentos digital de sinais e a microeletrônica evoluída. Embora a DFT é um dos procedimentos matemáticos mais diretos para determinar o conteúdo de frequência de uma seqüência no domínio de tempo discreto, ela é ineficaz devido a lentidão do processo. Conforme o número de pontos em uma DFT aumenta para centenas ou milhares, a quantidade de números necessária para resolvê-la é extremamente excessiva. Depois que o algoritmo de Cooley-Tukey foi publicado em 1965, publicaram-se numerosos artigos com melhorias, modificações e realizações do assim chamados algoritmos de transformada rápida de Fourier (FFT) (Yang & Chen, 2002). Antes do advento da FFT, milhares de pontos da DFT levavam tanto tempo para serem calculados que o seu uso era restrito apenas para grandes centros computacionais de pesquisas e universidades (Lyons, 1997).

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j)W_N^{(j-1)(k-1)} \quad (42)$$

onde: $X = \text{fft}(x)$

$$W_N = e^{(-2\pi i)/N}$$

N é o número de pontos de aquisição

Para isso, na Equação 42 deve-se usar 2^N pontos de aquisição, sendo N um número inteiro, que é proporcional à taxa máxima de amostragem em Hz.

5.3 MÉDIA E DESVIO PADRÃO

São respectivamente empregados para a determinação do valor médio e a dispersão do sinal. Deseja-se descrever muitas vezes a amplitude da distribuição, a simetria e a sua forma. Todas essas características são resumidas pelos momentos da distribuição, ou derivadas.

O desvio padrão (este termo foi originalmente usado por Pearson, 1894) é comumente usado na medida da variação. O desvio padrão de uma população de valores é definido conforme equação 43.

$$S = \left(\frac{\sum (x_i - m)^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (43)$$

onde

μ é a média da população

N é o tamanho da população.

A amostra estimada do desvio padrão da população (S) é calculada como descreve a equação 44 (Johnson, 1997).

$$S = \left[\frac{\sum (x_i - m)^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (44)$$

onde:

μ é a média da amostra

n é o tamanho da amostra

5.4 DPO

Aguiar (1997) tem demonstrado que o sinal RMS de emissão acústica e o sinal da potência de corte combinados podem fornecer parâmetros expressivos para a indicação da queima da peça na retificação plana. Sua configuração utilizou um sensor fixo de EA acoplado próximo da peça e um sensor de potência elétrica do motor de acionamento do rebolo para as medidas da força de corte. Da combinação entre os sinais, Aguiar (1997) obteve um parâmetro indicativo para a queima da peça, denominado DPO, que consiste da relação entre o desvio padrão do sinal RMS de emissão acústica e a potência média de corte por passada do rebolo.

$$DPO = S(EA) \cdot MAX(POT) \quad (45)$$

onde: $S(EA)$ é o desvio padrão do sinal de emissão acústica por passada [V],

$MAX(POT)$ é a potência máxima por passada [W].

5.5 PARÂMETRO DPKS

O parâmetro DPKS surgiu da necessidade de se aumentar a sensibilidade do parâmetro DPO e do FKS, entretanto, sem necessariamente se preocupar com a sua amplitude e sim com a variação entre as passadas. Através deste parâmetro, foi encontrado o momento exato onde a queima teve início, num ensaio com varias passadas, aprofundando o rebolo constantemente.

O DPKS é calculado pelo desvio padrão da Emissão Acústica multiplicado pela somatória da potência subtraída do seu desvio padrão elevado à quarta potência, representado pela Equação 46.

$$DPKS = \left(\sum_{i=1}^{i=m} (POT(i) - S(POT))^4 \right) * S(EA) \quad (46)$$

onde:

i é o índice da potência que varia de 1 até m pontos de cada passada;

m é o número de pontos da passada;

$POT(i)$ é o valor instantâneo da potência;

$S(POT)$ é o desvio padrão da potência na passada;

$S(EA)$ é o desvio padrão da Emissão Acústica RMS da passada;

5.6 PARÂMETRO DIFP

O parâmetro é realizado com base na variação da potência e não pelo sinal bruto, evitando assim que variações da potência alterem os resultados (Dotto, 2004).

O parâmetro DIFP na verdade utiliza a reta crescente e calcula o seno do ângulo alfa (α) máximo durante o intervalo. A Equação 47 apresenta o parâmetro DIFP.

$$DIFP = 100 \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot \text{MAX}(POT) \cdot \text{MEDIA}(EA) \quad (47)$$

onde:

$\text{Max}(POT)$ é a máxima potência presente na passada;

$\text{Média}(EA)$ é a média do sinal de Emissão Acústica na passada;

$\text{sen}(\alpha)$ é o seno do ângulo formado entre a potência máxima e o número de elementos normalizados.

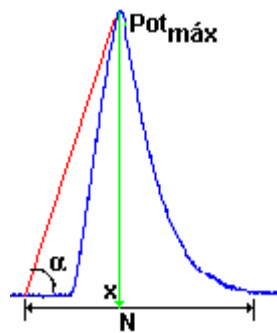


Figura 54 – Ângulo para o cálculo de DIFP

5.7 PARÂMETRO VARPO

O parâmetro proposto VARPO, apresentado na Equação 48, destaca mais os valores da Emissão Acústica por estarem elevados ao quadrado. Os sinais de emissão acústica apresentam características dinâmicas da queima o que não ocorre com a potência por atrasar seu sinal devido às inércias do sistema.

$$VARPO = 20 \cdot S(EA)^2 \cdot \text{MAX}(POT) \quad (48)$$

onde: $S(EA)$ é o desvio padrão do sinal de emissão acústica por passada

$\text{MAX}(POT)$ é a potência máxima por passada.

5.8 AUTOCORRELAÇÃO – COR

A correlação temporal de uma função ϕ_{xy} é definida como descrito na equação 49 (Oppenheim, 1998).

$$f_{xy}[t] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t+t) \cdot y(t) \cdot dt \quad (49)$$

onde: f_{xx} é comumente referida como autocorrelação do sinal $x(t)$.

- é o atraso entre os sinais $x(t)$ e $y(t)$, em tempo ou em pontos.

Discretizando, obtém-se a Equação 50:

$$f_{xy}[n] = \sum_{k=1}^{N-t} x[k] \cdot y[t+k] \quad (50)$$

A correlação requer muitos cálculos. Se um sinal for de comprimento M e o outro for de comprimento N , serão necessárias $N \times M$ multiplicações para calcular a função de correlação inteira. Aplicando aos sinais de emissão acústica e potência de corte, obtém-se a Equação 51:

$$COR(n) = \sum_{k=1}^{N-t} EA[k] \cdot POT[t+k] \quad (51)$$

5.9 PARÂMETRO CONVOLUÇÃO – CONVO2

Fazendo o somatório da convolução bidimensional dos vetores de potência e emissão acústica, obteve-se outro parâmetro de análise, dada pela Equação 52:

$$CONVO2 = \sum_{i=1}^n Conv2(EA, POT) \quad (52)$$

A convolução bidimensional é dada Equação 53:

$$Conv2(EA_{n_1}, POT_{n_2}) = \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{\infty} EA(k_1, k_2) \cdot POT(n_1 - k_1, n_2 - k_2) \quad (53)$$

Para se montar as matrizes de EA_{k_1, k_2} e de POT_{k_1, k_2} , deve tomar os pontos durante a passada e dividi-los em k_2 colunas, dependendo do número de elementos coletados na aquisição, com k_1 linhas fixas (4096 linhas para este trabalho).

Como o algoritmo apresenta a forma *straightforward*, que faz o cálculo de um ponto da matriz com todos os outros da matriz adjacente, o cálculo de CONVO2 é extremamente lento dependendo da quantidade de pontos da janela processada.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante os ensaios na retificadora foram coletados os dados que foram processados no LADAPS, Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais na UNESP-Bauru, que geraram os gráficos com os parâmetros estatísticos de análise de queima. Um ensaio foi feito utilizando o hardware proposto.

Após os ensaios na retificadora, foram realizados os testes de visualização manual e informatizada das peças, por meio de fotografias e um software quantizador de queima pela análise de cores. Também foram realizados ensaios de rugosidade e microdureza.

6.1 VISUALIZAÇÃO DAS PEÇAS

A Tabela 6 mostra as faces das peças usinadas as quais visualmente se pode observar que a coloração vai do cinza claro, que caracteriza uma peça sem queima, até o preto, que caracteriza uma queima severa, dependendo do grau de queima ocorrido (Malkin, 1989). As peças foram fotografadas digitalmente e então, posteriormente, analisadas pelo software de “Quantificação de Queima” (Dotto, 2004) que analisa a intensidade luminosa, pixel a pixel.

Tabela 6 – Fotografias das peças usinadas na retificadora plana

10 •m	C1	C2	C3
22,5 •m	H1	H2	H3
30 •m	K1	K2	K3
35 •m	L1	L2	L3
40 •m	M1	M2	M3
50 •m	O1	O2	O3
De- graus	DG1	DG2	DG3

Para fotografá-las foi necessário um ambiente relativamente escuro, abrindo a objetiva da câmera digital Sony CyberShot DSC-S60 em 1,0 segundo. Retiraram-se todos objetos reluzentes próximos às peças e temporizou a fotografia, estando a câmera apoiada sobre um pedestal para que não houvesse trepidações enquanto a objetiva estivesse aberta. Isso é necessário devido às superfícies metálicas serem tratadas como espelhos por equipamentos digitalizadores, e que, se tivesse grande quantidade de luz no ambiente, iriam refleti-las à objetiva desfocando a fotografia.

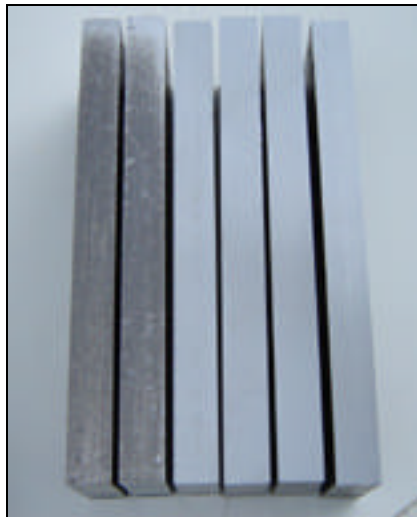


Figura 55 – Fotografia tirada dos corpos de provas ensaiados

Após recortar as fotos e tratá-las no Adobe PhotoShop CS, as imagens foram abertas uma a uma no “Quantificador de Queima”, mostrado na Figura 56, que fez sua quantificação do padrão de cor adotado e que geraram a Tabela 7.



Figura 56 - Software de Quantificação de Queima

A “Barra de Cores” permite a modificação do limiar entre as situações de queima e não queima, visto na Figura 57. Esse limiar, o qual se vê seu valor na caixa “Padrão de Cor” do software, é o que determina qual o valor de luminosidade que é considerado como queima na imagem da peça ou abaixo dele, qual não é considerado como queima, e que, dentro desses valores de queima é distribuído as situações de queima média, leve e severa. O Padrão de Cor adotado para as figuras foi 999999.

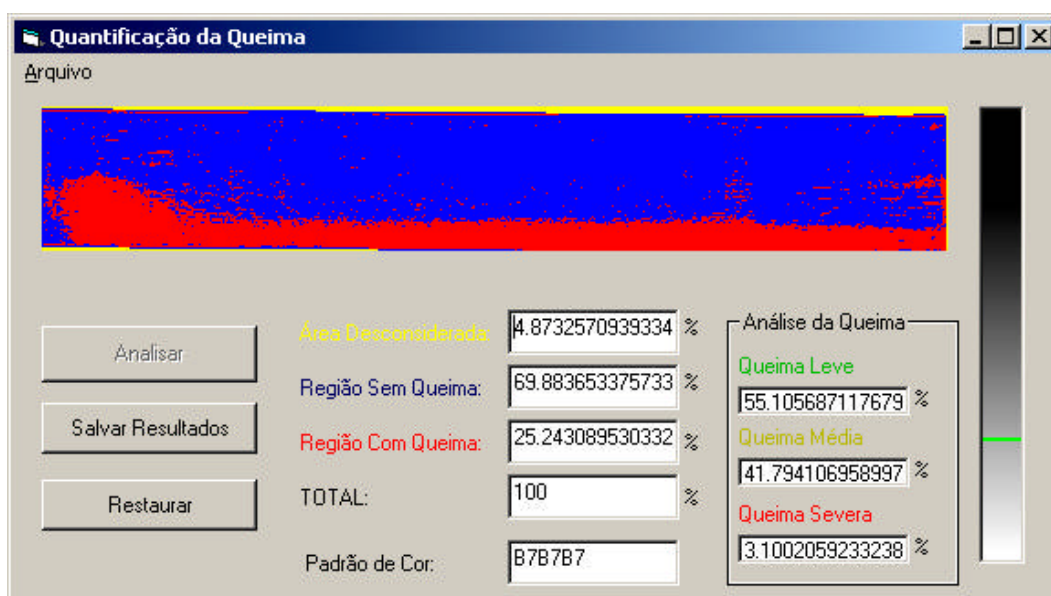


Figura 57 – Exemplo de Resultados Obtidos do Software de Quantificação de Queima

Tabela 7 – Quantificação das Cores das peças ensaiadas

Prof. a[• m]	Código	Área Desconsi-derada %	Região Sem Queima %	Região Com Queima %	Análise da Area de Queima		
					Queima Leve %	Queima Média %	Queima Severa %
10	C1	0	99,2771	0,7229	0,7506	0,0577	99,1917
10	C2	0	99,2126	0,7874	4,6537	0,8117	94,5346
10	C3	0	99,2452	0,7548	4,9127	0,2729	94,8144
22,5	H1	0	99,2917	0,7083	0,0575	0	99,9425
22,5	H2	0	99,2384	0,7616	4,4879	1,6367	93,8754
22,5	H3	0	90,2764	9,7236	91,9876	0,5921	7,4203
30	K1	0	98,7675	1,2325	17,1298	7,3227	75,5476
30	K2	0	99,2784	0,7216	2,933	0,4981	96,5689
30	K3	0	98,6254	1,3746	46,7862	0,1236	53,0902
35	L1	0	97,4819	2,5181	70,8054	0	29,1946
35	L2	0	21,0156	78,9844	11,4166	24,7039	63,8796
35	L3	0,0009	6,836	93,1632	9,0492	11,6115	79,3393
40	M1	0	20,4194	79,5806	27,6442	42,5832	29,7725
40	M2	0	7,5475	92,4525	6,3825	13,5095	80,108
40	M3	0	9,958	90,042	15,4089	36,123	48,4681
50	O1	0,0004	20,256	79,7436	19,3185	40,5303	40,1512
50	O2	0	3,458	96,542	3,7335	15,7469	80,5196
50	O3	0,0012	4,0968	95,9019	5,3637	21,3245	73,3118
Degrau	DG1	0	72,4259	27,5741	18,262	57,8766	23,8614
Degrau	DG2	0	85,5994	14,4006	58,5007	30,5858	10,9135
Degrau	DG3	0,0008	64,2392	35,76	6,9377	14,2301	78,8322

Observa-se que para estas condições experimentais – tipo de aço e rebolo, características de dressagem, velocidades, fluido de corte e máquina retificadora – houve uma faixa para a profundidade de corte onde a queima passa a ocorrer. Observando a Tabela 7, após a profundidade de corte ser de 35 μm sobre as superfícies usinadas, a região com queima passou de valores menores que 9,7%, peça H3, para valores percentuais maiores que 79%, peça L2.

Destaca-se com isso que a profundidade de corte é necessariamente importante para as condições de queima na retificação. Outra observação é que a queima que ocorre no Aço



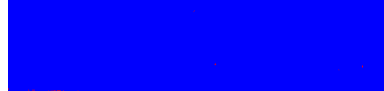
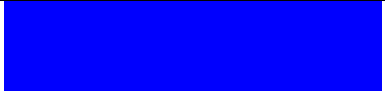
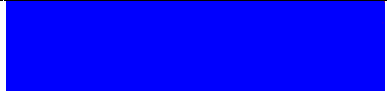





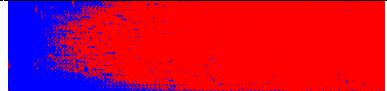
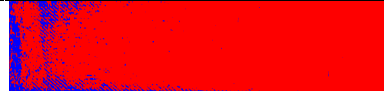
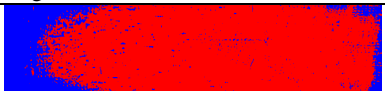
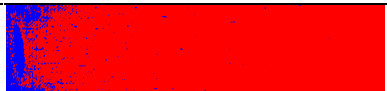
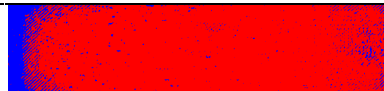
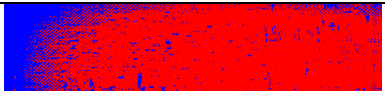
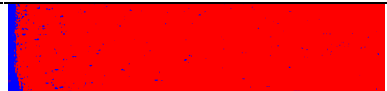
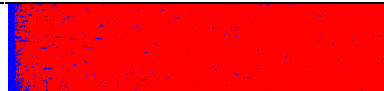
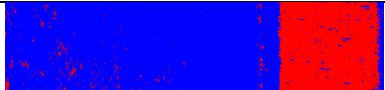
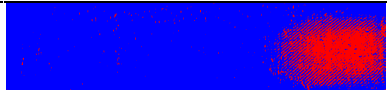
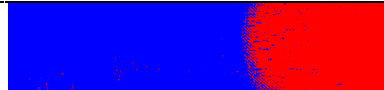
ABNT 1020 não é de forma gradativa ao aprofundar o corte, e ocorre de maneira intensa quando surge sobre a superfície da peça, classificando-as como queima severa (ver Tabela 8).

Para a distribuição da quantificação entre queima leve, queima média ou queima severa, dentro da região classificada como ocorrência de queima, não houve linearidade nos resultados. Isso pode ser observado, tanto quando não houve queima – peça H2 com 93,9% de queima severa dentro de 0,76% de região de queima e peça K2 com 96,6% de queima severa dentro de 0,72% de região de queima – quanto quando houve queima – peça L3 com 79,3% de queima severa dentro de 93,2% de região de queima e peça O2 com 80,5% de queima severa dentro de 96,5% de região de queima.

Para os degraus, as quantificações cromatográficas das peças ensaiadas ficaram entre 14,4% e 35,7% de queima sobre a peça. Idealmente, um terço da peça apresenta profundidade de 40• m, ou seja, a queima deveria ocorrer em 33,3%. Mas a queima não ocorre de maneira instantânea ao aplicar o corte. A temperatura da peça vai se elevando e propagando junto ao rebolo, aquecendo a superfície e acumulando calor para que ocorra a queima (Mamalis, 2003). Como o fenômeno de queima na retificação é muito sensível, e, as peças, por mais minuciosas que tenham sido elaboradas, sempre há um erro devido a precisão dos equipamentos (paralaxe) e ao próprio material na formação de suas grades cristalinas do metal (Schimdt, 1979), além de o material ter um relaxamento nessa grade ao sofrer um processo industrial.

A Tabela 8 mostra todas as peças identificadas como queima pelo padrão de cor do software e uma análise visual das peças. Vê-se que algumas peças, H3 (91,0% de queima leve dentro de 9,7% de região identificada como queima), K3 (46,8% de queima leve dentro de 1,4% de região identificada como queima) e L1 (70,8% de queima leve dentro de 2,5% de região identificada como queima) aparecem pequenas regiões que foram identificadas como queima leve devido ao software não conseguir distinguir se a coloração estava ou não dentro desta região para o padrão de cor utilizado. Essas variações se devem as condições de iluminação e de curvas cromatográficas que o software não consegue predizer por ser apenas um classificador dos três níveis dependentes e muito sensíveis do padrão de cor adotado, para o aço ABNT 1020, entretanto gera um bom parâmetro para o percentual de queima de uma superfície retificada.

Tabela 8 – Análise do Padrão de Cor

Peça a[•m]	1	2	3
C 10•m	 Sem Queima	 Sem Queima	 Sem Queima
H 22,5•m	 Sem Queima	 Sem Queima	 Faixa de Queima Leve Sem Queima: total Queima Leve: 30-80mm (faixa central) Queima Média: - Queima Severa: -
K 30•m	 Sem Queima	 Sem Queima Sem Queima: total Queima Leve: - Queima Média: - Queima Severa: - Rugosidade alta	 Sem Queima Sem Queima: total Queima Leve: - Queima Média: - Queima Severa: - Rugosidade alta
L 35•m	 Sem Queima Sem Queima: total Queima Leve: - Queima Média: - Queima Severa: - Rugosidade média	 Queima Severa Sem Queima: 0-10mm Queima Leve: 10-15mm Queima Média: 15-27mm Queima Severa: total	 Queima Severa Sem Queima: - Queima Leve: 0-14mm Queima Média: 14-24mm Queima Severa: total
M 40•m	 Queima Severa Sem Queima: 0-10 e 145-152mm Queima Leve: 10-20 e 130-145mm Queima Média: 110-130mm Queima Severa: 20-110mm	 Queima Severa Sem Queima: 0-8mm Queima Leve: - Queima Média: 8-17mm Queima Severa: total	 Queima Severa Sem Queima: 0-6mm Queima Leve: 6-13mm Queima Média: - Queima Severa: total
O 50•m	 Queima Severa Sem Queima: 0-8mm Queima Leve: 8-20mm Queima Média: 20-30 e 140-152mm Queima Severa: 30-140mm	 Queima Severa Sem Queima: 0-3mm Queima Leve: - Queima Média: 130-152mm Queima Severa: total	 Queima Severa Sem Queima: 0-3mm Queima Leve: - Queima Média: 3-4mm Queima Severa: total
DG1 DG2 DG3	 Queima Severa Sem Queima: 0-1mm Queima Leve: 42-50mm Queima Média: - Queima Severa: 1-42mm (Degrau)	 Queima Severa Sem Queima: 0-96mm Queima Leve: - Queima Média: - Queima Severa: 96-152 (Degrau)	 Queima Leve Sem Queima: 0-107mm Queima Leve: 107-152mm Queima Média: - Queima Severa: -

6.2 RUGOSIDADE MÉDIA

Uma das etapas após os ensaios experimentais de retificação foi medir a rugosidade média, conhecida como Ra (Average Roughness), dada em μm , a fim de obter maiores informações da qualidade da superfície de cada face usinada.

Para os testes, foi utilizado o rugosímetro da Taylor Hobson, modelo Surtronic 3⁺⁺, onde foram realizadas medidas espaçadas entre si de 10 mm ao longo de cada face do corpo de prova. (Ver item 4.2)

Dos valores medidos traçou-se os gráficos, sobre cada uma das faces amostradas, das Figura 58 até a Figura 63. Os valores médios para cada face pode serem observados na Tabela 9.

Destas médias, tem-se a média de Ra para cada profundidade de corte a , também representados na Tabela 9 e esboçadas na Figura 64. O desvio-padrão para cada profundidade de corte a ao longo das faces também foram mostradas na mesma tabela, que não puderam ser representadas devido à desordem que provocaria no gráfico.

A Figura 65 é a visualização gráfica das médias totais de Ra , em toda a passada, para cada profundidade de corte a e seu respectivo desvio-padrão.

Realizaram-se os mesmos procedimentos para os degraus, ou seja, medido três vezes cada faixa da peça e calculado sua média de Ra e o respectivo desvio-padrão. Esses resultados estão esboçados na Figura 66.

Tabela 9 – Rugosidade Média medida nas secções de cada corpo (µm)

Secção	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Total
Peça 10µm																
C1	0,45	0,39	0,49	0,57	0,50	0,59	0,46	0,40	0,43	0,48	0,60	0,59	0,45	0,44	0,41	
C2	0,53	0,71	0,59	0,55	0,54	0,54	0,56	0,53	0,55	0,63	0,60	0,51	0,53	0,73	0,66	
C3	0,41	0,51	0,59	0,50	0,47	0,43	0,51	0,46	0,44	0,43	0,46	0,48	0,44	0,47	0,47	
Média	0,46	0,53	0,56	0,54	0,50	0,52	0,51	0,46	0,47	0,51	0,55	0,53	0,47	0,55	0,51	0,51
Desvio	0,051	0,142	0,054	0,036	0,032	0,073	0,045	0,056	0,056	0,088	0,071	0,058	0,046	0,194	0,067	0,086
22,5µm																
H1	0,72	0,64	0,85	0,81	0,79	0,73	0,69	0,70	0,85	0,79	0,65	0,74	0,68	1,00	0,78	
H2	0,80	0,61	0,85	0,59	0,49	0,63	0,51	0,38	0,41	0,47	0,54	0,49	0,42	0,51	0,45	
H3	0,73	0,99	0,77	1,29	1,10	0,86	0,97	0,75	0,74	0,70	0,60	0,67	0,60	0,74	0,67	
Média	0,75	0,75	0,82	0,90	0,79	0,74	0,72	0,61	0,67	0,65	0,60	0,63	0,57	0,75	0,64	0,71
Desvio	0,047	0,182	0,142	0,307	0,275	0,101	0,199	0,174	0,201	0,144	0,049	0,118	0,116	0,225	0,145	0,190
30µm																
K1	0,89	0,86	0,77	0,68	0,93	1,27	1,22	0,85	1,31	0,73	0,84	1,00	0,84	0,73	0,79	
K2	1,51	1,39	1,50	1,39	1,30	1,42	1,31	1,36	1,28	1,26	1,33	1,30	1,27	1,34	1,38	
K3	0,81	1,13	1,08	1,28	0,94	1,10	1,18	1,06	1,02	1,07	1,08	1,26	1,22	1,05	1,12	
Média	1,07	1,13	1,12	1,12	1,06	1,26	1,24	1,09	1,20	1,02	1,08	1,19	1,11	1,04	1,10	1,12
Desvio	0,339	0,228	0,319	0,332	0,194	0,139	0,030	0,252	0,304	0,242	0,217	0,167	0,300	0,255	0,275	0,247
35µm																
L1	0,87	1,01	1,50	1,19	1,89	0,71	1,18	0,67	0,69	0,60	0,74	0,56	0,71	0,70	0,62	
L2	0,78	0,86	1,05	0,93	1,06	0,95	1,01	0,86	0,88	0,81	0,79	0,81	0,85	0,90	1,11	
L3	0,93	1,15	1,15	0,94	0,72	1,11	1,25	1,06	0,99	0,79	0,87	1,19	0,88	0,91	0,93	
Média	0,86	1,00	1,23	1,02	1,22	0,92	1,14	0,86	0,85	0,73	0,80	0,85	0,82	0,84	0,89	0,94
Desvio	0,106	0,136	0,218	0,150	0,520	0,179	0,154	0,189	0,139	0,088	0,060	0,297	0,065	0,164	0,250	0,250
40µm																
M1	0,45	0,91	0,84	0,89	1,15	1,15	0,76	1,18	1,46	1,34	1,31	1,08	1,05	1,15	1,32	
M2	0,74	0,96	1,17	0,73	1,15	1,13	1,21	1,14	0,97	1,17	1,13	1,13	1,33	1,38	1,64	
M3	1,07	1,02	1,04	1,30	0,83	0,96	1,05	1,07	1,25	0,92	1,25	1,24	1,11	1,42	1,57	
Média	0,75	0,96	1,02	0,97	1,04	1,08	1,01	1,13	1,22	1,14	1,23	1,15	1,16	1,32	1,51	1,11
Desvio	0,271	0,055	0,148	0,257	0,160	0,093	0,279	0,104	0,225	0,189	0,144	0,070	0,169	0,095	0,179	0,246
50µm																
O1	0,92	1,17	1,18	1,09	0,97	1,55	0,96	1,02	0,81	0,95	1,00	1,06	1,19	1,35	1,61	
O2	0,68	1,31	1,76	1,38	1,18	1,61	1,64	1,75	1,77	1,45	1,31	1,32	1,49	1,81	1,86	
O3	1,09	1,07	1,68	1,81	1,08	1,73	1,72	1,55	1,79	1,38	1,72	1,56	1,46	1,72	1,73	
Média	0,90	1,18	1,54	1,42	1,08	1,63	1,44	1,44	1,45	1,26	1,34	1,31	1,38	1,62	1,74	1,38
Desvio	0,183	0,107	0,274	0,314	0,093	0,080	0,366	0,340	0,484	0,198	0,313	0,217	0,146	0,228	0,053	0,328
DG1																
DG1	0,51	0,57	0,53	0,32	0,46	0,40	0,59	0,74	0,94	1,39	1,19	1,13	1,51	1,38	1,47	
DG2	0,62	0,71	0,74	0,68	0,51	0,58	0,51	0,64	0,65	0,64	0,63	0,77	0,79	0,58	0,79	
DG3	0,61	0,50	0,72	0,67	0,79	0,79	0,78	0,56	0,87	0,76	1,59	0,95	1,22	0,96	1,07	

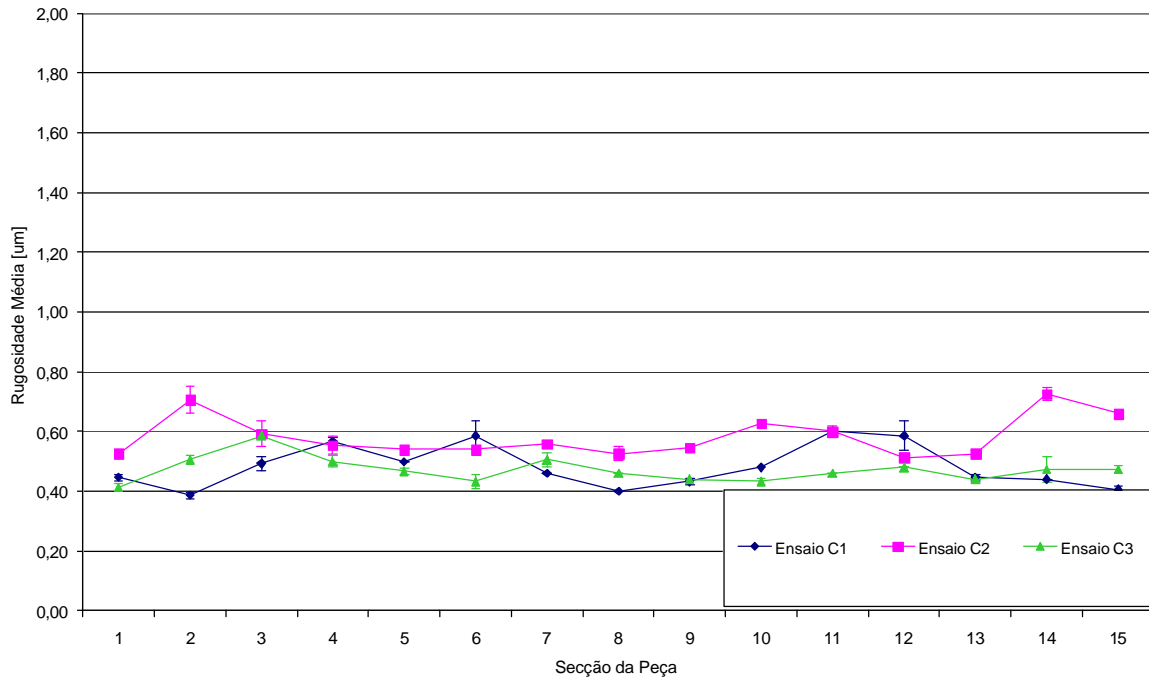


Figura 58 – Rugosidade Média ao longo das peças ensaiadas com $a = 10\mu\text{m}$

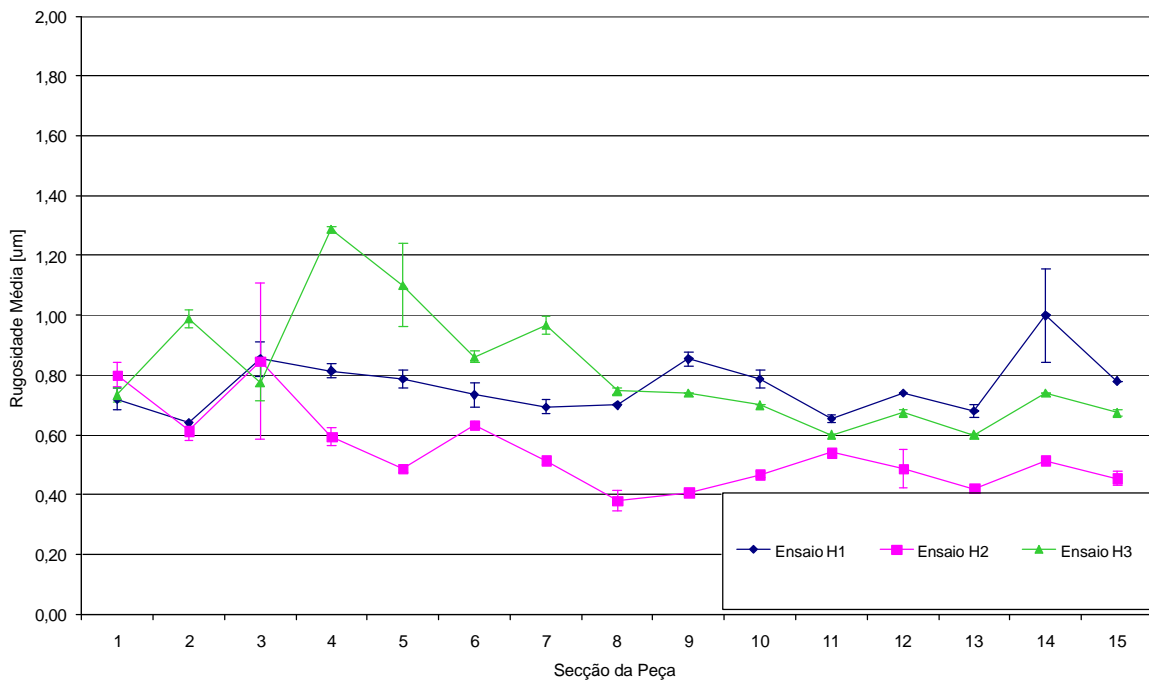


Figura 59 – Rugosidade Média ao longo das peças ensaiadas com $a = 22,5\mu\text{m}$

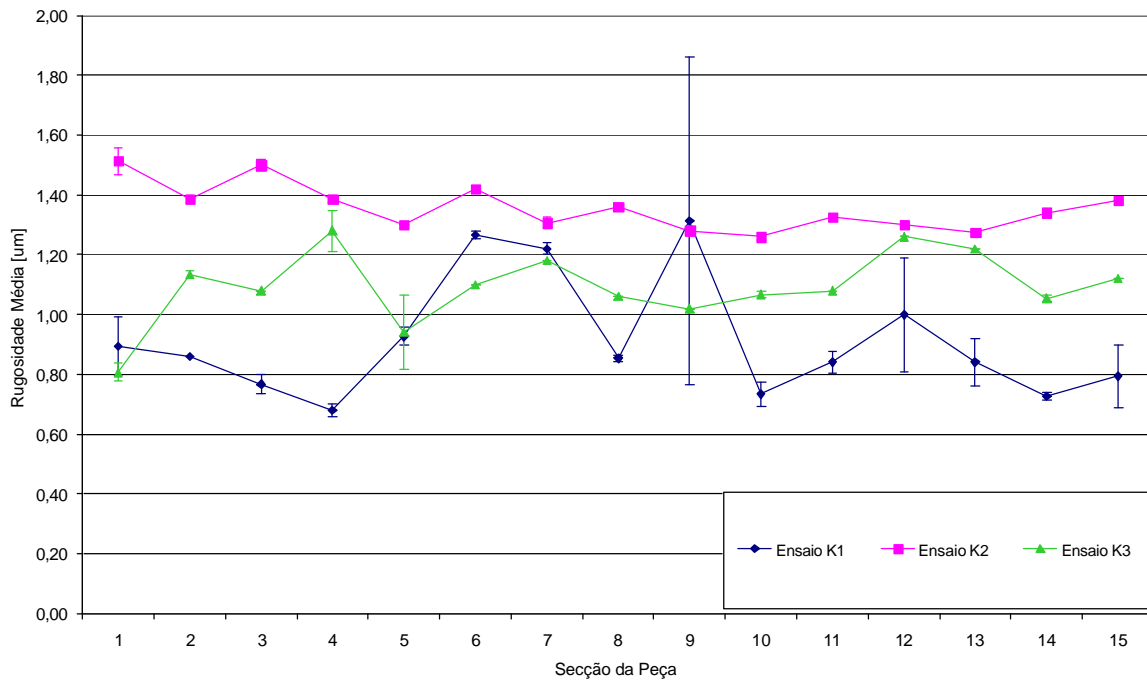


Figura 60 – Rugosidade Média ao longo das peças ensaiadas com $a = 30\mu\text{m}$

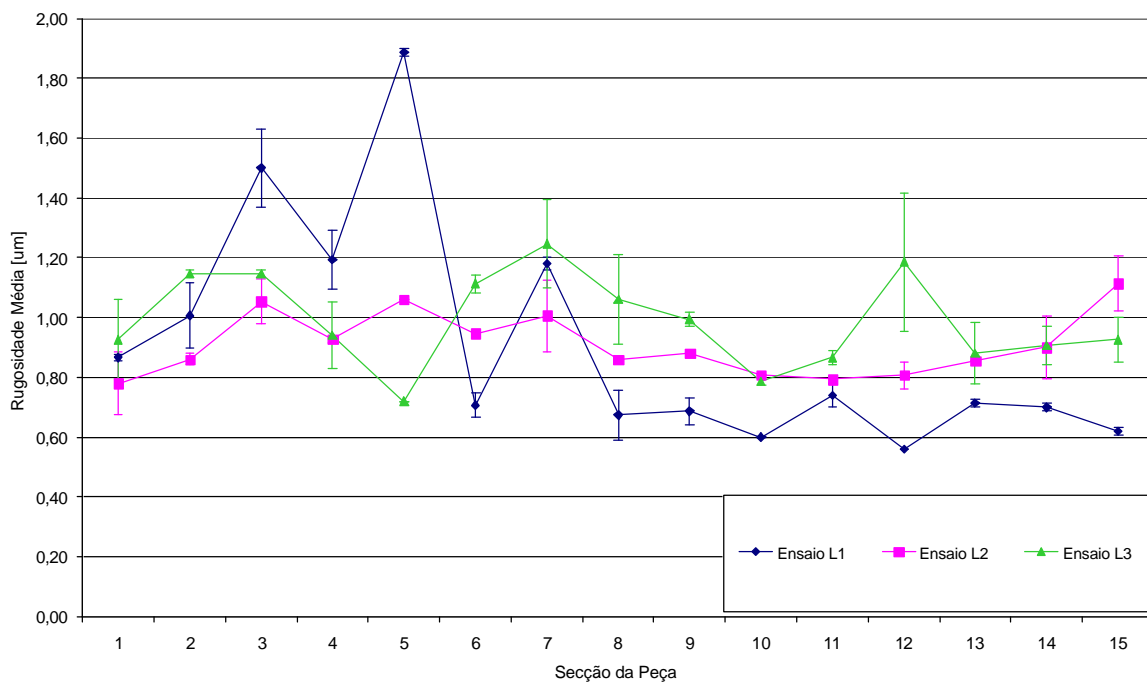


Figura 61 – Rugosidade Média ao longo das peças ensaiadas com $a = 35\mu\text{m}$

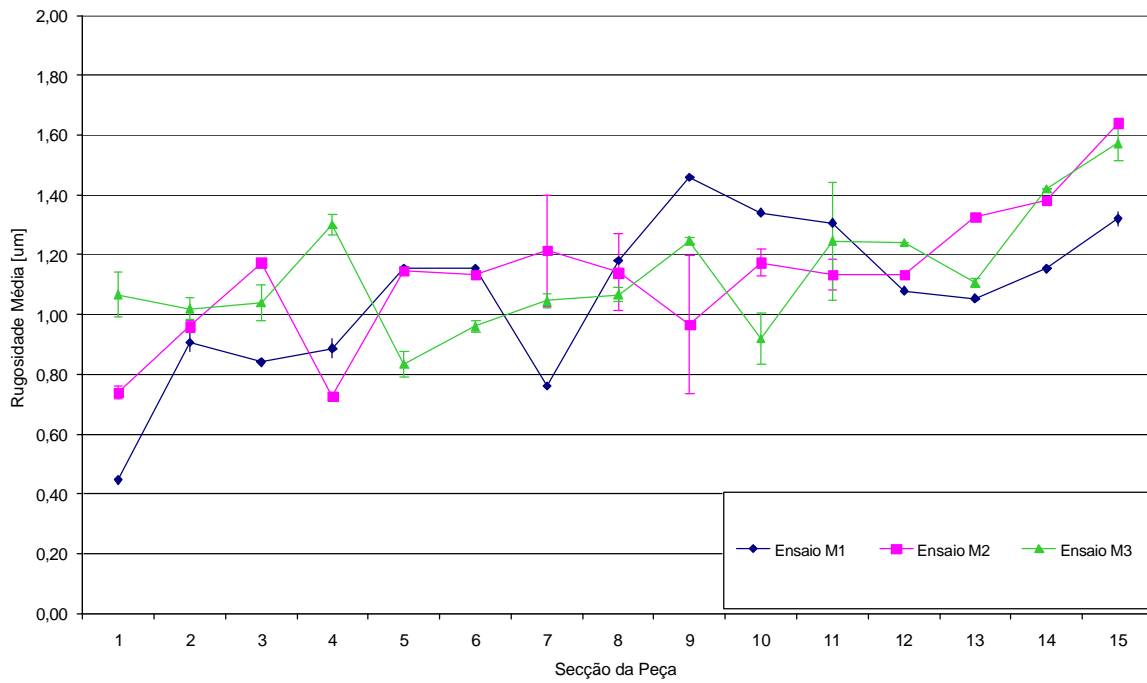


Figura 62 – Rugosidade Média ao longo das peças ensaiadas com $a = 40\mu\text{m}$

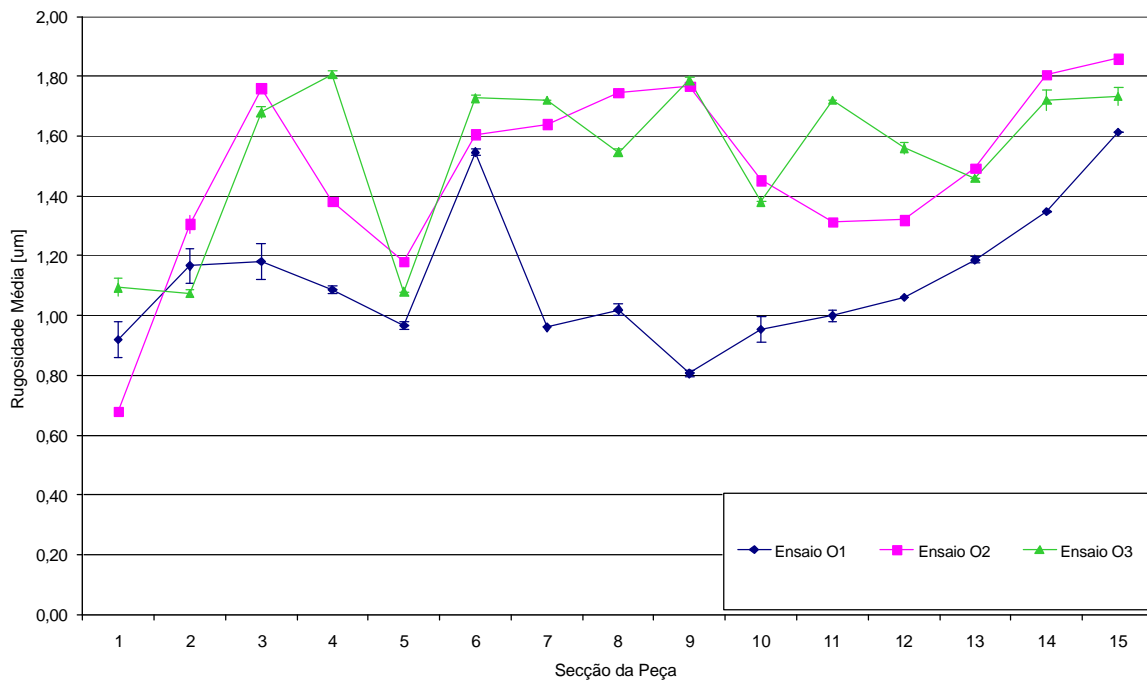


Figura 63 – Rugosidade Média ao longo das peças ensaiadas com $a = 50\mu\text{m}$

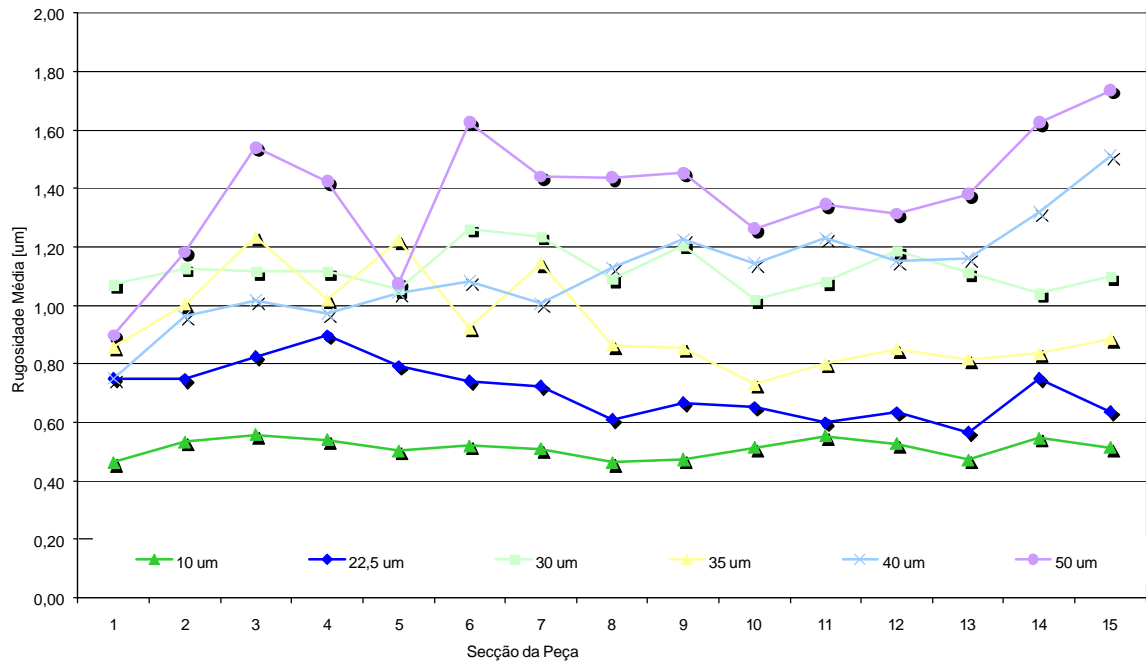


Figura 64 – Rugosidade Média obtida nos ensaios com as diferentes profundidades de corte

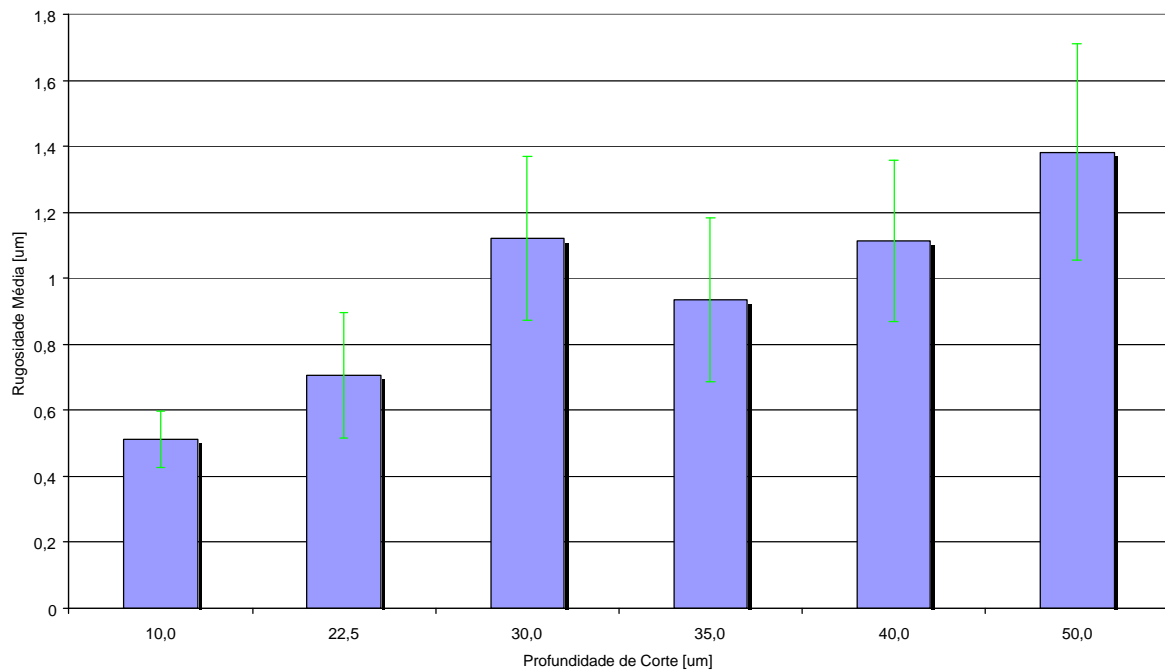


Figura 65 – Médias das Rugosidades das passadas para as diferentes profundidades de corte

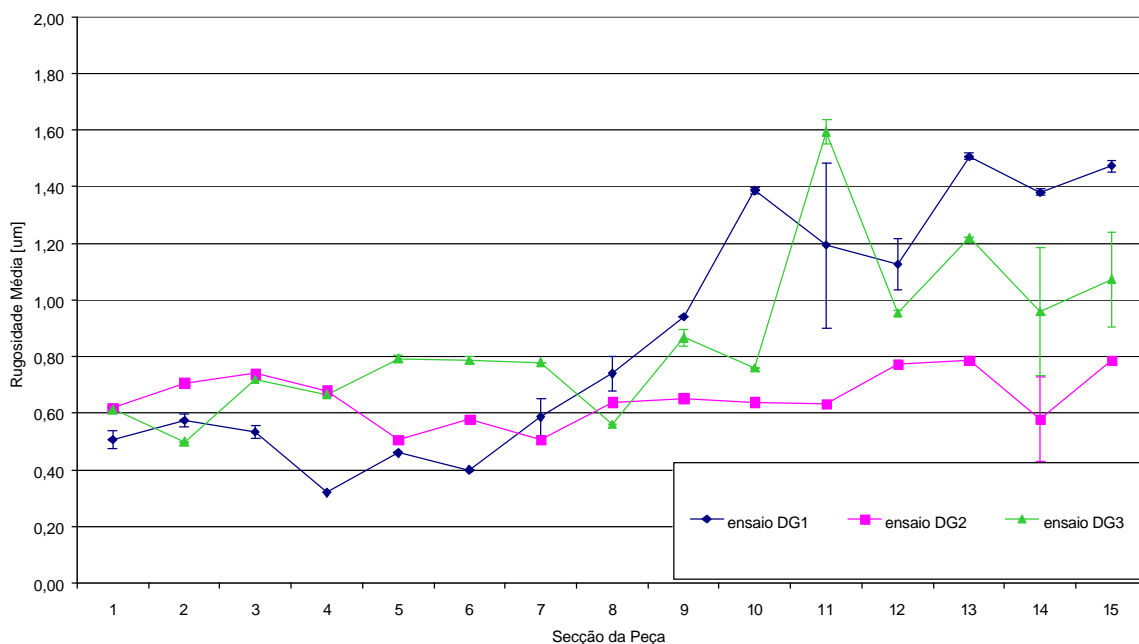


Figura 66 – Rugosidade Média ao longo das peças ensaiadas com degraus

De um modo geral, o comportamento das médias da Rugosidade Média Ra aumenta linearmente com a profundidade de corte a , conforme mostrado na Figura 65, com exceção para $a = 30 \mu\text{m}$ o qual houve um valor médio de Ra alto, principalmente devido a peça K2.

Para a Figura 58, a rugosidade média Ra ficou em torno de $0,51 \mu\text{m}$, sem grandes variações, o que certifica que nessas peças C1, C2 e C3 a retificação ficou mais uniforme, devido a pequena retirada de material das peças utilizando esta profundidade de corte e também a inoocorrência de queima sobre as peças. Nas outras peças, a rugosidade ficou inconstante, tendo alguns sobressaltos nos valores lidos (Figura 59 à Figura 63).

Em geral, verifica-se que a rugosidade média tem um comportamento dependente com a profundidade de corte a , mas não apresenta características diferentes para quando a ocorrência de queima na superfície da peça retificada, quando utilizado em aço ABNT 1020, não sendo um bom parâmetro para esse fim.

Comparou-se os gráficos de rugosidade com os gráficos de emissão acústica (Figura 80 à Figura 100), os quais obtiveram pequenas aproximações. Para a rugosidade da peça H3 na Figura 59, houve uma pequena elevação de Ra no primeiro quarto dos valores, também verificados nos valores de emissão acústica da Figura 85. Isso também ocorreu para a peça

L1, onde a rugosidade Ra do primeiro quarto sofreu uma elevação brusca na Figura 61, condizente com a emissão acústica da Figura 89.

As peças M1, M2 e M3 apresentaram suas rugosidades Ra (Figura 62) com comportamentos semelhantes as respectivas emissões acústicas (Figura 92 à Figura 94), as quais ambas apresentaram uma elevação quadrática no final da peça. Esses comportamentos são maiores percebidos na peça M1 que rugosidade e emissão acústica crescem durante toda a usinagem.

As rugosidades Ra das peças O1, O2 e O3 (Figura 63) também apresentam características semelhantes e o crescimento parabólico no final da peça, vistos nas Figura 95 à Figura 97.

A Figura 66 apresentou conforme o esperado, um aumento na rugosidade a medida que a profundidade de corte aumentou sobre a peça, a partir do ultimo terço da peça.

Porém, não se pode concluir que a Rugosidade Média é relação direta da Emissão Acústica. A rugosidade depende diretamente da característica do rebolo que está sendo utilizado, dos parâmetros de dressagem e da taxa de remoção do material (Malkin, 1989) – ver item 3.3 em rugosidade. Já a emissão acústica que pode ser definida como sendo ondas de tensão elástica geradas e liberadas sobre a superfície do material (Diniz et al,1991) – ver item 3.5.3 – são deformações mecânicas captadas pelo sensor rapidamente. Por ser propagação de som, imputa os problemas de transmissão sonora dentro de materiais, tais como reverberação, distorção e ressonância.

6.3 MICRODUREZA

Outra etapa após os ensaios experimentais de retificação foi medir a microdureza, pelo método Vickers, convertida em g/mm^2 .

Realizando os ensaios conforme o item 4.3, pode-se traçar o perfil de microdureza ao longo da peça, em três dimensões, para cada peça ensaiada, vistos na Figura 67, Figura 68 e Figura 69.

Calculando-se os valores sobre cada faixa perpendicular, obtém-se uma média dos valores de microdureza e seus respectivos desvios-padrão, que idealmente deveriam ser zero. Desses valores, traçou-se os gráficos, sobre cada uma das faces amostradas, na Figura 70 até a Figura 75. Os valores médios para cada face podem ser observados na Tabela 10.

Destas médias, tem-se a média de microdureza para cada profundidade de corte a , também representados na Tabela 10 e esboçadas na Figura 76. O desvio-padrão para cada profundidade de corte a ao longo das faces também foram mostradas na mesma tabela, mas não puderam ser representadas devido à dificuldade de visualização que geraria no gráfico.

A Figura 77 é a visualização gráfica das médias totais de microdureza, em toda a passada, para cada profundidade de corte a e seu respectivo desvio-padrão.

Realizaram-se os mesmos procedimentos para os degraus, ou seja, medido três vezes cada faixa da peça e calculado sua média de microdureza e o respectivo desvio-padrão. Esses resultados estão esboçados na Figura 79.

Tabela 10 – Microdureza medida nas secções de cada corpo (HV_{0,1})

Secção	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Total
Peça															
10µm															
C1	215,7	231,2	197,3	205,3	222,6	227,9	176,5	189,0	172,4	181,4	197,7	182,1	178,2	170,6	
C2	177,8	237,6	234,5	205,5	222,2	171,9	201,0	217,8	155,4	210,9	193,0	148,9	164,3	196,0	
C3	93,1	93,1	139,6	156,0	178,9	203,9	200,0	159,9	168,4	157,4	124,1	176,9	126,6	146,7	
Média	162,2	187,3	190,5	188,9	207,9	201,2	192,5	188,9	165,4	183,2	171,6	169,3	156,3	171,1	181,2
Desvio	62,8	81,6	47,8	28,5	25,1	28,1	13,9	28,9	8,9	26,8	41,2	17,9	26,7	24,6	44,6
22,5µm															
H1	178,2	177,8	197,3	149,6	160,6	168,3	161,5	187,3	189,4	190,9	188,3	171,3	184,3	178,2	
H2	185,4	201,7	186,5	184,3	215,7	177,5	194,2	173,8	185,1	175,1	198,9	159,7	174,6	185,8	
H3	148,6	177,8	143,1	132,7	134,9	170,6	159,0	168,8	159,9	151,6	173,9	194,2	135,4	185,1	
Média	170,7	185,8	175,6	155,6	170,4	172,1	171,6	176,6	178,1	172,5	187,0	175,1	164,8	183,0	174,2
Desvio	19,5	13,8	28,7	26,3	41,3	4,8	19,7	9,6	15,9	19,7	12,6	17,6	25,9	4,2	27,8
30µm															
K1	164,0	185,8	178,2	194,1	168,3	185,4	192,7	146,7	220,0	154,4	175,1	159,9	148,9	150,9	
K2	164,8	149,1	164,3	163,7	141,0	205,8	193,4	164,0	208,8	189,4	175,9	149,1	132,2	170,6	
K3	157,7	193,4	198,2	167,0	173,9	171,2	174,2	163,7	194,2	189,8	185,8	181,4	178,9	167,0	
Média	162,2	176,1	180,2	174,9	161,0	187,5	186,7	158,1	207,7	177,9	179,0	163,5	153,3	162,8	173,6
Desvio	3,9	23,7	17,0	16,7	17,6	17,4	10,9	9,9	12,9	20,3	5,9	16,5	23,7	10,5	27,0
35µm															
L1	222,2	192,7	209,5	210,9	207,4	157,9	187,8	177,8	220,4	167,0	190,8	134,9	136,0	164,0	
L2	295,3	335,0	422,3	350,0	297,7	378,0	385,3	378,3	393,0	422,7	394,3	392,0	348,7	334,3	
L3	294,3	297,3	295,7	418,7	420,0	374,7	341,3	397,7	403,7	345,3	385,0	373,3	395,0	383,7	
Média	270,6	275,0	309,2	326,5	308,3	303,5	304,8	317,9	339,0	311,7	323,4	300,1	293,2	294,0	305,5
Desvio	42,0	73,7	107,1	105,9	106,7	126,1	103,7	121,7	102,9	131,1	114,9	143,3	138,1	115,3	100,9
40µm															
M1	243,8	402,1	277,0	254,7	283,4	270,3	277,0	267,4	270,3	340,1	373,5	295,3	287,0	417,4	
M2	216,7	338,2	286,0	183,4	285,1	406,5	422,4	353,3	415,7	393,6	424,5	435,3	298,0	265,6	
M3	276,9	373,9	325,5	315,6	332,6	354,3	262,5	384,7	297,7	306,9	309,0	351,9	397,2	343,5	
Média	245,8	371,4	296,2	251,2	300,3	343,7	320,6	335,2	327,9	346,8	369,0	360,8	327,4	342,2	324,2
Desvio	30,2	32,0	25,8	66,2	27,9	68,7	88,4	60,7	77,3	43,8	57,9	70,5	60,7	75,9	96,9
50µm															
O1	325,1	313,5	326,5	425,9	324,1	338,0	317,9	297,7	351,9	359,3	276,6	256,4	366,8	291,0	
O2	293,1	277,5	307,2	336,0	315,6	323,1	293,1	336,0	338,9	344,9	397,0	346,4	351,9	289,2	
O3	296,7	264,0	317,3	334,3	337,7	304,7	349,3	345,3	376,7	381,3	388,3	338,7	340,7	470,3	
Média	305,0	285,0	317,0	365,4	325,8	321,9	320,1	326,3	355,8	361,8	354,0	313,8	353,1	350,2	332,5
Desvio	17,6	25,6	9,6	52,4	11,1	16,7	28,2	25,3	19,2	18,4	67,1	49,9	13,1	104,0	63,7
DG1	198,3	213,7	204,7	250,3	218,3	252,0	224,7	208,7	234,0	208,0	307,7	337,3	269,0	326,7	
DG2	215,3	209,7	242,0	228,0	227,7	219,3	234,7	229,0	240,7	365,0	381,0	303,3	321,7	351,0	
DG3	189,7	167,6	149,6	192,7	221,0	163,5	174,2	190,8	238,3	250,7	245,2	325,1	244,9	263,8	

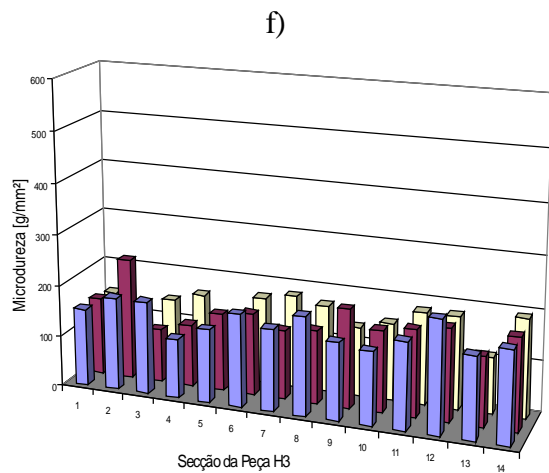
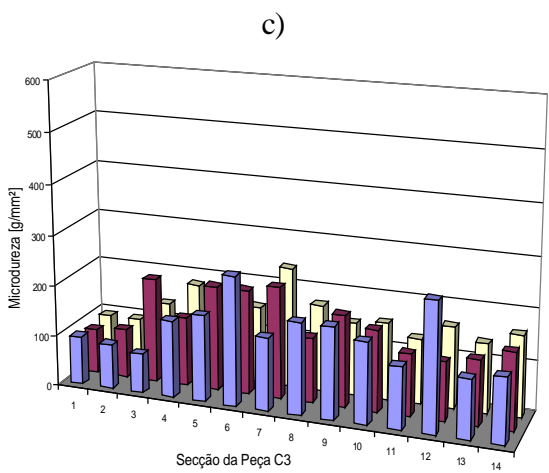
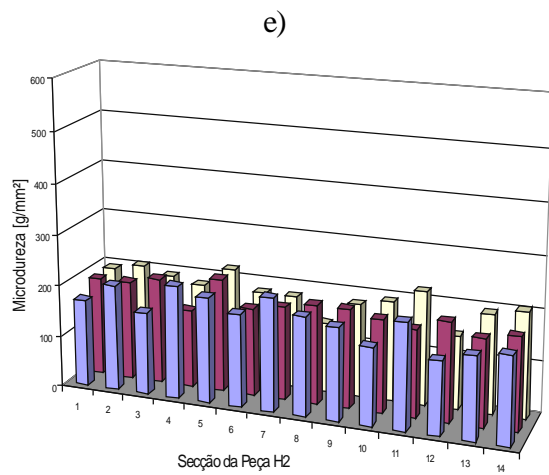
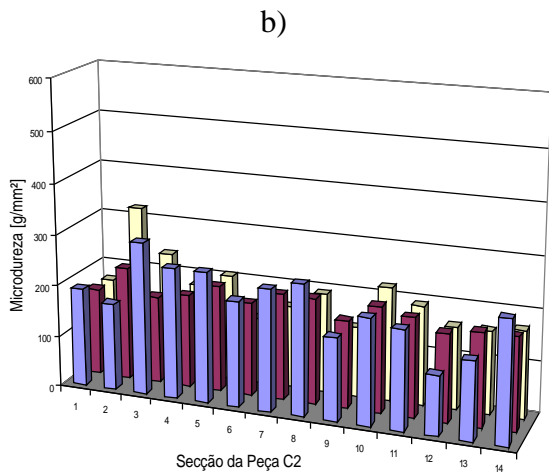
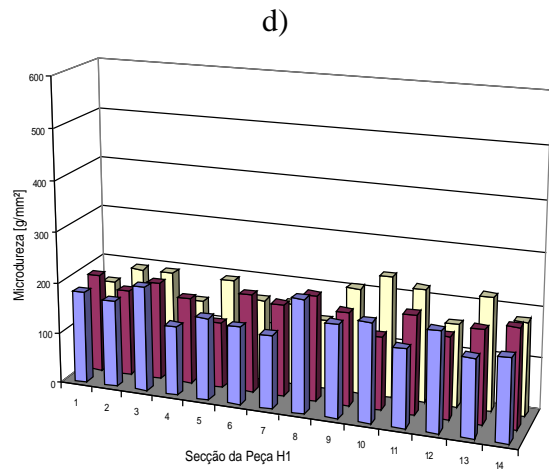
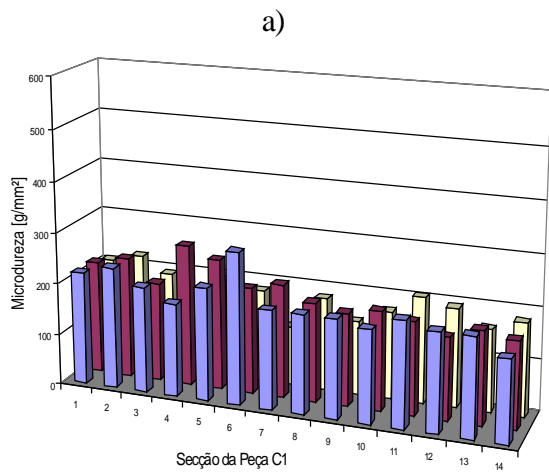


Figura 67 – Perfil da Microdureza sobre a face da peça ;
 Eixo vertical em HV; carga de 0,1kg aplicado em 20s
 a, b, c = peças com 10,0 μ m de profundidade de corte
 d, e, f = peças com 22,5 μ m de profundidade de corte

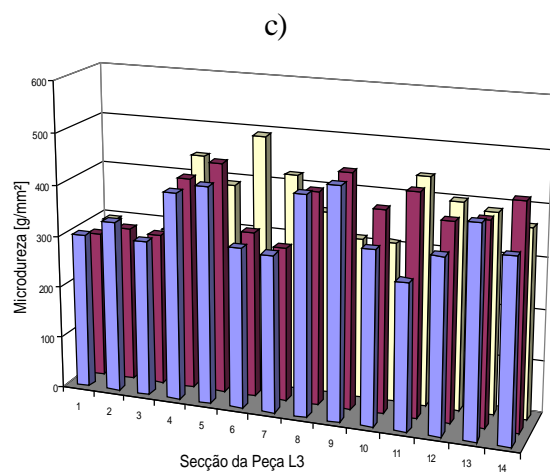
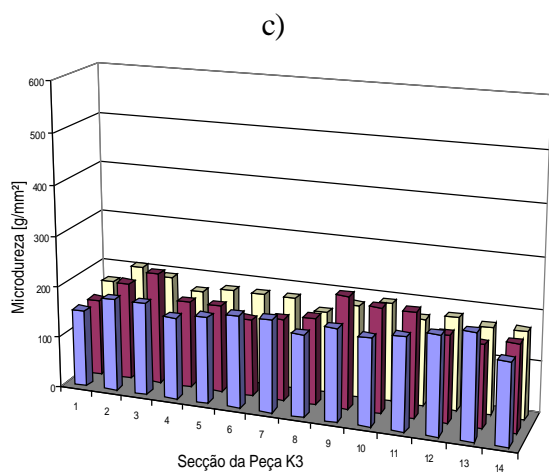
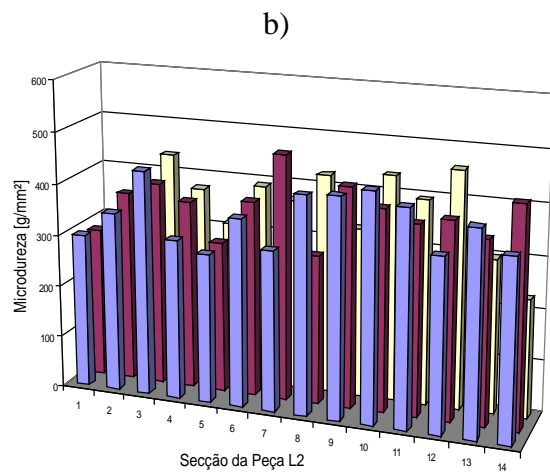
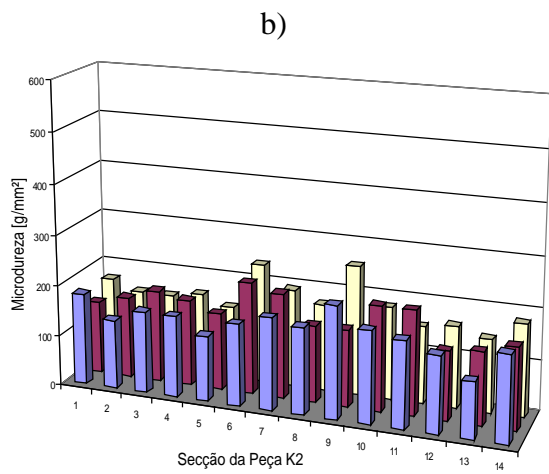
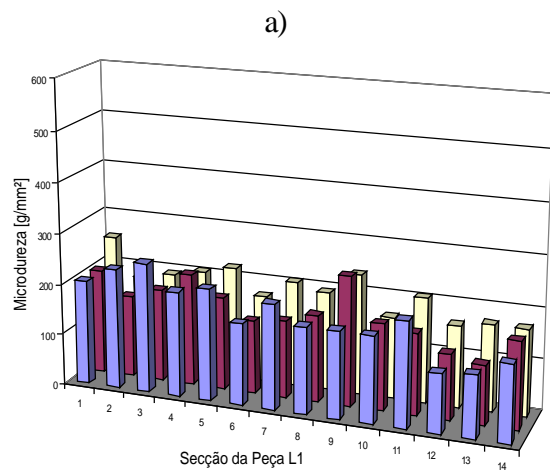
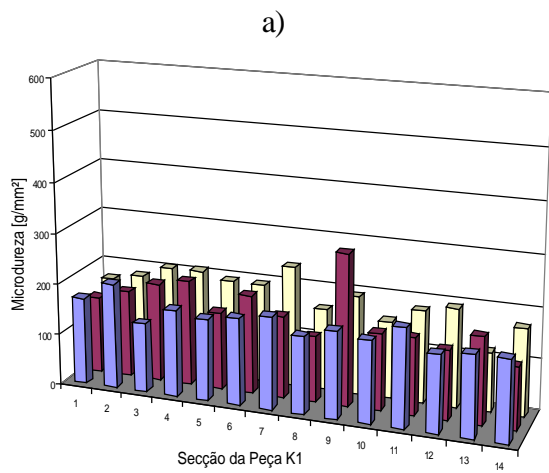


Figura 68 – Perfil da Microdureza sobre a face da peça
 Eixo vertical em HV; carga de 0,1kg aplicado em 20s
 a, b, c = peças com 30 μ m de profundidade de corte
 d, e, f = peças com 35 μ m de profundidade de corte

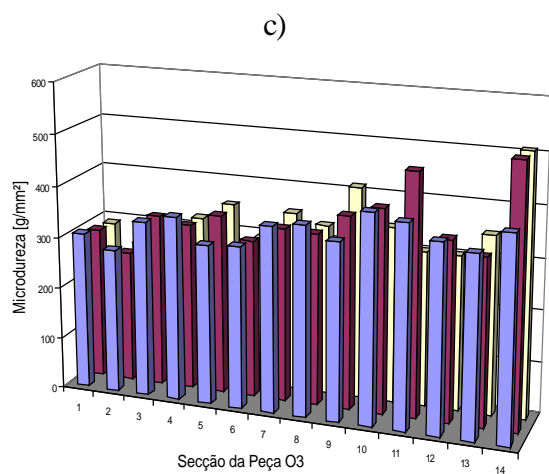
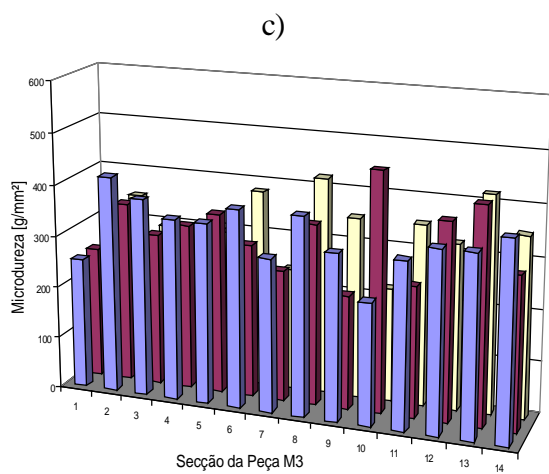
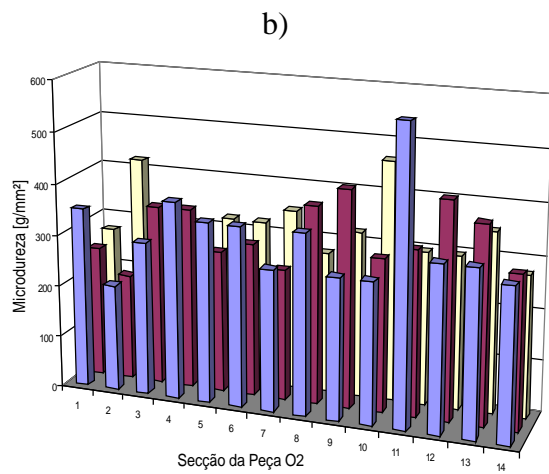
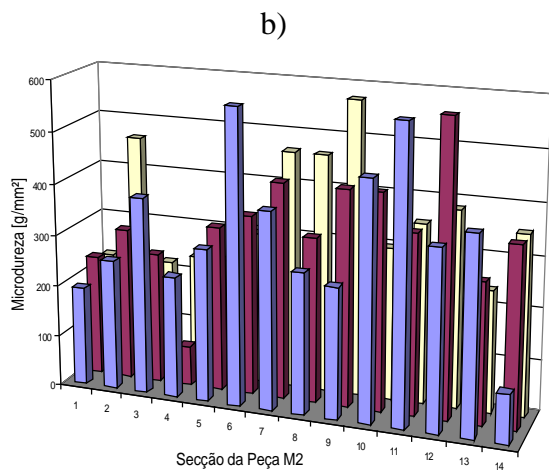
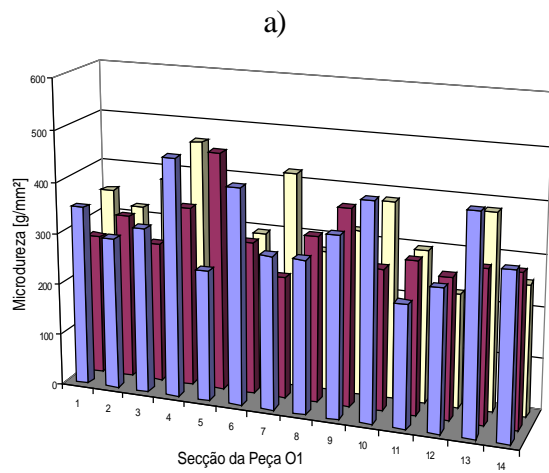
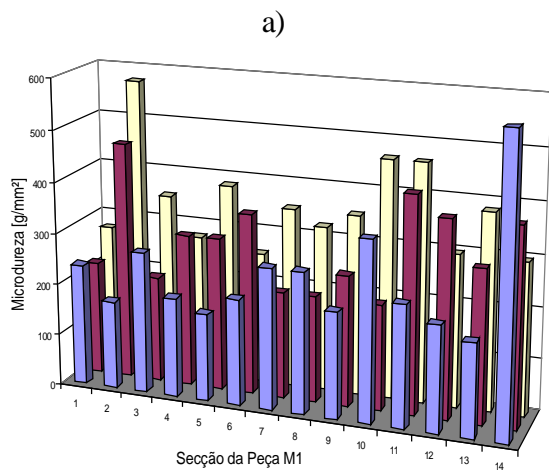


Figura 69 – Perfil da Microdureza sobre a face da peça
 Eixo vertical em HV; carga de 0,1kg aplicado em 20s
 a, b, c = peças com 40µm de profundidade de corte
 d, e, f = peças com 50µm de profundidade de corte

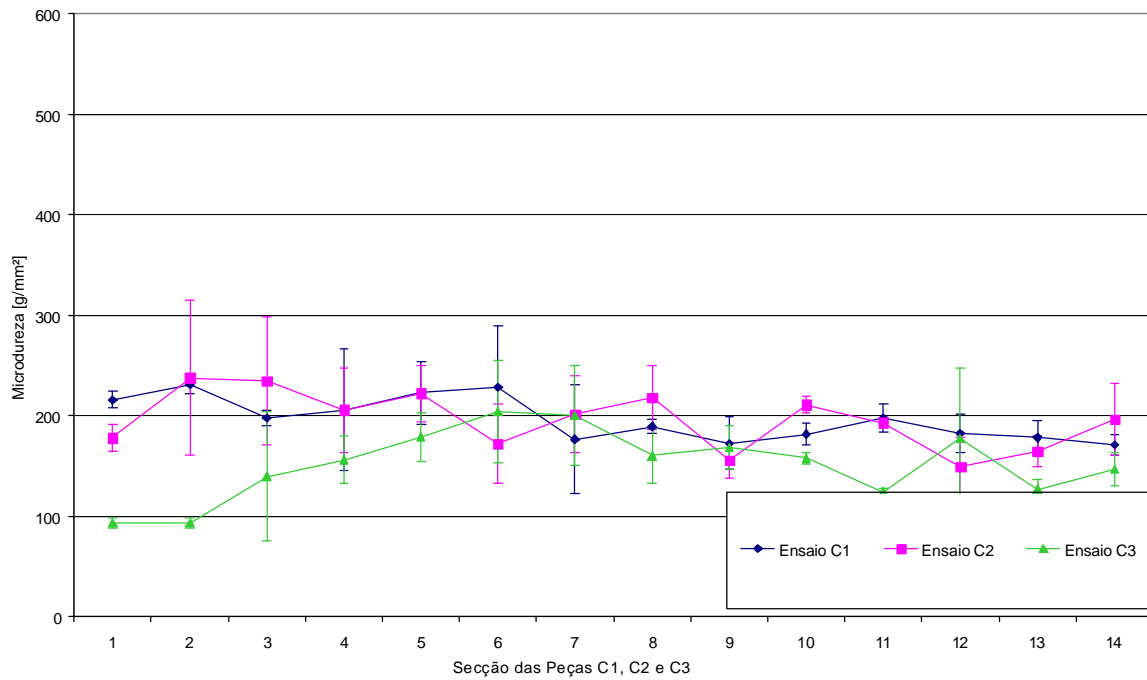


Figura 70 – Microdureza ao longo das peças ensaiadas com $a = 10\mu\text{m}$
Eixo vertical em HV, carga de 0,1kg aplicado em 20s

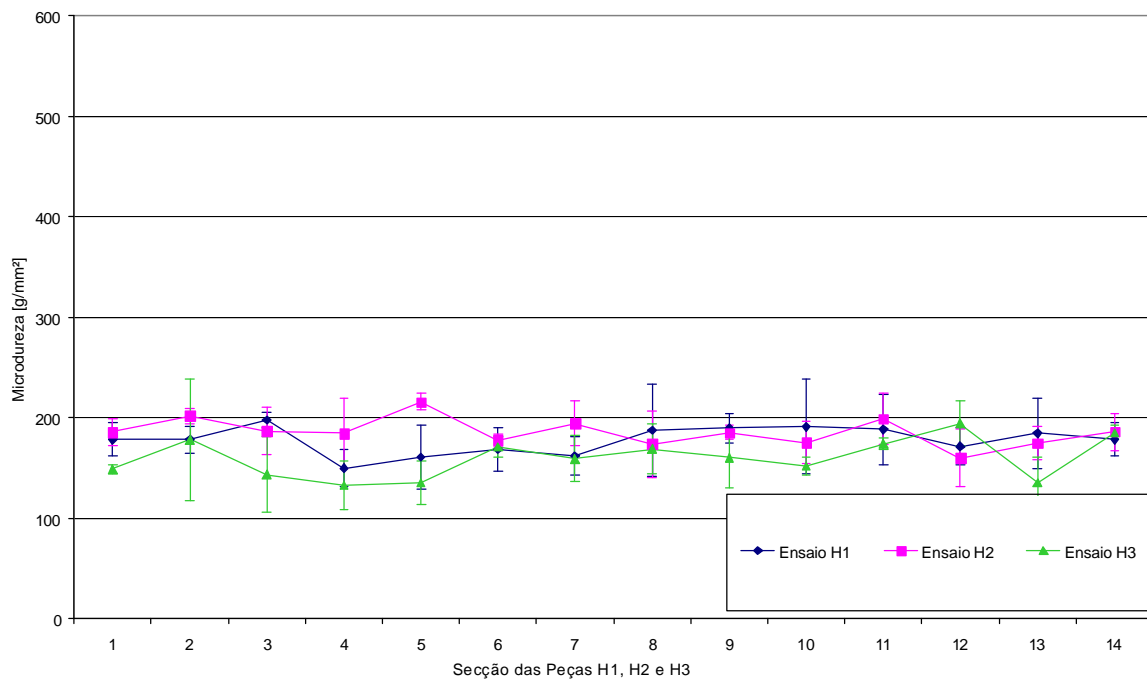


Figura 71 – Microdureza ao longo das peças ensaiadas com $a = 22,5\mu\text{m}$
Eixo vertical em HV, carga de 0,1kg aplicado em 20s

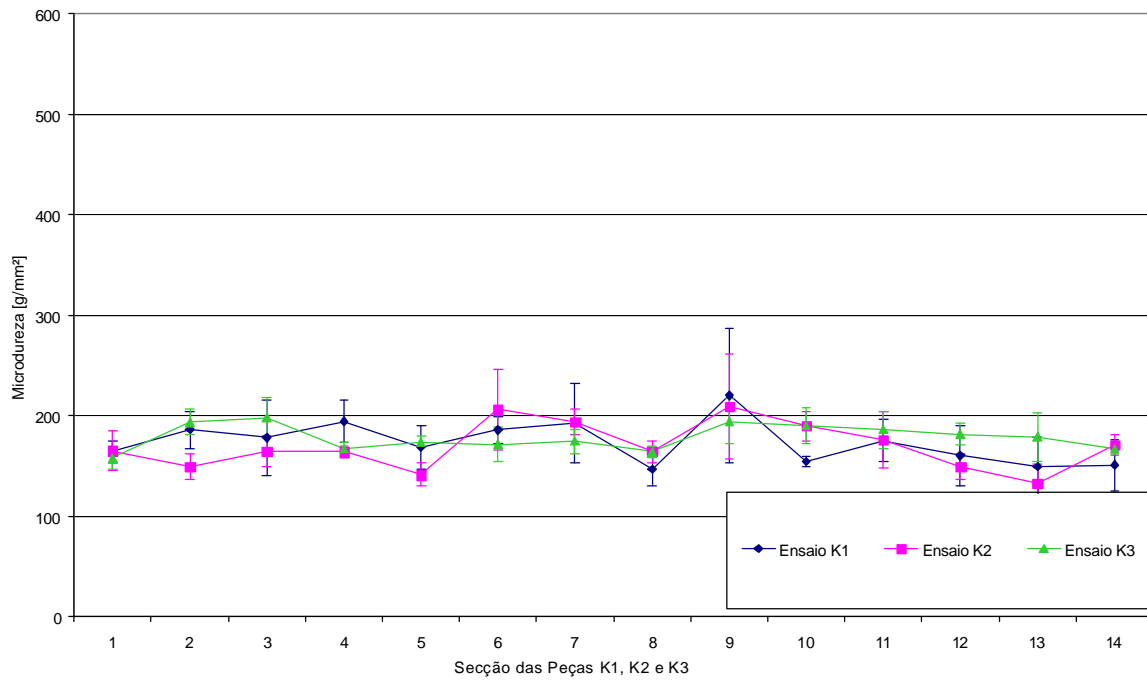


Figura 72 – Microdureza ao longo das peças ensaiadas com $a = 30\mu\text{m}$
Eixo vertical em HV, carga de 0,1kg aplicado em 20s

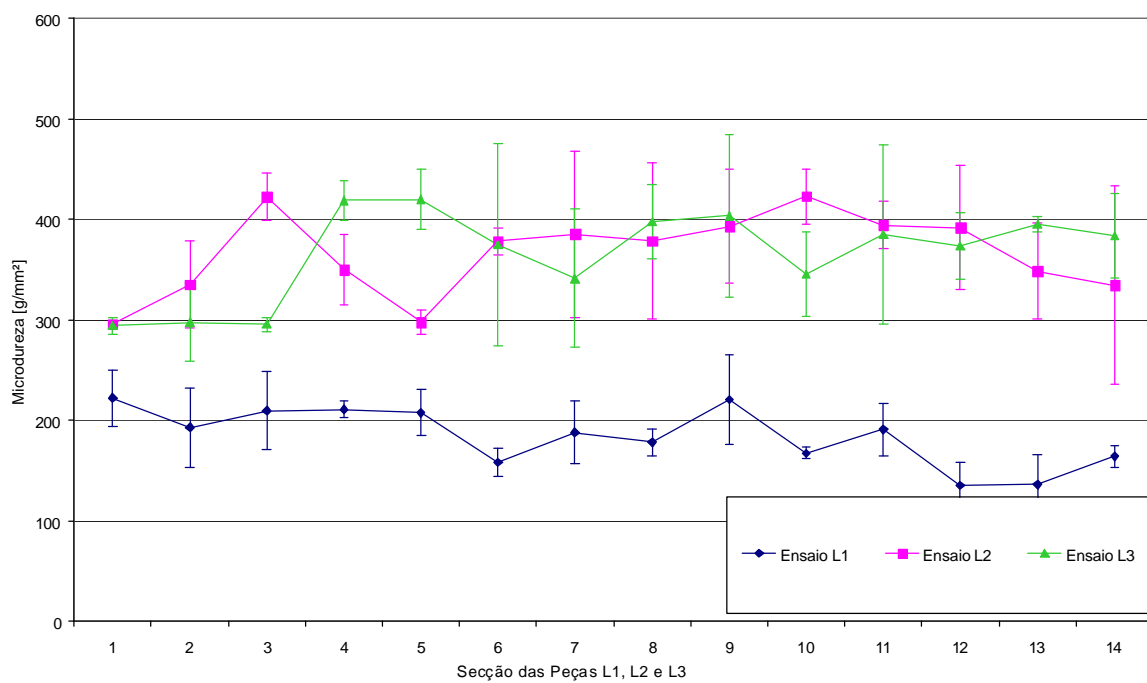


Figura 73 – Microdureza ao longo das peças ensaiadas com $a = 35\mu\text{m}$
Eixo vertical em HV, carga de 0,1kg aplicado em 20s

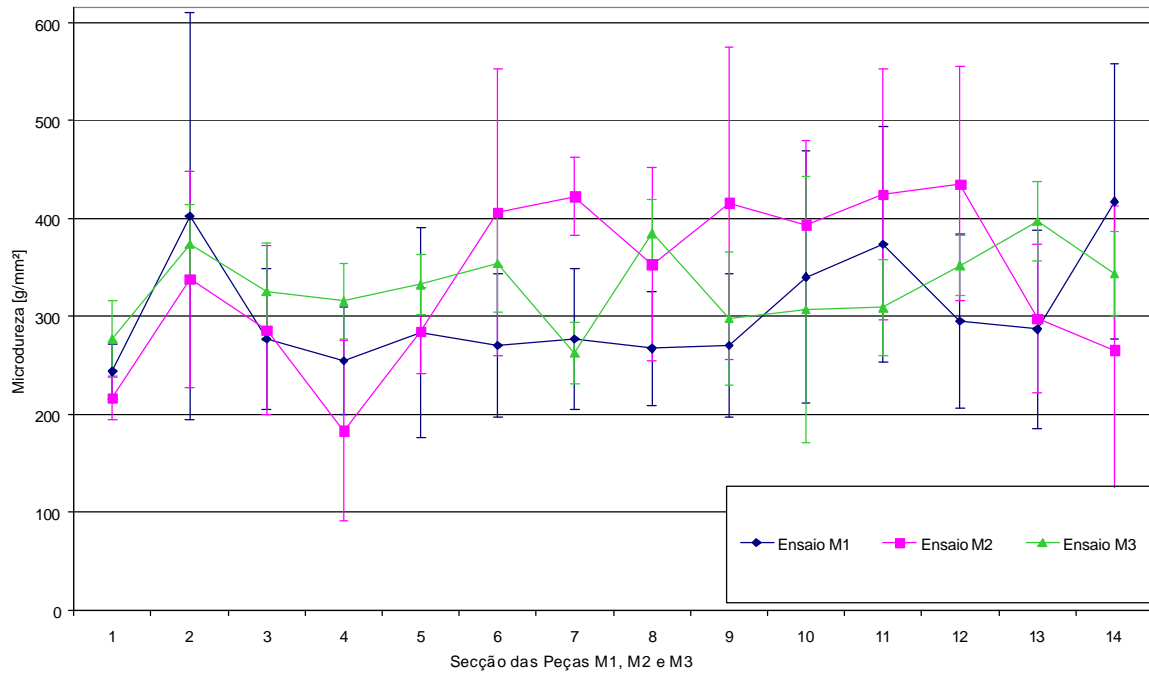


Figura 74 – Microdureza ao longo das peças ensaiadas com $a = 40\mu\text{m}$
 Eixo vertical em HV, carga de 0,1kg aplicado em 20s

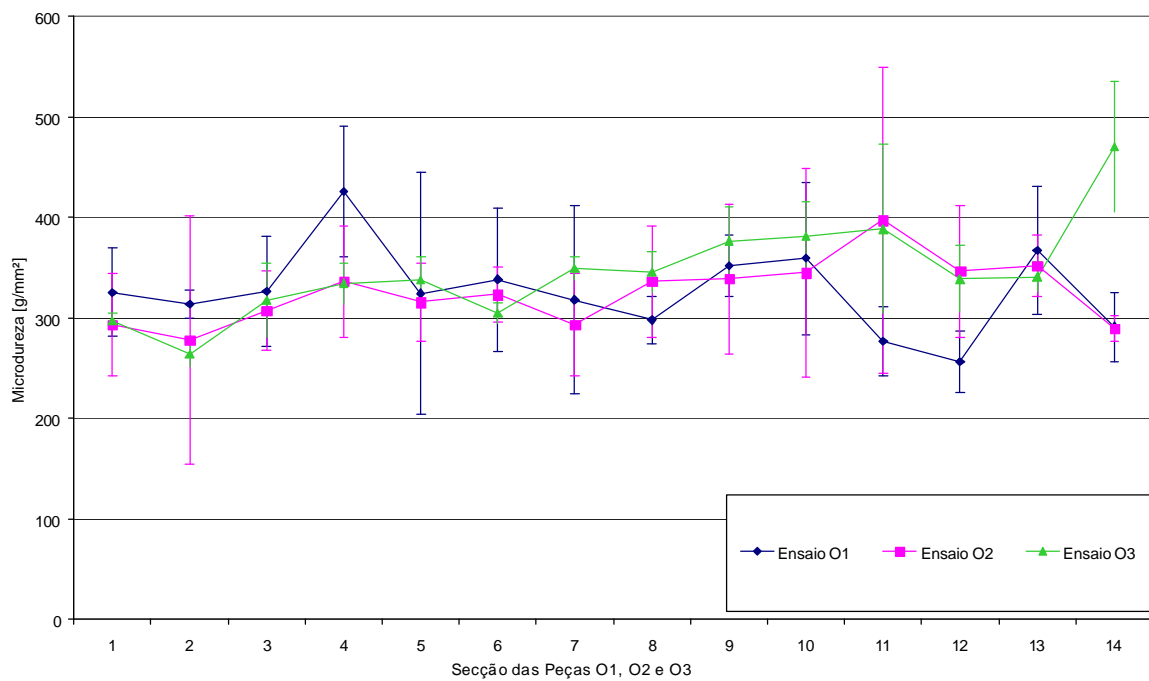


Figura 75 – Microdureza ao longo das peças ensaiadas com $a = 50\mu\text{m}$
 Eixo vertical em HV, carga de 0,1kg aplicado em 20s

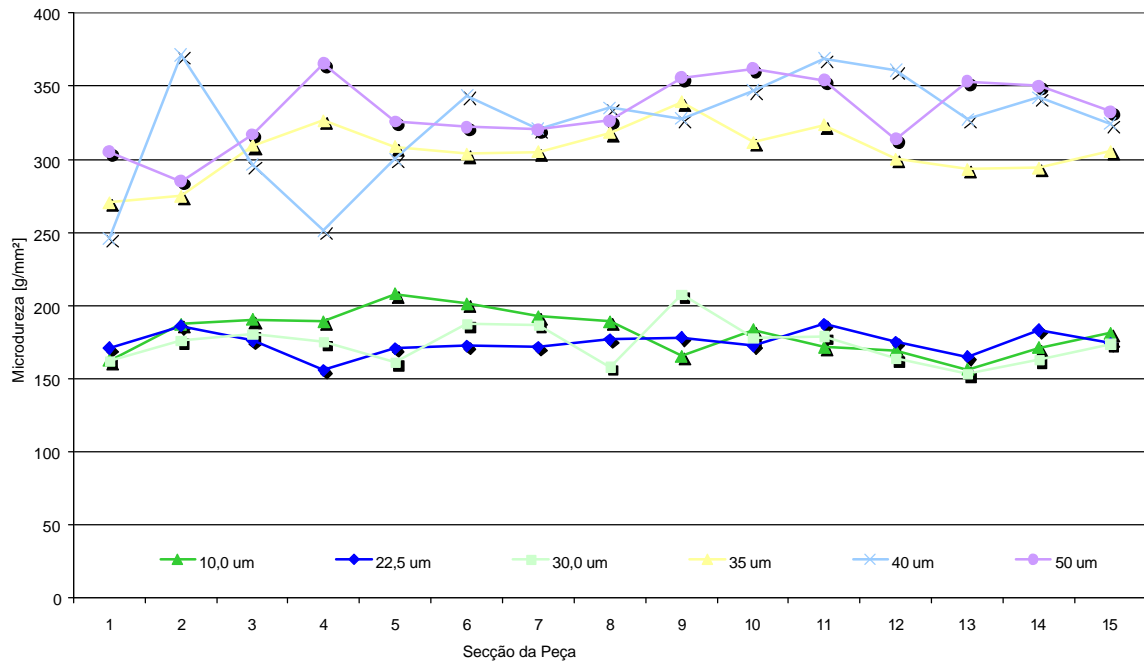


Figura 76 – Microdureza obtida nos ensaios com as diferentes profundidades de corte
Eixo vertical em HV, carga de 0,1kg aplicado em 20s

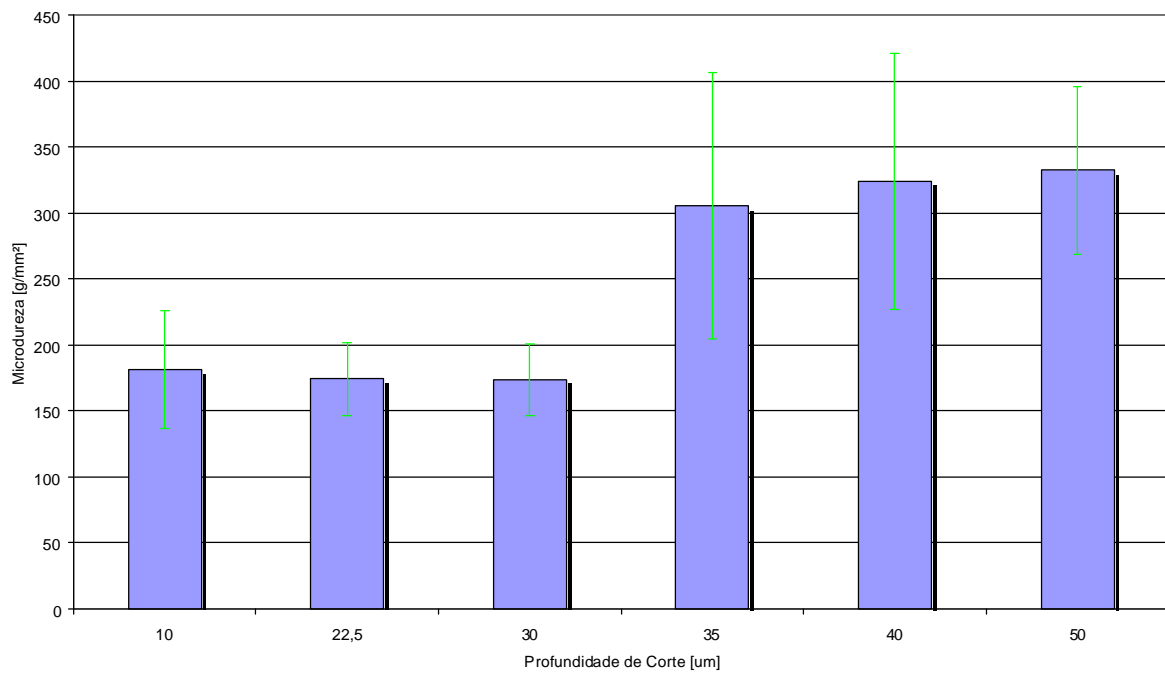


Figura 77 – Microdureza das passadas para as diferentes profundidades de corte
Eixo vertical em HV, carga de 0,1kg aplicado em 20s

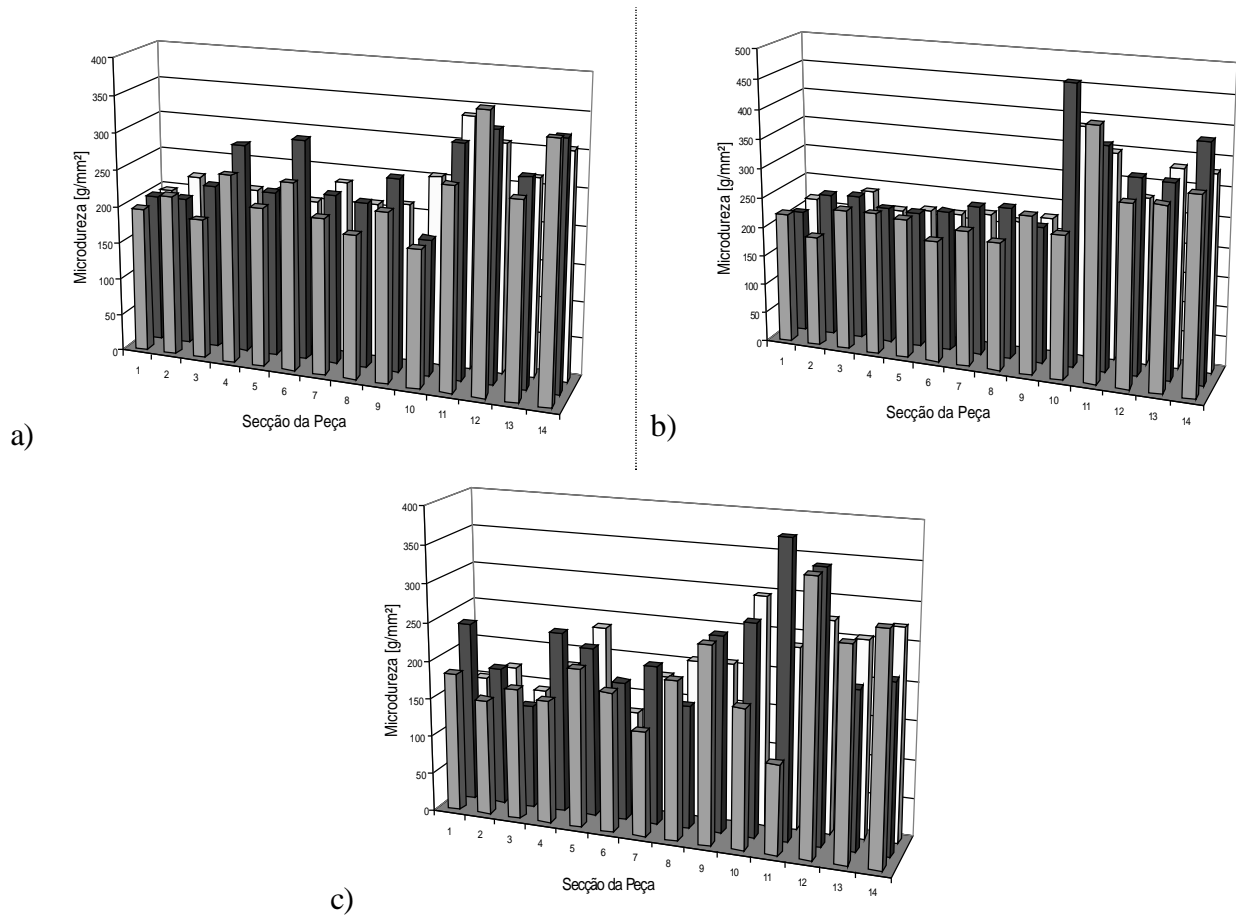


Figura 78 - Perfil da Microdureza sobre a face da peça
 Eixo vertical em HV; carga de 0,1kg aplicado em 20s
 a-DG1; b-DG2; c-DG3 – peças em degrau

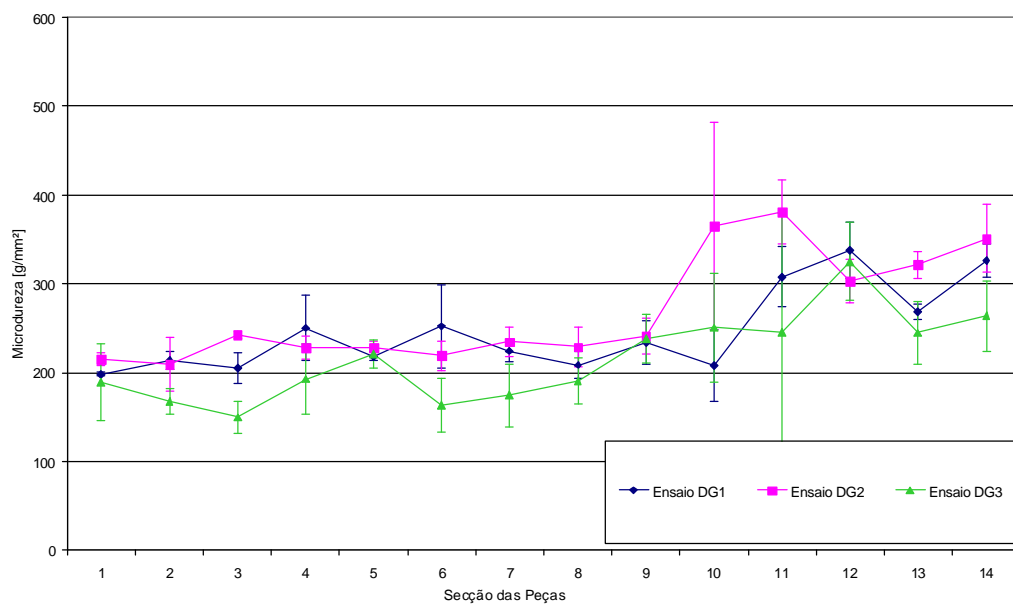


Figura 79 – Microdureza ao longo das peças ensaiadas com degraus
 Eixo vertical em HV, carga de 0,1kg aplicado em 20s

Percebe-se através da Figura 77 que a microdureza apresenta uma divisão entre as peças que não apresentaram queima (C, H e K) e entre as que apresentaram (L, M e O). Isso é muito bem observado na Figura 73, onde a peça L1 não apresentou queima para as condições dos ensaios, o que não ocorreu nas peças L2 e L3.

Para os corpos de prova C1, C2 e C3 da Figura 70, H1, H2 e H3 da Figura 71 e K1, K2 e K3 da Figura 72, as médias totais de microdureza para a profundidade de corte ficaram muito próximas, 181.2, 174.2 e 173.6 HV_{0,1}.

Porém, para as peças L1, L2 e L3 da Figura 73, M1, M2 e M3 da Figura 74 e O1, O2 e O3 da Figura 75, ficaram com médias totais de microdureza em 305.5, 324.2 e 332.5 HV_{0,1}, para as respectivas profundidades de corte. Nota-se que a peça L1 não queimou, e quem sem ela a média total seria em vez de 305.5 seria de 366.2 HV_{0,1}, fazendo cair um pouco a média total do grupo. Isso dá uma faixa de microdureza de 124.2 HV_{0,1} entre as médias, de quando ocorre e não ocorre a queima entre as peças, vistos na Figura 76. A média só de L1 é de 184.2 HV_{0,1}, bem próximo às outras peças que não queimaram.

Na Figura 78 e na Figura 79, observa-se que o material aumenta sua microdureza somente sobre a área de queima da peça, detalhadamente sobre a peça DG2, que houve queima mais severa em relação às outras, observado na Tabela 7, também houve maior microdureza encontrada a partir de 10µm, ou seja, seu terço final.

Assim, confirma-se que quando ocorre a queima, o material sofre um encruamento, endurecendo o aço, devido a têmpera e a conseqüente formação de austenita (ferro •) na cristalografia do aço (Ver item 3.4).

Quando o fluido de corte é aplicado à zona de retificação o mesmo será inicialmente submetido a um processo de ebulição. Esse processo aumenta a taxa de transferência de calor entre o fluido e a peça. Conforme a temperatura continua aumentado, o processo de ebulição se transformará em um filme de vapor denominado “film-boiling” que atua entre a peça e o fluido (ver item 3.4.2). O vapor atua como isolante e evita a transferência de calor para o fluido. Como resultado, a temperatura da peça aumenta rapidamente e queima a superfície do material. Para o fluido permanecer efetivo é necessário que a temperatura da peça não exceda a temperatura de “film-boiling” do fluido (Irani et al., 2005).

De acordo com Malkin apud Silva (2000), os aços são geralmente retificados em seu estado temperado-revenido. Dependendo da intensidade do aquecimento gerado durante o processo de retificação e da taxa de resfriamento imposta à peça retificada pela ação do fluido de corte, pode-se obter uma diminuição de sua dureza superficial, bem como levar à formação

de estruturas martensíticas não-revenidas. Estas são formadas quando se atinge a temperatura de austenitização do material, seguido de um processo de resfriamento rápido. A formação ou não desta estrutura martensítica, a qual é regida por mecanismos de difusão de carbono, é um processo complexo, dependente da temperatura, do tempo de aquecimento e das velocidades de resfriamento impostas pelo fluido de corte.

Verifica-se que o parâmetro de microdureza é então um bom indicativo da ocorrência de queima no metal. O ideal seria em ter um sinal elétrico que gerasse tal parâmetro dinamicamente, porém não pode ser analisado senão por ensaios de microdureza em equipamentos laboratoriais e dividido por etapas.

Outro problema seria que, caso conseguisse ser medido a microdureza durante a passagem, não haveria como prever se a peça iria ou não queimar, pois, ela só indica se houve ou não a queima da passagem após ser concluída.

6.4 RESULTADOS OBTIDOS NA AQUISIÇÃO DOS ENSAIOS

Para a obtenção dos resultados dos ensaios foram realizadas as seguintes etapas:

- O sinal adquirido pela placa de aquisição, utilizando o LabVIEW (Aguiar, 2003), foi salvo em arquivos texto (.txt) para cada ensaio;
- Tais arquivos de texto são carregados diretamente no MatLAB como matrizes de duas colunas, uma de emissão acústica e outra de potência;
- No MatLAB, essas colunas são salvas em vetores separados;
- Extraí dos vetores, através do gráfico gerado pelos sinais, o início e o fim da passada, ficando apenas com as aquisições durante o contato do rebolo com a peça;
- Processam-se os vetores, separados em janelas de 4096 pontos, com as estatísticas estudadas. Este número representa uma constante de tempo de aproximadamente 1ms, recomendada por Webster et al. (1994).
- Para a melhor visualização dos gráficos, passam-se os sinais através de um filtro digital de 5KHz (Anexo I).

Os gráficos da Figura 80 até a Figura 100 apresentam os valores capturados, calculados e filtrados.

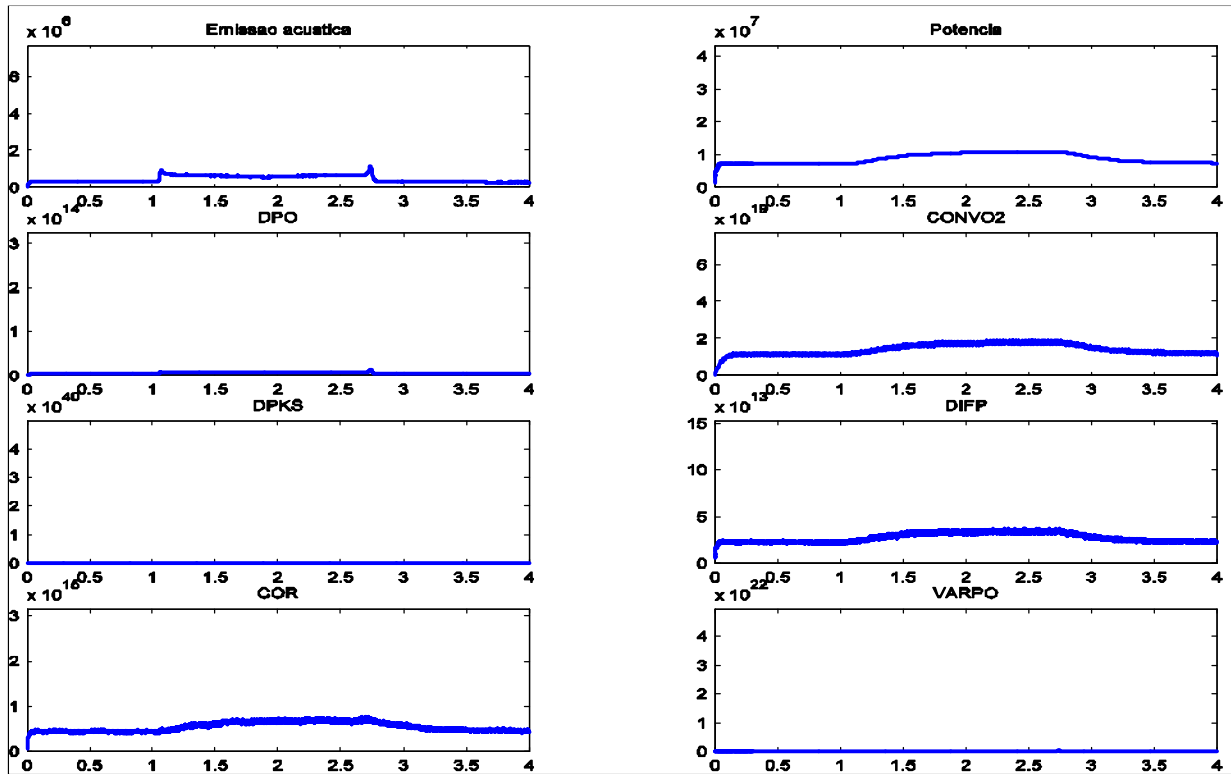


Figura 80 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 1ª Amostra para $a = 10,0 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts \times K

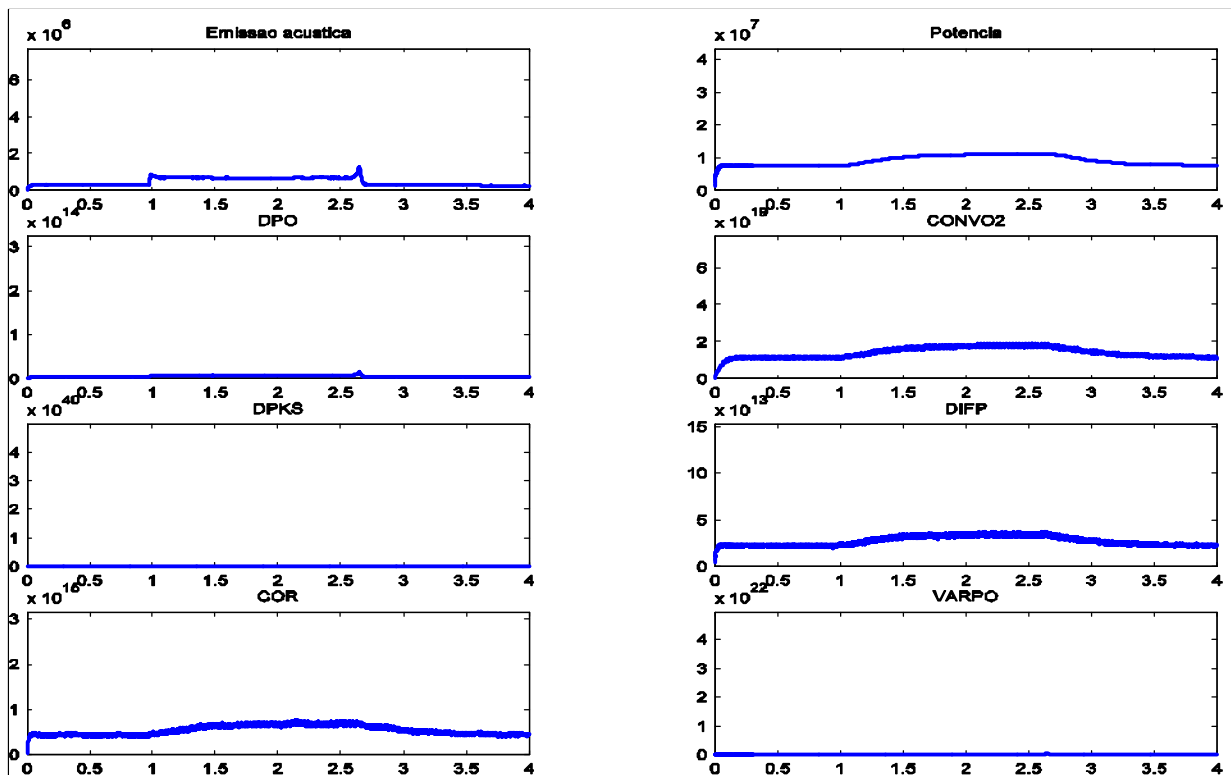


Figura 81 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 2ª Amostra para $a = 10,0 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts \times K

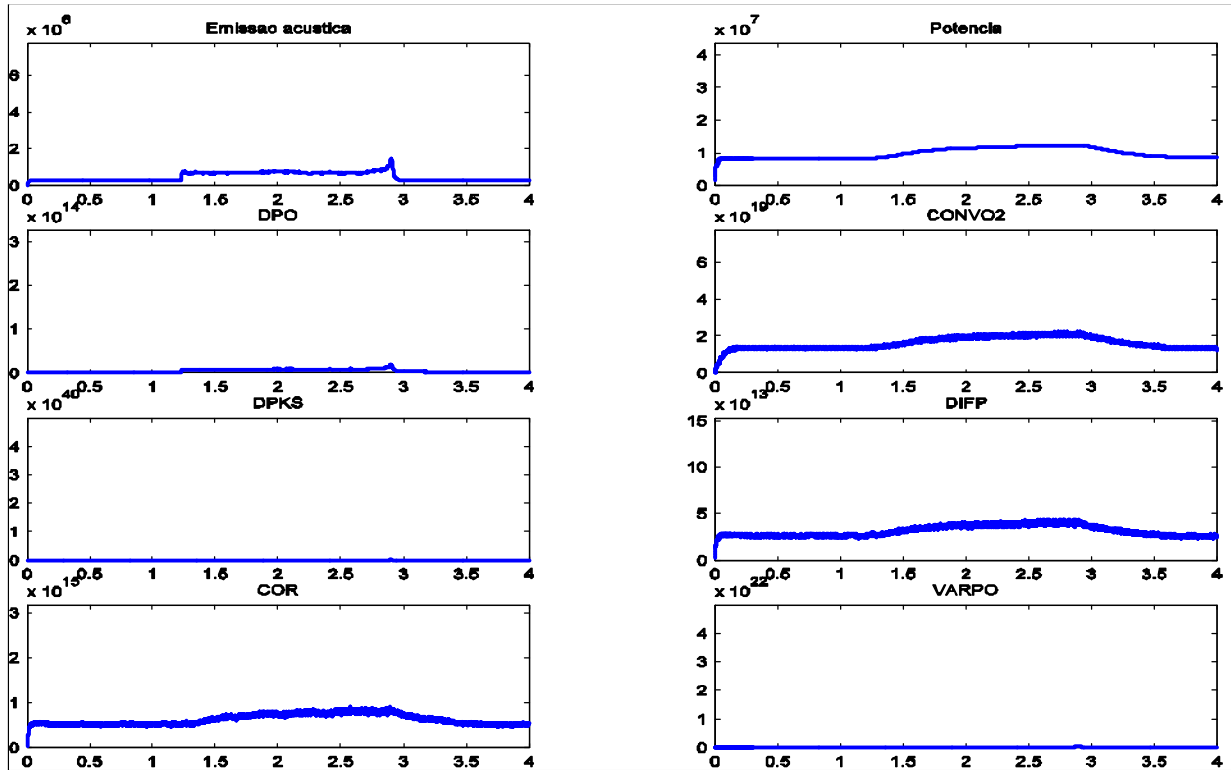


Figura 82 – Gráficos das Aquisições e Resultados \rightarrow 3ª Amostra para $a = 10,0 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts \times K

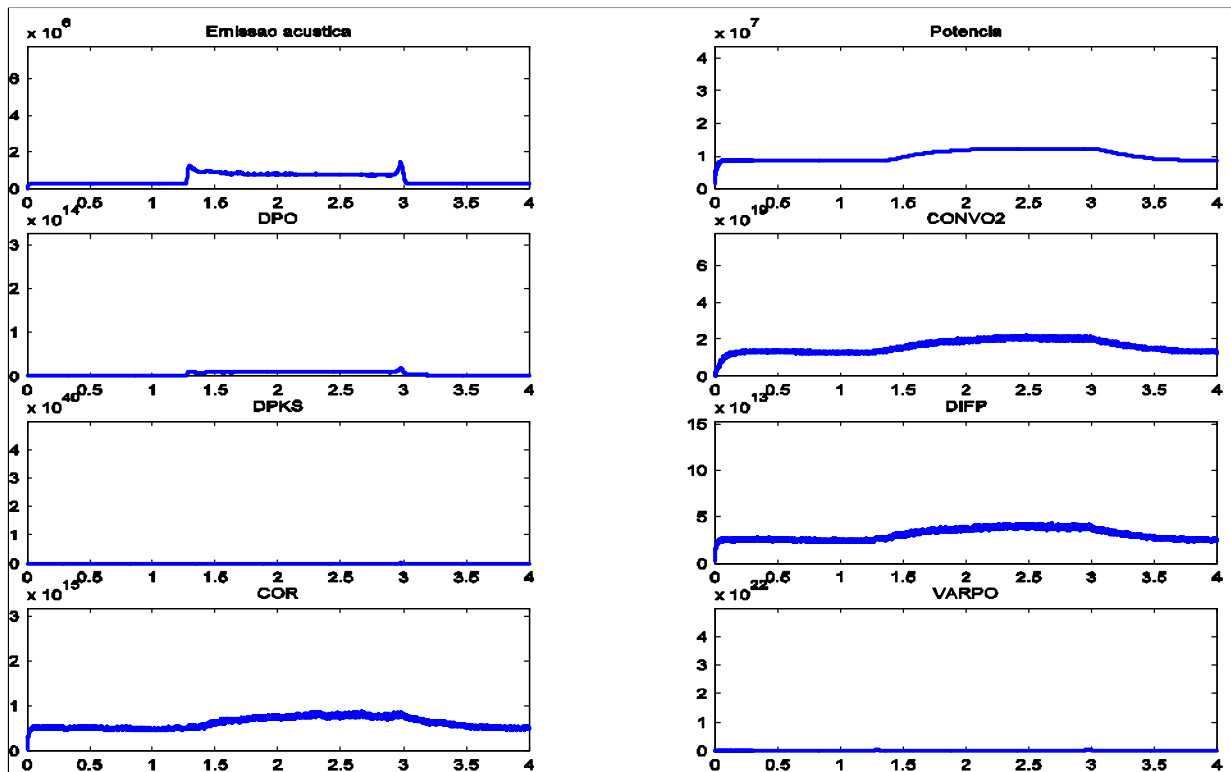


Figura 83 – Gráficos das Aquisições e Resultados \rightarrow 1ª Amostra para $a = 22,5 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts \times K

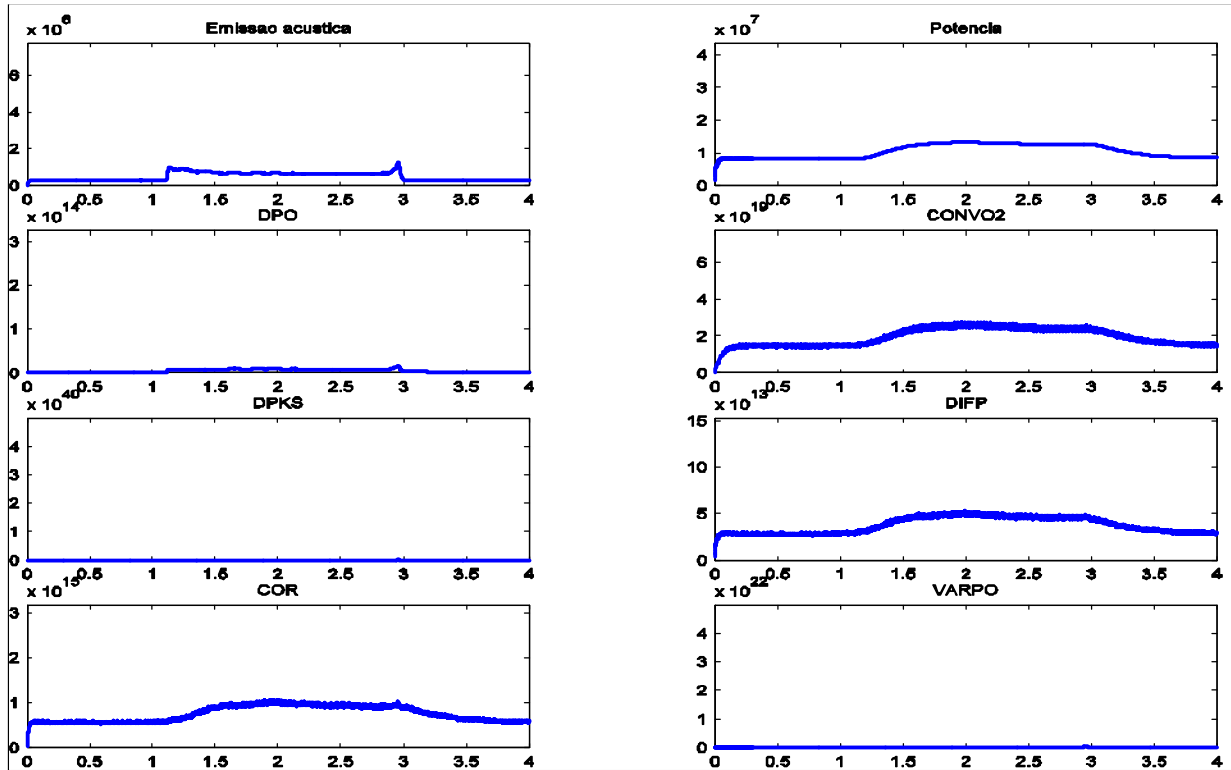


Figura 84 – Gráficos das Aquisições e Resultados \rightarrow 2ª Amostra para $a = 22,5 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts \times K

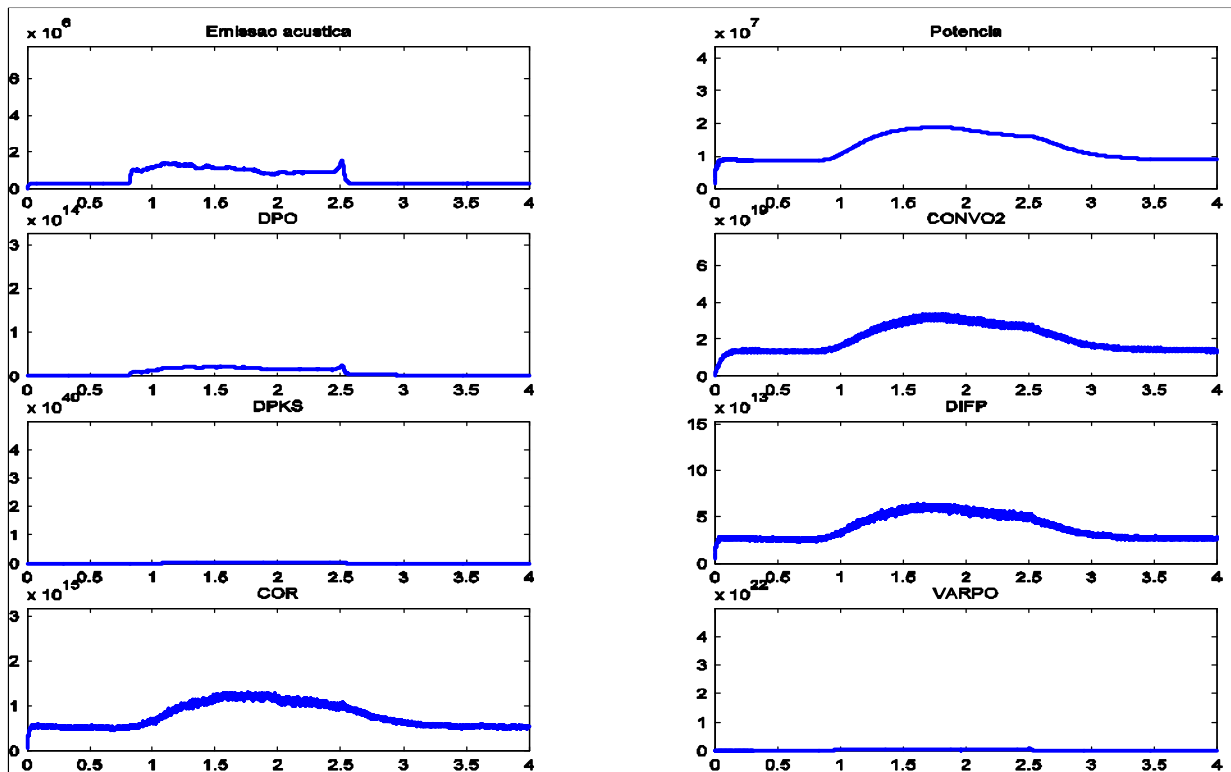


Figura 85 – Gráficos das Aquisições e Resultados \rightarrow 3ª Amostra para $a = 22,5 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts \times K

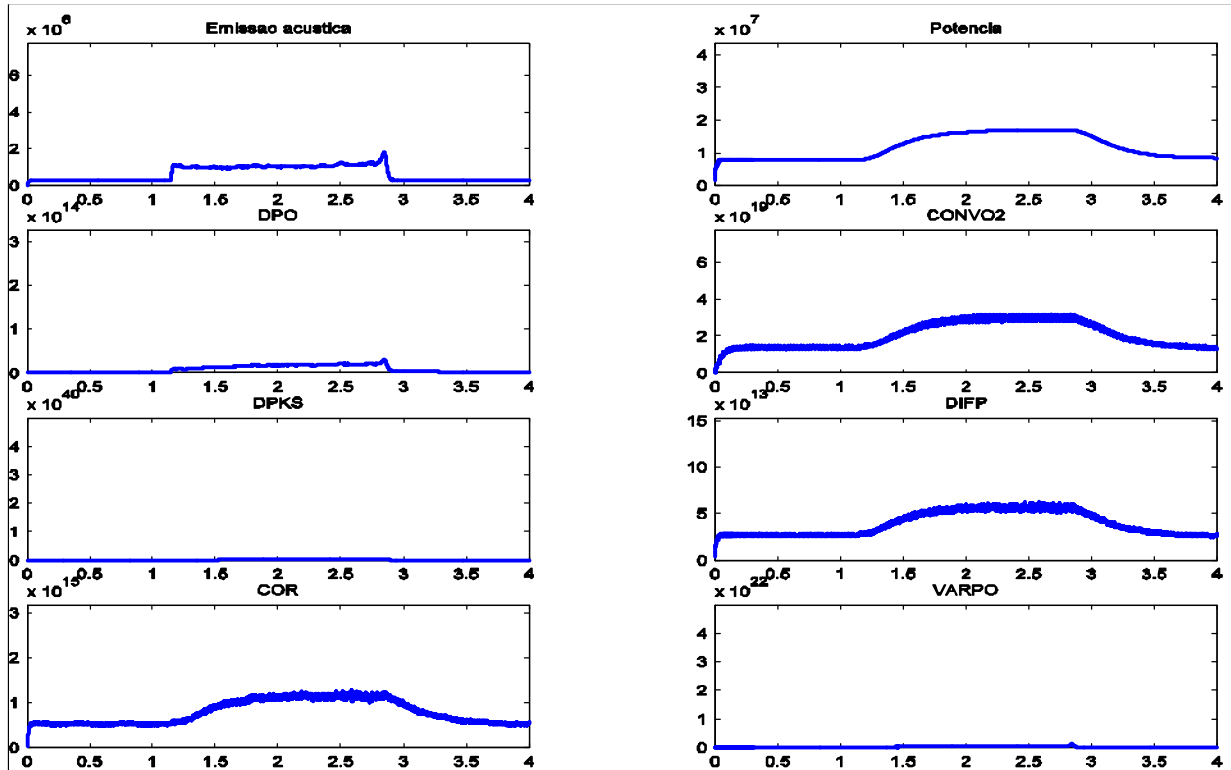


Figura 86 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 1ª Amostra para $a = 30,0 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts \times K

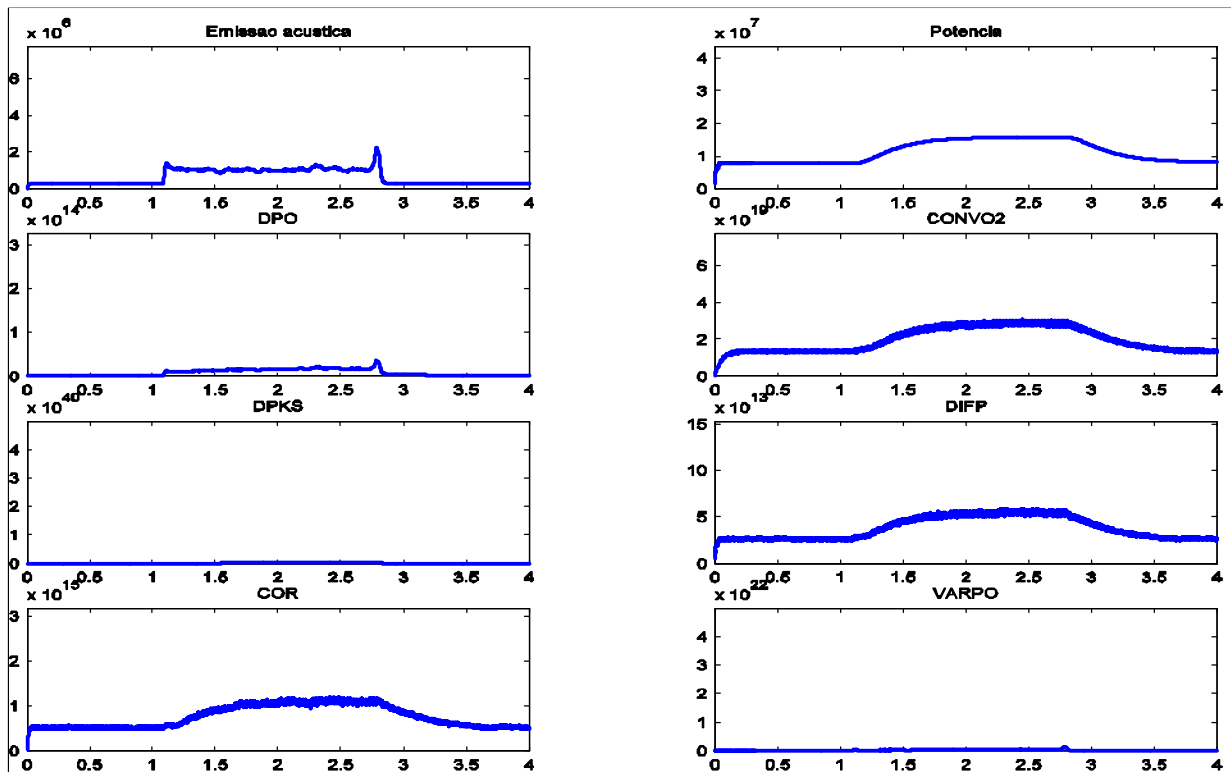


Figura 87 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 2ª Amostra para $a = 30,0 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts \times K

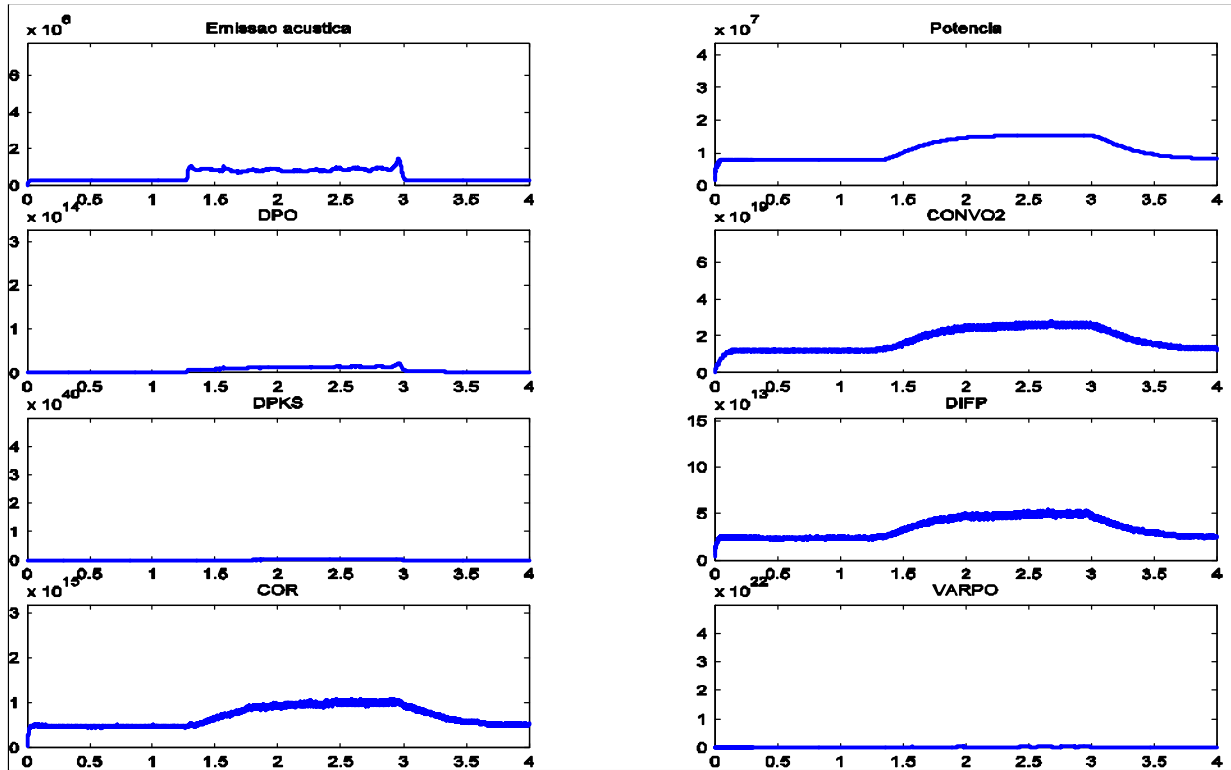


Figura 88 – Gráficos das Aquisições e Resultados \rightarrow 3ª Amostra para $a = 30,0 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts \times K

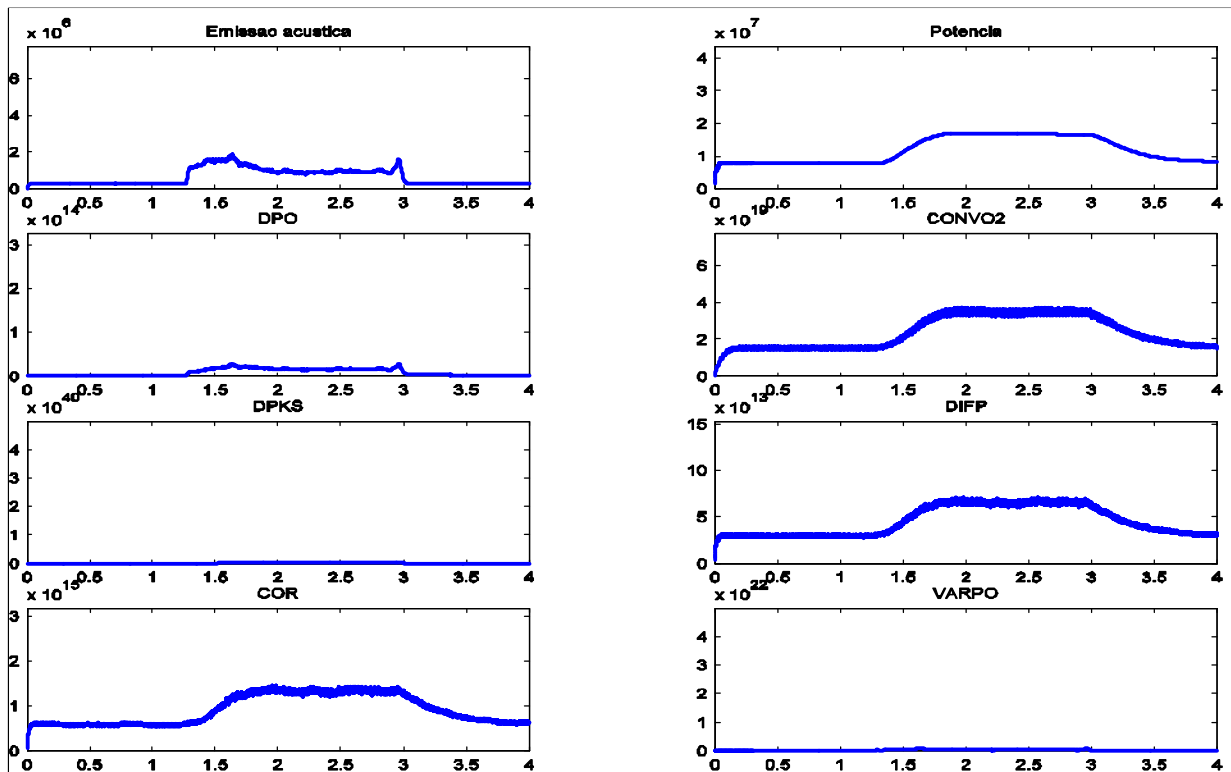


Figura 89 – Gráficos das Aquisições e Resultados \rightarrow 1ª Amostra para $a = 35,0 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts \times K

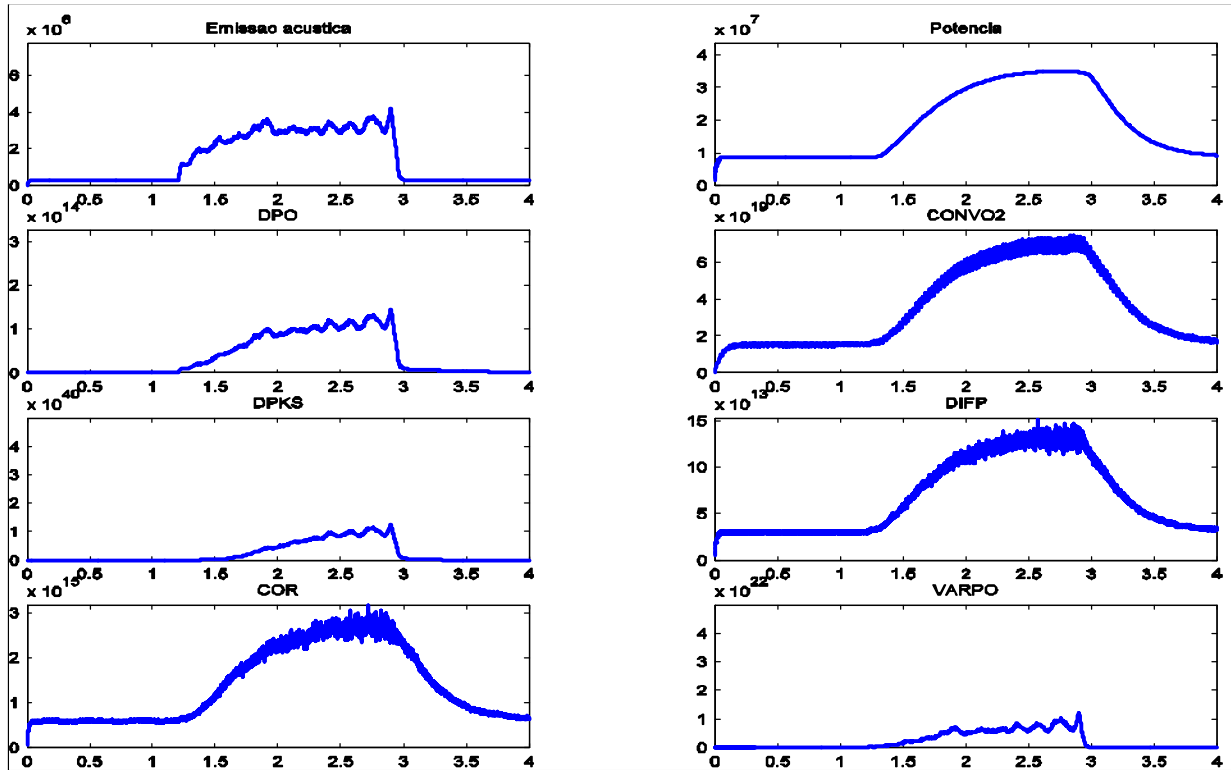


Figura 90 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 2ª Amostra para $a = 35,0 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts \times K

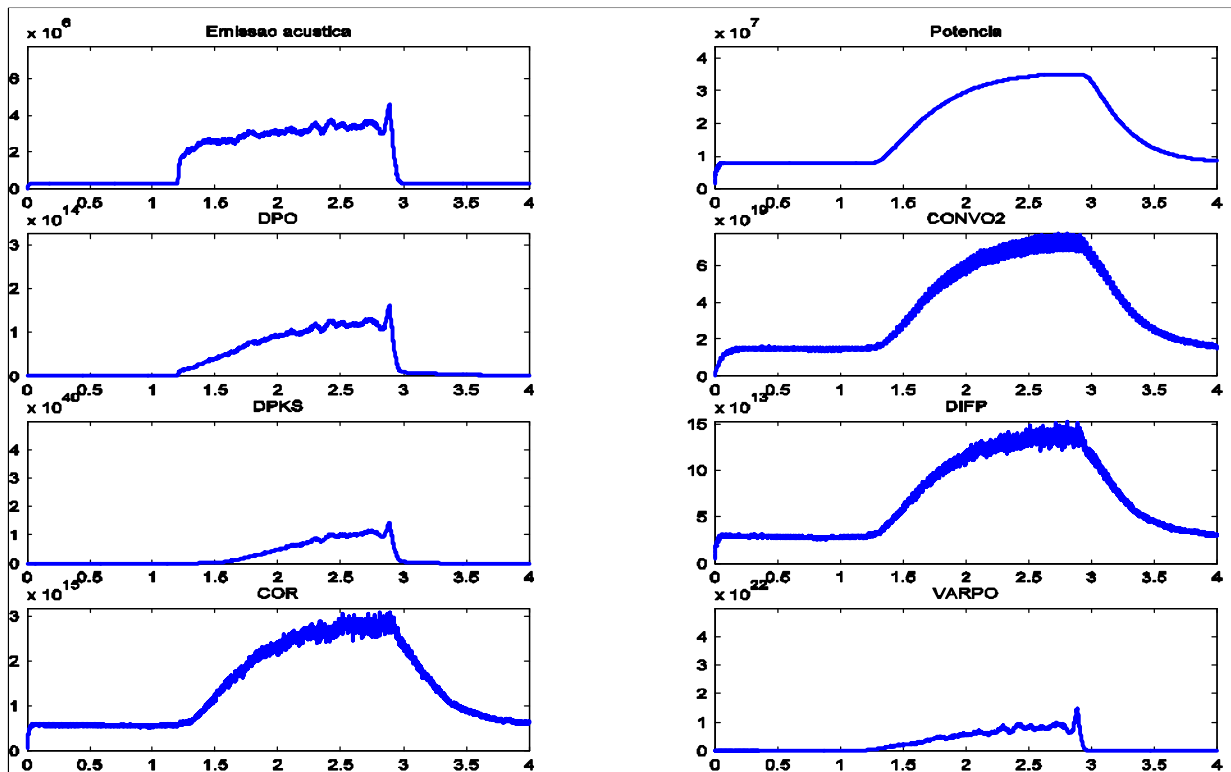


Figura 91 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 3ª Amostra para $a = 35,0 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts \times K

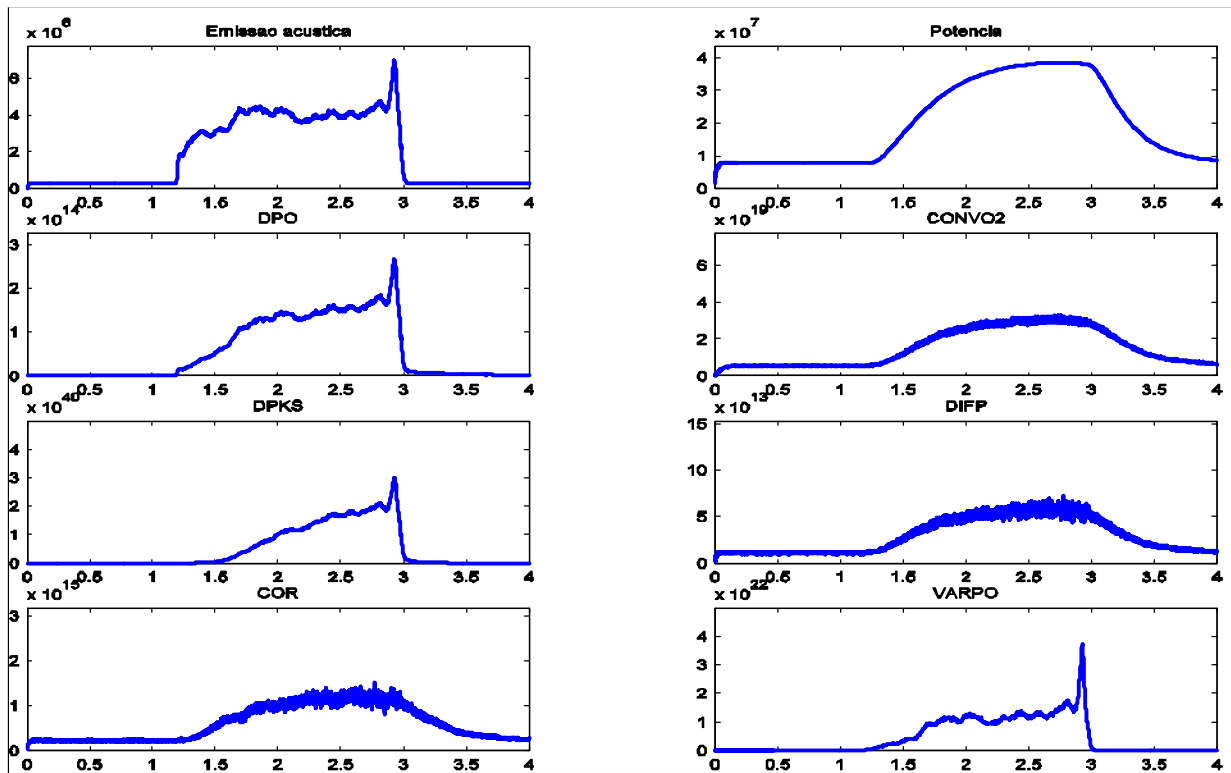


Figura 92 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 1ª Amostra para $a = 40,0 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts \times K

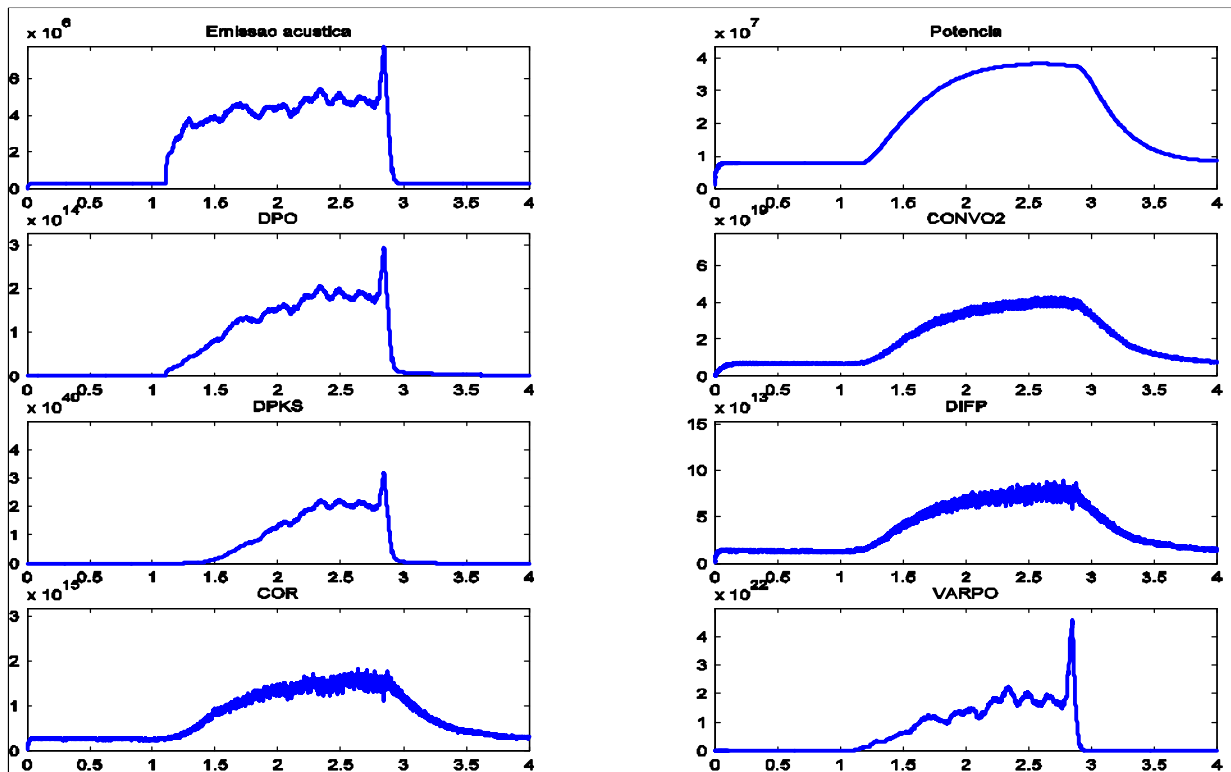


Figura 93 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 2ª Amostra para $a = 40,0 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts \times K

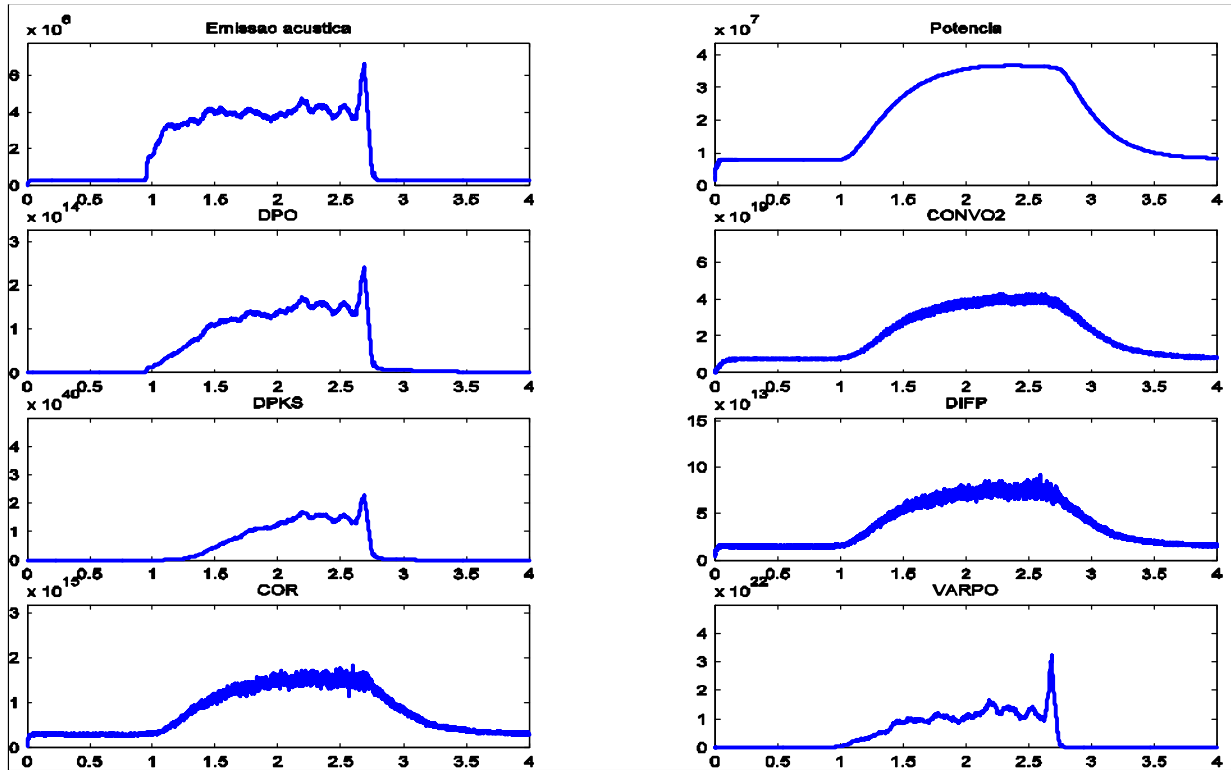


Figura 94 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 3ª Amostra para $a = 40,0 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts×K

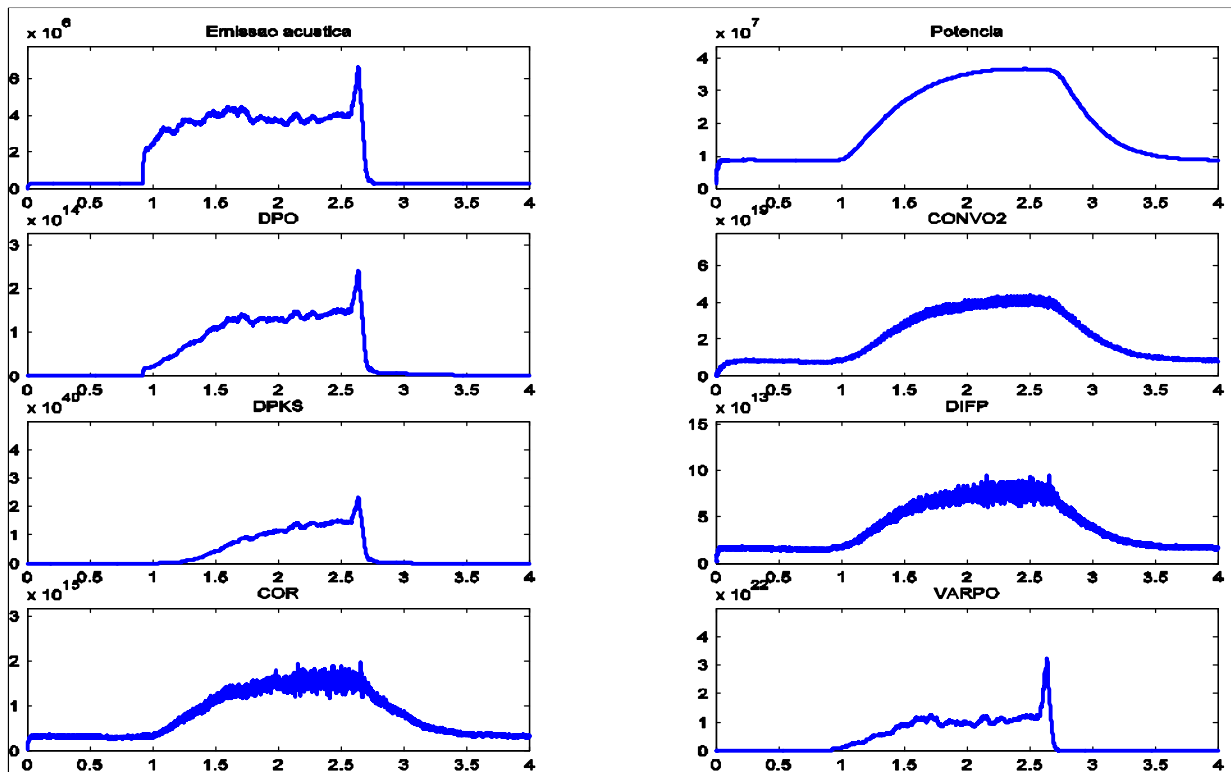


Figura 95 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 1ª Amostra para $a = 50,0 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts×K

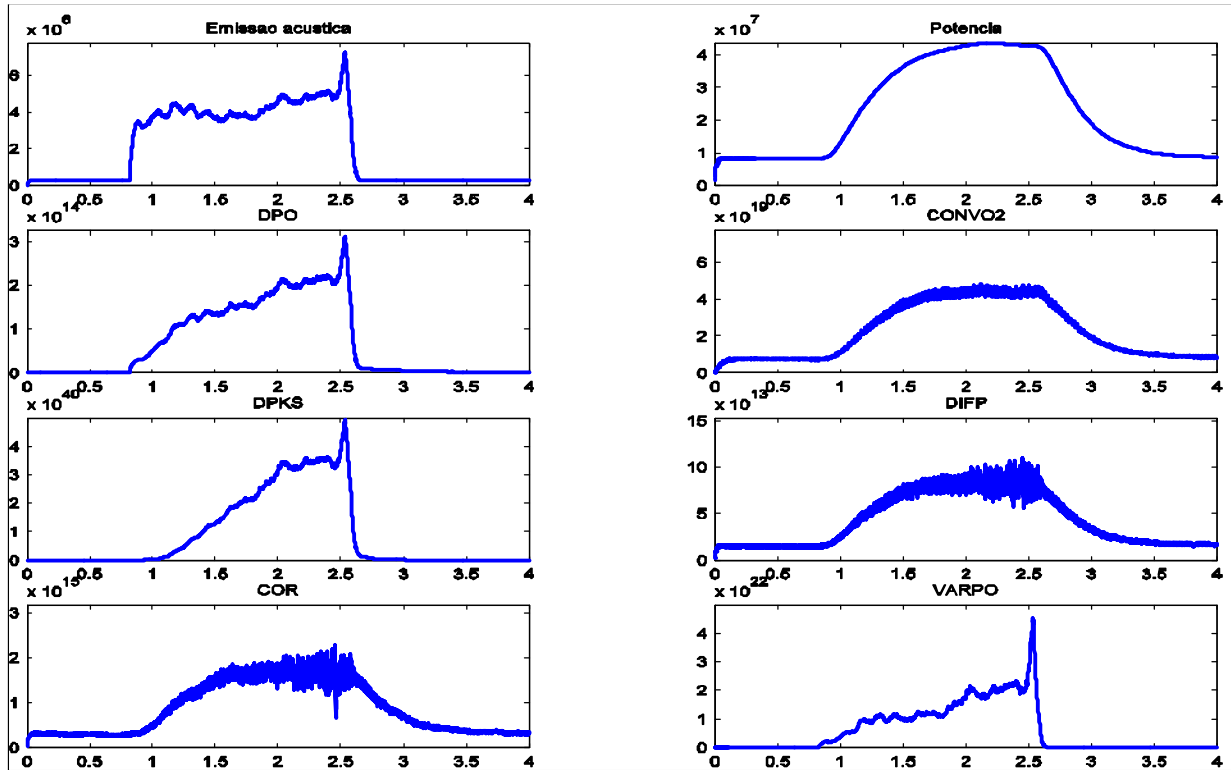


Figura 96 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 2ª Amostra para $a = 50,0 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts×K

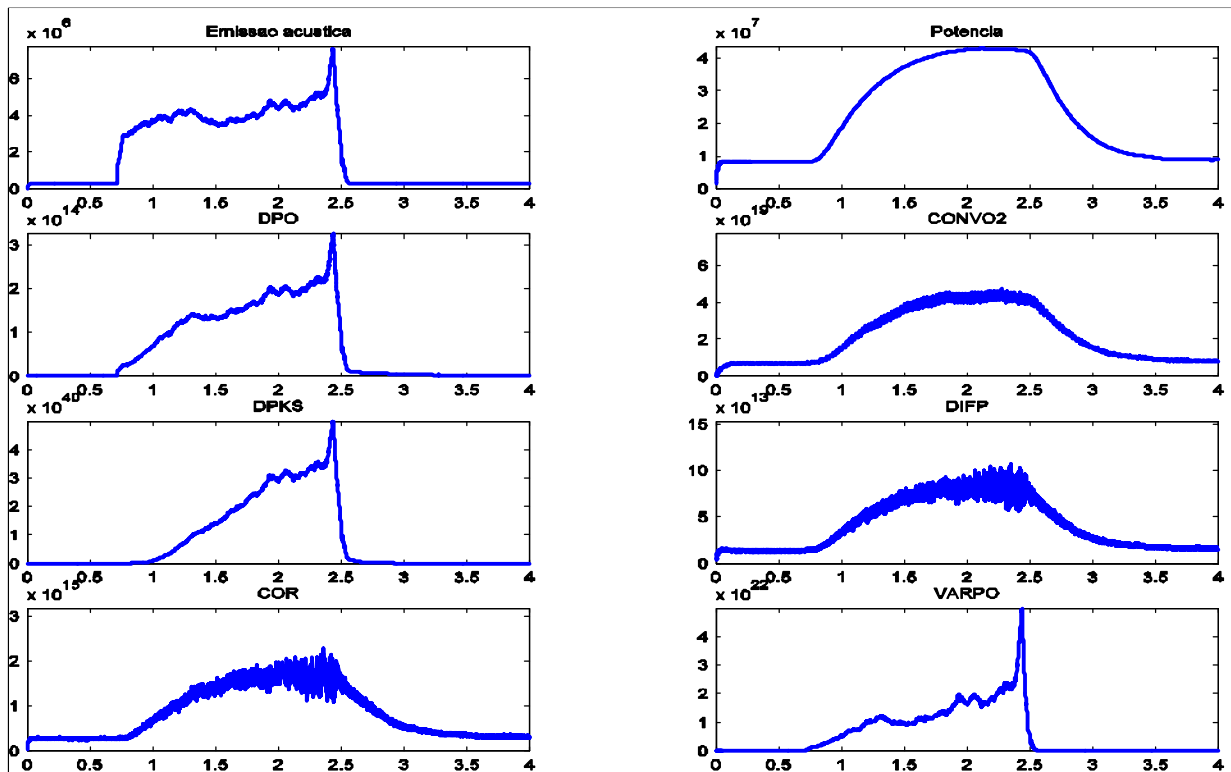


Figura 97 – Gráficos das Aquisições e Resultados → 3ª Amostra para $a = 50,0 \mu\text{m}$;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts×K

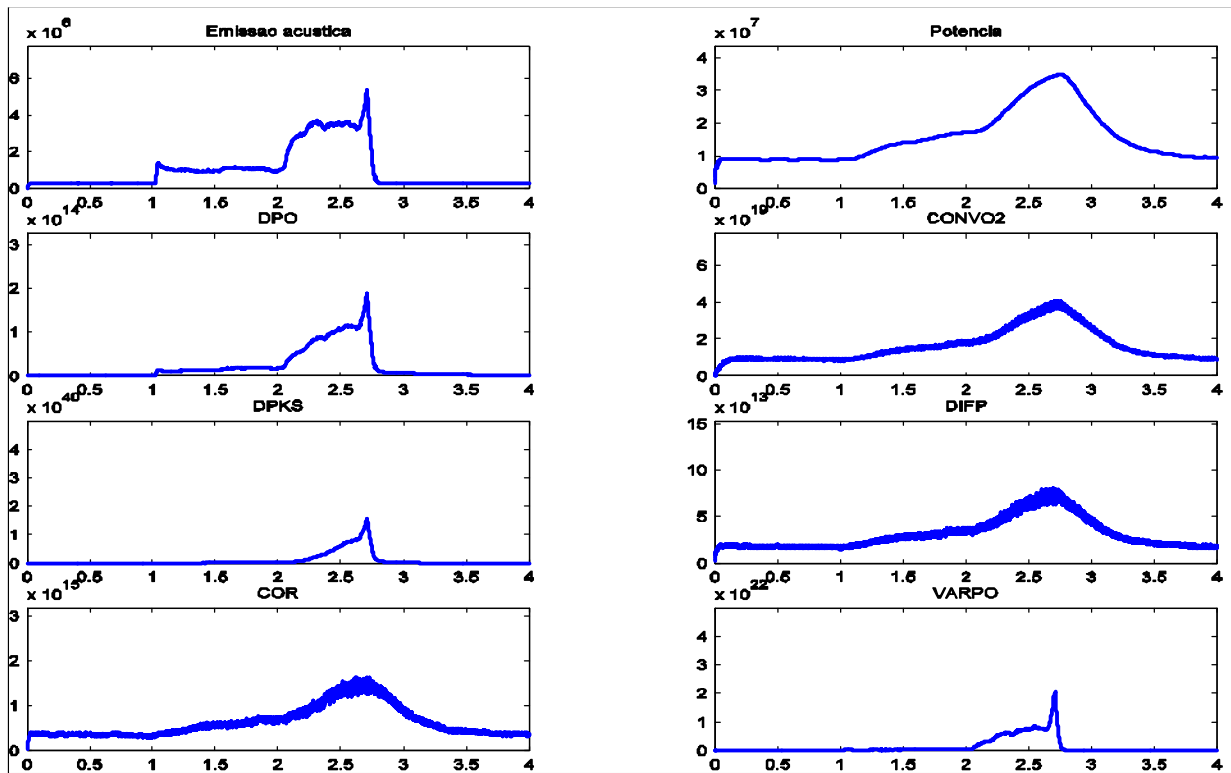


Figura 98 – Gráficos das Aquisições e Resultados para peça com Degrau – 1ª Amostra;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts×K

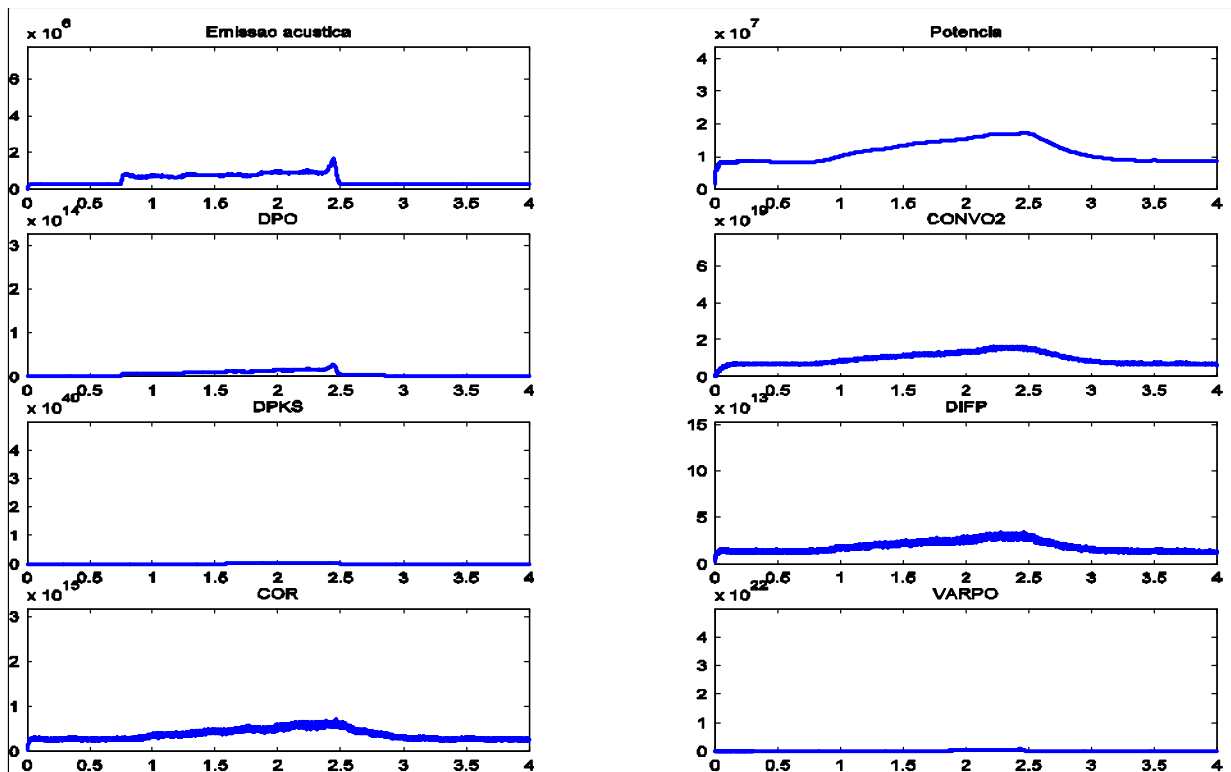


Figura 99 – Gráficos das Aquisições e Resultados para peça com Degrau – 2ª Amostra;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts×K

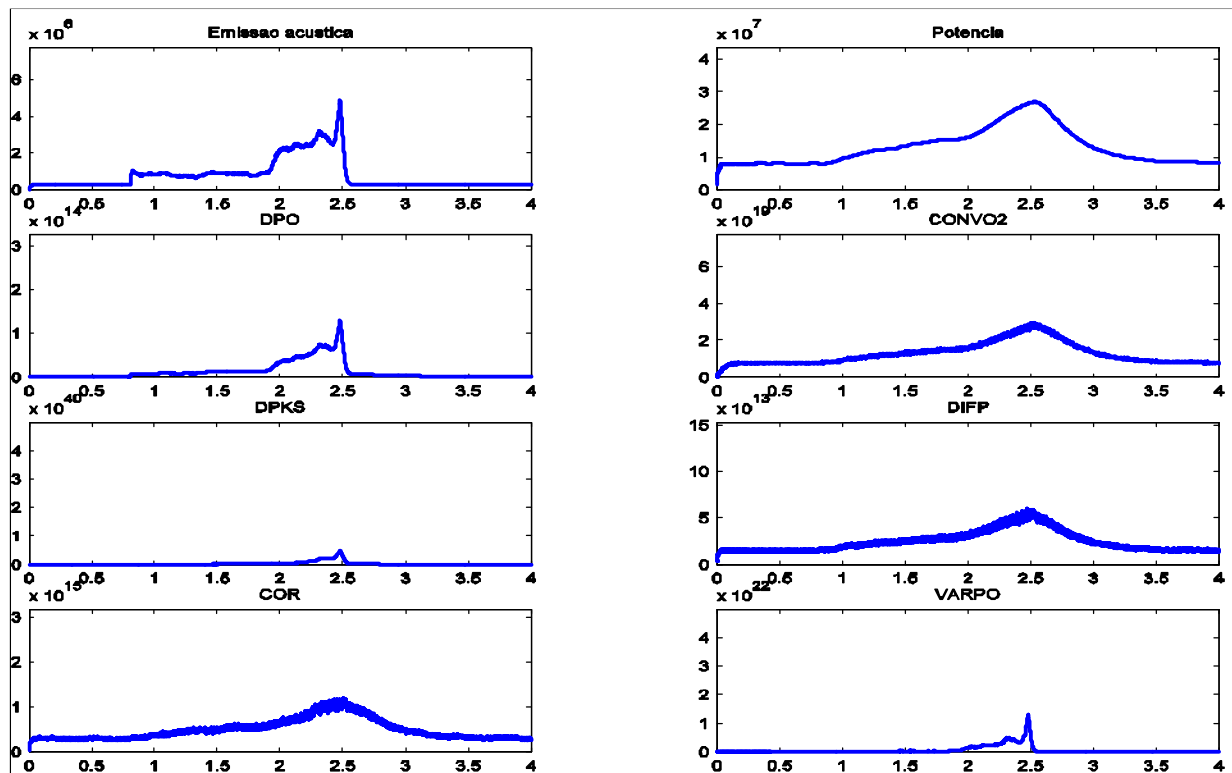


Figura 100 – Gráficos das Aquisições e Resultados para peça com Degrau – 3ª Amostra;
Escala horizontal em segundos; Escala vertical em Volts×K

A partir dos resultados mostrados nos gráficos da Figura 80 à Figura 97, foram calculadas as médias dos valores para cada passada em relação a cada parâmetro estudado bem como os respectivos desvios-padrão. Para calcular a média dos valores para $a = 10 \text{ m}$ foram tomados todos os pontos de um determinado parâmetro dos gráficos da Figura 80, Figura 81 e Figura 82; para $a = 22,5 \text{ m}$ usou-se os gráficos da Figura 83, Figura 84 e Figura 85 e assim por diante. Essas médias geraram os gráficos de barras da Figura 101.

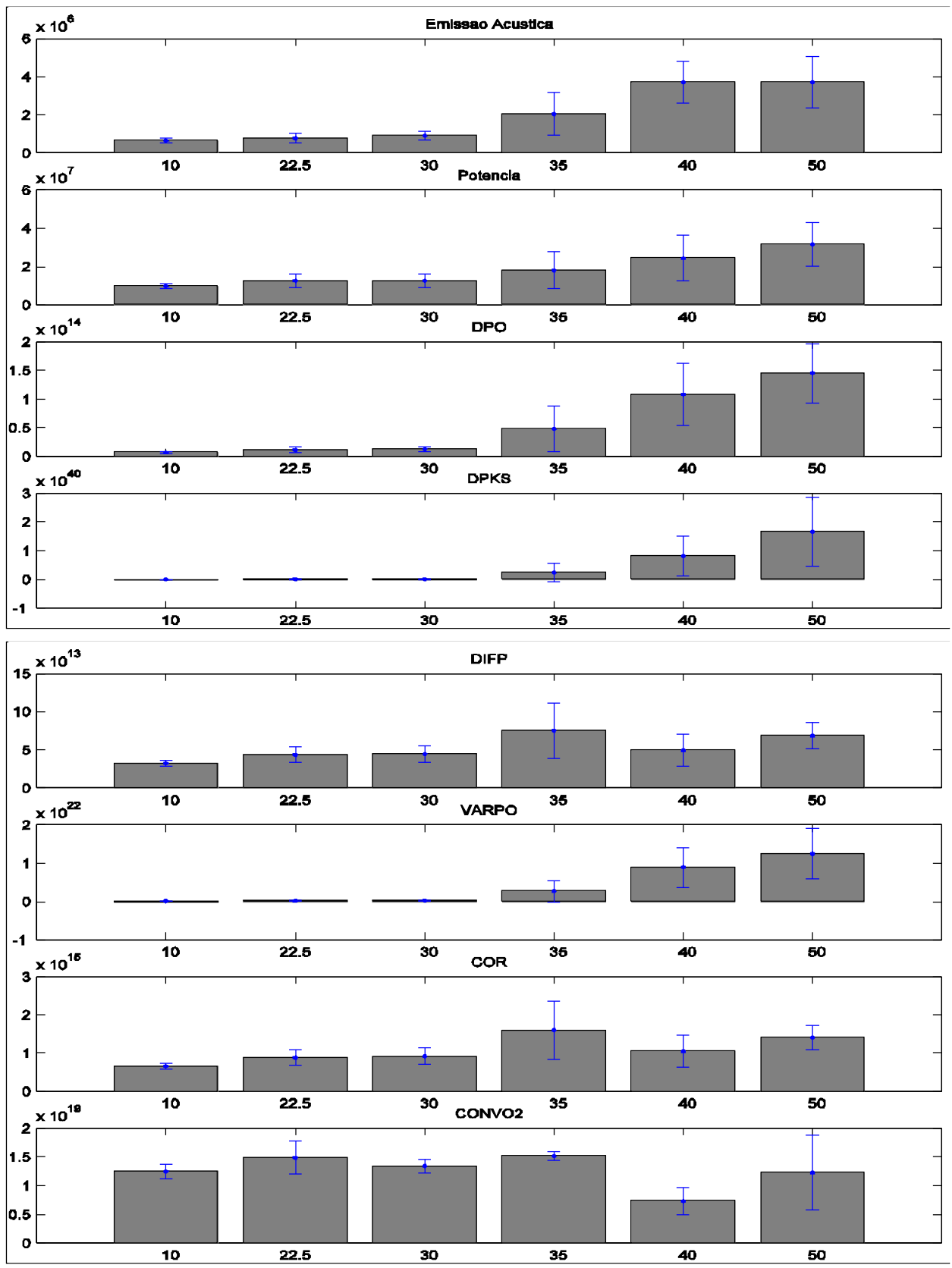


Figura 101 – Médias e Erros dos valores e resultados dos ensaios;
 Escala horizontal em μm - profundidade de corte; Escala vertical em Volts \times K

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE QUEIMA

- EMISSÃO ACÚSTICA – RMS

Visualizado as médias da Emissão Acústica da Figura 101, observa-se que seus valores permanecem semelhantes até $a = 30\mu\text{m}$. A partir deste ponto sua média aumenta significativamente, coincidindo com o início da queima das peças ensaiadas.

Mais aprofundadamente, para as peças com $a = 35\mu\text{m}$, a média da Emissão Acústica da peça L1 passou de $9,79 \cdot 10^5$ unidades na Figura 89, para a média de $24,90 \cdot 10^5$ unidades na peça L2, Figura 90, e média de $26,83 \cdot 10^5$ unidades na peça L3, Figura 91. Visto que L1 queimou, enquanto que L2 e L3 não obtiveram queima.

Assim, verificasse que o sinal RMS de Emissão Acústica é um parâmetro que quantifica a queima na retificação para o aço ABNT 1020, podendo estipular para estas condições de ensaios um limite dinâmico de queima de $20 \cdot 10^5$ unidades, vendo que ocorreu esse valor máximo para a peça L1 da Figura 90, ou um limite de $(9,69+24,9)/2 \cdot 17,5 \cdot 10^5$ unidades para a média de toda a passada.

Nota-se, conforme descrito nas análises de rugosidade do item 6.2, que o sinal de emissão acústica tem comportamento semelhante à rugosidade média em alguns pontos. Porém, esse comportamento corresponde mais aos valores de queima da peça. Observa-se na Tabela 8 que a peça M1, que obteve queima a partir de 10mm intensificando a partir de 20mm, e sua emissão acústica, na Figura 92, teve uma elevação em seu gráfico aumentando entre os pontos 1,5s e 1,75s até estabilizar em $40 \cdot 10^5$ unidades. A peça M2 obteve queima a partir de 8mm de contato do rebolo com a peça, a peça M3 teve queima a partir de 6mm, sendo mais forte a partir de 13mm. Respectivamente, nos gráficos da Figura 93 e da Figura 94, obtiveram um crescimento logo no início do contato. Vendo a peça O1, queimou a partir de 8mm com severidade a partir de 30mm, esse crescimento é visto na Figura 95. Nas peças O2 e O3 a queima foi imediata, verificada nos gráficos da Figura 96 e da Figura 97.

- POTÊNCIA ELÉTRICA

Outro sinal adquirido na aquisição, a Potência Elétrica do motor do rebolo, não houveram grandes variações usando profundidades de corte menores que $a = 35\mu\text{m}$, comparando com às profundidades maiores, visto na Figura 101. Observando as análises da peça L1, Figura 89, em relação às peças L2 e L3, Figura 90 e Figura 91, essa variável altera-se sensivelmente quando ocorre a queima da peça, com valores respectivamente de $1,30 \cdot 10^7$,

$2,07 \cdot 10^7$, $2,05 \cdot 10^7$ unidades, também verificando que a Potência é representativa da queima numa retificação. O limite de queima para este parâmetro estaria compreendido entre o primeiro e o último valor, ou seja, podemos estimar $1,60 \cdot 10^7$ unidades. O limite instantâneo pode ser estimado como o máximo valor da potência para a peça em que não houve queima, L1, que é $2,0 \cdot 10^7$ unidades.

Porém, os sinais brutos de Potência são atrasados no tempo devido às capacitâncias e inércias do sistema, com seu comportamento de carga quando o rebolo é solicitado e descarga ao sair o rebolo sobre peça. Devido a estes atrasos do sistema, a Potência não é um bom parâmetro para a localização da queima na peça, mas é um bom parâmetro para parametrizar toda a passada.

Os valores de Emissão Acústica combinados com os de Potência geram parâmetros de quantização de queima na retificação.

- DPO (Aguiar, 2003)

O parâmetro DPO, apresentou variação significativa para seus valores totais por passada, conforme Figura 101. Os valores médios de DPO foram de $6,9 \cdot 10^{12}$, $11,2 \cdot 10^{12}$ e $12,5 \cdot 10^{12}$ unidades, respectivamente às peças C-10 μ m, H-22,5 μ m e K-30 μ m as quais não obtiveram queima, e $47,6 \cdot 10^{12}$, $108 \cdot 10^{12}$ e $145 \cdot 10^{12}$ unidades, respectivamente às peças L-35 μ m, M-40•m O-50•m.

Para os valores instantâneos, como o parâmetro relaciona Potência Elétrica e Emissão Acústica, verifica-se na Figura 90 e na Figura 91 que o parâmetro passou a ser observado significativamente, o que não ocorreu nos gráficos anteriores. Porém, o parâmetro DPO não representa a superfície de queima, verificado que a partir da Figura 90, todas as análises começaram a surgir logo no início do contato do rebolo, crescendo até o fim do processo. O parâmetro é bem aceito como valor médio de uma passada, podendo estipulá-lo em $(12,5+47,6)/2 \cdot 30 \cdot 10^{12}$ unidades. O valor máximo da curva de L1 ficou muito pequeno através de seu gráfico normalizado, mas seria um bom limite para os valores instantâneos $0,5 \cdot 10^{14}$ unidades.

- DPKS (Dotto, 2004)

No parâmetro DPKS também se verifica que obteve valores visíveis a partir do gráfico normalizado da Figura 90.

Em se tratando do sinal médio por passada, Figura 101, o parâmetro obteve um bom comportamento, tendo pequena variação antes da queima e crescendo em relação que é aumentado a profundidade de corte. O parâmetro passou de $0,78 \cdot 10^{38}$ unidades, para as todas as peças de $a = 30\mu\text{m}$, para $23,4 \cdot 10^{38}$ unidades, para todas as peças de $a = 35\mu\text{m}$. Para a peça L1, de $a = 35\mu\text{m}$, ocorreu que o valor ficou em $1,04 \cdot 10^{38}$ unidades onde não houve queima, e as peças L2 e L3, de $a = 35\mu\text{m}$, ficaram em $33,8 \cdot 10^{38}$ e $35,5 \cdot 10^{38}$ unidades, respectivamente, onde obtiveram queima. Assim, uma estimativa do limite para este parâmetro estaria ao meio destes valores, ou seja, $17 \cdot 10^{38}$ unidades.

Vendo no gráfico da Figura 90, um valor estimado para o limite instantâneo de queima para os valores de DPKS seria $2,5 \cdot 10^{38}$ unidades, uma vez que não há visualização gráfica para quando não ocorre a queima.

O parâmetro começou a ter significância a partir do ponto 1,5s para a Figura 92, onde a peça M1 começou a queimar somente a partir de 10mm, conforme Tabela 8. Já para a peça O2, onde obteve queima imediata, o gráfico de DPKS da Figura 96 mostra que o valor apareceu ao mesmo tempo que a emissão acústica. Porém, não se pode afirmar que o parâmetro utilizado desta forma detecta o início da queima, pois o trabalho que originou tal parâmetro utilizou diversas passadas até que o rebolo perdesse a afiação e queimasse a peça. Isso é observado na Figura 97, onde a peça teve queima no instante que o rebolo tocou a peça e o gráfico apresenta um atraso de resposta em aproximadamente 0,5s. Porém, somente o DPKS sinalizou corretamente em seu gráfico a faixa de queima leve para peça H3, Figura 85.

- DIFP (Dotto, 2004)

Como o parâmetro DIFP, Equação 47, leva em consideração valores do coeficiente angular • da reta que vai de 0 até o valor máximo do sinal de Emissão Acústica, dentro da janela, seus resultados ficaram muito sensíveis à pequenas variações, amplificando os ruídos do sinal, visto entre a Figura 80 até a Figura 97. Os valores médios ficaram disformes conforme vistos no gráfico correspondente da Figura 101. Com isso o parâmetro não é adequado para a análise de queima.

- VARPO

Na Figura 101 os valores do parâmetro VARPO responderam bem aos ensaios. Seus resultados começaram a aparecer significativamente nos gráficos a partir da Figura 90, ou seja a peça L2 que foi a primeira que houve queima, com profundidade de corte $a = 35\mu\text{m}$, detectando o limite de queima. Para as médias de VARPO, Figura 101, este limite está

compreendido entre $3,27 \cdot 10^{21}$ e $36,6 \cdot 10^{21}$ unidades, respectivamente são as médias de L1 e L2. Uma boa estimativa para o limiar deste parâmetro seria o valor médio dessas médias, $20 \cdot 10^{21}$ unidades.

Analisando os sinais brutos, nota-se que quando a profundidade de corte ultrapassa $35\mu\text{m}$, os valores de VARPO começam a se destacar nos gráficos, confirmando a afirmação acima. Da mesma forma que o DPKS, uma estimativa do limite instantâneo seria $0,25 \cdot 10^{22}$ unidades.

Observando o aspecto do início da queima, o parâmetro começou a ter maior magnitude na peça M1 a partir do ponto 1,7s, aproximadamente $11,6 \cdot 10^{21}$ unidades (Figura 92), onde o corpo de prova começou a queimar somente a partir de 10mm, conforme Tabela 8. Para a peça O2, onde obteve queima imediata, o gráfico de VARPO da Figura 96 mostra que o valor apareceu com um pequeno tempo de atraso com apenas 0,2s após o início da emissão acústica, que determina o início do contato do rebolo com a peça devido ao sinal ser muito sensível.

- COR

Fazendo a correlação matemática dos valores de Emissão Acústica e Potência Elétrica, sendo esta última atrasada em 100 pontos, conforme a respectiva Equação 50 os valores calculados de COR não apresentarão bons resultados, pois, houve grande variação de suas médias na Figura 101. Observando mais detalhadamente, as médias de $35\mu\text{m}$ ficaram maiores que as médias de $40\mu\text{m}$, respectivamente $1,60 \cdot 10^{15}$ e $1,04 \cdot 10^{15}$ unidades, o que não deveria pois a queima também ocorreu nas peças de $40\mu\text{m}$. Contudo, observou-se que os gráficos de COR foram muito semelhantes aos de DIFP em seus valores médios da Figura 101.

Os valores brutos, também apresentaram o mesmo comportamento. Na Figura 90, peça L2, e na Figura 91, peça L3, os valores de COR (e também de DIFP), tiveram os maiores valores, reduzindo seus valores para os gráficos seguintes, onde também tiveram queima.

- CONVO2

Pela convolução bidimensional da Emissão Acústica e Potência Elétrica, os resultados para CONVO2 obtiveram grandes variações na Figura 101. Analisando os sinais brutos da Figura 92, a Figura 93 e a Figura 94, que possuem profundidade de corte de $40\mu\text{m}$, obtiveram os menores valores, com média total de $7,31 \cdot 10^{18}$ unidades, e que, tais peças ficaram com queima, verifica-se que os valores de CONVO2 não apresentaram um comportamento confiável.

- DEGRAUS

Para as peças em degrau, com exceção à Figura 99 em que o sinal de emissão acústica não se alterou e apesar de aparecer na Tabela 7 queima em 14,4% da peça, notou-se que a emissão acústica respondeu imediatamente a solicitação de corte da peça, confirmando sua resposta dinâmica ao sistema. Também na potência elétrica houve crescimento quando o rebolo era solicitado numa profundidade maior, mas também se observa o retardo na resposta do sinal.

Nos cálculos das peças com degrau, notou-se que os parâmetros DPKS e VARPO obtiveram respostas relativamente maiores que os outros parâmetros, identificando a região de queima da peça. Nas Figura 98 e Figura 100, os sinais de emissão acústica destacaram bem a região de elevação da peça. Assim, os parâmetros DPO, DPKS, e VARPO, os quais foram bem relacionados à detecção de queima, elevaram seus valores nesta região. Mais atentamente, VARPO ficou mais nítido que os outros desde o início da queima.

6.5 RESULTADOS UTILIZANDO O MICROCONTROLADOR

Utilizando o Hardware proposto no item 4.6, foi executado um experimento para conferir se o software gera o valor total médio por passada, de cada um dos parâmetros. Foram colocadas as mesmas condições de usinagem (rebolo de óxido de alumínio, fluido de corte e aço ABNT 1020). A profundidade de corte para o teste do software e hardware utilizada foi de 40• m que caracteriza uma peça com queima.

Foram obtidos os resultados da Figura 102.



Figura 102 – Parâmetros coletados no display LCD

Como a correlação e a convolução (itens 5.8 e 5.9) são cálculos realmente pesados para se fazer num microcontrolador, além de exigir uma exorbitante capacidade de memória de dados, não foi possível implementá-lo no software do microcontrolador. Já para as outras estatísticas foram possíveis.

Observando os valores médios de EA, POT, DPO, DPKS, DIFP e VARPO da Figura 101 para uma profundidade de corte de 40 μ m, podemos constatar que os parâmetros ficaram muito próximos ao desejado. Mas devem-se observar algumas discussões:

- § Utilizando este método, não é possível obter os mesmos valores desejados que a aquisição de sinal bruto devido à aquisição do módulo se dar numa frequência bem menor, 400Hz, devido a limitações construtivas.
- § Ruídos do ambiente podem ter sido captados pelo equipamento ao colocá-lo em teste, alterando seus valores em alguns instantes.
- § Outro ponto seria que mesmo sendo um ensaio com as mesmas características, devido a dimensões muito reduzidas da profundidade de corte combinado a potências e velocidades muito altas, nenhum ensaio será idêntico.
- § Os valores de EA_{RMS} e POT ficaram próximos ao desejado por ser semelhante à um valor médio, não dependendo da taxa de amostragem.
- § Fazer uma taxa de aquisição menor tem as conseqüências nos cálculos que necessitam do desvio-padrão. Como o sinal não é captado com tanta variação, um erro é apresentado nos resultados de DPO, DPKS e VARPO (Equações 45, 46 e 48). Já o valor de DIFP sentiu menos a variação da taxa de aquisição por não depender do desvio-padrão.

7 CONCLUSÕES

Na revisão bibliográfica pode-se verificar que a dificuldade da detecção de queima num processo de retificação, onde a ferramenta de corte apresenta diversas arestas cortantes, não é tão simples e que merece aprimoramento para ter um controle do processo. Como a energia do processo se transforma praticamente toda em calor (item 3.2.11) e a dificuldade da operação de retificação por utilizar profundidades de corte em escalas muito pequenas, a energia específica de retificação pode variar por pequenas alterações de precisão e condições de usinagem do processo (Equação 2). Com eficácia, o estudo de retificação por sinais indiretos do processo de emissão acústica e potência de corte tem conseguido fornecer maior domínio desta importante área.

Para os ensaios de rugosidade, observou em geral um aumento do seu valor médio por passada com o incremento da profundidade de corte a . Isso caracteriza que o acabamento da superfície e conseqüentemente sua precisão sofrem influências da retificação mesmo quando não há a ocorrência de queima. Porém não sofre grandes variações na ocorrência da queima.

Com a transformação de alguns grãos cristalinos do aço em outros subprodutos sob fortes condições térmicas dinâmicas (como austenita, vista no item 3.4.1), a microdureza é relação direta da superfície e da quantidade de queima que ocorreu no material. É possível a observação sob o gráfico em barras da Figura 77, onde o valor permanece constante enquanto não há a queima, abaixo de 35 μ m de profundidade de corte. Para valores superiores de profundidade de corte, a microdureza sofreu elevação e permaneceu noutra patamar com a ocorrência da queima sobre a superfície da peça.

Como os valores de rugosidade e de microdureza são realizados por experimentos laboratoriais, assim como o processo de aquisição de imagem (item 6.1), ainda não podem ser implantados numa monitoração ou num controle do processo. Essas etapas ficam então

destinadas apenas para estudos da superfície da peça após a retificação, avaliando a qualidade final do produto.

Observa-se nos gráficos da Figura 80 até a Figura 97, para os cálculos de DIFP, COR e CONVO2, suas curvas apresentaram aspectos similares aos gráficos de potência de corte. Já os gráficos de DPO, DPKS e de VARPO apresentam aspectos semelhantes com os gráficos de Emissão Acústica, e que, tais parâmetros representaram melhor a queima. Contudo, observa-se a interação da Potência nos gráficos de todos os parâmetros estatísticos em que é incluso.

As curvas de potência de corte e emissão acústica ficaram conforme o esperado, tendo um crescimento à medida que incrementa a profundidade de corte do rebolo sobre a peça, verificado na Figura 101 que apresenta as médias dos parâmetros por passada para cada profundidade, validando os ensaios para o cálculo dos parâmetros. Conclui-se que os parâmetros estatísticos DIFP, COR e CONVO2, descritos nas análises do item 6.4, não representaram a queima de uma superfície usinada numa retificadora plana para o aço ABNT 1020, calculados num processo de retificação de apenas uma passada sobre a peça. Mas podemos concluir que os parâmetros DPO, DPKS e VARPO conseguem detectar com grande êxito a queima ao terminar a passada. Foram estimados limites para estes valores no item 6.4 que podem ser inseridos em um controle de processo ou, na proposta do projeto deste trabalho, implantá-lo a um sistema com baseado em microcontroladores.

Para resumir os limites de queima para este tipo de retificação, rebolo, aço e condições de usinagem, a Tabela 11 é mostrada abaixo.

Tabela 11 – Limites estimados para os parâmetros de queima

Peça	LIMITES				
	EA_{RMS}	POT	DPO	DPKS	VARPO
Média Máx.	$17,5 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^7$	$30 \cdot 10^{12}$	$17 \cdot 10^{38}$	$2,0 \cdot 10^{21}$
Máx. Valor Instantâneo	$20 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^7$	$0,5 \cdot 10^{14}$	$2,5 \cdot 10^{38}$	$0,25 \cdot 10^{22}$

escala em unidades

Durante a análise dos sinais brutos, é possível verificar se as estatísticas que se aproximaram do ponto de início de queima. Isso é visto na Tabela 12.

Tabela 12 – Detecção de início de queima

Prof. <i>a</i> [μm]	Peça	Início de Queima [mm] leve/méd./sev.	ESTATÍSTICAS				
			EA _{RMS}	POT	DPO	DPKS	VARPO
10,0	C1	-	-	-	-	-	-
	C2	-	-	-	-	-	-
	C3	-	-	-	-	-	-
22,5	H1	-	-	-	-	-	-
	H2	-	-	-	-	-	-
	H3	30 (levíssima)	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘
30,0	K1	-	-	-	-	-	-
	K2	-	-	-	-	-	-
	K3	-	-	-	-	-	-
35,0	L1	-	-	-	-	-	-
	L2	10 / 15 / 27	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘
	L3	00 / 14 / 24	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘
40,0	M1	10 / -- / 20	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘
	M2	-- / 08 / 17	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘
	M3	06 / -- / 13	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘
50,0	O1	08 / 20 / 30	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘
	O2	-- / -- / 03	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘
	O3	-- / 03 / 04	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘

onde: ⊘ - acerto e ⊘ - erro

Verificar se o início da queima foi detectado é importante. Não só detectar o ponto em que começa a queima, mas também a variação da queima sobre a superfície das peças usinadas seria o ideal. Como são sinais coletados de variáveis dinâmicas e que interagem com o meio ambiente, sofrendo ações ainda não totalmente explicadas ou sequer excluídas do processo, os parâmetros poderiam estimar o ponto de início.

Para montar essa tabela, utilizou-se os máximos valores instantâneos nos gráficos da Figura 80 até a Figura 97. Se o parâmetro se aproximava visualmente do ponto de queima foi sinalizado correto na tabela. Pode-se observar claramente que o parâmetro VARPO, para o limite instantâneo estipulado, foi o mais coerente, acertando o início da queima em maior quantidade (77,7%). Porém, ele também falhou para a detecção do ponto de início de duas queimas. Já para os outros parâmetros, eles acertaram a mesma quantidade em peças distintas (55,5%), com exceção da potência o qual não é indicada para determinar o início da queima.

Também se deve observar que o parâmetro DPKS foi o único a detectar uma queima leve sobre a peça H3.

Implantar os parâmetros através dos limites da Tabela 11 em microcontroladores, visto a possibilidade apresentada no presente trabalho, para a monitoração de uma retificação observando os danos térmicos ou informando ao operador da retificadora a queima da peça tornou-se possível. Através do algoritmo e das técnicas incorporadas ao trabalho foi possível quantificar em valores o processo de retificação durante uma passada.

8 PROJETOS FUTUROS

Como projetos futuros, sugere-se:

- § Fazer uma implementação das estatísticas que foram bem sucedidas em DSP, que são muito mais velozes que os microcontroladores e que possuem internamente módulos mais eficazes para cálculos matemáticos.
- § Caso haja necessidade da predição de queima, uma estratégia seria de implantar sinais e parâmetros em malhas de redes neurais artificiais ou neuro-fuzzy, o qual se encontra em andamento no LADAPS, Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais.
- § Se o enfoque se destina a simplificar e baratear a monitoração do processo, se pode estudar a aquisição de sinais com frequências menores que 2,5MHz, aplicando filtros passa-baixa, com frequências de corte que variam de 200 a 500KHz.

9 BIBLIOGRAFIA

- ABEBE, M. e APPL, F. C., “A Slip Line Field for Negative Rake Angle Cutting”, Proceedings, Ninth North American Manufacturing Reserch Conference, SME, 1981, p.341.
- AGUIAR, P. R., WILLET, P., WEBSTER, J. “Acoustic Emission Applied to Detect Workpiece Burn During Grinding”, International Symposium on Acoustic Emission: Standards and Technology Update, S. Vahaviolos, Ed., Fort Lauderdale, FL, January 1999.
- AGUIAR, P. R. “Monitoramento da Queima Superficial em Processo de Usinagem por Retificação usando a Potência Elétrica do Motor de Acionamento e Emissão Acústica”, Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, 1997.
- AGUIAR, P. R. “Controle Automático de Danos Térmicos na Usinagem por Abrasão através do Processamento de Sinais de Emissão Acústica e Potência Elétrica”, Bauru, 2003. Tese (Livre Docência em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP.
- AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C., DOTTO, F. R. L., FLAUZINO, R. e SPATTI, D. “Neural Network Applied to Detect Burn in Grinding”, Artigo publicado e apresentado no The IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications, Innsbruck-Austria, fev. 2005.
- AGUIAR, P. R. ; SERNI, P. J A ; DOTTO, F. R. L. ; BIANCHI, E. C. “In-Process Grinding Monitoring Through Acoustic Emission”, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, São Paulo, v. XXVIII, n. 1, p. 118-124, 2006.
- AKBARI, J.; SAITOB, Y.; HANAOKAB, T. “Effect of Grinding Parameters on Acoustic Emission Signals while Grinding Ceramics”, Materials Processing Technology, Tehran/Iran, 1996
- BACKER, W. R., MARSHALL, E. R. e SHAW, M. C., “The Size Effect in Metal Cutting”, Trans. ASME, 74, 1952, p.61.
- BADGER, J. A. e TORRANCE, D. A. “Burn Awareness”. Cutting Tool Engineering Magazine. Dezembro, 2000 , Volume 52, Número 12.
- BERKOVITS, A. e FANG, D. “Study of Fatigue Crack Characteristics by Acoustic Emission”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 51(3), pp. 401-416, 1995.

- BIANCHI, E. C., SANCHES, L. E. A., FERNANDES, O. C., MOGAMI, O., SILVA Jr, C. E. e AGUIAR, P. R. “Análise do Comportamento de Rebolos Convencionais na Retificação de Aços Frágeis”, Congresso Norte Nordeste de Engenharia Mecânica, IV, Recife/PE, pp. 335-340, 1996.
- BIANCHI, E. C., SANCHES, L. E. A., FERNANDES, O. C., MOGAMI, O., SILVA Jr, C. E. e AGUIAR, P. R. “Análise do Comportamento de Rebolos Convencionais na Retificação de Aços Dúcteis”, Congresso Norte Nordeste de Engenharia Mecânica, IV, Recife/PE, pp. 387-392, 1996.
- BIANCHI, E. C.; OLIVEIRA, J. F. G. Comportamento das forças de corte em rebolos de CBN com ligante resinóide e sua influência no desempenho do processo de retificação. Revista Engenharia e Ciências Aplicadas. São Paulo, V.2, p. 79 - 90, 1994/1995. ISSN - 0104-6314.
- BIANCHI, E. C. “Ação das Condições de Dressagem na Retificação de Precisão”, Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1990.
- BIFANO, T. G. e YI, Y. “Acoustic Emission as na Indicator of Material-Removal Regime in Glass Micro-Machining”. Precision Engineering, Vol 4, No 4, October 1992, pp. 219-227.
- BYRNE, G., DORNFELD, D., INASAKI, I., KETTLER, G.; KÖNIG, W. “Tool Condition Monitoring (TCM) – The Status of Research and Industrial Application”, Anals of the CIRP, Vol. 44/2/1995.
- CHANG, Y. P. e .DORNFELD, D. A. “Chatter and Surface Pattern Detection for Cylindrical Grinding Using a Fluid Coupled Acoustic Emission Sensor”, pp. 159-167, 1993.
- DALLY, J. W.; RILEY, W. F.; McCONNEL, K. G. “Instrumentation for Engineering Measurements”, John Wiley & Sons, Inc, 2sd. Edition, 1993, ISBN 0471551929.
- DINIZ, A. E., CUPINI, N. L.; VILELLA, R. C. “Monitoramento do processo de usinagem por emissão acústica”. XI Congresso Brasileiro De Engenharia Mecânica, São Paulo, dezembro de 1991.
- DOEBELIN, E. O. “Measurement Systems Application and Design”, MacGraw -Hill Professional, 4th. Edition, 1990. ISBN: 0070173389.
- DORNFELD, D. A. “Application of Acoustic Emission Techniques in Manufacturing”, In: NDT&E INT., 1992, v.25, p. 259-269.
- DOTTO, F. R. L. “Sistema de detecção automática on-line de danos térmicos no processo de retificação com monitoramento via Internet”, Tese de Mestrado apresentada na Universidade de São Paulo – Unesp, Bauru, SP, 2004.

- DOTTO, F. R. L.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C.; SERNI, P. J. A.; THOMAZELLA, R. "Automatic System for Thermal Damage Detection in Manufacturing Process with Internet Monitoring", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, v. 1, p. No-Prelo, 2006.
- FELIPE, J. "Contribuição para Implementação de Funções de Retificação Inteligente (RI) Utilizando Técnicas de Monitoramento por Emissão Acústica", Tese de Doutorado, EESC, USP, São Carlos, 1996.
- FUSSE, R. Y. "Estudo Comparativo entre a Lubri-Refrigeração Convencional e a MQL no Processo de Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho", Dissertação de Mestrado, UNESP, Bauru/SP, 2005.
- HASSUI, A. "Estudo de Vibração Durante o Corte e Centelhamento na Retificação Cilíndrica de Mergulho", Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas/SP, 2002.
- HEKMAN, K. A.; LIANG, S. Y. "Compliance Feedback Control for Part Parallelism in Grinding". Advanced Manufacturing Technology, Georgia Institute of Technology, Atlanta/USA, 1999.
- INASAKI, I. "Sensor Fusion for Monitoring and Controlling Grinding Processes". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999, pp. 730-736.
- IRANI, R. A.; BAUER, R. J.; WARKENTIN, A. "A Review of Cutting Fluid Application in the Grinding Process" - International Journal of Machine Tools & Manufacture, Dalhousie University, Canada, 2005.
- SILVA, E. J. "Análise da Influência dos Tipos de Fluido de Corte e Rebolo na Retificação do Aço SAE HVN-3", Dissertação de Mestrado, UNESP, Bauru/SP, 2000.
- JEMIELNIAK, K. "Some Aspects of Acoustic Emission Signal Processing". Annals of the CIRP, 1997, pp. 1-8.
- JOHNSON, C. D. "Process Control Instrumentation Technology", Prentice Hall, 5 ed. New Jersey, 1997, 638 p.
- KANNAPPAN, S.; MALKIN, S. "Effects of the Grain Size and Operation Parameters on the Mechanics of Grinding", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 94, 1972, p.838-842.
- KHAZAN, A. D. "Transducers and Their Elements: Design and Application", Pearson Education POD, 1994, 572p. ISBN 0139294805.
- KING, R. I. e HAHN, R. S. "Handbook of modern technology". 3 New York, Chapman and Hall, 1986.

- KLUFT, W. “A Monitoração dos Processos Reduz Custos e Desperdícios”, Revista Máquinas & Metais, vol. 10, pp. 60-80, Outubro 1994.
- KOENIG, W. e KLUMPEN, T. “Monitoring and Sensor Concepts for Higher Process Reliability”, 5th Int. Grinding Conf., Cincinnati, Ohio, October 26-28, 1993.
- KÖNIG, W. “Fertigungsverfahren Band 2, Schleifen, Honen, Laeften”. VDI Verlag, Dusseldorf, 1980.
- KÖNIG, W. “Monitoring and Sensor Concepts for Higher Process Reliability”, In: 5th International Grinding, October 1990, Dearborn, Michigan.
- KRAR, S. F. “Grinding Technology”, 2 ed, Editora Delmar Publisher Inc., Albany, NY, 1995, 334p., ISBN 0-8273-6390-7.
- KWAK, J. S.; SONG, J. B. “Trouble Diagnosis of the Grinding Process by Using Acoustic Emission Signals” - International Journal of Machine Tools & Manufacture, Pusan National University, South Korea, 2000.
- RUGGIERO, M. A. G. e LOPES, V. L. R, “Cálculo Numérico – Aspectos Teóricos e Computacionais”, 2 ed., Pearson Education, São Paulo, SP, 1997, 422p, ISBN 85-3460204-2.
- KRUSZYNSKY, B. W. e WÓJEIK, R., “Residual stress in grinding”, Journal of Materials Processing Technology 109, 2001, pp. 254 -257.
- LEE, Y. “Probabilistic Analysis of Ductile/Brittle Transition in Diamond Turning of Brittle Materials”, Research Reports, 1998.
- LIU, J. B. “Monitoring the precision machining process: Sensors, signal processing and information analysis”, Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, USA, 1991.
- LYONS, R. G. “Understanding Digital Signal Processing”, Addison-Wesley Longman, Inc., 1997. ISBN 0-201-63467-8.
- MACKICHAN Software Inc. “Scientific Workplace ver. 5.5”, internal help, Poulsbo, WA, 2005, URL: <http://www.mackichan.com>.
- MALKIN, S. “Grinding technology: theory and applications of machining abrasives”. England: Ellis Horwood Limited, 1989, 275p.
- MALKIN, S. e Cook, N. H. “The wear of Grinding Wheels, Parte 1, Attritious Wear”, Trans. ASME, J. of Eng.for Ind., 93, 1971, p.1129.
- MAMALIS, A. G., Kundrak, J., Manolakos, D. E. “Effect of the workpiece material on the heat affected zones during grinding: a numerical simulation”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 22, pp 11-12, December 2003.

- MARSHALL, E. R. e SHAW, M.C. “Forces in Dry surface Grinding”, Trans. ASME, 74, 1952, p.51.
- MERCHANT, E. “Mechanics of the Metal Cutting Process”, J. Appl. Phys., 16, 1945, p.207.
- MICROCHIP, “PIC18FXX2 Data Sheet - High Performance, Enhanced Flash Microcontrollers with 10-Bit A/D” – 2002, Microchip Technology Inc., URL:<http://www.microchip.com>, July 2003, 330p. Ref. DS39564B
- MINER, G. F. e COMER, D. J. “Physical Data Acquisition for Digital Processing – Components, Parameters, and Specifications”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1992. ISBN 0-13-209958-6.
- MOSAICO, High Performance Solutions. “LabTools – McLab2”, included disk, Santo André, SP, 2005, URL: <http://www.labtools.com.br>.
- MUNEM, M. A. e FOULIS, D. J. “Cálculo”, vol. 1, LTC Editora, Rio de Janeiro, RJ, 2003, 682p, ISBN 85-2161054-8.
- OLIVEIRA, J. F. G. O., “Intelligent Grinding Systems (IGS): High Reliability and Automation Level in Precision Grinding”, Abrasives Magazine, pp. 11-22, June/July, 1998.
- OLIVEIRA, J. F. G. “Tópicos Avançados sobre o Processo de Retificação”, EESC, USP, São Carlos, 1989, Publicação 048/89.
- OPPENHEIM, A. V. e WILLSKY, A. S. “Signals & Systems”, Second Edition, Prentice Hall, 1998.
- PEREIRA, F., “Microcontroladores PIC – Programação em C”, 5 ed., Editora Érica, São Paulo, SP, 2003, 360p, 85-7194-9352.
- RUGGIERO, M. A. G. e LOPES, V. L. R., “Cálculo Numérico – Aspectos Teóricos e Computacionais”, 2 ed., Pearson Education, São Paulo, SP, 1997, 422p, ISBN 85-3460204-2.
- SAINT-GOBAIN. “Norton Abrasivos”, fabricante de rebolos, 2006, URL: <http://www.saint-gobain.com.br>.
- SALMON, S. C. “Unpublished work”, University of Bristol, 1988.
- SARAVANAPRIYAN, S. N. A., Vijayaraghavan, L., Krishnamurthy, R., “On-line Detection of Grinding Burn by Integrated Sensing”, Sensors of Industry conference, Rosemount, Illinois, USA, 5 - 7 de novembro de 2001.
- SCHMIDT, W. “Materiais Elétricos”, vol. 1 – Condutores e Semicondutores, 2 ed., Edgard Blücher, São Paulo, SP, 1979, 152 p, ISBN 85-212-0088-9.

- SCHWARZ, J. “O Ótimo Superacabamento Começa pelo Acabamento Certo”, Revista Máquinas e Metais, DEZEMBRO, P.126-L33, 1999.
- SHAFTO, G. R. “Creep Feed Grinding”, Ph.D. Thesis, University of Bristol, 1975.
- SHI, J.; ZHANG, S.; ZHONG, B.; HAANG, R. “A Study of On-line Identification of Grinding Burn and Wheel Wear Based on Self Clustering Neural Network”, Proceedings of IEEE International Conference of Industrial Tecnology, 1996.
- SOUZA, D. J. “Desbravando o PIC - Ampliado e Atualizado para PIC 16F628A”, 9 ed., Editora Érica, São Paulo, SP, 2003, 272p, 85-7194-8674.
- SPIEGEL, M. R. “Estatística”, 3 ed., Coleção Schaum, Makron Books, São Paulo, SP, 1983, 660p. ,ISBN 85-3460120-8
- TOCCI, R. J. e WIDMER, N. S. “Sistemas Digitais – Princípios e Aplicações”, 8 ed., Pearson Education, São Paulo, SP, 2003, 776p, 85-8791820-6.
- WANG, Z.; WILLETT, P.; AGUIAR, P. R.; WEBSTER, J. “Neural Network Detection Grinding Burn from Acoustic Emission”. Intenational Journal of Machine Tools & Manufacture, volume 41, 2001, pp. 283-309.
- WASCHKIES, E., SKLARCZYK, C., AND HEPP, K. “Tool Wear Monitoring at Turning”, ASME Journal of Engineering and Industry, Vol. 116, 1994, pp. 521-524.
- WEBSTER, J.; DONG., W. P.; LINDSAY, R. “Raw Acoustic Emission Signal Analysis of Grinding Process”, In: CIRP, Annals of the CIRP, v.45/1/1195, 1996, p. 335-340.
- WEBSTER, J.; MARINESCU, I.; BENNET, R. “Acoustic emission for process control and monitoring of surface integrity during grinding”. Annals of the CIRP, volume 43/1, 1994. p. 299-304.
- XIAO, G. e MALKIN, S. “On-line optimization for internal grinding process”. Annals of the CIRP, volume 45/1, 1996. p. 287-292.
- YANG, J. F. e CHEN, F. K. “Recursive discrete Fourier transform with inified IIR filter structures”, Signal Processing 82 (2002) 31 – 41.
- YASUI, H. e TSUKUDA, S. “Influence of Fluid Type of Wet Grinding Temperature”. Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., Vol. 17, No. 2, pp. 133-134, 1983.

ANEXO I TRABALHOS PUBLICADOS

KHENAIRES, Maurício; DOTTO, Fabio Romano Lofrano ; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, Eduardo Carlos. Parametrização da queima superficial no processo de retificação plana tangencial. In: XII SIMPEP - Simpósio de Engenharia de Produção, 2005, Bauru. XII SIMPEP - Simpósio de Engenharia de Produção, 2005. v. 1. p. 50-62.

KHENAIRES, Maurício; AGUIAR, P. R.; DOTTO, Fábio Romano Lofrano; BIANCHI, Eduardo Carlos. Automação do Processo de Retificação - Detecção e Controle de Danos Térmicos. In: XIV Congresso e Exposição Internacionais da Tecnologia da Mobilidade, 2005, São Paulo. SAE Technical Papers, 2005. v. 01. p.

ANEXO II FILTRO DIGITAL DE FREQUÊNCIA

Um filtro de frequência pode ser classificado como: filtro passa-baixa, passa-faixa ou passa-alta (frequência). Para passar uma frequência, por exemplo no filtro passa-baixa da Figura 103, deve-se ter uma frequência de corte f_c definida, onde acima dessa frequência o sinal é atenuado. Essa frequência de corte, por convenção, delimita a metade da potência, é equivalente a -3dB . Isso porque $10 \cdot \log(0,5) = -3,0103 \cdot 3\text{dB}$.

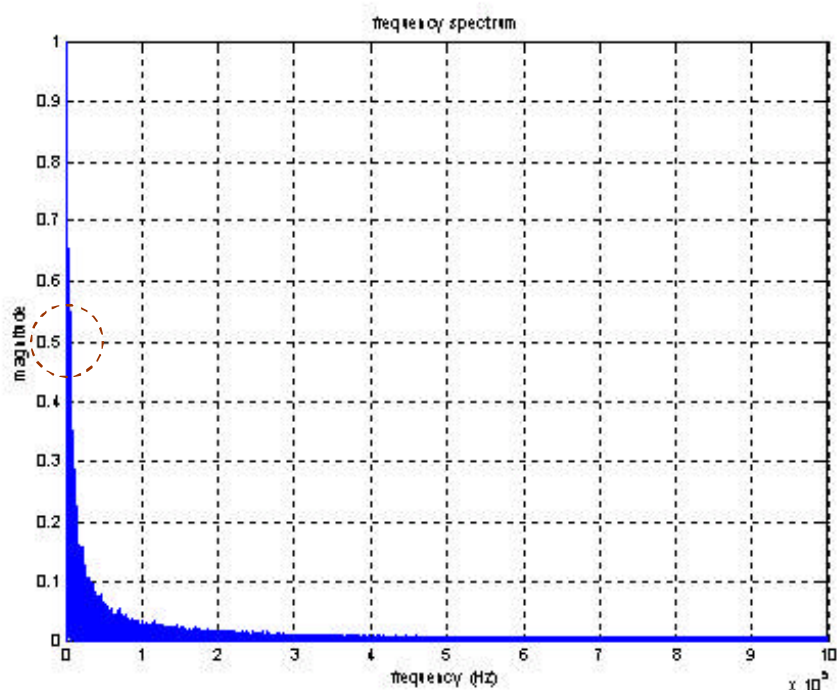


Figura 103 – Filtro passa-baixa digital em 5 KHz utilizado após os cálculos com o sinal bruto

Utilizou-se um filtro passa baixa implementado no Matlab, conforme rotina abaixo:

```
T = .01; % original value = .1
a = [1,-1./(1+T)];
b = T/(1+T);
yfiltered = filter(b,a,yraw);
```

Foi necessário utilizar esse filtro para que os sinais nos gráficos ficassem compreensíveis ao olho humano, pois a alta frequência do sinal confundiria o comportamento médio do sinal.

Desse modo, a frequência de corte que consiste no ponto de 3dB foi de 5KHz , sendo a mais agradável.

ANEXO III SOFTWARE DESENVOLVIDO E IMPLEMENTADO NO MICROCONTROLADOR – PIC18F452

Arquivo MASTER.C

```
//-----Links-----
#include "Master.h" // arquivo Header(configura o MCU)
#define ECONOMIA 0 // a definicao economiza 8 floats no MATH.h
#include "MATH.H" // biblioteca de matematica
#include "CONSTANTES.H" // variaveis, constantes e estruturas atraves de um arquivo externo
#include "MOD_LCD8.H" // funcoes para o modulo LCD com 8 bits de dados
#include "FUNCOES.H" // funcoes atraves de um arquivo externo

//-----Programa Principal-----
void main()
{
    // long max_ea,min_ea; //minimos e maximos da EA
    long max_pot,min_pot; //minimos e maximos da potencia

    // configura ADC
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_8); // configurado para maximo de 5MHZ
    // SETUP_COMPARATOR(NC_NC_NC_NC); //desliga modo de comparacao
    // configura Timer1
    setup_timer_1 ( T1_INTERNAL | T1_DIV_BY_1 ); // timer1 incrementa com 1us

    // LOCAL 1
    // variaveis locais
    boolean bit_ea_ini,bit_pot_ini; // bits para sinalizar se EA ou POT começarão a adquirir
    boolean bit_ea_fim,bit_pot_fim; // bits para sinalizar se EA ou POT pararam de adquirir

    int jan, i;
    int ea_ciclo[JANELA],pot_ciclo[JANELA];//vetores da JANELA de EA e de POT ciclicos
    int ea_temp[JANELA];// pot_temp[JANELA]; //vetores da JANELA de EA e de POT temporarios
    long TEMP_EA,TEMP_POT; //Constantes para comparacao
    long somador_ea,somador_pot; //valor do somatorio dos valores da Janela
    long valor_ea,valor_pot; //valor do ADC

    // inicializacao das variaveis
    // max_ea=0x0000;min_ea=0xFFFF;
    max_pot=0x0000;min_pot=0xFFFF;
    for (i=0;i<JANELA;i++) {ea_ciclo[i]=0; pot_ciclo[i]=0;}
    somador_ea=0; somador_pot=0;
    bit_ea_ini=0; bit_pot_ini=0; bit_ea_fim=0; bit_pot_fim=0;
    jan=0;i=0;
    TEMP_EA=EA_MIN*JANELA/RELACAO_ADC;
    TEMP_POT=POT_MIN*JANELA/RELACAO_ADC;

    // mensagem inicial
    lcd_init();
    lcd_escreve('\t'); //cursor nao pisca
    lcd_escreve('\a'); //desliga cursor
    printf(lcd_escreve,"\f LADAPS 2005\n Botao S1=START");
    while (input(PIN_BO)); // espera apertar o BOTAO_START
    printf(lcd_escreve,"\f Botao S4=SAIR\n Processando!");

    // Disparo do Timer1 e interrupcao
    set_timer1(0xFFFF-TEMPO_AQUISICAO); // leva o TEMPO_AQUISICAO para interromper Timer1
    enable_interrupts(GLOBAL);
    enable_interrupts(INT_TIMER1); // habilita interrupcao do Timer1
    bitempo=0;

    //-----aquisicao de valores-----
    while (!(bit_ea_fim&&bit_pot_fim))
    {
        // para canal EA
        valor_ea=le_ADC(CANAL_EA);
        substitui_valor(&ea_ciclo[jan], &somador_ea, valor_ea);
    }
}
```

```

if (!bit_ea_ini)
{
    if (somador_ea>=TEMP_EA)
    {
        bit_ea_ini=1;
        printf(lcd_escreve, "\vAquisitando EA..");
        for (i=0;i<JANELA;i++) ea_temp[i]=ea_ciclo[i]; // copia o vetor EA
        TEMP_EA*=HISTERESE/100.0;
    }
}
else if (!bit_ea_fim)
{
    armazena_vetor(valor_ea, &vetor_ea);
    // maxmin(&max_ea,&min_ea,valor_ea,TEMP_EA);
    if (somador_ea<TEMP_EA)
    {
        bit_ea_fim=1;
        printf(lcd_escreve, "\v----EA OK----");
    }
}

// para canal POT
valor_pot=le_ADC(CANAL_POT);
substitui_valor(&pot_ciclo[jan], &somador_pot, valor_pot);
if (!bit_pot_ini)
{
    if (somador_pot>=TEMP_POT)
    {
        bit_pot_ini=1;
        printf(lcd_escreve, "\nAquisitando POT.");
        // for (i=0;i<JANELA;i++) pot_temp[i]=pot_ciclo[i]; // copia o vetor POT
        TEMP_POT*=HISTERESE/100.0;
    }
}
else if (!bit_pot_fim)
{
    //armazena_vetor(valor_pot, &vetor_pot);
    maxmin(&max_pot,&min_pot,valor_pot,TEMP_POT);
    if (somador_pot<TEMP_POT)
    {
        bit_pot_fim=1;
        printf(lcd_escreve, "\n----POT OK----");
    }
}

// sincronismo(); // aguarda sincronizacao
if (++jan)==JANELA jan=0; // incrementa (girando) o vetor da janela
}
disable_interrupts(GLOBAL); //desabilita Interrupcoes (Timer1)
bittempo=0;
// Somando os Primeiros valores da janela
for(i=0;i<JANELA;i++)
{
    armazena_vetor(ea_temp[i]<<2, &vetor_ea);
    // armazena_vetor(pot_temp[i], &vetor_pot);
}
} // Fim do LOCAL 1

//-----Calculando os Parametros-----

{
    //variaveis locais
    float media, dv, skew, kurt, dpo, fks; // valores calculados
    media=calc_media(&vetor_ea);
    dv=calc_dv(&vetor_ea, &media);
    skew=calc_skew(&vetor_ea, &media, &dv); //retorna em vetor_ea.soma
    kurt=calc_kurt(&vetor_ea, &media, &dv); //retorna em vetor_ea.soma2
    dpo=max_pot*dv; // DPO
    fks=max_pot/(vetor_ea.soma*vetor_ea.soma2); // FKS
    printf(lcd_escreve, "\fDPO=%011.3f", dpo);
    printf(lcd_escreve, "\nFKS=%011.3f", fks);
}
delay_ms(60000); // espera 1 minuto e reseta
reset_cpu();
}
//-----FIM-----

```

Arquivo FUNCOES.H

```

//-----interrupcoes-----
#INT_TIMER1
void TIMER1_isr()
{
    printf(lcd_escreve, "\f Tempo Aquisicao\n t=%luus", get_timer1());
}
// checa Botao ABORTAR
if (!input(PIN_B3)) reset_cpu();
bittempo=1;

```

```

}

//-----FUNCOES-----
void armazena_vetor(long valor,struct vetor_soma *vetor)
// armazena valores do vetor
{
    vetor->n_ptos++;
    vetor->soma+=valor;
    ftemp=(int32)valor*valor;
    vetor->soma2+=ftemp;
    ftemp=(int32)ftemp*valor;
    vetor->soma3+=ftemp;
    ftemp*=valor;
    vetor->soma4+=ftemp;
}

long le_ADC(int canal_ad)
// le o valor do ADC
{
    long valor;
    switch (CANAIS_PIN[canal_ad])
    { case PIN_A0: output_float(PIN_A0);break;
      case PIN_A1: output_float(PIN_A1);break;
      case PIN_A2: output_float(PIN_A2);break;
      case PIN_A3: output_float(PIN_A3);break;
      case PIN_A5: output_float(PIN_A5);break;
      case PIN_E0: output_float(PIN_E0);break;
      case PIN_E1: output_float(PIN_E1);break;
      case PIN_E2: output_float(PIN_E2);break;
    } // configura o pino como entrada
    setup_adc_ports(CANAIS); // Canais habilitados
    set_adc_channel(canal_ad); // Seleciona o canal
    // le o valor do ADC - aprox 35us para CLK=4MHZ e PreescalerADC=8
    delay_us(10); //atraso para acomodacao Sample/Hold
    read_adc(ADC_START_ONLY);
    valor = read_adc(ADC_READ_ONLY)& 0xFFFE; // o ADC nao le o ultimo bit direito
    return valor;
}

void substitui_valor(int *xk, long *somatorio, long vADC)
// tira o valor do vetor(k) do Somatorio
// salva o valor do ADC nessa posicao k do vetor
// Soma esse valor do ADC ao Somatorio
// Guarda apenas os 8b mais sign. do ADC(10bits)
{ long temp;
    temp=*xk; // xk é int
    temp=temp<<2;
    *somatorio-=temp; //aumenta para 10 bits
    *xk=make8(vADC>>2,0); //extrai o bit menos significativo
    *somatorio+=(vADC&0xFFFC); //anula os dois ultimos bits
}

void sincronismo()
// espera o sincronismo do timer1
{
    if (bittempo){
        setup_adc_ports(NO_ANALOGs);
        printf(lcd_escreve,"fErro no Timer1");
        printf(lcd_escreve,"\npor %luus",get_timer1()-0xFFFF+TEMPO_AQUISICAO);
        delay_ms(5000);
        bittempo=0;
        reset_cpu();
    }
// aguarda bit de sincronismo
while (!bittempo);
bittempo=0;
}

void maxmin(long *max, long *min, long valor,long CMIN)
{
    if (valor>*max) *max=valor;
    if ((valor<*min)&(valor>CMIN)) *min=valor;
}

//calcula Media
float calc_media(struct vetor_soma *vt)
{
    //μ_{x}=(∑_{i=1}^N x_i)/N
    return(vt->soma/(float)vt->n_ptos);
}

```

```

}

//calcula Desvio Padrao
float calc_dv(struct vetor_soma *vt, float *media)
{
    ftemp=vt->soma2-(float)vt->n_ptos*(*media)*(*media);
    return (sqrt(ftemp));
}

//s_{x}=?_{i=1}^N x_{i}^2-N\mu_{x}^2
}

//calcula Skew
float calc_skew(struct vetor_soma *vt, float *media, float *dv)
{
    ftemp=-(*media)*(*media)*(float)vt->n_ptos;
    ftemp+=3.0*(*dv);
    ftemp*=(*media);
    ftemp+=vt->soma3;
    ftemp/=(float)vt->n_ptos*pow((*dv),3.0);
    return(ftemp); // retorna valor
}

//S=(1/(Ns_{x}^3))(?_{i=1}^N x_{i}^3-\mu_{x}(N\mu_{x}^2+3s_{x}))
}

//calcula Kurtosis
float calc_kurt(struct vetor_soma *vt, float media, float dv)
{
    ftemp>(*dv)*(*dv)*(*dv)+(*media)*(*media)*(*media)*(*media);
    ftemp*=(-3.0*vt->n_ptos);
    ftemp+=6.0*(*media)*(*media)*vt->soma2;
    ftemp-=4.0*(*media)*vt->soma3;
    ftemp+=vt->soma4;
    ftemp/=vt->n_ptos*pow((*dv),4.0);
    return(ftemp); // retorna valor
}

//K=(1/(Ns_{x}^4))(?_{i=1}^N x_{i}^4-4\mu_{x}?_{i=1}^N x_{i}^3+6\mu_{x}^2?_{i=1}^N x_{i}^2-3N(s_{x}^4+\mu_{x}^4))
}

```

Arquivo CONSTANTES.H

```

//-----CONSTANTES-----
#ZERO_RAM
float const RELACAO_ADC=5.0/1022.0; // Passo do ADC = Tensao de Referencia / 10 bits
long const TEMPO_AQUISICAO=10000; // Tempo entre cada aquisicao em us
int const JANELA=50; // tamanho da Janela p/ media dos ultimos valores (max 64)
float const EA_MIN=2.0; // media da janela de tensao em volts do ruido maximo para disparo
float const POT_MIN=4.5; // media da janela de tensao em volts da potencia minima de disparo
// Tempo da Janela = JANELA x TEMPO_AQUISICAO us
// Tempo de Aquisicao Total = N_PTOS_TOTAL x TEMPO_AQUISICAO us
int const HISTERESE=90; // %porcetagem da media de EA ou de POT
para parar aquisicao

int const CANAL_EA=1; // Canal Analogico de Emissao Acustica
int const CANAL_POT=1; // Canal Analogico de Potencia
int const CANAIS=ALL_ANALOG; // habilita os 8 canais ADC e Vref=VDD // A0 A1 A2 A3 A5 E0 E1 E2 Ref=Vdd
int const CANAIS_PIN[]={PIN_A0,PIN_A1,PIN_A2,PIN_A3,PIN_A5,PIN_E0,PIN_E1,PIN_E2}; // endereco dos pinos

//-----variaveis-----
struct vetor_soma
{
    long n_ptos; // no. de pontos lidos
    float soma; // somatorio dos valores
    float soma2; // somatorio quadratico dos valores
    float soma3; // somatorio cubico dos valores
    float soma4; // somatorio quadruplo dos valores
}; // vetor do Somatorio de Vandermonde
struct vetor_soma vetor_ea={0,0,0,0,0}; // vetor de emissao acustica
// struct vetor_soma vetor_pot={0,0,0,0,0}; // vetor de potencia
boolean bittempo; // bit para sinalizar se o timer1 interrompeu
float ftemp;

```

Arquivo MASTER.H

```

#include <18F452.h>
#device adc=10
#use delay(clock=4000000)
#fuses NOWDT, XT, PUT, BROWNOUT, NOLVP
#id CHECKSUM
#opt 9
##USE DYNAMIC_MEMORY

```