

LUCIANO ALCINDO SCHÜHLI

## **Monitoramento de operações de retificação usando fusão de sensores**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de mestre em engenharia de produção mecânica.

Área de Concentração: Processos de Fabricação  
Orientador: Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira

São Carlos  
2007

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S386m Schühli, Luciano Alcindo  
Monitoramento de operações de retificação usando fusão de sensores / Luciano Alcindo Schühli ; orientador João Fernando Gomes de Oliveira. -- São Carlos, 2007.

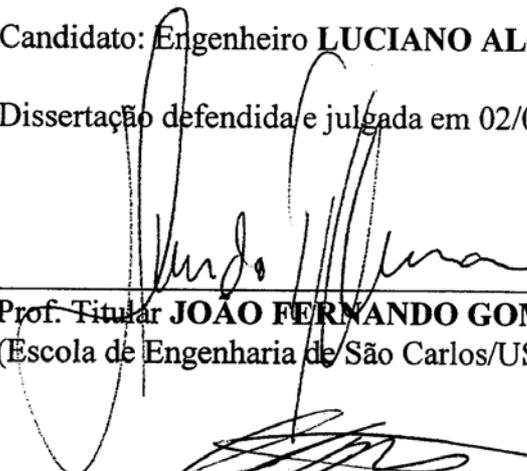
Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Produção) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.

1. Processos de fabricação. 2. Monitoramento de processos de retificação. 3. Fusão de sensores.  
4. Retificação. 5. Emissão acústica. 6. Potência.  
I. Título.

**FOLHA DE JULGAMENTO**

Candidato: Engenheiro **LUCIANO ALCINDO SCHUHLI**

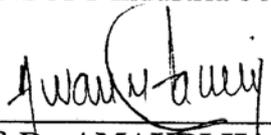
Dissertação defendida e julgada em 02/08/2007 perante a Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **JOAO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

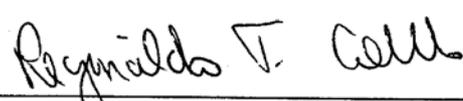
Aprovado

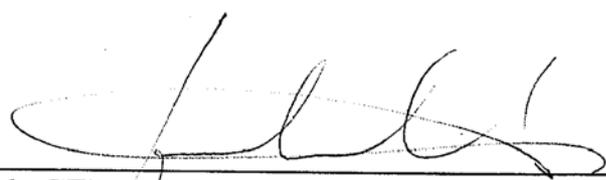
  
\_\_\_\_\_  
Dr. **CARLOS MAGNO DE OLIVEIRA VALENTE**  
(SENSOFT Industria e Automação)

APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **AMAURI HASSUI**  
(Escola Politécnica/USP)

APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **REGINALDO TEIXEIRA COELHO**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**  
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC



## DEDICATÓRIA

---

*Aos meus pais: Ademir e Zenaide.*



### **Os meus profundos e sinceros agradecimentos...**

A Deus por tudo quanto posso compreender.

À minha família pelo amparo, tolerância e compreensão sem os quais não seria possível realizar essa tarefa.

À Eliziane por seu companheirismo e compreensão.

Ao Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira pela oportunidade, paciência e orientação desse mestrado.

Ao Dr. Carlos Magno de Oliveira Valente e ao Dr. Fábio Ferraz Júnior pelo suporte técnico, imprescindível para realização desse trabalho.

Ao Me. Tobias Heymeyer pela revisão do trabalho e sugestões.

Ao Dr. Gherhardt Ribatski e à sua esposa Dra. Aline Lamon Cerra Ribatski pela revisão do trabalho e apoio.

Aos técnicos do OPF Adolfo Ferrarin Neto e Ariel Fernando Gatti pelo apoio na fase experimental.

Ao Daniel Picon, ao Fernando Walker Lima da Silva e ao Eloy Rodrigues Martins pelo suporte técnico de informática.

Ao Flavio Camarinho Moreira pelo suporte do software LabVIEW.

Ao Prof. Dr. Luiz Carlos Casteletti e ao técnico Eliezer Dias Francisco pela realização dos ensaios de dureza e metalografia dos corpos-de-prova.

À Irene Migliato Libardi pelo suporte no trato dos assuntos administrativos.

Aos funcionários da secretaria de pós-graduação do departamento de engenharia de produção mecânica.

À FAPESP e a CAPES pelo financiamento desse projeto.

À Universidade de São Paulo por colocar a minha disposição a sua estrutura.

A todos os colegas do Laboratório OPF e da EESC pela ajuda, incentivo e companheirismo.

Enfim, a todos aqueles a quem devo amparo, força, coragem e tudo mais, e sem cujo auxílio, não seria possível alcançar meta alguma.

SCHÜHLI, L. A. **Monitoramento de operações de retificação usando fusão de sensores**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

O presente trabalho trata da análise experimental de um sistema de monitoramento baseado na técnica de fusão de sensores, aplicado em uma retificadora cilíndrica externa. A fusão é realizada entre os sinais de potência e emissão acústica para obtenção do parâmetro FAP (*Fast Abrasive Power*) através do método desenvolvido por Valente (2003). Através da simulação de problemas encontrados nos processos de retificação (falha de sobremetal, colisão, desbalanceamento e vibração), foram captados os sinais de potência e emissão acústica e a partir destes gerado o parâmetro FAP, comparando seu desempenho, na detecção dos problemas, com os outros dois sinais. Para a análise foram construídos os gráficos das variações dos sinais em relação ao tempo de execução do processo e os mapas do FAP e acústico. O sistema de monitoramento avaliado tem como característica baixa complexidade de instalação e execução. Os dados experimentais revelam que o FAP apresenta uma velocidade de resposta maior que a potência e levemente amortecida em relação à emissão acústica. O nível do seu sinal é igual ao da potência mantendo-se homogêneo durante o processo, ao contrário da emissão acústica que pode ser influenciada por diversos outros parâmetros, tais como geometria da peça, distância do sensor, montagem do sensor, entre outros, que independem da interação ferramenta-peça. O resultado é uma resposta dinâmica e confiável, associada à energia do sistema. Estas

características são interessantes para o monitoramento de processos de retificação (excluindo a dressagem) sendo superiores àquelas apresentadas isoladamente pelos sinais de potência e emissão acústica.

Palavras-chave: Processos de fabricação, monitoramento de processos de retificação, fusão de sensores, retificação, emissão acústica, potência.

The present study deals with an experimental analysis of a monitoring system based on a sensor fusion strategy applied to a cylindrical grinding machine. It comprises a fusion of the power and acoustic emission signals and has as main goal to obtain the FAP (*Fast Abrasive Power*) using the method developed by Valente (2003). Initially, the power and acoustic emission signals were captured under operational dysfunction conditions during the grinding process (stock imperfection, collision, unbalancing e vibration). Then, based on these signals, the FAP parameter was generated and its capability in characterizing operational dysfunctions evaluated against the performance of an individual analysis of the power and acoustic emission signals. For this analysis, FAP and acoustic maps plus plots showing the FAP signals vs. working time were implemented. The experimental data revealed that the FAP presents a faster response than the power signal and a slightly dumped response when compared against the acoustic signal. The signal level of the FAP is similar to the power signal and is homogenous during the machining process. On contrary to the FAP, the acoustic emission signal may be affected by parameters that are not related to the tool-workpiece interactions, workpiece geometry and sensor positioning. The dynamic response of FAP is reliable and linked to the energy of the system. Finally, it should be highlighted that the monitoring system based on the FAP parameter presents low complexity in both implementation and execution. Such characteristics are superior to those observed when using either the power or acoustic emission signals and highly valuable in a system designed to monitor grinding processes.

Keywords: Manufacturing process, grinding monitoring, sensor fusion, grinding acoustic emission, power.

## LISTA DE FIGURAS

---

figura 2.1 - Retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho .....	28
figura 2.2 - Ciclo de retificação de mergulho.....	29
figura 2.3 -Ciclo de retificação em mergulho.....	31
figura 2.4 - Mecanismos de desgaste do rebolo: A - desgaste por atrito, B - fratura do grão abrasivo e C - fratura do aglomerante devido ao desgaste.....	38
figura 2.5 - Evolução da automação da retificação .....	41
figura 2.6 – Funções do sistema de monitoramento.....	42
figura 2.7 - Objetivos do monitoramento.....	43
figura 2.8 - Sistemas de monitoramento de máquinas-ferramenta CNC.....	44
figura 2.9 – Elementos de um ciclo do processo de controle .....	45
figura 2.10 – Grandezas adequadas para o propósito de monitoramento.....	47
figura 2.11 – Sensores/grandezas e problemas relevantes de monitoramento do processo de retificação .....	50
figura 2.12 – Retificação plana .....	51
figura 2.13 – Retificação cilíndrica externa.....	52
figura 2.14 - Esquema de um sensor de força que utiliza cristais piezelétricos.....	54
figura 2.15 – Fontes de emissão acústica em retificação .....	56
figura 2.16 – Esquema de um sensor de EA.....	57
figura 2.17 - Posições possíveis dos sensores de força, EA e potência em retificadoras .....	58
figura 2.18 - Sinal de EA em um processo de retificação cilíndrica .....	59
figura 2.19 - Mapa acústico da dressagem de uma rebolo com uma marca em forma de L produzido em sua superfície .....	60

figura 2.20 - EA (RMS) <sup>2</sup> versus $F_H$ .....	61
figura 2.21 – Evolução do sistema de monitoramento .....	65
figura 2. 22 – Típicos sinais de potência (usando sensor de corrente de efeito Hall e piezo-dinamômetro) e EA RMS. ....	68
figura 2.23 – Influência de $t_w$ na dinâmica de resposta do FAP .....	69
figura 2.24 – Influência de $k$ na dinâmica de resposta do FAP .....	69
figura 2. 25 – Comparação do sinal do FAP com o dinamômetro após a calibração ( $t_w = 1s, k = 0,5$ ) .....	70
figura 2. 26 – Resultado com o FAP como parâmetro .....	72
figura 2. 27 - Resultado com a potência como parâmetro.....	73
figura 3.1 - Esquema geral da retificadora ZEMA Numérica G800 - HS.....	76
figura 3.2 - Corpo-de-prova 1 .....	78
figura 3.3 - Corpo-de-prova 2 .....	79
figura 3.7 – Esquema de instalação dos sensores de EA e eletromagnético .....	80
figura 3.8 – Esquema de localização da unidade de tratamento do sinal de EA.....	81
figura 3.9 – Esquema geral do sistema de monitoramento.....	82
figura 4.1 – Variações do sinal do FAP para diferentes valores da janela de tempo $t_w$ e da constante $k$ .....	86
figura 4.2 – Etapas de um ciclo de retificação.....	87
figura 4.3 - Circularidade da peça antes(a) e depois(b) a retificação.....	87
figura 4.4 - média do sinal de EA em relação a potência e o FAP.....	88
figura 4.5 - Mapa do FAP e acústico do ciclo de retificação .....	89
figura 4.6 - Sinal da dressagem do rebolo antes de realizar o ciclo de retificação ....	91
figura 4.7 - Mapa do FAP e acústico da dressagem do rebolo.....	92
figura 4.8 - Sinal do ciclo interrompido .....	94

figura 4.9 - Padrão do sinal do ciclo interrompido no intervalo de um segundo.....	95
figura 4.10 - Esquema da posição do rebolo em relação à peça durante a colisão ...	96
figura 4.11 - Circularidade do corpo-de-prova após a colisão.....	97
figura 4.12 - Sinais da colisão entre o rebolo e a peça .....	98
figura 4.13 - Circularidade do corpo-de-prova <sup>1</sup> retificado com o rebolo desbalanceado.....	100
figura 4.14 - Sinais do ciclo de retificação com o rebolo desbalanceado.....	101
figura 4.15 - Sinais do ciclo de retificação com rebolo desbalanceado no intervalo de três períodos.....	101
figura 4.16 - Mapa do FAP e EA do ciclo de retificação com rebolo desbalanceado .....	102
figura 4.17 - Detalhe da porca presa ao disco de dressagem.....	104
figura 4.18 - Circularidade da peça submetida a vibração durante a retificação .....	104
figura 4.19 - Sinais do ciclo de retificação com vibração .....	105
figura 4.20 - sinais do FAP e EA no intervalo de três períodos da retificação com vibração.....	105
figura 4.21 - Sinal da EA e FAP de uma volta do rebolo.....	106
figura 4.22 - Mapa do FAP e EA da retificação com vibração.....	107



## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 2.1 - Características de sensores para retificação.....	49
Tabela 4.1 - Parâmetros do processo e aquisição de sinal do experimento .....	84
Tabela 4.2 - Parâmetros do processo e de aquisição de sinal utilizados na construção do mapa do FAP e acústico .....	88
Tabela 4.3 – Configuração da Dressagem.....	90
Tabela 4.4 - Parâmetros do processo e aquisição de sinal do experimento .....	93
Tabela 4.5 - Parâmetros do processo e aquisição de sinal do experimento .....	96
Tabela 4.6 - Parâmetros do processo e aquisição de sinal do experimento .....	99
Tabela 4.7 - Parâmetros do processo e aquisição de sinal do experimento .....	103



## LISTA DE SÍMBOLOS

---

$EA_{ni}$	nível de EA dinâmica normalizada no tempo $i$ . [V]
$EA_{RMSi}$	nível de EA RMS no tempo $i$ . [V]
$FAP$	<i>Fast Abrasive Power</i> [W]
$F_H$	força horizontal de corte [N]
$F_n$	força normal [N]
$F_t$	força tangencial [N]
$k$	constante de tempo RMS
$P$	potência [W]
$P'$	potência específica [W]
$P_i$	nível de potência no tempo $i$ . [W]
$Q'_w$	taxa específica de remoção de material [mm <sup>2</sup> /s]
$Ra$	rugosidade superficial [μm]
$Ront$	circularidade [μm]
$t_w$	janela de tempo para calcular a $EA_{RMS}$ média. [s]
$v_f$	velocidade de avanço [mm/min]
$v_s$	velocidade de corte [m/s]
$v_w$	velocidade da peça [m/s]



<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	23
1.1 OBJETIVOS.....	25
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	25
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	27
2.1 CICLO DE RETIFICAÇÃO .....	27
2.2 PROBLEMAS EM RETIFICAÇÃO.....	31
<b>2.2.1 Detecção de Contato e Colisão Rebolo-Peça</b> .....	32
<b>2.2.2 Queima</b> .....	32
<b>2.2.3 Vibração</b> .....	34
2.2.3.1 Vibração Forçada .....	34
2.2.3.2 Vibração Auto-excitada .....	35
2.2.3.3 Efeito das Condições de Retificação na Vibração do Processo .....	36
<b>2.2.4 Sobremetal insuficiente</b> .....	37
<b>2.2.5 Desgaste e topografia do rebolo</b> .....	37
2.3 MONITORAMENTO DE PROCESSOS DE RETIFICAÇÃO .....	40
2.4 SENSORES E GRANDEZAS DE MONITORAMENTO.....	46
2.5 POTÊNCIA .....	51
2.6 EMISSÃO ACÚSTICA .....	55
2.7 FUSÃO DE SENSORES .....	62
2.8 <i>FAST ABRASIVE POWER</i> (FAP) .....	65
<b>2.8.1 Definição</b> .....	66
<b>2.8.2 FAP em Retificadora Plana</b> .....	68
<b>2.8.3 FAP em Rebarbação Robótica</b> .....	71
<b>2.8.4 Conclusões sobre o FAP</b> .....	73
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	75
3.1 RETIFICADORA.....	75
3.2 REBOLO.....	76

3.3 CORPOS-DE-PROVA .....	77
3.4 SISTEMA DE MONITORAMENTO .....	79
<b>4 ANÁLISE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>83</b>
4.1 CICLO DE RETIFICAÇÃO .....	84
4.2 CICLO INTERROMPIDO.....	92
4.3 COLISÃO E CONTATO.....	95
4.4 REBOLO DESBALANCEADO.....	99
4.5 VIBRAÇÃO.....	103
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>109</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>113</b>
<b>APÊNDICE I.....</b>	<b>119</b>

## Introdução

---

# 1

## Capítulo

As empresas de manufatura enfrentam uma pressão cada vez maior sobre sua produção, gerada pela demanda por melhor qualidade do produto, maior variabilidade, redução dos custos e competição global, levando os fabricantes a buscar cada vez mais a automação dos meios de produção, como uma solução eficaz para atender estas demandas e se manterem competitivos (LIANG; HECKER; LANDERS, 2004). Os autores enfatizam que o sucesso da automação depende primeiramente da eficácia dos sistemas de monitoramento e controle do processo.

O sistema de monitoramento tem como função processar e interpretar as medidas obtidas pelo sensor (potência, força, emissão acústica) determinando o estado do processo. A função do sistema de controle é a manipulação das variáveis (ex: velocidade, profundidade de corte, etc.) para regular o processo (LANDERS; ULSOY; FURNESS, 1999).

Buscando contribuir com a automação dos meios de produção, este trabalho se propõe a analisar uma alternativa de monitoramento de processos de retificação.

Segundo Malkim (1989) a retificação é um processo abrasivo largamente empregado na indústria, quase tudo que nós usamos foi retificado em algum estágio da produção ou foi processado por máquinas que devido a sua precisão passaram por operações abrasivas durante sua fabricação. Entre os processos de usinagem é usualmente o mais caro por unidade de volume de material removido. Também apresenta algumas particularidades como várias arestas de corte, geometria irregular e pequena profundidade de corte que varia de grão para grão. Por isso a importância como processo de fabricação e a necessidade de estudos.

Os sistemas de monitoramento da retificação devem ser capazes de detectar com elevada confiabilidade os problemas (vibração, queima e deterioração da rugosidade superficial do rebolo) que podem ocorrer durante o processo, de modo que a produção de peças fora do padrão especificado possa ser minimizada (INASAKI; KARPUSCHEWISKI, 2001).

Segundo Faceli (2001), na seleção do sensor adequado para um sistema de monitoramento, é necessário analisar suas características, considerando seu custo e ou complexidade. As restrições de um dado sensor podem não ser apresentadas por outro e vice-versa, por isso a combinação de informações de mais de um sensor pode fornecer uma informação mais completa, precisa e confiável.

A fusão de sensores envolve justamente a combinação de informações, para captar dados que estão além da capacidade isolada de cada um dos sensores envolvidos. Isso tanto torna o sistema mais robusto, como também pode fornecer informações que não são obtidas isoladamente (FACELI, 2001).

A área de fusão de sensores é muito vasta e tem sido empregada na solução de diversos tipos de problemas em diferentes áreas de aplicação. Neste trabalho é

aplicada essa técnica utilizando os sinais de potência e emissão acústica, os quais juntamente com força são os mais utilizados na indústria segundo Byrne (1995).

O método aplicado foi desenvolvido por Valente (2003) para rebarbação robótica utilizando o parâmetro *Fast Abrasive Power* (FAP). As características extraídas pelo FAP são a confiabilidade do sinal original de potência e a dinâmica do sinal de emissão acústica. O seu baixo custo e facilidade de aplicação o tornam atraente para ser implementado em sistemas de monitoramento e controle de processos de retificação.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos:

- Testar a resposta de um sistema de monitoramento do processo de retificação, que tem como base a fusão dos sensores de EA e potência, apresentada pela metodologia do parâmetro FAP.
- Simular problemas freqüentes de processos de retificação apresentados pela literatura e verificar o desempenho do parâmetro FAP em relação aos sinais de potência e emissão acústica na detecção dessas anormalidades.

## 1.2 Estrutura da Dissertação

Este documento é composto pelas seguintes partes:

- Capítulo 1: Introdução onde se apresenta um breve contexto sobre monitoramento e retificação. Também são apresentados os objetivos desse trabalho e sua estrutura.

- Capítulo 2: Apresenta a revisão da literatura abordada, necessária para um melhor entendimento do assunto estudado. Neste capítulo são abordados os seguintes temas: Ciclo de Retificação, Problemas em Retificação, Monitoramento de Processos de Retificação, Sensores e Grandezas de Monitoramento, Potência, Emissão Acústica, Fusão de Sensores, *Fast Abrasive Power* (FAP).
- Capítulo 3: É feita uma descrição dos equipamentos, materiais e a configuração do sistema de monitoramento analisado.
- Capítulo 4: São apresentados os experimentos realizados e seus resultados.
- Capítulo 5: Conclusões finais do presente trabalho.
- Apêndice: são incluídas informações necessárias para complementação desse trabalho.
- Referências Bibliográficas que deram suporte a realização desse trabalho.

## Revisão Bibliográfica

---

# 2

## Capítulo

A revisão bibliográfica que se segue tem como meta abordar assuntos necessários para um melhor entendimento da pesquisa a que se propõe esse trabalho de mestrado. O levantamento das referências foi feito mediante análise de livros, textos e artigos publicados nos periódicos de importância no cenário científico.

### 2.1 Ciclo de Retificação

A retificação é um processo de usinagem que utiliza um rebolo como ferramenta, o qual consiste de grãos abrasivos unidos por um material ligante. As arestas dos grãos da superfície do rebolo agem como ferramentas de microcorte, que de forma mais ou menos aleatória entram em contato com o material a ser cortado (MALKIN, 1989).

De acordo com a norma DIN 8589 (apud HASSUI, 2002) as operações de retificação são classificadas de acordo com a superfície do rebolo em contato com a peça e com o movimento de avanço do rebolo. De acordo com a forma geométrica

das superfícies obtidas são divididas em cilíndrica externa, cilíndrica interna, plana e plana rotativa. De acordo com o movimento de avanço são divididas em tangencial de mergulho, tangencial de passagem, lateral (ou de face) de mergulho e lateral de passagem. Em relação à fixação, a retificação cilíndrica pode ser classificada em retificação entre pontas ou sem centros (*centerless*).

A operação de interesse para esse trabalho é a retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho, esquematizada na figura 2.1, onde  $v_w$  (m/s) é a velocidade da peça,  $v_s$  (m/s) é a velocidade de corte e  $v_f$  (mm/min) é a velocidade de avanço.

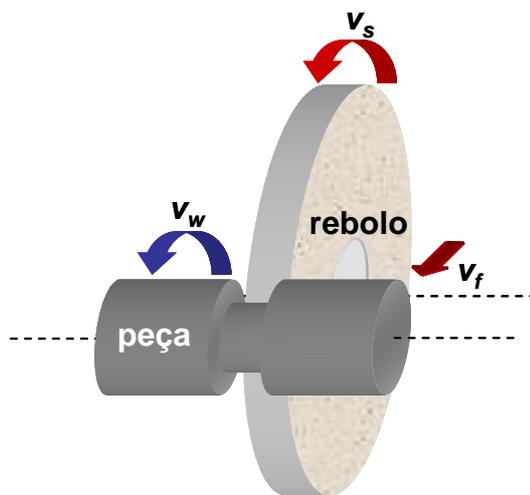


figura 2.1 - Retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho (modificada da DIN 8589 apud OLIVEIRA, 1989)

O Ciclo de retificação é formado por um conjunto de fases executadas durante uma operação, desde o posicionamento da peça na máquina até a sua saída dentro de especificações pré-determinadas (OLIVEIRA, 1989).

A figura 2.2 mostra o diagrama de um ciclo de retificação de mergulho, onde o eixo das abscissas representa o tempo e o das ordenadas a posição de avanço em

que estaria o rebolo, se não houvesse deformação, além da posição real da superfície de contato peça/rebolo (SOARES; OLIVEIRA, 2001).

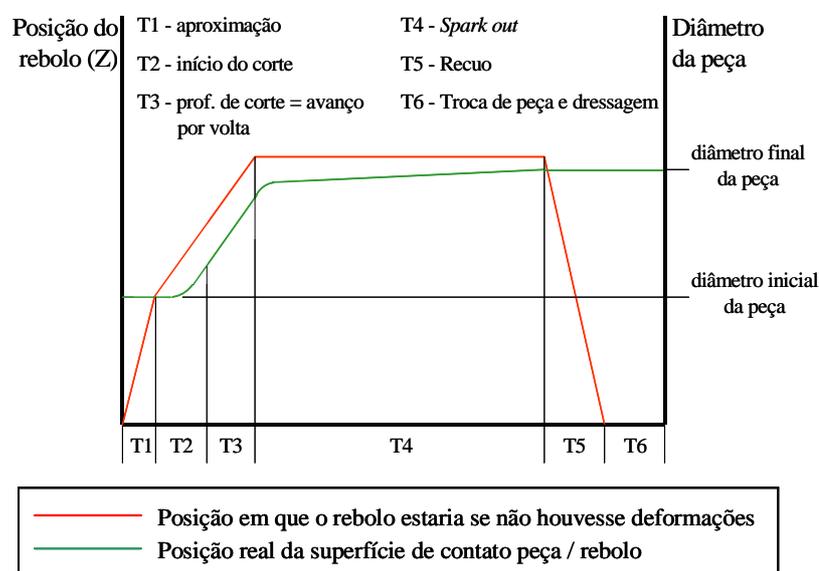


figura 2.2 - Ciclo de retificação de mergulho (modificado de OLIVEIRA, 1989)

Na primeira fase (T1) o rebolo se aproxima da peça sem haver contato. Na segunda (T2) ocorre o contato peça/rebolo e se inicia a remoção de material pelos grãos abrasivos. Essa remoção acontece em três estágios: escorregamento, deformação plástica e por último corte. Quando se inicia a remoção ocorre a geração de força e um aumento da potência consumida pelo motor e da emissão acústica gerada pelo processo. Isso também causa uma deformação no sistema máquina-peça-ferramenta (M-P-F). Na terceira fase (T3) a profundidade de corte passa a ser igual ao avanço por volta (OLIVEIRA, 1989; CHEN; ROWE; CAI, 2002).

O surgimento de deformações elásticas do sistema M-P-F iniciado na fase T2 ocasiona um atraso do avanço real em relação ao teórico, conseqüentemente gerando um “atraso dimensional”. Por esse motivo, estabelece-se um período de

tempo (T4) em que não há avanço, denominado *spark-out* ou centelhamento. Nessa fase, as deformações são gradualmente eliminadas, removendo material e finalmente eliminando o atraso e atingindo as dimensões desejadas (OLIVEIRA, 1989; HASSUI, 2002).

Na quinta fase (T5) ocorre o afastamento do rebolo e na sexta (T6) e última fase há a troca da peça e se necessário a dressagem do rebolo. A operação de dressagem é a preparação do rebolo através da usinagem da face de trabalho deste com uma ferramenta (OLIVEIRA, 1989).

Nos ensaios realizados nesse trabalho de mestrado, as fases dos ciclos de retificação realizadas são apresentadas de maneira um pouco diferente da acima. A figura 2.3 mostra as três primeiras fases do ciclo. Abaixo estão nomeadas as fases:

- a. Aproximação – O rebolo se aproxima da peça até uma pequena distância, utilizada como folga de segurança, antes de haver contato.
- b. Desbaste – Com uma velocidade de avanço menor, o rebolo toca a peça e realiza o desbaste. Essa fase pode ser realizada em mais de uma etapa, diminuindo a velocidade de avanço entre elas, de acordo com a quantidade de sobremetal e a qualidade final desejada.

As fases seguintes são iguais as fases T4, T5 e T6, respectivamente do diagrama apresentado anteriormente.

- c. *Spark-out*
- d. Recuo
- e. Troca de peça e dressagem

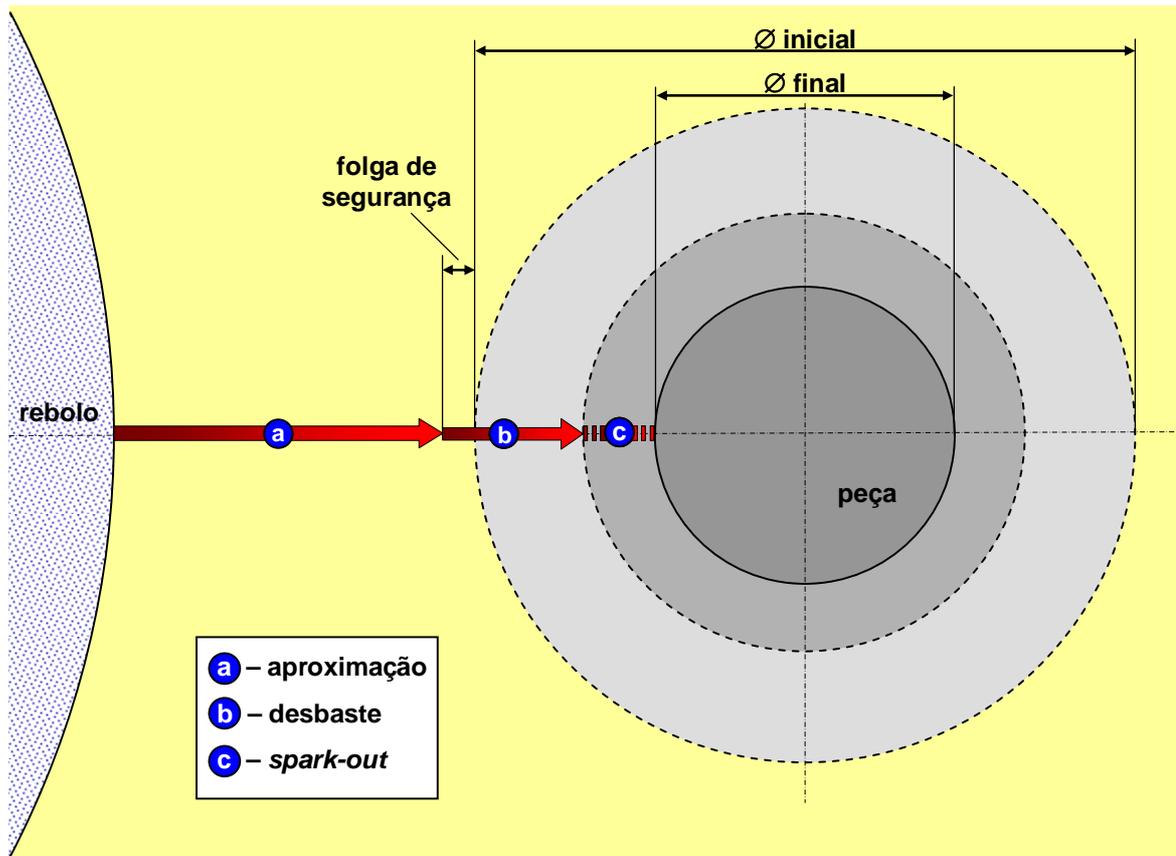


figura 2.3 -Ciclo de retificação em mergulho (modificado de KLUFT, 1994)

## 2.2 Problemas em Retificação

Antes de se desenvolver um sistema de monitoramento para retificação, é necessário identificar quais são os problemas que precisam ser monitorados. Alguns dos principais problemas encontrados em processos retificação são: vibração, queima e deterioração da superfície do rebole (desgaste e perda de agressividade) (INASAKI; KARPUSCHEWISKI, 2001).

A seguir serão abordados alguns problemas de retificação encontrados na literatura e nas indústrias usuárias deste processo.

### **2.2.1 Detecção de Contato e Colisão Rebolo-Peça**

Como visto anteriormente, durante o ciclo de retificação de uma peça, o rebolo segue uma trajetória predefinida. O rebolo aproxima-se da peça com velocidade alta até uma distância segura, maior que o máximo sobremetal existente, deixando uma folga de segurança. A partir deste ponto, o rebolo passa a mover-se com velocidades de corte de desbaste e depois de acabamento (mais lentas) até atingir o diâmetro final. Antes de tocar a peça e começar a usiná-la, o rebolo faz uma retificação em vazio, também chamada de corte em vazio ou corte no ar (FELIPE jr, 1996).

A detecção de contato é um aspecto importante da otimização do ciclo de retificação, devido à necessidade na etapa preliminar de eliminar a distância entre o rebolo e a peça (DORNFELD; CAI, 1984). Uma taxa demasiadamente elevada de aproximação do rebolo pode resultar em uma colisão com a peça, etc. Enquanto que uma taxa demasiadamente baixa desperdiça tempo retificando o ar (MAKSOUND; AHMED; KOURA, 2001).

### **2.2.2 Queima**

Na retificação, cada grão do rebolo age como uma ferramenta única, cortando material da peça. A temperatura em cada grão atinge valores bastante elevados, bem acima da temperatura de trabalho. A maior parte do calor gerado pelo grão é eliminado através do cavaco e do fluido refrigerante aplicado na interface rebolo-peça enquanto o restante é conduzido para o rebolo e para a peça ou dispersado através do ar e da estrutura da máquina. Porém se a refrigeração não funciona de

forma eficaz, uma grande quantidade de calor é conduzida para peça podendo gerar danos térmicos ou queima (FELIPE jr, 1996).

A queima é um dos tipos mais comuns de danos térmicos. A queima visível das peças de aço é caracterizada por uma cor azulada da superfície, conseqüência da formação de uma camada de óxido. Tal camada é, na maioria das vezes, removida durante o *spark-out* (centelhamento) e tem efeito cosmético, ou seja, a ausência desta coloração na peça não implica em ausência de queima (ROWE; MORGAN; ALLANSON, 1991).

Quando a queima superficial da peça se inicia, existe uma tendência do crescimento da adesão das partículas metálicas nos grãos abrasivos do rebolo, tendo como conseqüência o aumento das forças de retificação. Este aumento de forças provoca a deterioração da qualidade superficial da peça, podendo levar ao aumento da perda diametral do rebolo, fazendo com que seu desgaste volumétrico aumente (FRANÇA et al, 2004).

A queima superficial da peça influencia na alteração da microestrutura do material retificado. Através da análise da distribuição de microdureza em peças que apresentam queima visível, nota-se que estas apresentam reaustenitização. Um aço endurecido, retificado sem queima, apresenta uma pequena diminuição de dureza na superfície devido ao revenimento. Ocorrendo a queima, há a tendência de um aumento da dureza superficial e queda da dureza subsuperficial. Este aumento de dureza se deve a reaustenitização seguida de formação de martensita não revenida (MALKIN, 1989).

### **2.2.3 Vibração**

A vibração é um dos problemas cruciais, pois resulta em ondulações e rugosidade tanto no rebolo quanto na peça, afetando prejudicialmente a precisão da forma geométrica e o acabamento superficial da peça, que são os dois principais objetivos do processo de retificação. Em geral, a redução da taxa de remoção de cavacos reduz a vibração do processo, mas aumenta o tempo de corte de uma peça, reduzindo a produtividade. Além disso, a heterogeneidade da superfície do rebolo demanda dressagens mais freqüentes (HASSUI, 2002; INASAKI; KARPUSCHEWSKI; LEE, 2001).

Há basicamente dois tipos de vibração que podem ocorrer no processo de retificação: vibração forçada e vibração auto-excitada (BIERA; VIÑOLAS; NIETO, 1997).

#### **2.2.3.1 Vibração Forçada**

A vibração forçada tem como principais causas o desbalanceamento e a excentricidade do rebolo. Esse tipo de vibração pode ser facilmente localizada através da medida da freqüência (INASAKI; KARPUSCHEWSKI; LEE, 2001; GAWLAK, 1984).

Uma das formas de reduzir a severidade dos problemas decorrentes da vibração forçada é identificar as fontes de perturbação e reduzir os níveis das mesmas. Se as perturbações são na forma de vibrações transmitidas pelo piso à estrutura da máquina, uma modificação na fundação da mesma reduz as vibrações. Se o problema é causado por um desbalanceamento do rebolo, uma dressagem

durante a retificação pode reduzir a vibração forçada. Da mesma forma, minimizar folgas e desalinhamentos diminui essas vibrações (HASSUI, 2002).

As imperfeições no acabamento superficial resultantes de vibrações forçadas podem ser minimizadas pela melhoria da estabilidade do ciclo de vibrações auto excitadas. Ou seja, muitas das medidas que melhoram as vibrações auto excitadas da operação de retificação também melhoram a resposta à vibração forçada (HASSUI, 2002).

### **2.2.3.2 Vibração Auto-excitada**

A vibração auto-excitada refere-se às vibrações resultantes da resposta do processo de retificação a perturbações transientes. Tais perturbações podem ser na forma de eventos, tais como o contato inicial da peça com o rebolo ou na forma de heterogeneidades geométricas, tais como ondulações nas superfícies da peça ou do rebolo. As vibrações auto-excitadas decrescem em amplitude com o tempo, se o processo é dinamicamente estável e crescem se este for dinamicamente instável. A estabilidade dinâmica é analisada com base em modelos dinâmicos do processo de retificação, que representam as relações entre a geometria do processo e as forças de corte (MALKIN, 1989).

Esse fenômeno da vibração auto-excitada ocorre com frequência em operações de retificação que apresentam baixa rigidez e forças elevadas, como por exemplo, a retificação cilíndrica interna. A solução para este problema normalmente é encontrada através da dressagem mais agressiva do rebolo ou aumento da rigidez do sistema (FELIPE jr, 1996).

Técnicas para redução da vibração auto excitada podem envolver a seleção de condições de retificação apropriadas, modificações na estrutura da máquina, e/ou uso de estratégias de controle especiais. Uma vez que a retificação é viável a despeito de amplitudes de vibração crescentes e como existem outras restrições relacionadas com a integridade superficial, temperatura de corte e limitações da máquina que não podem ser violadas, o comportamento da vibração é apenas mais uma restrição imposta ao processo (HASSUI, 2002).

### **2.2.3.3 Efeito das Condições de Retificação na Vibração do Processo**

A escolha de condições de retificação que minimize as taxas de crescimento da vibração e o tempo de retificação é um problema de grande significado prático. As relações exatas entre os parâmetros do processo de retificação e o comportamento da vibração dependem dos detalhes do processo. Um aumento do diâmetro do rebolo aumenta o diâmetro equivalente e diminui a taxa de crescimento da vibração. Aumentando-se a profundidade de corte, aumenta-se a taxa de remoção de cavaco por unidade de largura do rebolo e aumenta significativamente a taxa de crescimento da vibração. Uma largura maior do rebolo em contato com a peça, resulta em maior rigidez de contato e de desgaste do rebolo. Isto contribui para uma maior taxa de aumento da vibração. Um aumento na velocidade da peça, por outro lado, tende a diminuir a taxa de aumento da vibração, ao contrário do que ocorre com o aumento da velocidade do rebolo (HASSUI, 2002).

#### **2.2.4 Sobremetal insuficiente**

Num processo de fabricação, é esperado que a peça tenha uma dimensão anterior à retificação que permita remover uma camada de material suficiente para eliminar marcas de ferramentas de operações anteriores, ou no caso de forjamento, retirar a camada superficial e obter a dimensão final desejada. O problema do sobremetal insuficiente implica na não-obtenção das medidas finais da peça, ou seja, a peça não é totalmente retificada. Este problema é gerado nas operações anteriores, como forjamento ou torneamento (FELIPE jr, 1996).

#### **2.2.5 Desgaste e topografia do rebolo**

Oliveira (1989) define o desgaste como a quantidade de rebolo consumida durante a retificação. Também afirma que inicialmente pode-se fazer uma distinção entre desgaste e perda de afiação (ou agressividade), a qual é decorrente do arredondamento das arestas cortantes ou do entupimento das porosidades com cavacos (empastamento).

O desgaste é considerado um processo bastante complexo, resultado de diversos fenômenos que ocorrem devido ao contato entre grãos abrasivos individuais e a peça, durante o processo de retificação. Similarmente a outros processos de desgaste, o desgaste do rebolo apresenta três fases: uma alta taxa de desgaste inicial, seguida de um crescimento aproximadamente constante e sofrendo uma aceleração elevada nesta taxa num terceiro momento (MALKIN, 1989).

Existem três mecanismos principais de desgaste do rebolo: desgaste por atrito, fratura dos grãos abrasivos e fratura do aglomerante (SHAW, 1996). Estes mecanismos podem ser observados na figura 2.4.

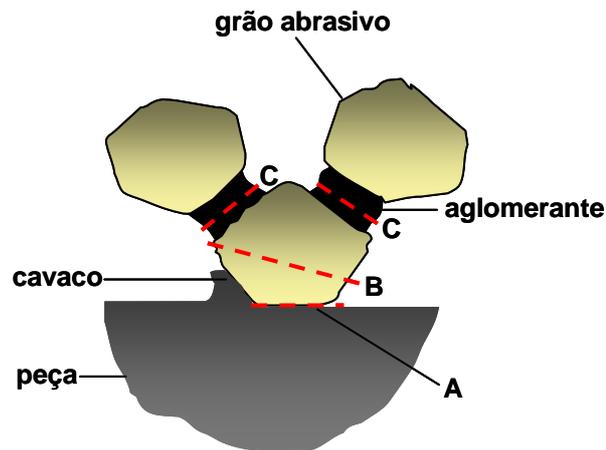


figura 2.4 - Mecanismos de desgaste do rebolo: A - desgaste por atrito, B - fratura do grão abrasivo e C - fratura do aglomerante devido ao desgaste (modificado de MALKIN, 1989)

O desgaste por atrito envolve a perda de afiação dos grãos abrasivos e crescimento das áreas planas devido ao atrito com o material da peça. A fratura do grão abrasivo provoca a remoção de fragmentos e a fratura do aglomerante ocorre devido ao desalojamento do grão abrasivo inteiro, devido aos esforços de corte (MALKIN, 1989).

Experimentos realizados por Malkin (1989), para quantificar a contribuição de cada mecanismo de desgaste em relação ao total, revelaram que o desgaste por atrito é responsável por uma pequena fração da perda volumétrica total, enquanto que a fratura do aglomerante é responsável pela maior parte (50 – 90% de acordo com a dureza do rebolo). Outra informação obtida nesses experimentos é que um aumento da dureza do rebolo favorece um desgaste por fratura dos grãos abrasivos,

já que estes estão mais bem ancorados. Por outro lado, rebolos com uma dureza menor, tendem a gerar desgastes pela fratura do aglomerante.

Apesar da contribuição volumétrica insignificante, o desgaste por atrito produz um grande aumento nas forças de corte, causando grande influência no comportamento do grão (HAHN; LINDSAY, 1971). Esse é um dado importante já que é a força de corte, distribuída entre os grãos atuantes, que arranca o grão abrasivo e proporciona o desgaste (OLIVEIRA, 1989).

Lindsay (1984) faz uma distinção entre o desgaste por atrito e os outros mecanismos de desgaste, denominando-o de perda de afiação e desprezando-o em seu trabalho.

Oliveira (1989) descreve da seguinte forma a condição ideal de trabalho do rebolo em relação aos mecanismos de desgaste: no decorrer da usinagem os grãos vão se desgastando; o rebolo vai perdendo a agressividade; a força de corte aumenta (naqueles grãos) até que os mesmos se desprendam dando lugar a novos grãos afiados. Porém ressalta que é freqüente o rebolo perder a afiação e o aumento da força não ser suficiente para arrancar os grãos, sendo então necessária a operação de dressagem, ou afiação do rebolo.

A dressagem consiste em pressionar a superfície do rebolo, em rotação, contra uma ferramenta de dressagem com movimento de avanço transversal à superfície do rebolo. Uma analogia possível é com o torneamento. Diz-se que, na dressagem, “torneia-se” o diâmetro externo do rebolo, em geral com uma ferramenta de diamante (HASSUI, 2002).

O desgaste e a perda progressiva da agressividade modificam a topografia do rebolo, a qual afeta o desempenho do processo de retificação, caracterizado pelas forças de corte, consumo de potência, temperaturas de corte e acabamento da peça

(HONG, CHEN, 2005). Malkin (1989) define a topografia do rebolo como a distribuição espacial dos grãos abrasivos na superfície e a sua morfologia.

A correção da topografia dos rebolos se faz necessária porque estes se desgastam de forma desigual, devido à esforços de corte heterogêneos, diferentes necessidades de remoção de material ou mesmo devido à orientação aleatória dos grãos abrasivos. Além disso, é necessário após alguns ciclos de retificação, a remoção dos cavacos empastados e a exposição de novas arestas de corte, sendo que grãos abrasivos desgastados aumentam os esforços de corte, aumentando o atrito, conseqüentemente aumentando temperatura de corte e também podendo gerar vibrações, causando danos térmicos e de forma (HASSUI, 2002).

### **2.3 Monitoramento de Processos de Retificação**

O surgimento de novas tecnologias de usinagem e exigências de produção têm extrapolado os limites e habilidades dos operadores. Máquinas CNC já realizam diversas funções (aproximação e posicionamento da ferramenta, etc), porém permanecendo algumas sob responsabilidade humana (troca de ferramenta, inspeção da peça, etc). Assim, o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e controle de processos busca atender a necessidade de minimizar e/ou auxiliar a atuação do homem nas máquinas ferramenta (DINIZ; PIGARI, 1995; BLUM; SUZUKI; INASAKI, 1988).

Os sistemas de monitoramento de processo provocaram uma alteração nas relações entre subsistemas que compõe a retificação. A figura 2.5 mostra a evolução da automação da retificação com o advento do CNC e dos sistemas de

monitoramento, mostrando as mudanças nas relações entre os subsistemas: humano (H), controle CNC (C) e máquina (M) (OLIVEIRA, 1995).

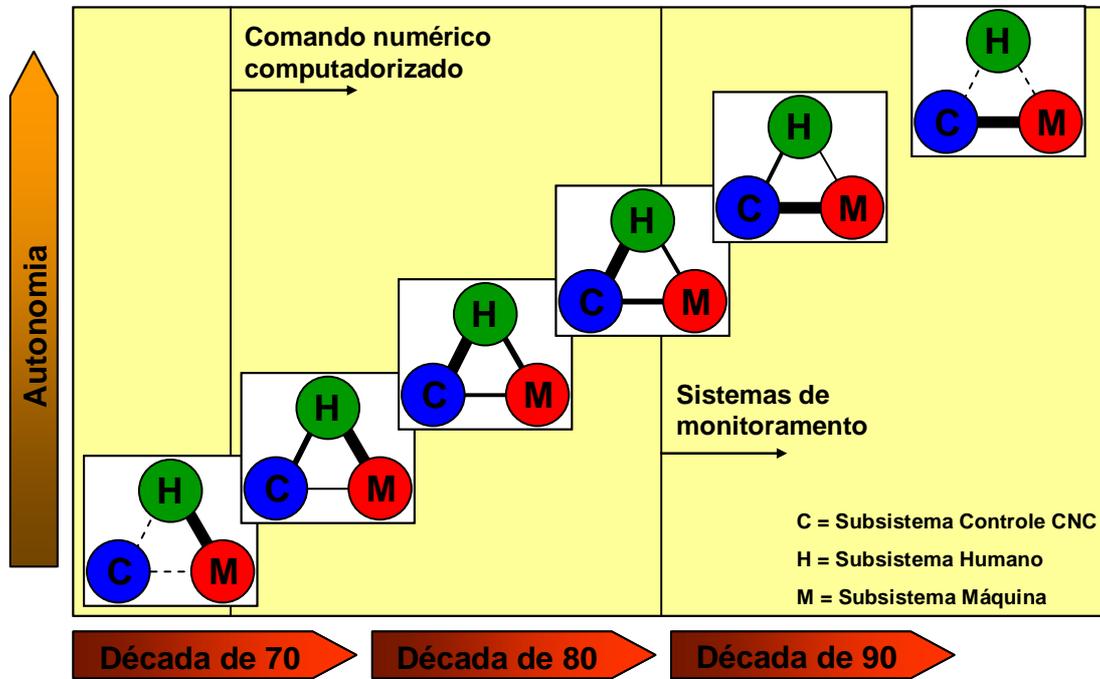


figura 2.5 - Evolução da automação da retificação (OLIVEIRA, 1995)

Antes do CNC, só havia relação direta entre homem e máquina. Com o CNC, a relação homem/controle passou a ser a mais forte. Com os sistemas de monitoramento, a tendência é que haja relação forte somente entre controle e máquina (OLIVEIRA, 1995).

Segundo Inasaki (1997 e 1999), geralmente um sistema de monitoramento possui três funções principais, como apresentado na figura 2.6. Primeiro, deve ser capaz de detectar todos os problemas inesperados que puderem ocorrer. Segundo, as informações obtidas podem ser usadas para otimizar o processo. Terceiro, o sistema de monitoramento deve fazer o possível para obter a relação de causa e

efeito de eventos não previstos de entrada-saída, que são úteis para estabelecer um banco de dados a respeito do processo em particular.

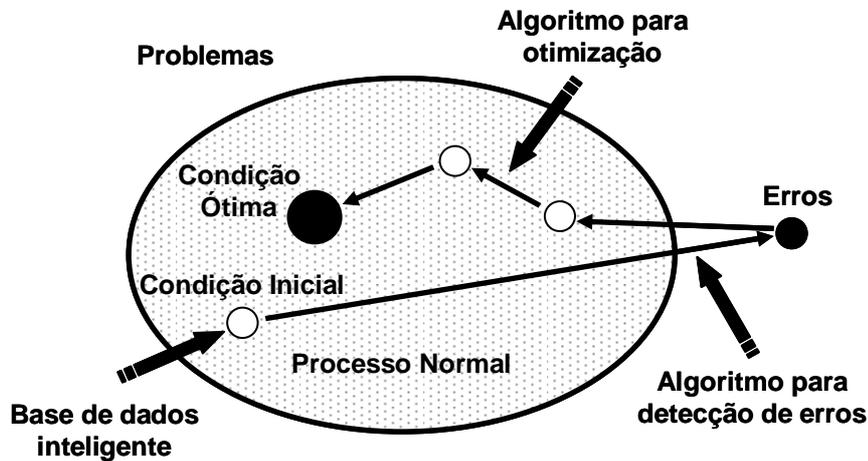


figura 2.6 – Funções do sistema de monitoramento (modificado de INASAKI, 1999)

Tönshoff, Friemuth e Beckerm (2002) afirmam que monitorar o processo de retificação significa que um ou diversos sinais são observados para atingir diferentes objetivos (figuras 2.7).

Esses objetivos são direcionados para adquirirem dados e conhecimento para a garantia de qualidade, delineamento e documentação (registro das informações obtidas). A aquisição de dados pode ser usada para o estabelecimento de bancos de dados tecnológicos que podem servir de base para sistemas de controle numérico (CN). O monitoramento também pode ser usado para gerar conhecimento geral do processo.

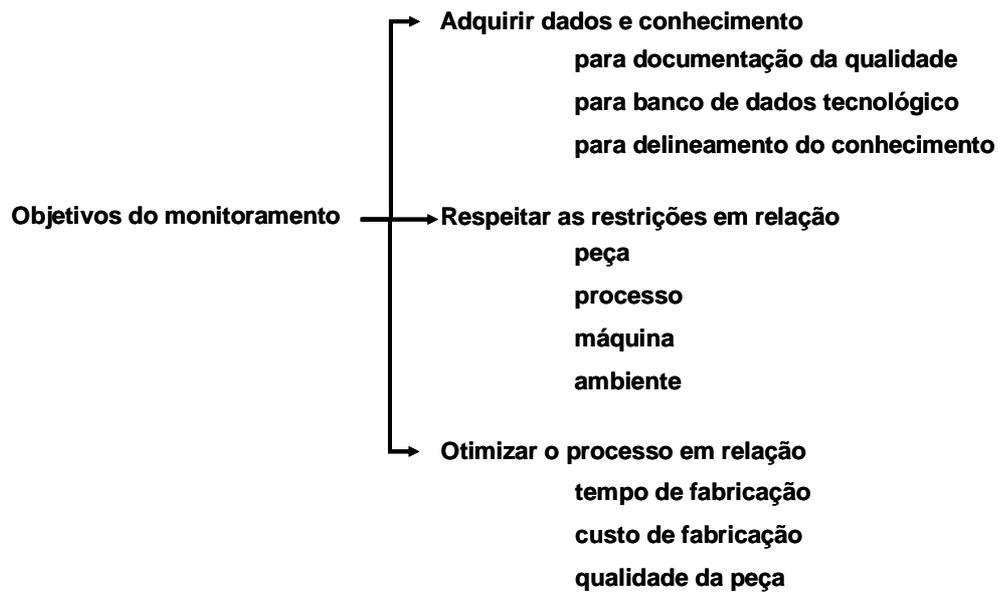


figura 2.7 - Objetivos do monitoramento (modificado de TÖNSHOFF; FRIEMUTH; BERCHERM, 2002)

Um outro grupo de objetivos é ligado as restrições dos componentes do sistema tais como a peça, o processo, a máquina e o ambiente. As restrições relacionadas a peça são dadas por exemplo pelas tolerâncias geométricas. O conjunto das limitações do processo é dado pela estabilidade necessária pela máquina, pela carga mecânica e pelo ambiente. O monitoramento também pode ser usado para otimizar o processo de produção, em relação ao tempo, aos custos ou a qualidade (TÖNSHOFF; FRIEMUTH; BECKERM, 2002).

Os três tipos de sistemas de monitoramento mais comuns em máquinas-ferramenta com comando numérico segundo Graham (1989) são os monitoramentos da peça, da ferramenta e da máquina conforme mostra a figura 2.8.

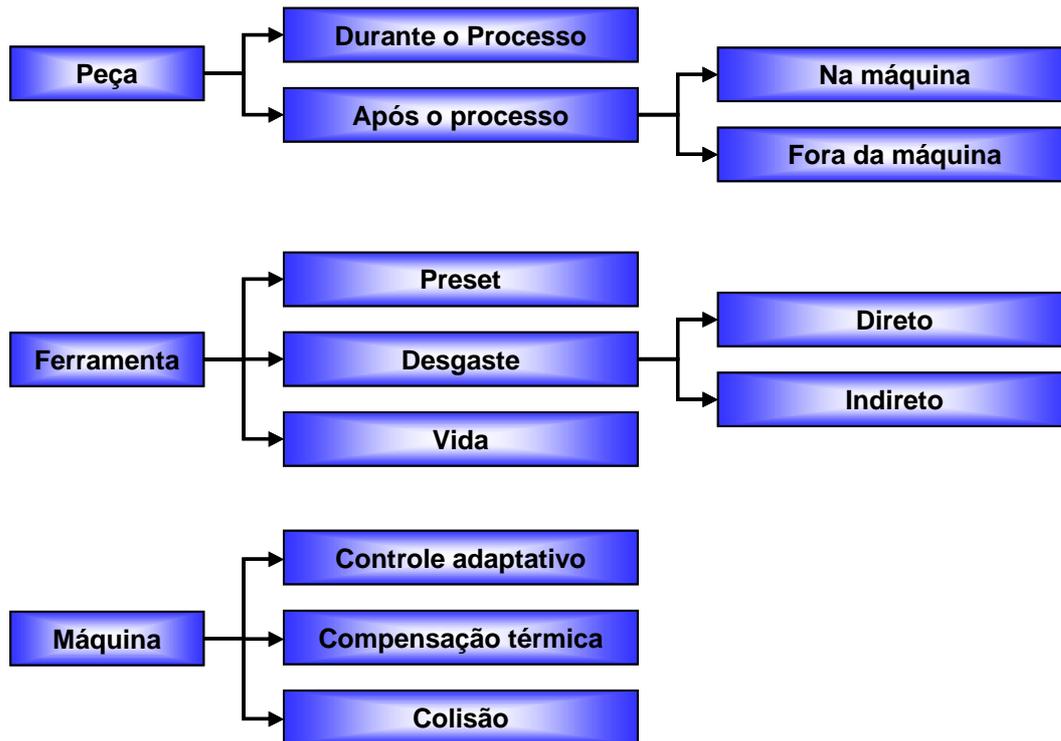


figura 2.8 - Sistemas de monitoramento de máquinas-ferramenta CNC (modificado de GRAHAM, 1989)

Segundo Tönshoff, Friemuth e Beckerm, 2002 o monitoramento muitas vezes é parte integrante de um processo de controle assim como o diagnóstico e o tratamento, porém esses fogem ao escopo desse trabalho. Os diferentes elementos de monitoramento do processo de retificação são definidos a seguir (figura 2.9):

Sensor: Dispositivo que detecta uma mudança em um estímulo físico e converte em um sinal que pode ser medido ou gravado. Em outras palavras, uma característica essencial do processo de leitura é a conversão de uma forma de energia para outra. Para finalidade de medição são importantes os seguintes tipos de sinais: Radiação, mecânico, térmico, elétrico, magnético e químico (INASAKI; TÖNSHOFF, 2001).

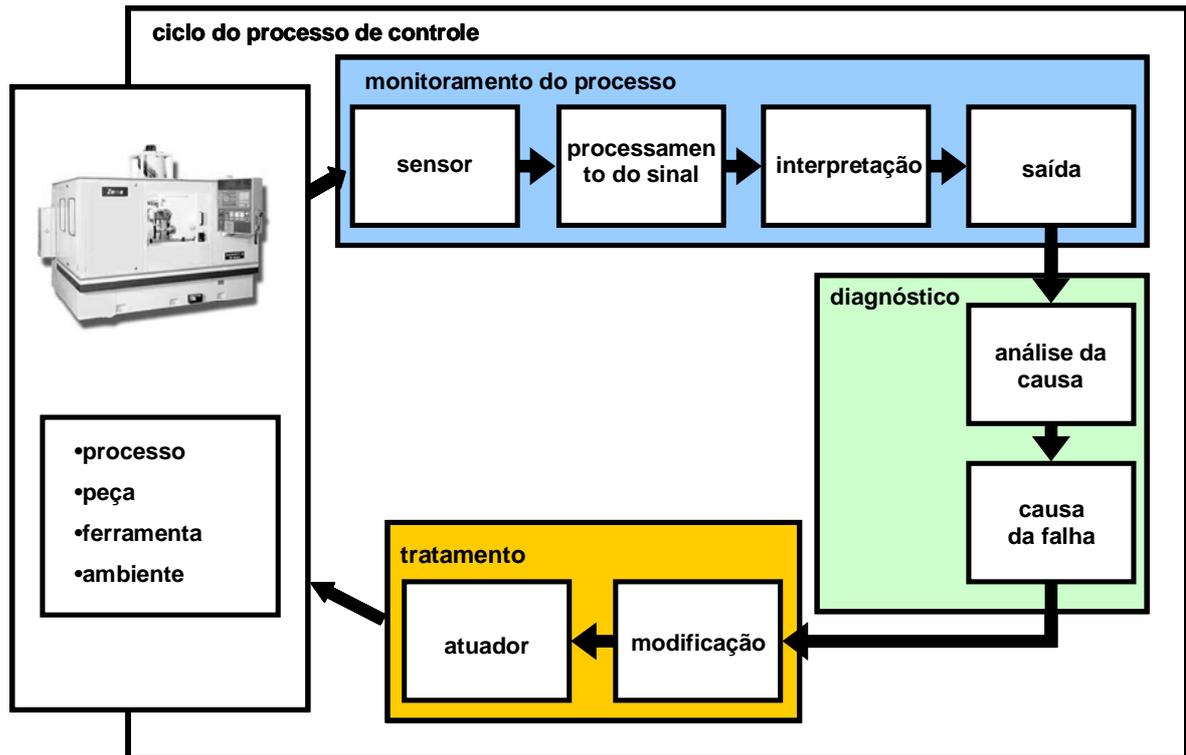


figura 2.9 – Elementos de um ciclo do processo de controle (modificado de TÖNSHOFF; FRIEMUTH; BECKERM, 2002)

Processamento do sinal: Consiste de processamento do sinal analógico (por exemplo: amplificação, filtragem, transformações matemáticas tais como a integração de sinais), conversão de analógico para digital, e processamento do sinal digital (domínio do tempo, domínio da frequência, etc.).

Interpretação: Nessa fase, às vezes, são necessários modelos para relacionar os valores medidos aos objetos monitorados. Além disso, os valores monitorados são comparados com limites pré-definidos ou são analisados em comparação a dados medidos anteriormente. A saída do processo de monitoramento é uma indicação da ocorrência de problema no processo. A causa do problema pode não ser clara até esse ponto.

Saída: A saída de cada sensor ou sistema de leitura é caracterizada pela sua exatidão, confiabilidade, relação de entrada e saída, assim como a frequência de resposta (MORIWAKI, 2001).

## **2.4 Sensores e Grandezas de Monitoramento**

A implementação de um sistema de monitoramento requer o questionamento de quais grandezas são mais adequados para cumprir essa tarefa, o que depende de vários critérios (figura 2.10). Primeiramente, é importante saber os objetivos do sistema, isto é, quais as funções que tem que realizar. Tem de ser levadas em consideração as variantes do processo de retificação tais como interna, externa ou de superfície, o tipo de material a ser usinado, a sensibilidade em relação à integridade da superfície ou a qualidade geométrica que tem que ser atingida. Diversas propriedades do sistema de medição, tais como a aplicabilidade, a sensibilidade, a robustez, o comportamento durante o tempo e o tempo de resposta, são características importantes que precisam ser analisadas (TÖNSHOFF; FRIEMUTH; BECKERM, 2002).

As principais grandezas utilizadas no monitoramento de processos de retificação citadas por Tönshoff, Friemuth e Beckerm (2002) são: força, potência, aceleração (vibração), emissão acústica e temperatura. Algumas dessas grandezas serão analisadas adiante.

Para captar as informações das grandezas durante o processo são utilizados sensores. 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 em outra, são chamados transdutores. Os 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. Muitos sensores têm sido inventados e aplicados em laboratório, mas somente poucos vêm sendo utilizados comercialmente (JEMIELNIAKI, 1999).

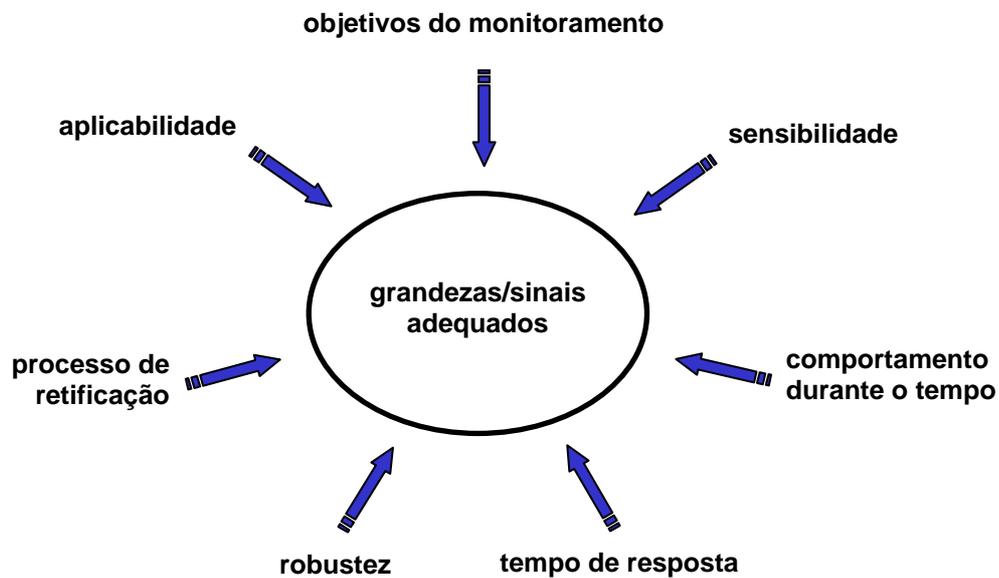


figura 2.10 – Critérios adequados para seleção de grandezas/sinais para o propósito de monitoramento (modificado de TÖNSHOFF; FRIEMUTH; BECKERM, 2002)

Existem inúmeras áreas que utilizam sensores, dentre as quais se pode destacar: automação doméstica (sistemas de alarme, por exemplo), medicina (desde um simples termômetro até complexos equipamentos de ressonância magnética), automação industrial, robótica, militar, pesquisas espaciais, aeronáutica, sensoriamento remoto, atividades perigosas e controle de tráfego (LUO; KAY, 1992; BROOKS; IYENGAR, 1998).

McKerrow (1995) classificou os sensores da seguinte forma:

- quantidade física ou química que ele mede (distância, velocidade, viscosidade, cor);
- princípio físico em que se baseia (memória do metal, efeito Hall);
- tecnologia que utiliza (silício, eletro-mecânica, fibra ótica);
- tipo de energia envolvida (elétrica, mecânica, solar);
- relação espacial entre o sensor e o elemento que ele está medindo (contato, sem contato, remoto).

O uso de sensores para o monitoramento de máquinas e processos tem se tornado cada vez mais comum nas indústrias que buscam um aumento da qualidade e produtividade, uma vez que eles fornecem informações mais precisas e confiáveis. Essas informações, tratadas de forma a fornecer subsídios necessários para o diagnóstico preciso dos problemas dos processos e análise reais da produtividade e status da produção, por exemplo, fazem dos sensores um importante alicerce na construção de um sistema de informação da manufatura (SOARES; OLIVEIRA, 2001).

Segundo Byrne et al (1995) os sensores para monitoramento de processos devem preencher os seguintes requisitos:

- efetuar a medição o mais próximo possível do fenômeno em questão;
- não reduzir a rigidez estática ou dinâmica da máquina ferramenta;
- não restringir o espaço útil de usinagem e os parâmetros de corte;
- ser livre de desgaste e de manutenção, ser facilmente trocado e possuir um baixo custo;

- apresentar resistência à sujeira, cavacos e interferências mecânicas, eletromagnéticas e térmicas;
- funcionar independentemente da ferramenta e da peça;
- apresentar características metrológicas adequadas;
- transmitir o sinal de forma confiável.

Vários tipos de sensores estão disponíveis para monitorar fenômenos de usinagem (MORIWAKI; DORNFELD; BYRNE, 1993). Os principais utilizados no monitoramento de processos de retificação citados por Tönshoff, Friemuth e Beckerm, 2002 são de força, potência, emissão acústica, temperatura e posição.

Tabela 2.1 - Características de sensores para retificação (OLIVEIRA; VALENTE, 2004)

Sensores	Resposta	Intrusividade	Custo	Precisão
Piezo/Força	B	R	R	B
Hall/Corrente	R	B	B	B
EA	B	B	B	R

(B = bom, R = ruim)

Os mais usados geralmente na indústria são força, potência e emissão acústica (BYRNE et al, 1995; INASAKI, 1999). Cada um deles tem vantagens e limitações. A tabela 2.1 mostra algumas das características principais desses sensores.

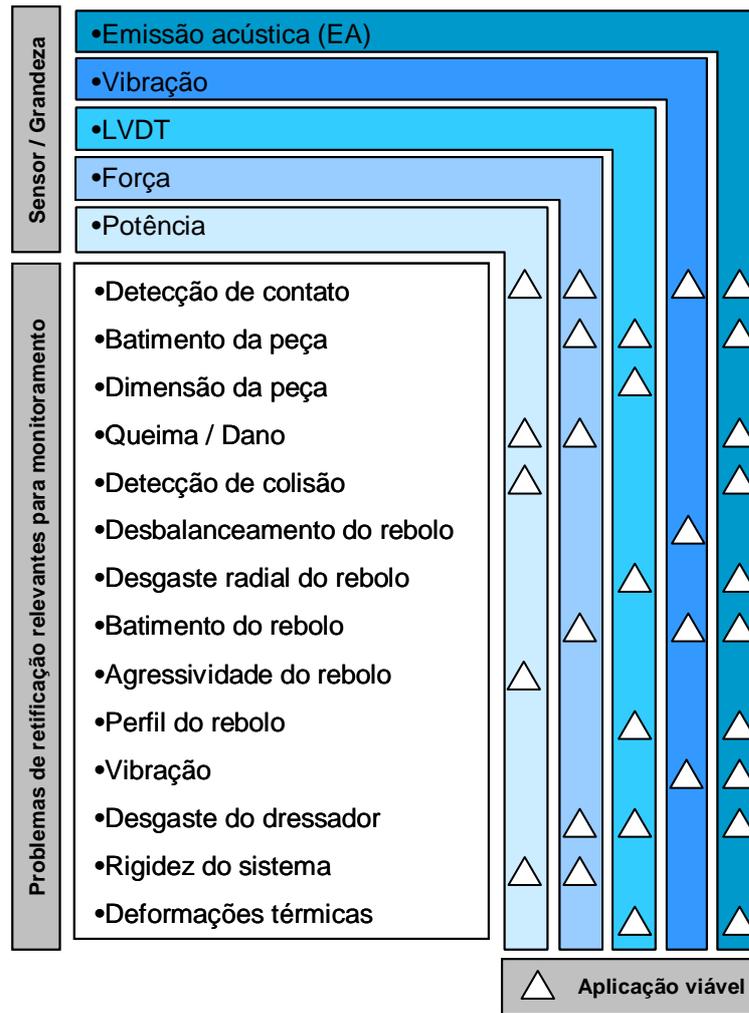


figura 2.11 – Sensores/grandezas e problemas relevantes de monitoramento do processo de retificação (Adaptado de OLIVEIRA; DORNFELD, 2001)

A figura 2.11 mostra a viabilidade de aplicação de algumas grandezas e sensores no monitoramento de alguns problemas relevantes do processo de retificação, contribuindo para solucioná-los. Uma característica importante apresentada é que nenhuma grandeza/sensor apresenta uma aplicação viável para todos os problemas, no entanto a que possui maior abrangência é a EA.

A seguir são abordados algumas grandezas e sensores utilizados no monitoramento de processos de retificação de relevância para esse trabalho.

## 2.5 Potência

Devido à ação de retificação, são desenvolvidas entre o rebolo e a peça algumas forças. Para operações de retificação de mergulho, como ilustrado nas figuras 2.12 e 2.13, o vetor da força total exercido pela peça de encontro com o rebolo pode ser separado entre uma componente tangencial  $F_t$  e uma componente normal  $F_n$  (MALKIN, 1989).

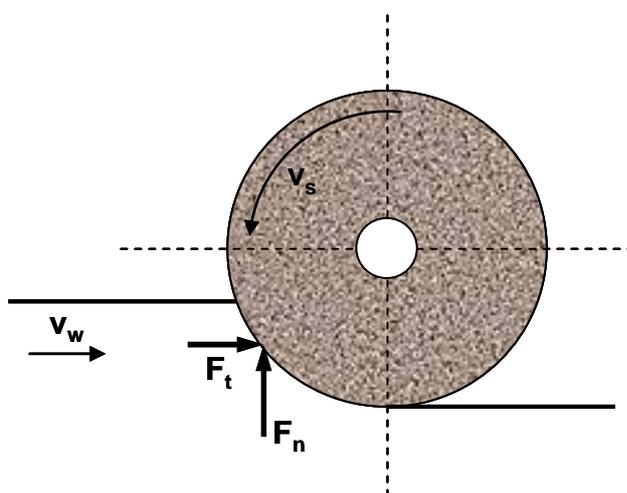


figura 2.12 – Retificação plana (MALKIN, 1989)

A força tangencial é a componente mais importante no que diz respeito ao estado da integridade da superfície, porque a multiplicação da força tangencial e a velocidade de corte resultam na potência de retificação  $P$ .

A potência de retificação  $P$  é então definida como:

$$P = F_t \cdot (v_s \pm v_w) \quad (2.1)$$

Onde  $v_s$  é a velocidade do rebolo e  $v_w$  é a velocidade da peça.

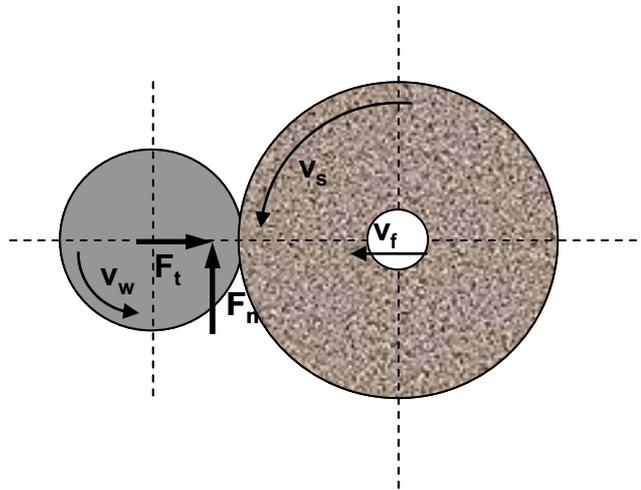


figura 2.13 – Retificação cilíndrica externa (MALKIN, 1989)

Se a potência de retificação é referente à zona de contato, a potência de retificação específica  $P'$  pode ser calculada. Esta grandeza é usada para estimar a geração do calor durante a retificação. A potência específica de retificação é diretamente proporcional a taxa específica de remoção de material  $Q'_w$  (MALKIN, 1989).

A potência específica é um parâmetro fundamental e a relação mencionada anteriormente é representada pela seguinte equação (MALKIN, 1989):

$$P' = \frac{P}{Q_w} \quad (2.2)$$

A potência consumida pelo motor da máquina pode ser obtida através do produto da medida da sua corrente e tensão. A corrente consumida pelo motor pode ser medida usando-se sensores de efeito Hall. Esse efeito é baseado na interação

entre o movimento de condutores elétricos e um campo magnético externo, isto é, quando um condutor, através do qual flui uma corrente elétrica, é submetido a um campo magnético perpendicular, uma diferença de potencial surge nas laterais desse condutor. Este efeito ocorre devido a cargas elétricas tenderem a desviar-se de sua trajetória por causa da força de Lorentz. Desta forma, cria-se um acúmulo de cargas nas superfícies laterais do condutor, produzindo uma diferença de potencial Hall transversal, cujo sinal e amplitude dependem da intensidade do campo magnético e da corrente elétrica (SOARES, 2002; JEMIELNIAK, 1999).

Os sensores de efeito Hall constituem-se numa forma de medição indireta das forças de corte através da medição da potência consumida pelo motor. A vantagem desta medição indireta das forças de corte reside no posicionamento do sensor no motor da máquina, ou seja, isolado do ambiente industrial que geralmente é bastante agressivo (SOARES, 2002).

Por ser de fácil instalação, esses sensores de potencia são usados em larga escala no monitoramento de máquinas de usinagem (JEMIELNIAK, 1999).

Devido a algumas desvantagens inerentes do processo, esses tipos de sensores são comumente usados para detectar colisão, quebra da ferramenta e desgaste se instalados corretamente (BYRNE et al, 1995).

O sinal de potência também pode ser obtido usando um piezo-dinamômetro, medindo-se a força tangencial e multiplicando pela velocidade de corte como na equação anterior (OLIVEIRA e VALENTE, 2004).

Os piezos-dinamômetro possuem materiais cristalinos que quando submetidos a uma força, formam-se proporcionalmente, cargas elétricas em sua superfície. O material cristalino utilizado nesses sensores é o quartzo, embora atualmente seja mais utilizado o quartzo artificial, o qual também é conhecido como

quartzo transdutor ou cristal piezelétrico (NATIONAL PHYSICAL LABORATORY, 2006).

A figura 2.14 mostra um sensor de força. Onde após os cristais produzirem uma carga elétrica sob efeito de uma força, essa carga é acumulada no eletrodo e posteriormente condicionada pelo micro circuito (PCB GROUP, 2006).

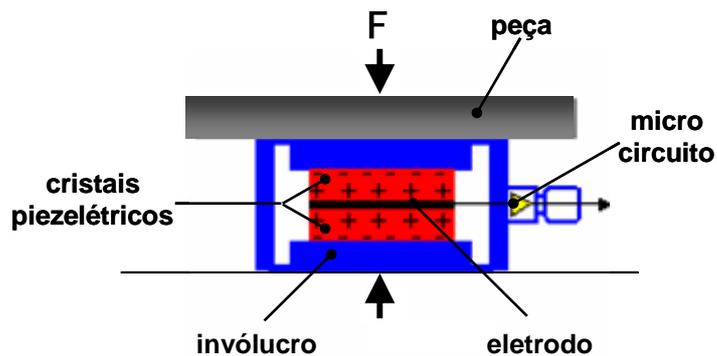


figura 2.14 - Esquema de um sensor de força que utiliza cristais piezelétricos (modificado de PCB GROUP, 2006)

Os piezos-dinamômetro comerciais fornecem uma medida mais exata da força de corte. Estes transdutores são muito precisos, mas por usarem cerâmicas piezelétricas, a medida de força estática sobre um período de tempo longo pode resultar numa variação significativa (BYRNE et al, 1995). Devido a seus custos elevados e dificuldades de instalação, a aplicação de piezos-dinamômetro é limitada para laboratório (JEMIELNIAK, 1999).

Transdutores de força estão sujeitos também a influências dinâmicas do sistema máquina/ferramenta/peça. Neste caso, a peça montada sobre o instrumento pode trabalhar como uma massa sísmica, e o dinamômetro pode responder como um acelerômetro (OLIVEIRA; VALENTE, 2004).

Valente (2003) conclui que o sinal de potência oferece uma informação bastante confiável sobre a energia consumida no processo, sendo proporcional à quantidade de material removido pela ferramenta abrasiva. O lado negativo deste sinal é a sua resposta lenta, diretamente relacionada à inércia do motor, o que induz certo amortecimento do sistema (VALENTE, 2003).

## **2.6 Emissão Acústica**

Matthews (1984) define emissão acústica (EA) como ondas de tensão elásticas, que surgem espontaneamente pela liberação rápida da energia da fonte localizada dentro do material. Pollock (1989) define de forma mais simplificada como ondas de tensão produzidas por movimento súbito nos materiais.

Os primeiros resultados obtidos em pesquisas com emissão acústica foram publicados na década de 1950 por Joseph Kaiser para testes de tração (KARPUSCHEWISKI, 2001). A aplicação de emissão acústica em retificação é pesquisada desde 1984, quando foi publicado um estudo sobre as influências dos parâmetros de retificação na EA por Dornfeld e Cai (OLIVEIRA; DORNFELD, 2001).

As principais fontes que têm de ser consideradas no processo de retificação são o material e as mudanças dentro do material, tais como: impacto elástico, riscamento sem remoção de cavaco, remoção de cavaco, quebra de cavaco, fratura de grão, fratura do ligante, rachaduras, indução térmica de mudanças estruturais, como mostrado na figura 2.15 (KARPUSCHEWISKI, 2001; HUNDT; LEUENBERGER; REHSTEINER, 1994; DORNFELD; LIU, 1993).

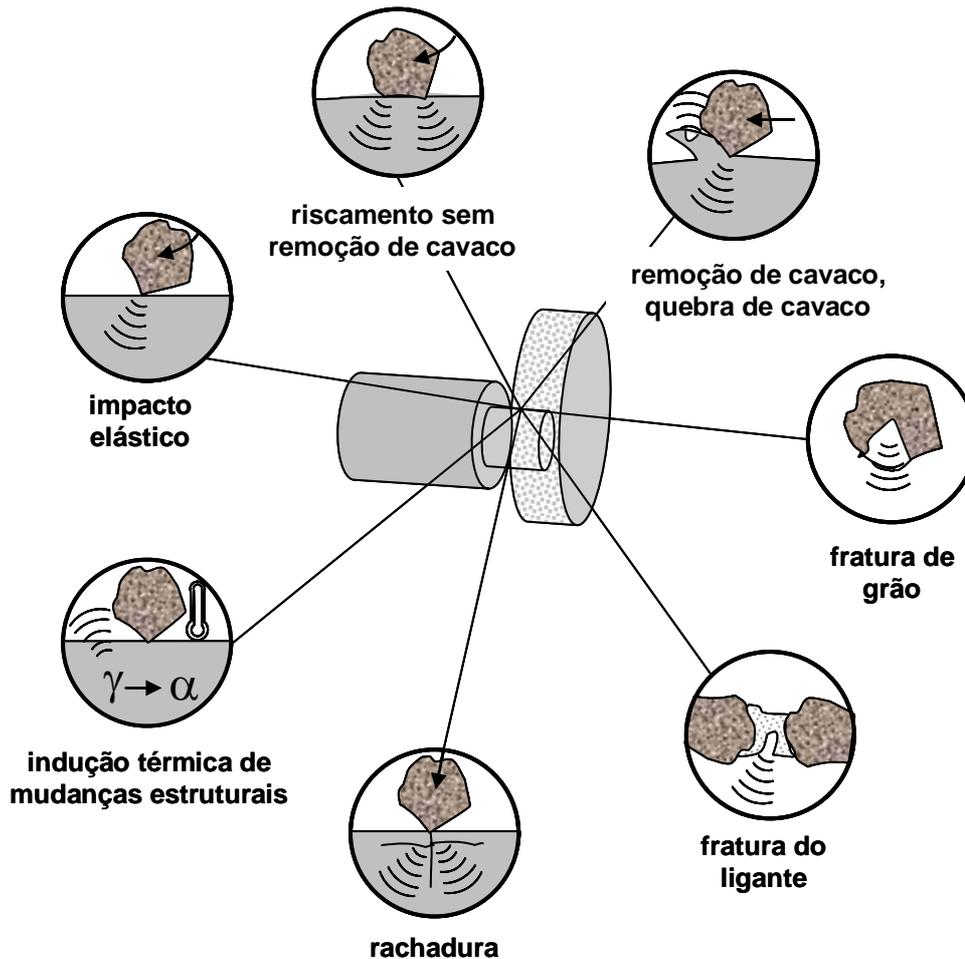


figura 2.15 – Fontes de emissão acústica em retificação (adaptado de KARPUSCHEWISKI, 2001)

Um sensor de EA recebe a estimulação de ondas acústicas (ondas de tensão) e fornece como saída às tensões elétricas correspondentes. Há diversos métodos para converter as ondas acústicas a uma saída elétrica. O método mais comum usado é com piezeletricidade, usando cristal piezelétrico ou cerâmicas ferromagnéticas. A escala típica das frequências para sensores de EA é de 30kHz até em torno de 2MHz. A figura 2.16 mostra a construção típica de um sensor de EA (NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK, 1987).

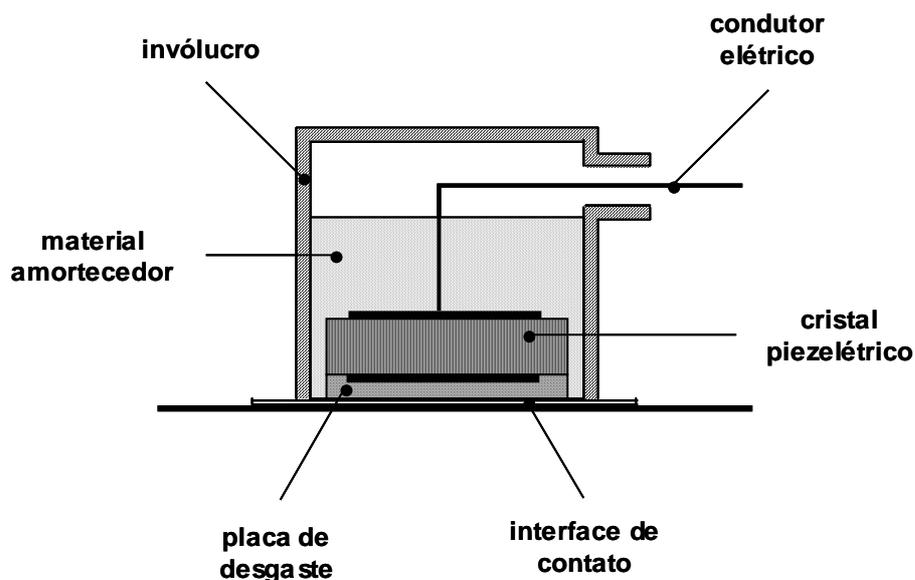


figura 2.16 – Esquema de um sensor de EA (modificado de NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK, 1987)

A figura 2.17 mostra os locais mais utilizados para posicionar sensores de força, EA e potência em retificadoras planas e cilíndricas (INASAKI; KARPUSCHEWSKI, 2001).

O princípio físico da técnica de monitoramento por EA se resume na utilização do sinal acústico, gerado durante o processo de usinagem que é propagado pelo material. A variação da intensidade de energia deste sinal é captada pelo sensor e posteriormente correlacionada com o processo em questão. A emissão acústica, por captar sinais de alta frequência, livre dos ruídos advindos de fontes que não interessam especificamente ao processo, é um método bastante sensível e, portanto adequado ao monitoramento do processo de retificação, que possui baixas taxas de remoção de cavaco (SOARES, 2002; BIFANO; YI, 1992).

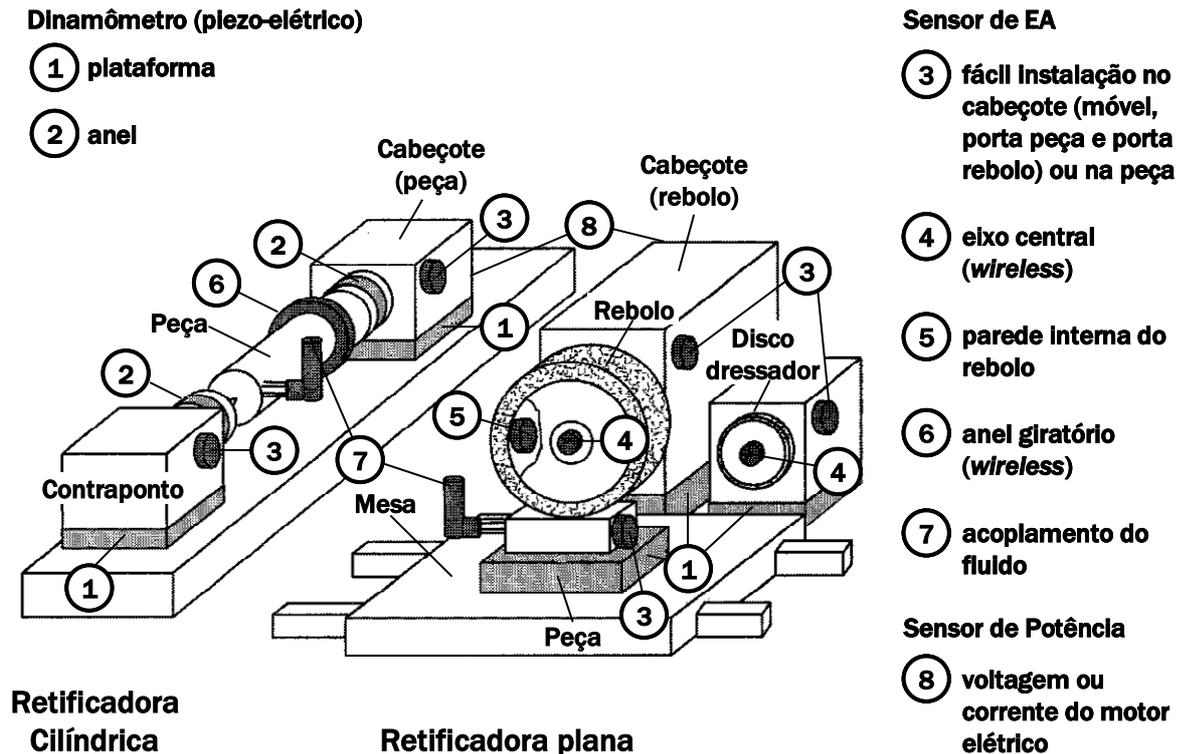


figura 2.17 - Posições possíveis dos sensores de força, EA e potência em retificadoras (modificado de INASAKI; KARPUSCHEWSKI, 2001)

Diferentes tipos de avaliação de sinal podem ser aplicados à saída do sensor de EA. As análises mais importantes são: valor da raiz quadrática média (RMS), sinais de EA brutos e análise da frequência (KARPUSCHEWSKI, 2001).

A fim de exemplificar o uso da RMS da EA, pode-se citar o trabalho de König e Meyen (1990), onde foi utilizado um sistema de EA em retificação cilíndrica com sensores fixados no ponto e no contraponto, para o monitoramento do processo. O objetivo era verificar, através do sinal, se todas as fases do processo eram realizadas com sucesso, sem falhas. O processo em questão é dividido em três fases: desbaste, acabamento e acabamento fino. A figura 2.18 mostra o sinal obtido, onde se verifica uma distinção clara entre as fases, à qual é atribuída a diferença nas taxas de remoção entre elas.

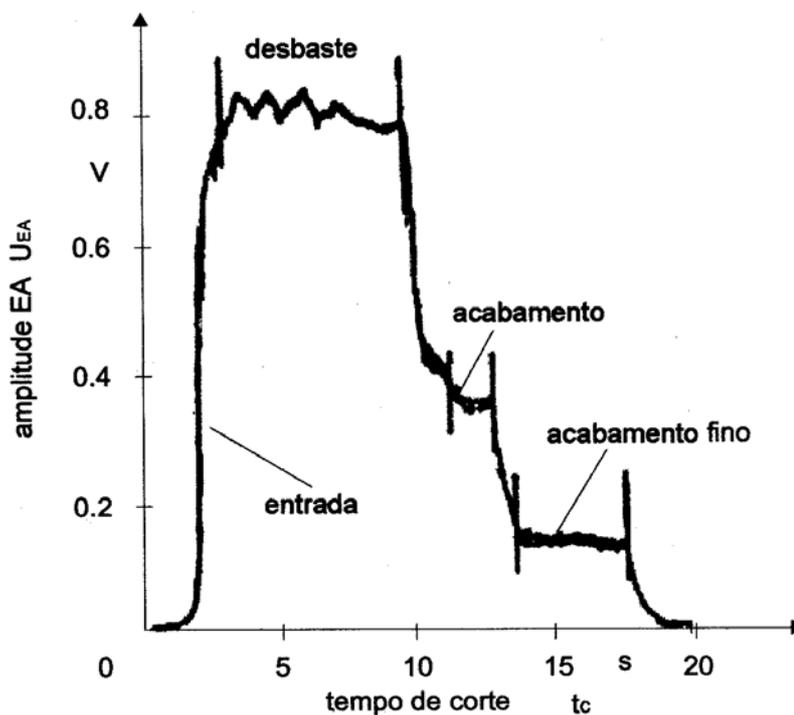


figura 2.18 - Sinal de EA em um processo de retificação cilíndrica (KONIG; MEYEN 1990, modificada por FELIPE Jr 1996)

Outro método de análise do sinal de EA é o mapeamento acústico. A construção do mapa consiste em plotar linhas verticais que correspondem a uma volta do rebolo, onde a escala de cor varia de acordo com a amplitude, isto é, quanto maior a potência de retificação ou a energia acústica, mais clara é a cor no mapa (OLIVEIRA; DORNFELD, 2001).

A figura 2.19 mostra um exemplo de mapa acústico obtido durante um processo de dressagem. As direções verticais e horizontais representam o perímetro e a largura do rebolo respectivamente. A intensidade da cor mostra o valor medido da emissão acústica RMS da interação entre a ferramenta de dressagem e os grãos abrasivos. A marca em forma de “L” foi feita na superfície do rebolo a fim de avaliar o desempenho do sistema. As áreas mais escuras mostram regiões gastas do rebolo onde a ferramenta de dressagem teve uma interação menor com os grãos abrasivos.

A faixa desgastada vertical no lado esquerdo é resultado de uma operação de retificação da peça mostrada na figura (OLIVEIRA; DORNFELD, 2001).

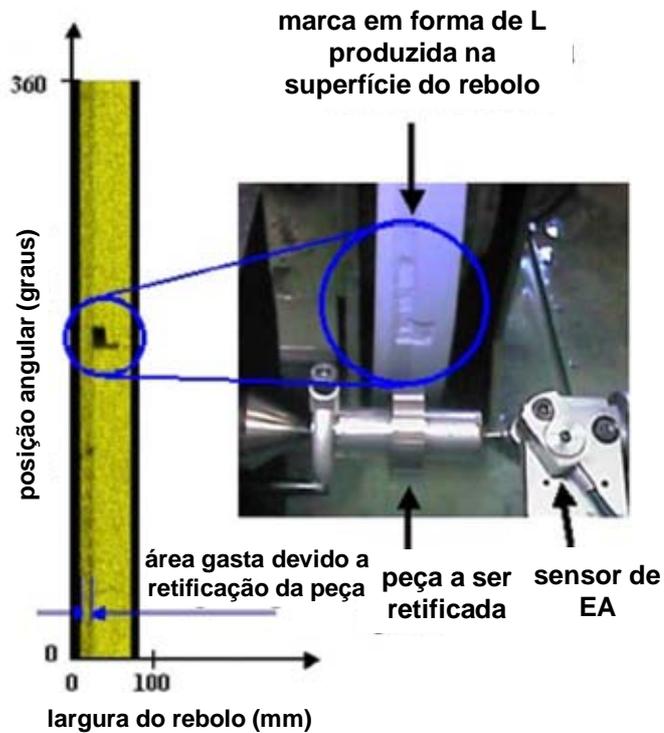


figura 2.19 - Mapa acústico da dressagem de um rebolo com uma marca em forma de L produzido em sua superfície (LEE et al, 2005)

O mapa acústico pode fornecer informações sobre a topografia do rebolo, a operação de dressagem e a interação entre o rebolo e a peça durante uma operação de retificação (OLIVEIRA; DORNFELD, 2001).

Uma grande vantagem da tecnologia da emissão acústica, utilizada para o monitoramento de máquinas e processos de usinagem, é o fato de que a larga faixa de frequência do sinal não é afetada pela baixa frequência de vibração da máquina. Além disso, devido às altas velocidades relativas entre rebolo e peça garantirem uma fonte significativa e os sinais de EA serem gerados diretamente na zona de

deformação do processo de corte, fornece no caso do processo de retificação, informações seguras para poder investigar o processo de *spark out*, desgaste do rebolo e dressagem (DORNFELD, 1992; BLUM; DORNFELD, 1993).

Uma característica importante da EA foi apresentada por Dornfeld e Cai (1984) no estudo relacionando força de corte e EA. Através de medições da EA e das forças de corte, realizadas durante um processo de retificação plana, os autores concluem que a energia da EA, que é o quadrado do valor RMS do sinal obtido, é proporcional à força horizontal de corte  $F_H$ . A figura 2.20 apresenta os resultados dessas medições obtidos para rebolos afiados e cegos, mostrando que a relação não depende do estado de afiação do rebolo.

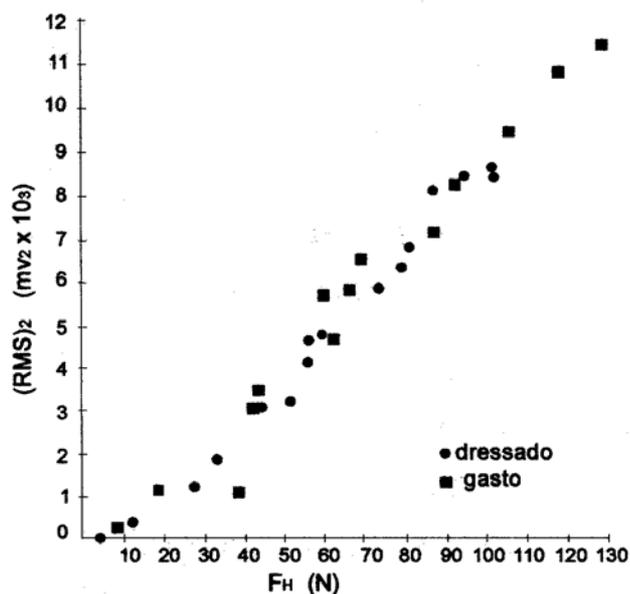


figura 2.20 - EA  $(RMS)^2$  versus  $F_H$  (DORNFELD; CAI, 1984, modificado por FELIPE Jr, 1996)

As vantagens apontadas para sensores de EA em aplicações industriais são: alta sensibilidade, alta dinâmica e facilidade de instalação (FELIPE jr, 1996). São usados com frequência em máquinas de usinagem, principalmente para a detecção

de quebra de ferramenta. A análise do sinal de EA em conjunto com aquele vindo de outro sensor, como o de potência, aumenta a confiabilidade da informação a respeito da máquina ou do processo, permitindo uma tomada de decisão ou uma ação de controle mais rápida e confiável (JEMIELNIAK, 1999).

Valente (2003) concluiu, ao analisar a bibliografia existente, que a EA é extremamente rápida e adequada para detectar o contato entre as superfícies. Contudo, o nível acústico não apresenta um comportamento homogêneo durante todo o processo, podendo ser influenciado por diversos outros parâmetros (geometria da peça, distância do sensor, montagem do sensor, etc) que independem da interação ferramenta-peça.

## **2.7 Fusão de Sensores**

Como descrito anteriormente, cada tipo de sensor apresenta suas limitações e tem uma precisão e custos associados. Muitas vezes, algumas características de um sensor necessárias e/ou desejáveis para uma aplicação ficam limitadas por restrições como custo ou complexidade. Além disso, limitações apresentadas por um tipo de sensor podem não se aplicar a outros e vice-versa (FACELI, 2001).

A combinação de informações obtidas a partir de alguns sensores simples e baratos pode fornecer uma informação mais completa, precisa e confiável, a qual está além da capacidade isolada de cada um dos sensores envolvidos. Para essas informações se apresentarem de forma coerente e servirem aos propósitos do sistema, elas precisam ser integradas. Esse processo de integração é realizado através da fusão de sensores, que tanto torna o sistema mais tolerante a falhas,

como também pode fornecer informações novas, que nenhum dos sensores isoladamente consegue obter (FACELI, 2001).

Chiu, Morley e Martin (1986) definiram a fusão de sensores como sendo uma combinação da informação de múltiplos sensores e múltiplos tipos de sensores para aumentar a exatidão.

Embora não seja padrão na literatura, pode-se fazer uma distinção entre integração e fusão de múltiplos sensores. A integração é uma idéia mais genérica e diz respeito ao uso sinérgico de informações, provenientes de múltiplos sensores, para a realização de uma tarefa. Já a noção mais restrita de fusão pode ser entendida como um estágio da integração, em que as leituras de diversos sensores são combinadas, de fato em uma estrutura representacional (LUO; KAY, 1992; BROOKS; IYENGAR, 1998)

A fusão de sensores tem como objetivo aumentar a confiabilidade da informação de modo que uma decisão no estado do processo seja alcançada. Deve-se estabelecer uma relação entre o parâmetro medido e o parâmetro do processo. Há duas maneiras principais de codificar este relacionamento (DORNFELD, 2001):

- teórica - o relacionamento entre um fenômeno e os parâmetros medidos do processo (desgaste e processo da ferramenta);
- empírica - os dados experimentais são usados para ajustar parâmetros de um modelo proposto.

Os modelos teóricos, que relacionam a saída do sensor às características do processo, são difíceis de serem desenvolvidos por causa da complexidade e da variabilidade do processo e dos problemas associados com a incorporação de um grande número de variáveis no modelo. Em conseqüência, os métodos empíricos

que podem usar dados do sensor para ajustar parâmetros desconhecidos de uma relação proposta são mais atrativos. Estes tipos de abordagens podem ser executadas (RAO; AHMED, 1975; DORNFELD, 2001):

- propondo uma relação entre uma característica particular do processo e as saídas do sensor e então usando dados experimentais para ajustar parâmetros desconhecidos de um modelo, ou
- associando testes padrões de dados do sensor com uma decisão apropriada no estado do processo sem consideração de todos os dados relacionando-se modelo do sensor ao estado.

A segunda abordagem geralmente é referente à identificação do padrão e envolve três estágios críticos (RAO; AHMED, 1975; DORNFELD, 2001):

- amostragem do sinal de entrada para adquirir o vetor da medida;
- seleção e extração de característica;
- classificação no espaço da característica para permitir uma decisão no estado processo.

Sakura e Inasaki (1993) fazem uma distinção dentro do contexto da fusão de sensores: o sistema de sensores repetidos e o sistema de diversos sensores. A integração de tipos similares de sensores, isto é, um sistema de sensores repetidos, pode contribuir principalmente a melhorar a confiabilidade e robustez do sistema de monitoração, visto que a integração de tipos diferentes de sensores, sistema de diversos sensores, pode tornar o sistema de monitoramento mais flexível (figura 2.21).

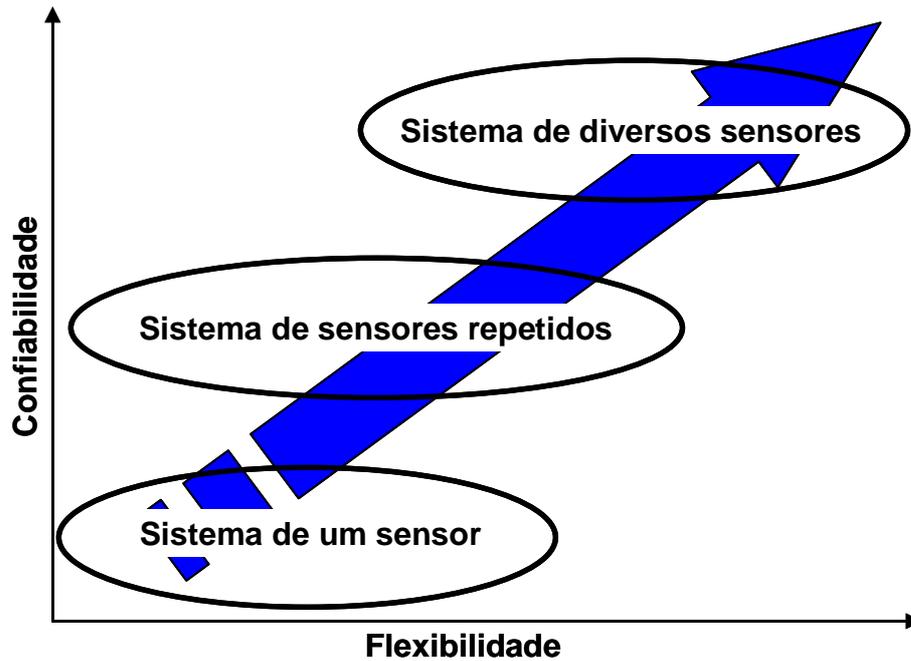


figura 2.21 – Evolução do sistema de monitoramento (INASAKI; TÖNSHOFF, 2001)

## 2.8 Fast Abrasive Power (FAP)

Valente (2003) concluiu que a EA é extremamente rápida e adequada para detectar o contato entre superfícies. Contudo, o nível acústico não apresenta um comportamento homogêneo durante todo o processo, podendo ser influenciado por diversos outros parâmetros (geometria da peça, distância do sensor, montagem do sensor, etc.) que independem da interação ferramenta-peça. Já o nível de potência oferece uma informação bastante confiável sobre a energia consumida no processo, sendo proporcional à quantidade de material removido pela ferramenta abrasiva. O lado negativo deste sinal é sua lentidão de resposta, diretamente relacionada à inércia do motor, o que induz um certo amortecimento o sistema.

Baseado nessas conclusões, Valente (2003) propôs em seu trabalho de implementação de um sistema para eliminação automática de rebarbas resultantes

dos processos de usinagem, um sistema de controle da trajetória da ferramenta abrasiva do robô, utilizando a combinação do nível de emissão acústica (EA) da operação e da potência consumida no processo.

Valente (2003) então propôs uma fusão dos sinais de emissão acústica (EA) e potência. O sinal resultante é denominado FAP (*Fast Abrasive Power*). Esse novo sinal FAP conserva a confiabilidade do sinal original de potência e incorpora a dinâmica do sinal de emissão acústica.

Através dos resultados obtidos, Valente (2003) concluiu que as seguintes características habilitavam a utilização do FAP como sinal de controle do sistema de rebarbação robótica:

- detecção praticamente instantânea de alterações bruscas no contato entre a ferramenta e a peça, devido à influência da dinâmica do sinal de EA
- durante um corte em regime constante, o nível FAP acompanha a evolução do sinal de potência, que é proporcional à taxa de remoção de material em processos abrasivos.

### **2.8.1 Definição**

A combinação dos sinais de EA e potência deve extrair as características mais importantes de ambos: a resposta do sinal de EA e a confiança do nível médio de potência. Conseqüentemente, o nível da EA dinâmica normalizada pode ser definido como a relação entre o valor da EA RMS instantânea e a sua média em um período de tempo recente. O parâmetro FAP pode ser obtido através do produto do

nível da EA dinâmica normalizada pelo nível de potência (OLIVEIRA; VALENTE, 2004):

$$FAP_i = P_i \cdot EA_{ni}(W) \quad (2.3)$$

Onde:

$P_i$  = nível de potência no tempo  $i$ .

$EA_{ni}$  = nível de EA dinâmica normalizada no tempo  $i$ .

O nível da EA dinâmica normalizada é calculado como se segue:

$$EA_{ni} = \frac{EA_{RMSi} + k}{\left( \frac{1}{t_w} \cdot \int_{t=i-t_w}^i EA_{RMS}(t) dt \right) + k} \quad (2.4)$$

Onde:

$EA_{RMSi}$  = nível de EA RMS no tempo  $i$ .

$t_w$  = janela de tempo para calcular a  $AE_{rms}$  média.

A constante  $k$  é incluída para compensar a dinâmica da EA no nível do FAP. Para valores mais elevados de  $k$ , menor é a influência da dinâmica da EA.

Uma vez que o nível da EA tem correlação local com o valor força, é possível traçar o parâmetro FAP com a mesma resposta de um piezo-dinamômetro,

ajustando os valores de  $k$  e  $t_w$ . Algumas flutuações da EA são restauradas após todo período de tempo  $t_w$ . Sendo a  $EA_{ni}$  não dimensional, o FAP tem unidade de potência.

### 2.8.2 FAP em Retificadora Plana

Oliveira e Valente (2004) aplicaram o parâmetro FAP em um processo de retificação plana. Os resultados e as conclusões encontradas por eles são apresentados a seguir.

A figura 2.22 mostra os sinais obtidos durante um passe de retificação. Uma característica típica da EA é o aumento do ganho nas bordas da peça. Isso não é relacionado ao processo de retificação, mas à resposta acústica do sistema. A potência obtida com o transdutor de corrente tem um comportamento amortecido como esperado.

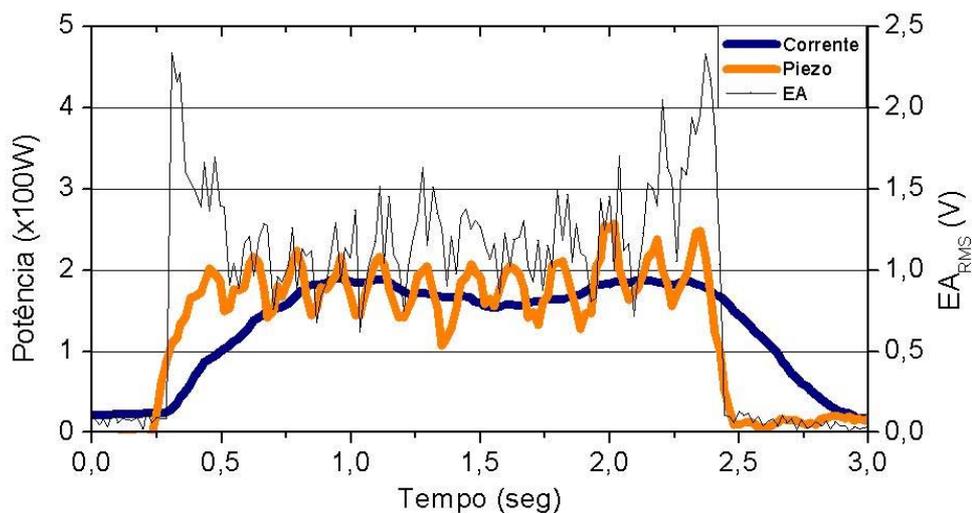
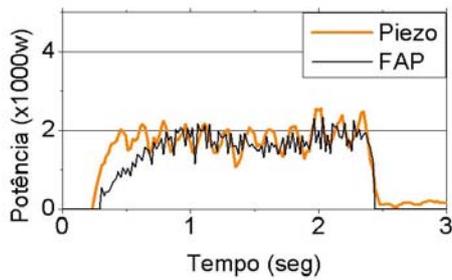
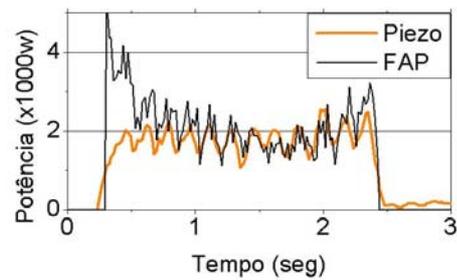
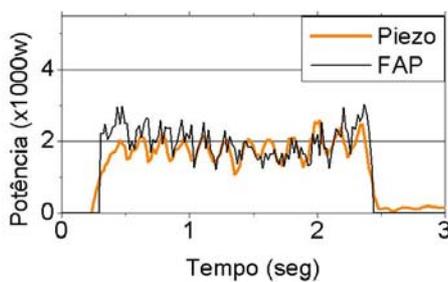
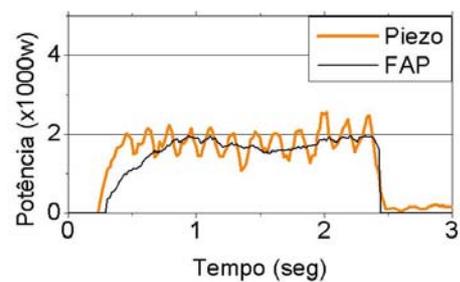


figura 2. 22 – Típicos sinais de potência (usando sensor de corrente de efeito Hall e piezo-dinamômetro) e EA RMS.

A figura 2.23 mostra a influência do histórico do tempo  $t_w$  no FAP. Quando se aumenta o valor de  $t_w$ , a dinâmica do nível do FAP também aumenta. O histórico do tempo também tem uma forte influência nas bordas do sinal.

(a)  $t_w = 40\text{ms}$ (a)  $t_w = 1000\text{ms}$ figura 2.23 – Influência de  $t_w$  na dinâmica de resposta do FAP

A influência de  $k$  na resposta do FAP é mostrada na figura 2.24. Altos valores de  $k$  produzem um efeito de amortecimento no nível do FAP. Entretanto, uma redução do valor de  $k$  amplifica a influência na dinâmica da EA com um pequeno efeito no comportamento nas bordas do sinal.

(a)  $k = 0,2$ (a)  $k = 10$ figura 2.24 – Influência de  $k$  na dinâmica de resposta do FAP

O procedimento correto para encontrar os melhores valores de  $t_w$  e  $k$  é primeiro encontrar o tempo  $t_w$ , a fim de obter o macro-comportamento do FAP e ajustar então o valor de  $k$ , a fim de adaptar a micro-dinâmica do sinal à referência. Isso torna possível obter o sinal do FAP com uma resposta muito similar a potência obtida usando o dinamômetro.

O gráfico final depois do procedimento de calibração é apresentado na figura 2.25. Esse resultado demonstra que é possível obter um sinal rápido da potência de retificação usando o método FAP.

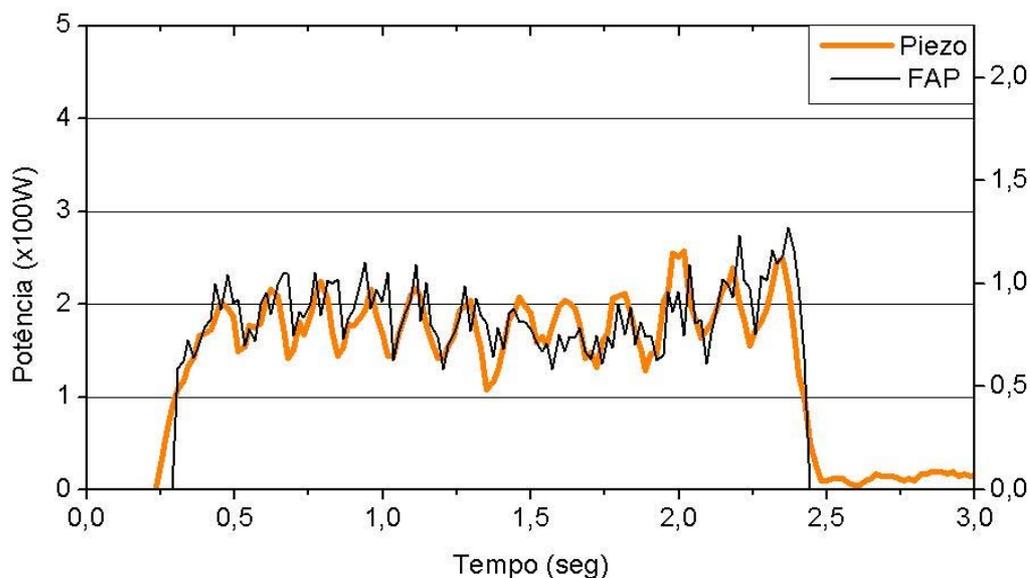


figura 2. 25 – Comparação do sinal do FAP com o dinamômetro após a calibração ( $t_w = 1s$ ,  $k = 0,5$ )

Algumas características principais do FAP são (OLIVEIRA; VALENTE, 2004):

- o custo da instalação é muito mais baixo que de um piezo-dinamômetro;
- fácil instalação;
- baixa sensibilidade para variações do ganho da EA;

- insensível à flutuações da EA (se as flutuações ocorrem fora da janela de tempo  $t_w$ );
- a dinâmica da resposta pode ser ajustada as exigências do monitoramento, mudando  $t_w$ ,  $k$  e a constante de tempo RMS;
- Somente trabalha onde o nível da EA RMS tem uma correlação linear com a força de retificação, então as saturações do sinal devem ser evitadas.

O sinal do FAP pode também ser compreendido como um sinal de EA, onde o ganho é constantemente ajustado pelo nível de potência.

### **2.8.3 FAP em Rebarbação Robótica**

Oliveira e Valente (2004) realizaram testes de rebarbação robótica de rebarbas produzidas pelos orifícios de envasamento durante a fundição, utilizando o FAP e a potência como parâmetros de controle.

A figura 2.26 mostra os sinais quando o FAP foi usado como o parâmetro de controle. Como o disco toca primeiramente na ponta da rebarba, o FAP dá um pico que não poderia ser detectado pelo sensor de corrente sem um atraso de aproximadamente 1 segundo. Uma vez que o disco se está movendo com uma rápida aproximação nesta fase, um atraso na detecção do contato pode provocar danos no disco (OLIVEIRA; VALENTE, 2004).

No final do ciclo, o pico da EA associado com a potência mais elevada fornece uma resposta que é rápida o bastante para retornar o cabeçote de rebarbação. Após ter detectado a extremidade do ciclo, o robô leva aproximadamente 0.5 segundos para retornar seu braço. Esse atraso é responsável

por danos menores na peça. É importante notar que nem a EA, nem o sinal de potência poderiam ser usados separadamente para controlar este processo. A EA tem um comportamento imprevisível e a potência tem uma resposta amortecida (OLIVEIRA; VALENTE, 2004).

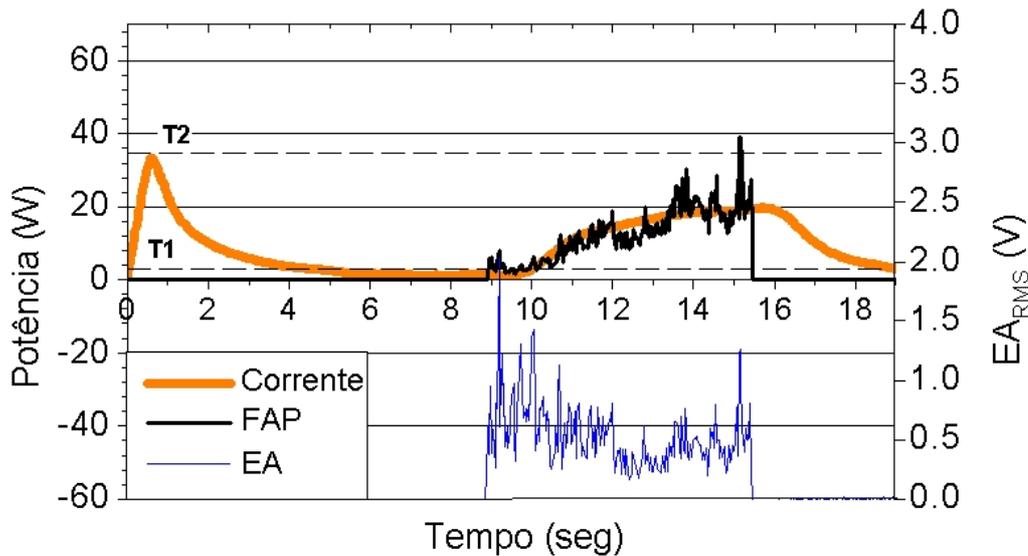


figura 2. 26 – Resultado com o FAP como parâmetro

A figura 2.27 mostra o mesmo teste onde o sinal de potência, medido através de um transdutor de corrente (sistema do FAP não aplicado), foi usado como parâmetro do controle. Os limiares foram ajustados aos mesmos valores usados no primeiro teste. O atraso do sinal de corrente amortecido aumenta o atraso na resposta do controlador do robô produzindo um dano significativo na peça (OLIVEIRA; VALENTE, 2004).

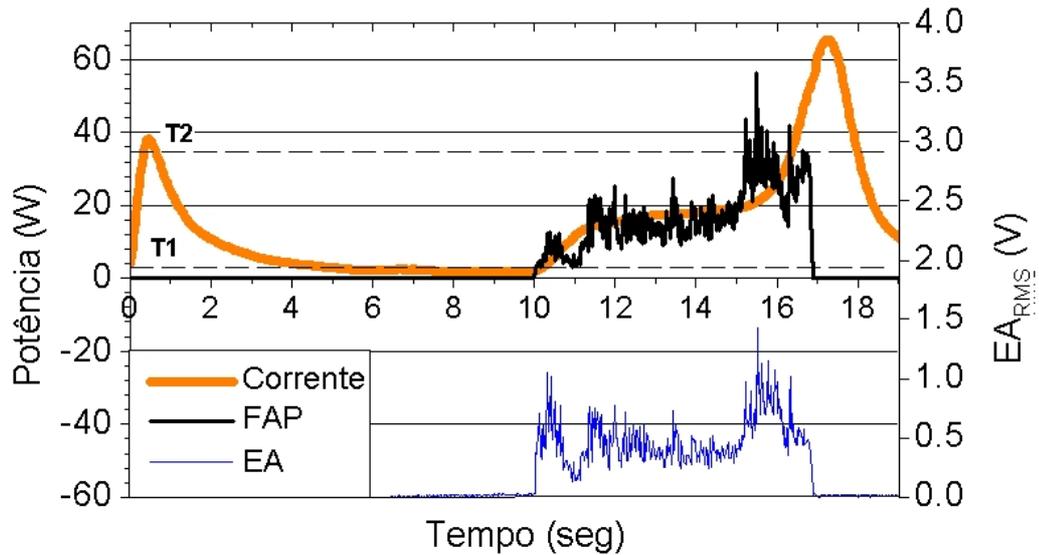


figura 2. 27 - Resultado com a potência como parâmetro

#### 2.8.4 Conclusões sobre o FAP

Oliveira e Valente (2004) chegaram as seguintes conclusões sobre o FAP:

- o comportamento dinâmico da EA RMS pode ser usado para modular o sinal de potência a fim de melhorar sua resposta.
- sendo que o nível de AE RMS é localmente proporcional a potência de retificação, o parâmetro FAP pode representar a potência de retificação real com uma resposta mais rápida do que é possível com os transdutores comerciais de corrente e potência.
- a dinâmica do FAP pode ser ajustada para suprir as necessidades do monitoramento e controle do processo. A detecção do contato pode ser realçada e o nível de potência pode ser controlado usando o mesmo parâmetro.
- a aplicação da estratégia do FAP é relativamente simples requerendo um sensor de potência e um sensor de EA. As limitações do sistema dependem da

relação entre o sinal de EA e as grandezas de retificação. A saturação do sinal deve ser evitada.

## Materiais e Métodos

---

# 3

## Capítulo

A metodologia de experimentação para a avaliação do desempenho do sinal do FAP no monitoramento de processos de retificação consistiu na realização de ensaios laboratoriais de retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho.

Os testes foram realizados no Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação (OPF) do Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP). A seguir é apresentado um detalhamento da configuração utilizada nos experimentos.

### 3.1 Retificadora

Os experimentos foram realizados numa retificadora cilíndrica externa, marca Zema, modelo G800, ilustrada na figura 3.1, a qual possui CNC GE Fanuc. É importante destacar que a retificadora foi modificada em pesquisas desenvolvidas anteriormente pelo Laboratório OPF de maneira a melhorar seu desempenho.

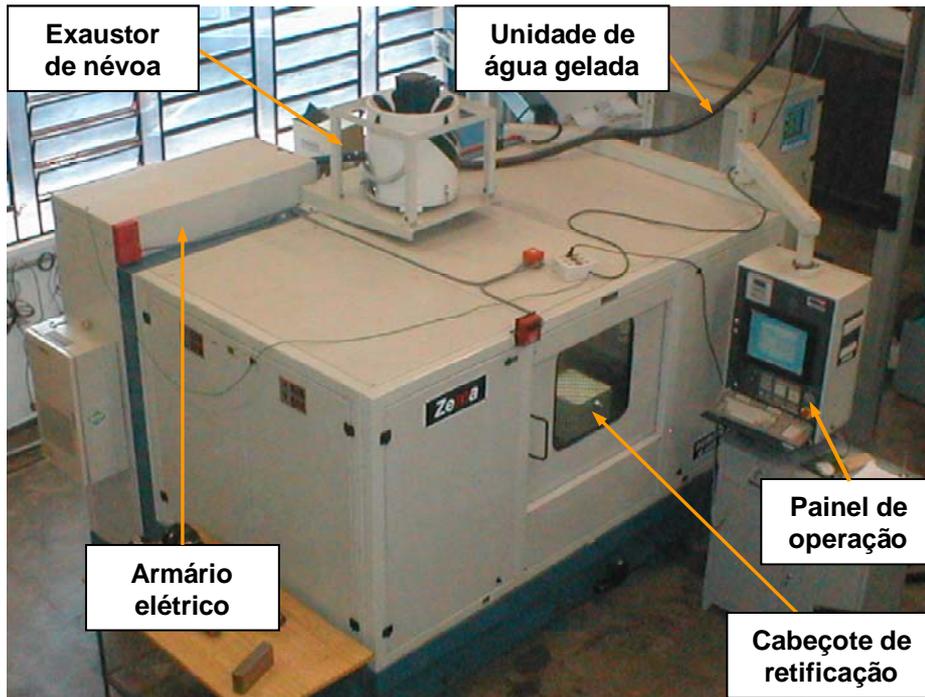


figura 3.1 - Esquema geral da retificadora ZEMA Numérica G800 - HS

Sobre a retificadora destacam-se as informações a seguir:

- Comprimento máximo retificável: 800 mm;
- Dimensões do rebolo: 508 x 80 x 203,2;
- Máxima velocidade de corte: 100 m/s
- Máxima potência disponível (potência do motor do rebolo): 15 CV.

### 3.2 Rebolo

O rebolo utilizado apresenta uma rotação máxima de aplicação de 2200RPM, as dimensões de 500mm (diâmetro externo) x 50mm (largura) x 203,2mm (altura de seguimento) e a seguinte especificação: SGB 60 LVHB, a qual é detalhada a seguir:

- **SGB**: Mistura de três abrasivos: Óxido de alumínio branco + Óxido de alumínio monocristal + Óxido de alumínio cerâmico.
- **60**: Granulometria média.
- **L**: Dureza média (A - macio, N - dureza média, Z - duro).
- **VHB**: Liga vitrificada modificada para trabalhar a 60m/s.

### 3.3 Corpos-de-Prova

O principal interesse desse trabalho é avaliar o comportamento do sinal do FAP em relação aos sinais de potência e EA em um processo de retificação, independente do rebolo e da peça utilizados. A configuração escolhida apenas delimitou um arranjo possível de ser analisado, no limite de tempo determinado para execução desse mestrado, dentre as inúmeras configurações possíveis no universo da retificação.

Cabe ressaltar, portanto, que a escolha dos materiais dos corpos-de-prova foi feita de acordo com a disponibilidade no laboratório de peças com formas, dimensões e materiais que se adequassem à operação de retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho na retificadora Zema G-800.

Durante os experimentos, foram utilizados dois tipos de corpos-de-prova, os quais são apresentados a seguir.

O corpo-de-prova 1 possui geometria e material igual à de um colo de virabrequim de motores diesel. A figura 3.2 as dimensões do corpo-de-prova. O material do mesmo é o Din 38MnS6 (SAE 1538DH) (55-60HRc), o qual possui a seguinte composição: C 0,36% - 0,40%; Mn 1,4 - 1,55%; Si 0,5 - 0,65%; P 0,25%

(máx); S 0,55 - 0,70%; Cr 0,10 - 0,20%; Ni 0,15% (máx); Mo 0,50% (máx); Cu 0,25% (máx); Al 0,10% (máx); Ni 150 – 200 ppm.

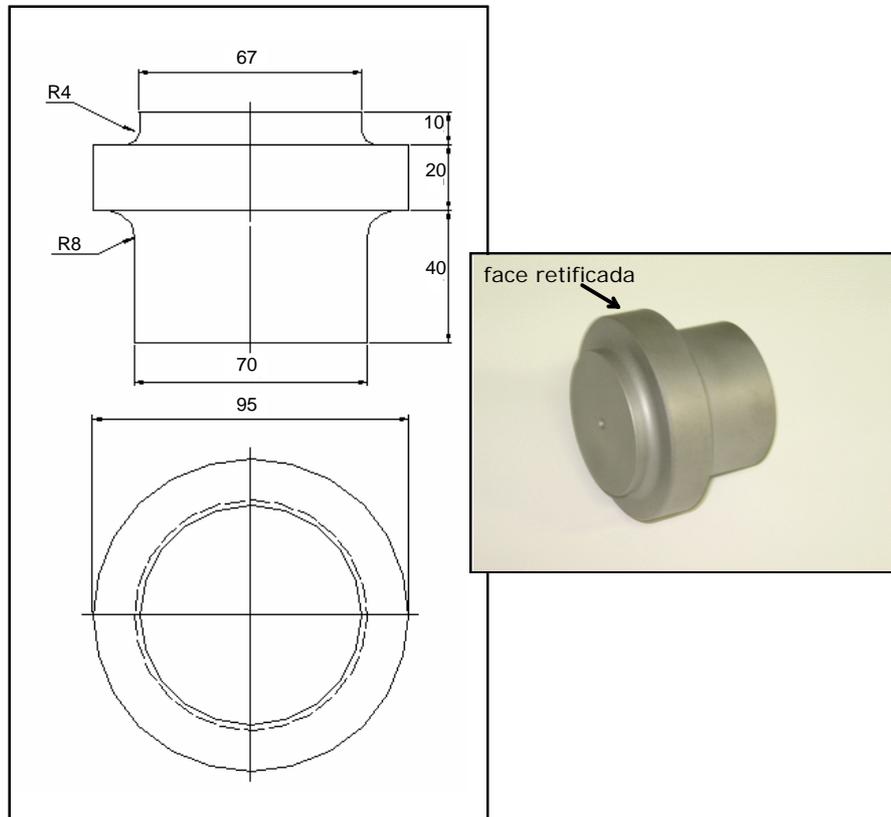


figura 3.2 - Corpo-de-prova 1

A figura 3.3 apresenta uma foto e as dimensões do corpo-de-prova 2, o qual foi utilizado exclusivamente para simular falha de sobremetal, através do chanfro em destaque na imagem. O material do corpo-de-prova é o DIN 40NiCrMo22 (SAE 8640) (52-57HRC). A composição do material é: C 0,39%; Mn 0,80%; P 0,020%; S 0,025%; Si 0,27%; Ni 0,54%; Cr 0,50%; Mo 0,22.

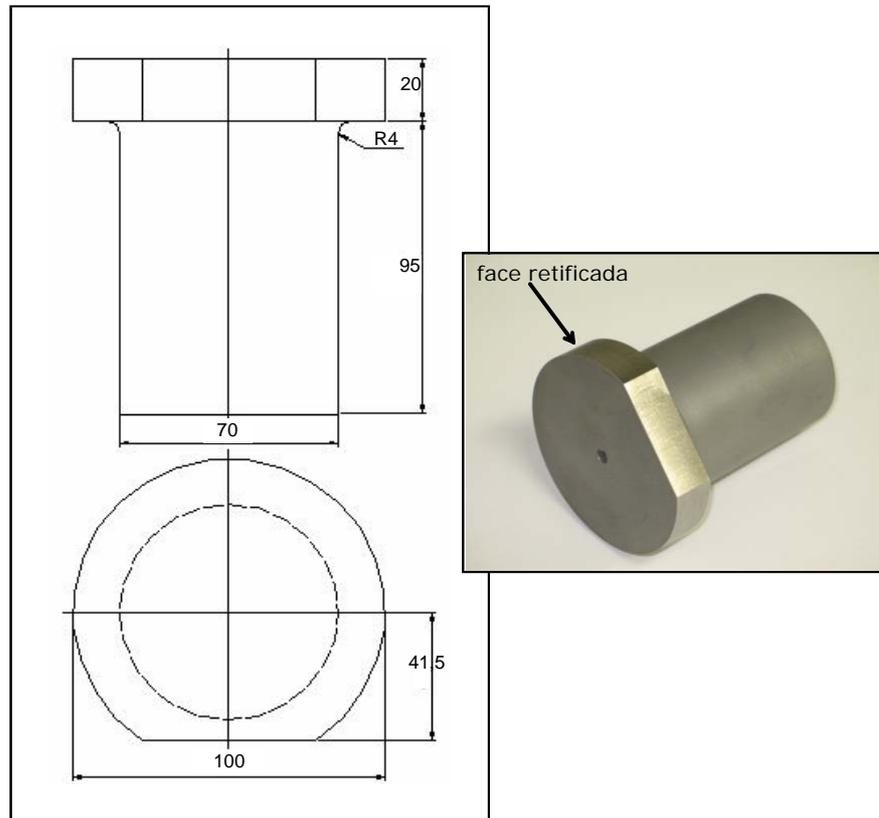


figura 3.3 - Corpo-de-prova 2

### 3.4 Sistema de Monitoramento

O sistema de monitoramento proposto nesse trabalho consiste em utilizar o sinal do parâmetro FAP para diagnosticar problemas durante o processo de retificação. Como foi explicada anteriormente, a metodologia do parâmetro FAP consiste na fusão dos sinais de potência e EA.

O sinal de potência é obtido através da corrente elétrica do inversor de frequência da máquina. O inversor de frequência VariSpeed 616G5 possui uma saída de 10V, através da qual pode-se obter a variação da corrente elétrica durante o processo de retificação. Essa corrente elétrica é proporcional ao percentual da

potência máxima de retificação, permitindo assim obter o sinal de potência do processo.

Para se obter o sinal de EA, foi instalado um sensor de EA (sensor de EA ativo com pré-amplificação da Sensis) na superfície externa do mancal do rebolo. Esse é um dos locais recomendados pela literatura (ver figura 2.17). Também foi instalado um sensor indutivo (Sense modelo PS1-8GM25-N) para se sincronizar a posição do rebolo com as medidas. Desta forma, é possível se construir um mapa da distribuição do FAP em torno do rebolo. A figura 3.7 mostra um esquema onde estão localizados o sensor de EA e o sensor eletromagnético (trigger).

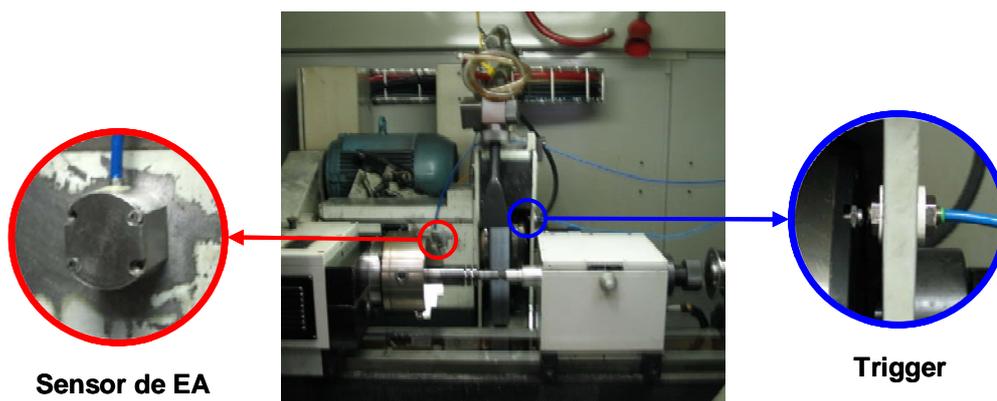


figura 3.7 – Esquema de instalação dos sensores de EA e eletromagnético

O sinal de EA precisa ser amplificado e também é necessário ser calculada a sua raiz média quadrática (RMS) antes de chegar à placa de aquisição, para que se possa obter uma boa leitura do processo com uma taxa de aquisição menor. Isso é feito pela unidade de tratamento de sinal Sensis (sistema de monitoramento DM42 – 4 entradas de sensores e 2 níveis de comparação) que está localizada no painel de controle da retificadora (figura 3.8).

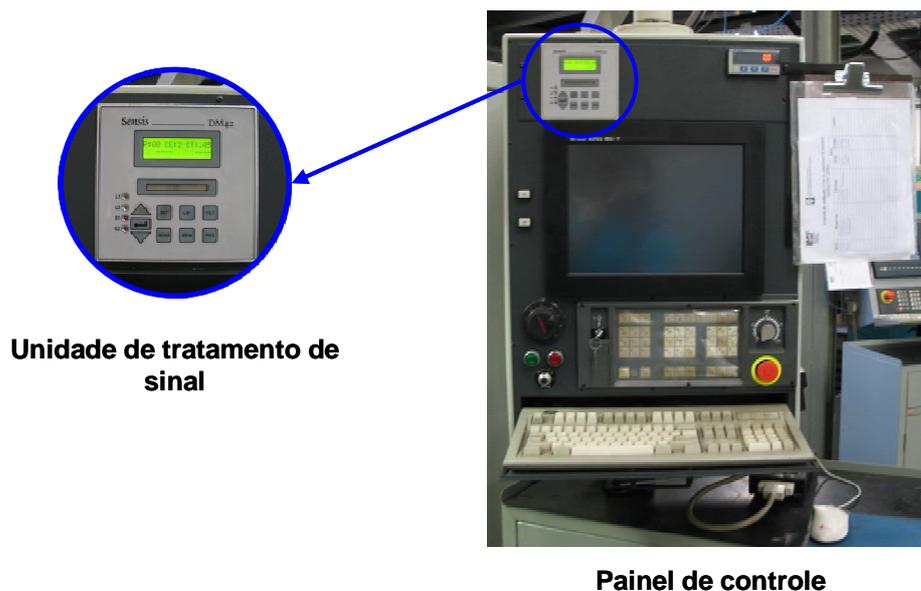


figura 3.8 – Esquema de localização da unidade de tratamento do sinal de EA

Após essas etapas, os sinais de corrente elétrica (potência), EA e do trigger são transformados de analógicos pra digitais através da placa de aquisição (fabricante: National Instruments, código: NI PCI-MIO-16E-4) para poderem ser processados e analisados computacionalmente.

Para se obter o parâmetro FAP, foi utilizado o *software* de programação gráfica LabVIEW. Essa etapa foi desenvolvida juntamente com o pesquisador colaborador Dr. Carlos Magno Oliveira Valente e o bolsista de iniciação científica Flavio Camarinho Moreira. Esse trabalho consistiu em implementar a metodologia FAP computacionalmente através do software LabVIEW para fazer a fusão dos sinais de potência e EA.

A figura 3.9 mostra um esquema geral do sistema de monitoramento proposto nesse trabalho de mestrado.

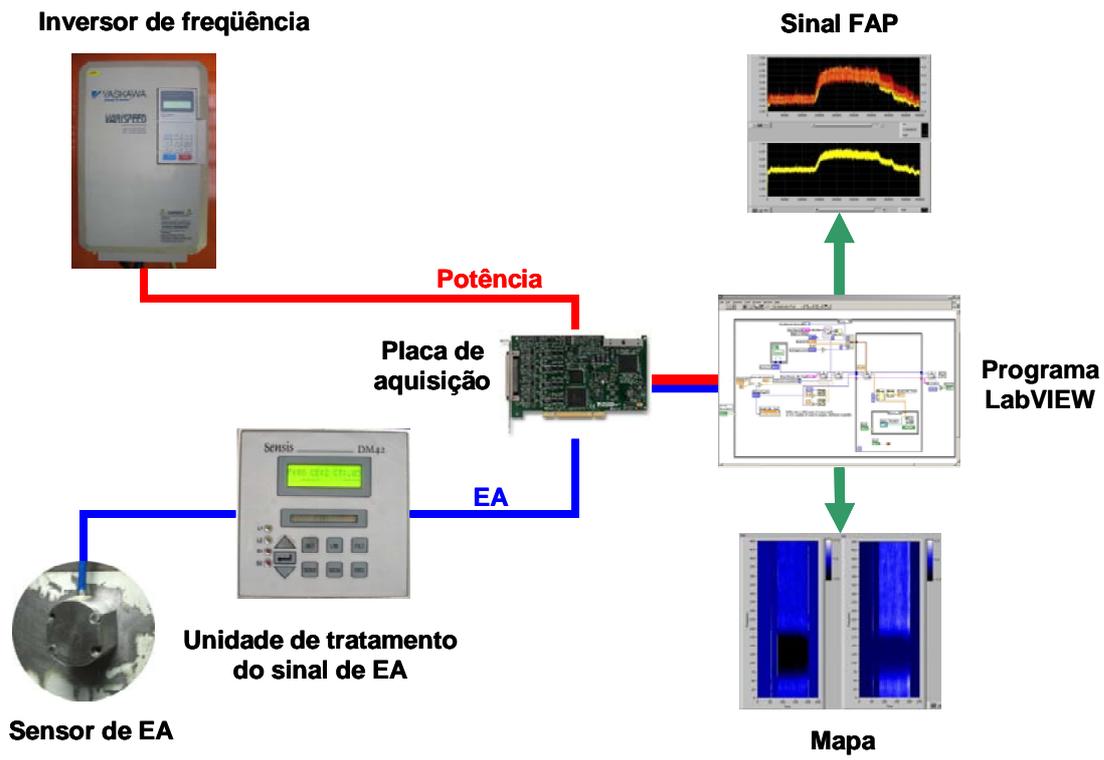


figura 3.9 – Esquema geral do sistema de monitoramento

## Análise Experimental

---

# 4

## Capítulo

Para avaliar o desempenho do parâmetro FAP no monitoramento de processos de retificação cilíndrica externa tangencial de mergulho, foram simulados alguns problemas (falha de sobremetal, colisão, desbalanceamento e vibração) que são encontrados na indústria. O programa CNC utilizado durante os experimentos (apêndice I) possui um ciclo de retificação com quatro etapas principais, as quais são: desbaste, semi-acabamento, acabamento e *spark-out*.

Para cada experimento, será apresentada uma tabela com os parâmetros utilizados no processo de retificação e na aquisição e análise dos sinais. Os valores adotados foram estabelecidos a partir da experiência prática e buscando uma similaridade com as aplicações industriais relacionadas aos problemas a serem estudados.

Deve-se ressaltar que todos os valores da EA, apresentados nos experimentos a seguir, estão acrescidos do módulo do seu menor valor para cada sinal. Isso foi necessário devido aos valores originais variarem entre números negativos e positivos o que comprometia os cálculos do FAP.

Outra informação relevante é que os sinais foram filtrados para eliminar alguns ruídos. A EA foi filtrada na unidade de tratamento de sinal utilizando-se um filtro passa-baixa, com valor fixo de 100 khz. para todos os experimentos. Posteriormente foi calculado seu valor eficaz RMS. O sinal da corrente também foi filtrado por um filtro passa-baixa. Os valores utilizados da faixa da RMS e o valor do filtro passa-baixa da corrente são informados nas tabelas de cada experimento

#### 4.1 Ciclo de Retificação

Para avaliar o parâmetro FAP durante um ciclo de retificação sem problemas foram utilizados os parâmetros apresentados na tabela 4.1. O corpo-de-prova 1 foi utilizado durante o experimento.

Tabela 4.1 - Parâmetros do processo e aquisição e análise de sinal do experimento

Ciclo de retificação	Sobre Metal ( <i>mm</i> )	Desbaste	0,2
		Semi-acabamento	0,05
		Acabamento	0,02
	Avanço ( <i>mm/min</i> )	Desbaste	0,35
		Semi-acabamento	0,15
		Acabamento	0,05
	Tempo de Spark-out ( <i>s</i> )		1
	Rotações peça ( <i>RPM</i> )		120
	Rotações do rebolo ( <i>RPM</i> )		1853
Sinais	Constante de tempo – EA ( <i>ms</i> )		0,05
	Ganho de sinal – EA		3
	Redução de ruído – EA		33
	Faixa do valor eficaz RMS – EA ( <i>ptos</i> )		20
	Filtro passa-baixa – corrente ( <i>Hz</i> )		2
	Taxa de aquisição ( <i>ptos/s</i> )		100

Antes de se obter o sinal do FAP, foi necessário estabelecer os valores da janela de tempo  $t_w$  e da constante  $k$  para se realizar seu cálculo. A figura 4.1 mostra a variação do sinal para diferentes valores de  $t_w$  e de  $k$ , onde aumentam de cima para baixo e da esquerda para a direita respectivamente. Observa-se que com o aumento dos valores de  $t_w$ , aumenta também a faixa dinâmica do sinal do FAP. Já para valores muito altos de  $t_w$ , o sinal do FAP fica distorcido e apresenta variações que não existem no processo monitorado, se tornando, de certa maneira, independente do nível da potência. Com o aumento de  $k$  o sinal do FAP tende a assumir a dinâmica do sinal de potência já que a influência da EA diminui.

Os sinais obtidos durante o processo estão apresentados na figura 4.2, onde o eixo vertical à esquerda corresponde a porcentagem da potência utilizada em relação à potência máxima do motor. Para o cálculo do FAP foi utilizado o valor de tempo  $t_w$  igual a 1 segundo e o valor de  $k$  igual a 0,5. A rugosidade ( $Ra$ ) da superfície retificada obtida após o processo foi de  $0,26\mu\text{m}$  ( $Ra_{anterior} = 0,31\mu\text{m}$ ) e a circularidade ( $Ront$ ) foi de  $2,67\mu\text{m}$  ( $Ront_{anterior} = 3,73\mu\text{m}$ ) (figura 4.3).

No gráfico obtido pode-se perceber as etapas do ciclo de retificação bem determinadas, as quais estão identificadas pelos números:

1. aproximação do rebolo na peça;
2. desbaste;
3. semi-acabamento;
4. acabamento;
5. *spark-out*;
6. afastamento do rebolo em relação a peça.

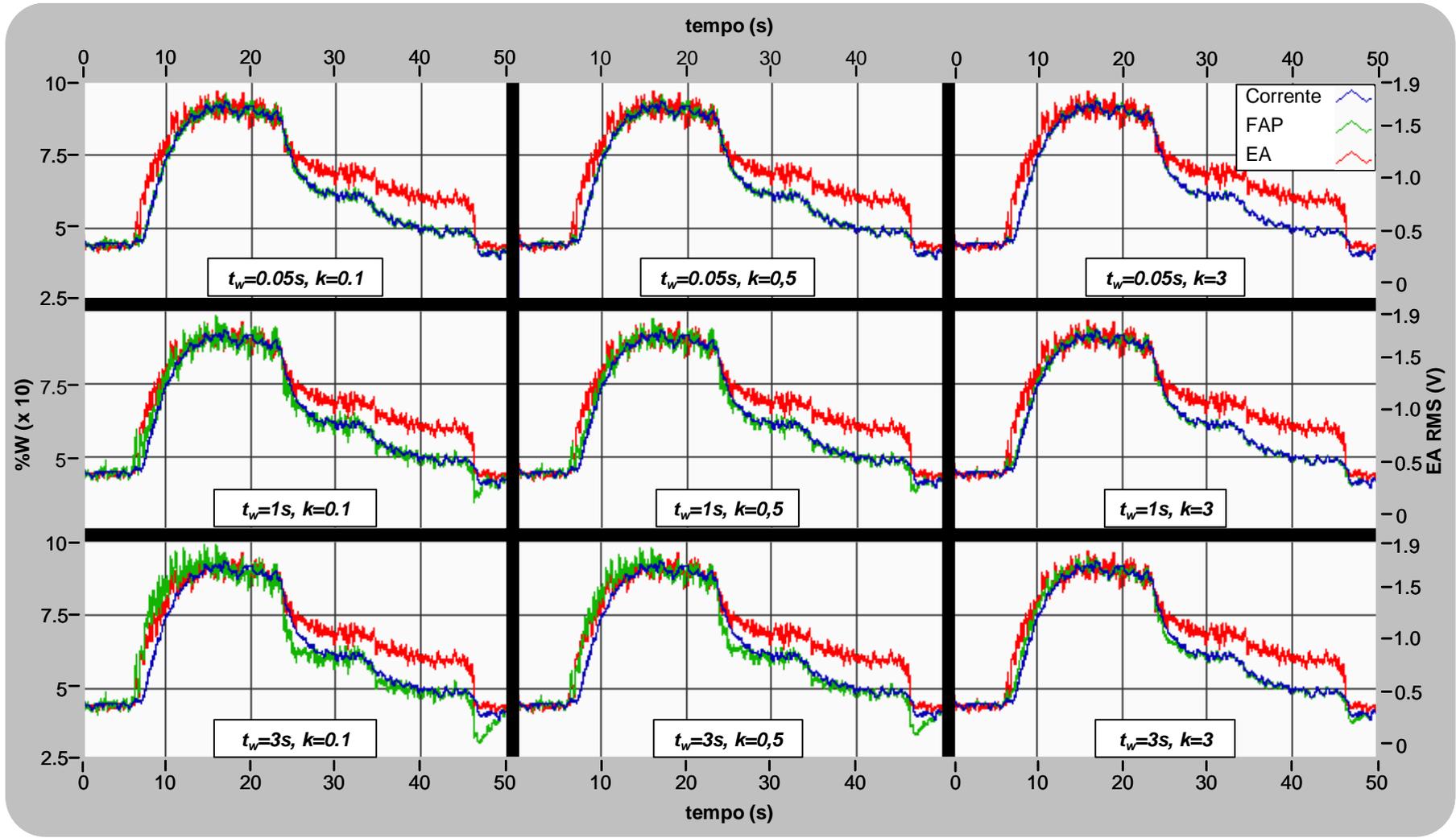


figura 4.1 – Variações do sinal do FAP para diferentes valores da janela de tempo  $t_w$  e da constante  $k$

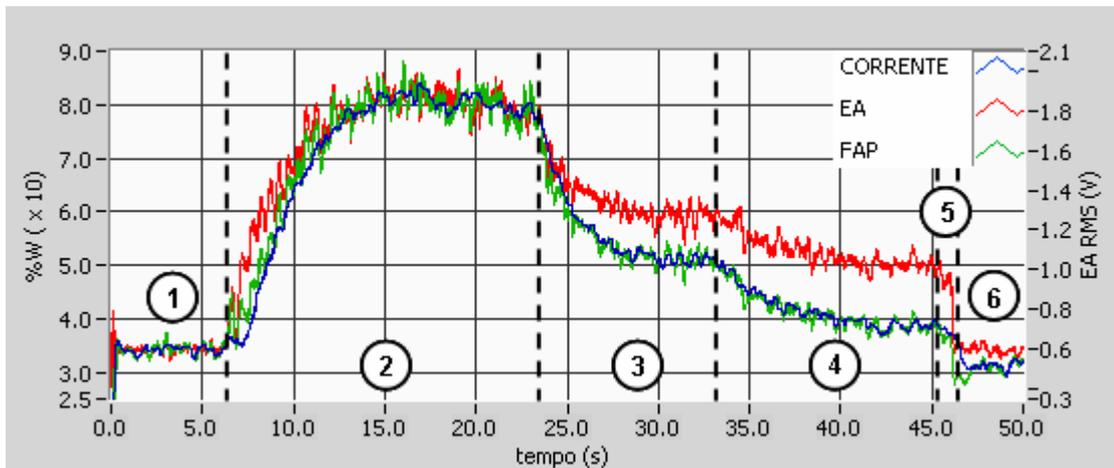


figura 4.2 – Etapas de um ciclo de retificação

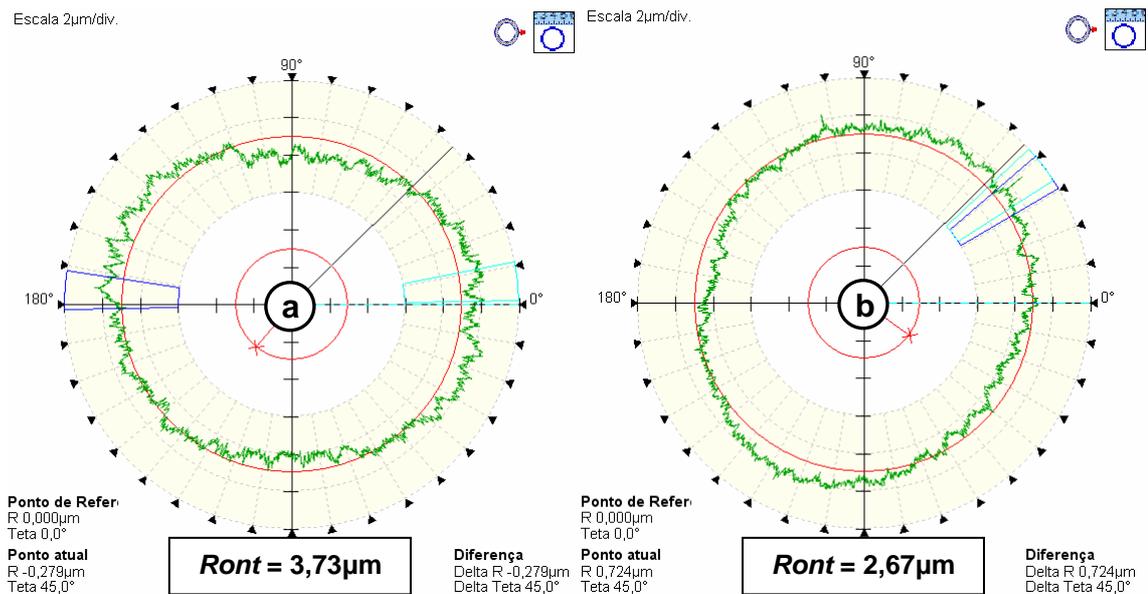


figura 4.3 - Circularidade da peça antes(a) e depois(b) a retificação

O sinal do FAP, como era esperado, possui o mesmo nível do sinal potência, mas apresenta uma resposta dinâmica maior devido à influência do sinal de EA. Sobrepondo-se os sinais (figura 4.4) verifica-se que a média do sinal de EA fica acima do nível da potência e do FAP nas etapas de semi-acabamento (região 1

destacada), e acabamento (região 2 destacada), que envolvem menos energia durante o processo. Ou seja, o sinal de EA não representa bem a energia global despendida no processo, o que é corrigido com a adoção do FAP.

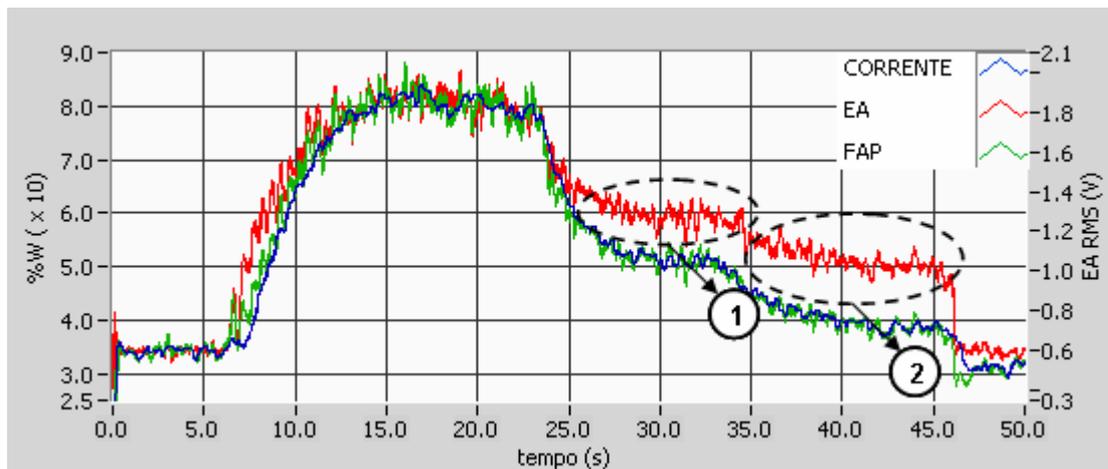


figura 4.4 - média do sinal de EA em relação a potência e o FAP

Tabela 4.2 - Parâmetros do processo e de aquisição de sinal utilizados na construção do mapa do FAP e acústico

Ciclo de retificação	Sobre Metal ( <i>mm</i> )	Desbaste	0,2
		Semi-acabamento	0,05
		Acabamento	0,02
	Avanço ( <i>mm/min</i> )	Desbaste	0,15
		Semi-acabamento	0,1
		Acabamento	0,05
	Tempo de Spark-out ( <i>s</i> )		3
Rotações peça ( <i>RPM</i> )		120	
Rotações do rebolo ( <i>RPM</i> )		1858	
Sinais	Constante de tempo – EA ( <i>ms</i> )		0,05
	Ganho de sinal – EA		3
	Redução de ruído – EA		33
	Faixa do valor eficaz RMS – EA ( <i>ptos</i> )		-
	Filtro passa-baixa – corrente ( <i>Hz</i> )		-
	Taxa de aquisição ( <i>ptos/s</i> ) ou ( <i>ptos/rot. do reb.</i> )		13935 ou 450

A configuração apresentada na tabela 4.2 foi utilizada para construção dos mapas do FAP e acústico (figura 4.5). Podemos observar nos mapas as três principais etapas bem definidas do ciclo de retificação, representadas pelas setas e números. Onde o número 1 representa o desbaste, o número 2 o semi-acabamento e o número 3 o acabamento.

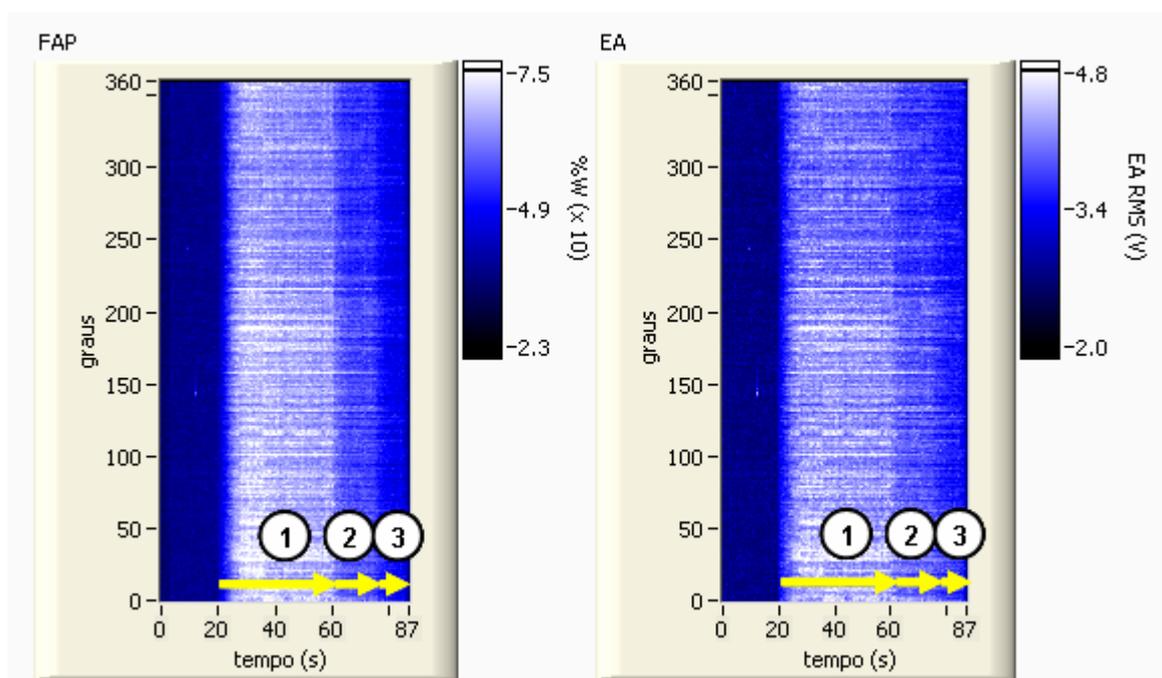


figura 4.5 - Mapa do FAP e acústico do ciclo de retificação

Como se pode perceber nos mapas, a faixa dinâmica é decrescente como era de se esperar, devido ao decréscimo da taxa de remoção de material. O mapa do FAP mostra uma representação de cores diretamente relacionada à potência dependida pelo processo. Isso torna possível uma melhor avaliação de anomalias do processo que são dependentes da concentração de energia na região de contato. Seria impossível construir um diagrama como o apresentado na figura 4.4 apenas com o sinal de potência do inversor de frequência, pois este sinal não tem resposta

suficientemente rápida. Por outro lado, o mapa acústico não representa bem a distribuição de energia ao longo do processo, mas apenas sua dinâmica, o que também é resolvido pela adoção do FAP.

Antes de ser realizado o ciclo de retificação apresentado na figura 4.2, o rebolo foi dressado utilizando-se um dressador de diamante com ponta única, com a configuração apresentada na tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Configuração da Dressagem

Dressagem	Avanço ( <i>mm/min</i> )	125
	Profundidade ( <i>mm</i> )	0,05
	Nº de passes	5
	Rotações do rebolo ( <i>RPM</i> )	1855
Sinais	Constante de tempo – EA ( <i>ms</i> )	10
	Ganho de sinal – EA	2
	Redução de ruído – EA	40
	Faixa do valor eficaz RMS – EA ( <i>ptos</i> )	1000
	Filtro passa-baixa – corrente ( <i>Hz</i> )	5
	Taxa de aquisição ( <i>ptos/s</i> ) ou ( <i>ptos/rot. do reb.</i> )	13868,5 ou 450

Os sinais adquiridos durante a dressagem estão apresentados na figura 4.6. Foram utilizados  $t_w$  igual a 1 segundo e  $k$  igual a 0,5. Como pode ser observado, a EA apresentou um comportamento parecido ao do experimento realizado com uma retificadora plana por Oliveira e Valente (2004), isto é, houve um aumento do ganho nas bordas da peça, devido a resposta acústica do sistema. Contudo, a EA conseguiu apresentar os três passes bem definidos, mudando seu nível durante o contato do rebolo e o dressador em relação quando não havia contato.

O FAP consegue detectar o contato do dressador com o rebolo, mas apresenta um aumento do ganho nas bordas, como a EA. Após detectar o contato o nível do FAP cai rapidamente, influenciado pela potência e se estabelece durante o passe pouco acima do nível de não-contato. Logo após terminar o passe o seu nível cai rapidamente influenciado pela potência, mas retorna rapidamente ao nível da potência, influenciado pela mesma. O sinal do FAP apresenta muitas distorções e não consegue representar satisfatoriamente a dressagem.

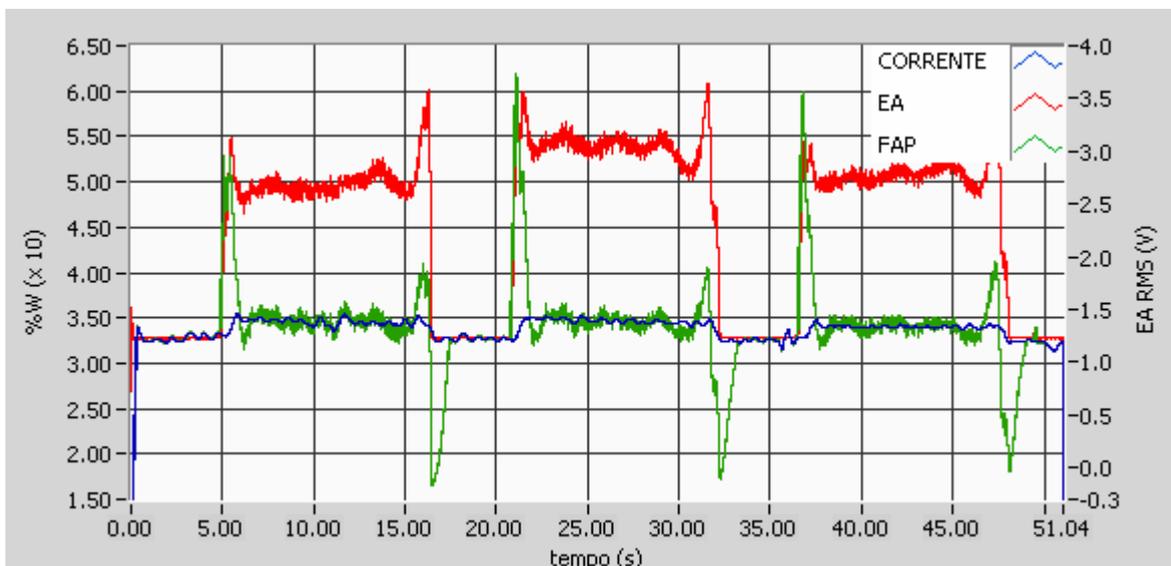


figura 4.6 - Sinal da dressagem do rebolo antes de realizar o ciclo de retificação

A figura 4.7 mostra o mapa do FAP e acústico da dressagem, onde se pode analisar a topografia do rebolo. O mapa acústico mostra os três passes bem definidos, onde se percebe o ganho nas bordas como era de se esperar. O mapa do FAP também apresenta os três passes bem definidos, mas apresenta uma variação muito pequena em sua faixa dinâmica. Uma característica importante que é

detectada pelo mapa acústico é um contato maior entre o rebolo e o dressador no segundo passe e que não é percebida pelo mapa do FAP.

Após a análise dos sinais e mapas da dressagem, observa-se que o FAP se mostra uma alternativa inferior a EA no monitoramento de processos de dressagem, já que tem uma sensibilidade menor na detecção de variações topográficas no rebolo, devido a baixa variação de sua faixa dinâmica.

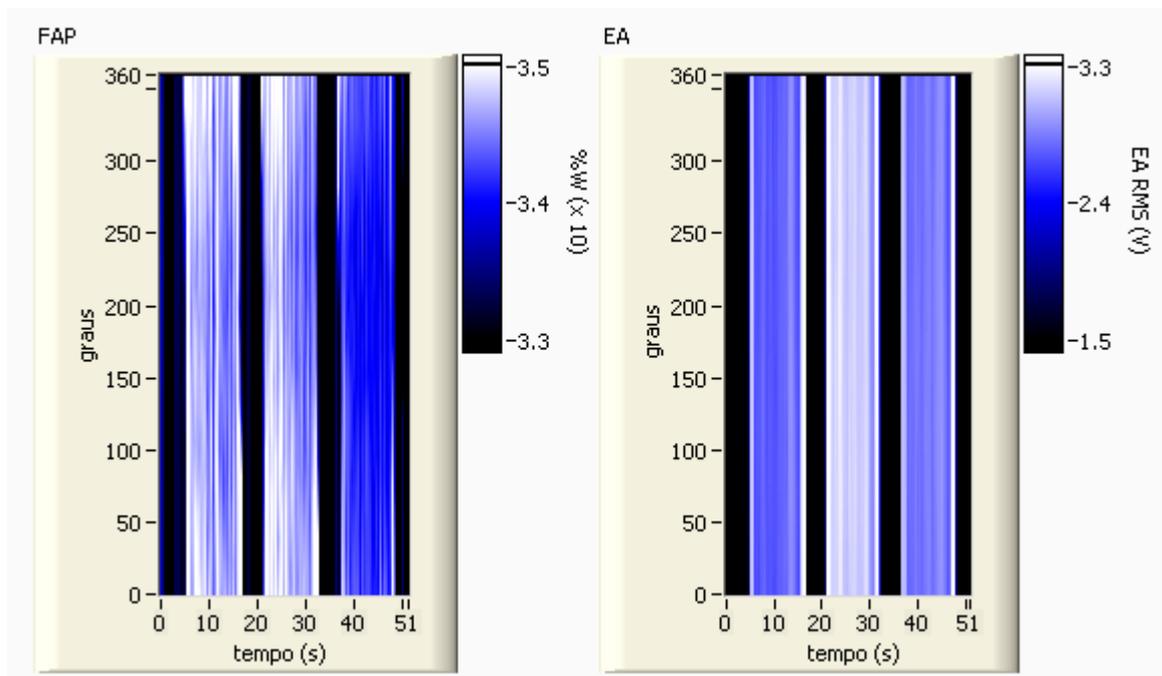


figura 4.7 - Mapa do FAP e acústico da dressagem do rebolo

## 4.2 Ciclo Interrompido

Com o intuito de avaliar o comportamento do parâmetro FAP na detecção de falhas de sobre metal, foi realizado um processo de retificação, com os parâmetros apresentados na tabela 4.4, utilizando o corpo-de-prova 2, o qual possui um chanfro

caracterizando uma região onde o rebolo não toca na peça. Com este teste, é possível avaliar a capacidade do sistema de responder às variações instantâneas da profundidade de corte.

Antes de se retificar a peça, o rebolo foi dressado (diamante de ponta única) em 5 passes com profundidade de 0,05mm e avanço de 125 mm/min.

A figura 4.8 mostra os sinais obtidos durante o processo, sendo que foram utilizados para o cálculo do FAP o valor da janela de tempo  $t_w$  igual a 1 segundo e o valor da constante  $k$  igual a 0,5. O sinal de EA apresenta durante a retificação vales que se aproximam do nível antes do início do processo de retificação, identificado pela linha pontilhada, caracterizando exatamente quando a peça não toca no rebolo.

Tabela 4.4 - Parâmetros do processo e aquisição de sinal do experimento

Ciclo de retificação	Sobre Metal ( <i>mm</i> )	Desbaste	0,2
		Semi-acabamento	0,05
		Acabamento	0,02
	Avanço ( <i>mm/min</i> )	Desbaste	0,15
		Semi-acabamento	0,1
		Acabamento	0,05
	Tempo de Spark-out ( <i>s</i> )		1
Rotações peça ( <i>RPM</i> )		120	
Rotações do rebolo ( <i>RPM</i> )		1841	
Sinais	Constante de tempo – EA ( <i>ms</i> )		0,05
	Ganho de sinal – EA		3
	Redução de ruído – EA		33
	Faixa do valor eficaz RMS – EA ( <i>ptos</i> )		10
	Filtro passa-baixa – corrente ( <i>Hz</i> )		2
	Taxa de aquisição ( <i>ptos/s</i> )		100

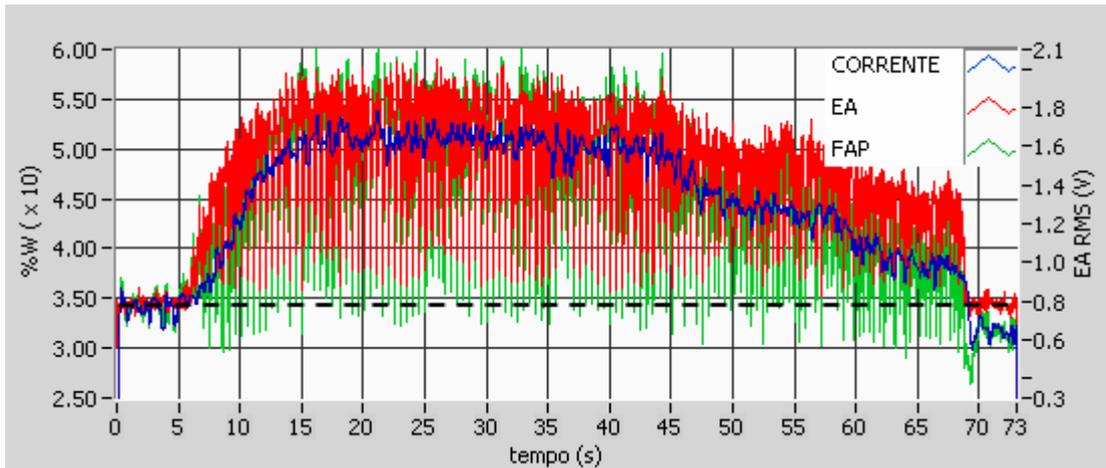


figura 4.8 - Sinal do ciclo interrompido

O FAP também detecta que a peça não toca o rebolo em todo o seu diâmetro, mas de maneira mais acentuada que a EA, pois seus vales chegam a ultrapassar a linha pontilhada (nível de quando não existe contato entre o rebolo e a peça).

A rotação do corpo-de-prova utilizada durante a retificação foi de 120RPM (tabela 4.4). Sendo assim, o sinal deve detectar que a peça não toca o rebolo com uma frequência de 2Hz.

Na figura 4.9, que é uma ampliação do intervalo de 26 a 29 segundos da figura 4.8, percebe-se que tanto a EA quanto o FAP apresentam um padrão que se repete com a mesma frequência, onde o sinal apresenta variações entre determinados limites (rebolo retificando a peça) que são precedidas por uma queda abrupta (interrupção de contato entre a peça e o rebolo). As duas linhas pontilhadas na figura 4.9 delimitam um intervalo de tempo de um segundo entre duas ocorrências do fenômeno. Isso confirma que a EA e o FAP detectam que o rebolo não toca a peça com a frequência de 2HZ.

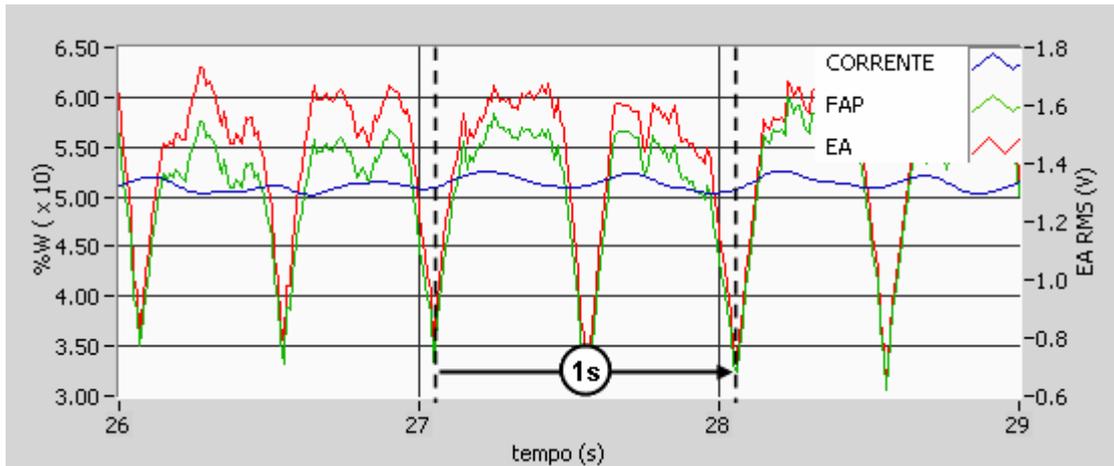


figura 4.9 - Padrão do sinal do ciclo interrompido no intervalo de um segundo

Tal fenômeno é muito comum na indústria quando o sobremetal de retificação é menor que o desvio de batimento existente na peça. Tal fenômeno não poderia ser monitorado pelo sinal de potência devido à baixa velocidade de resposta. Da mesma forma que nos casos anteriores, a emissão acústica, apesar de rápida, não representa bem os níveis de energia consumidos no processo.

### 4.3 Colisão e Contato

Um outro problema encontrado em processos de retificação é a ocorrência de colisão e a detecção de contato entre o rebolo e a peça. Para se avaliar o comportamento do sinal do parâmetro FAP na detecção desse fenômeno simplesmente foi dado um comando de avanço rápido (G0) para o rebolo até a posição de 0,05mm dentro do diâmetro do corpo-de-prova<sup>1</sup>, como na figura 4.10 e logo retornar a coordenada original. Esse experimento foi realizado com as condições finais da peça e do rebolo do experimento apresentado na figura 4.2.

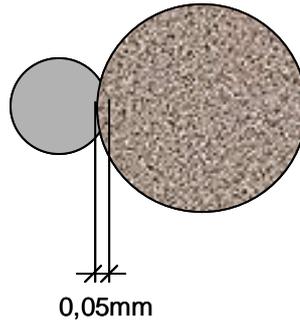


figura 4.10 - Esquema da posição do rebolo em relação à peça durante a colisão

Os dados dos parâmetros utilizados durante o experimento estão inseridos na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Parâmetros do processo e aquisição de sinal do experimento

Ciclo de retificação	Sobre Metal ( <i>mm</i> )	Desbaste	
		Semi-acabamento	
		Acabamento	
	Avanço ( <i>mm/min</i> )	Desbaste	
		Semi-acabamento	
		Acabamento	
	Tempo de Spark-out ( <i>s</i> )		
Rotações peça ( <i>RPM</i> )		120	
Rotações do rebolo ( <i>RPM</i> )		1853	
Sinais	Constante de tempo – EA ( <i>ms</i> )		0,05
	Ganho de sinal – EA		3
	Redução de ruído – EA		33
	Faixa do valor eficaz RMS – EA ( <i>ptos</i> )		20
	Filtro passa-baixa – corrente ( <i>Hz</i> )		2
	Taxa de aquisição ( <i>ptos/s</i> )		100

Para se ter uma idéia do efeito causado no corpo-de-prova, pode-se visualizar a figura 4.11 que mostra o gráfico da circularidade da peça ( $RONt_{antes} = 2,67\mu\text{m}$ ,

$RON_{t_{depois}} = 7,38\mu\text{m}$ ) após o experimento (o gráfico da circularidade antes do experimento pode ser visto na figura 4.3b). A rugosidade superficial ( $Ra$ ) medida após o experimento foi de  $0,37\mu\text{m}$  (anterior igual a  $0,26\mu\text{m}$ ).

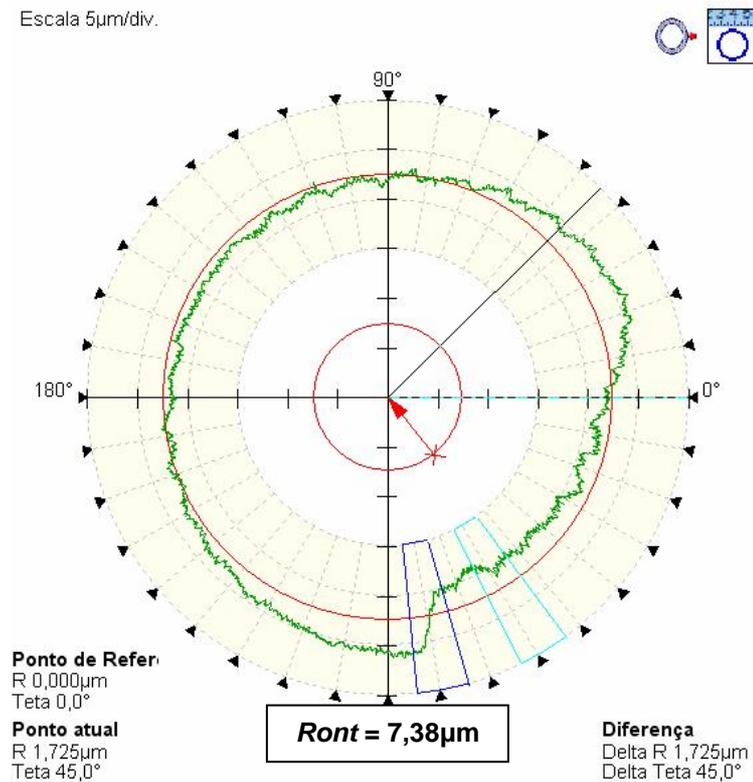


figura 4.11 - Circularidade do corpo-de-prova após a colisão

No cálculo do parâmetro FAP, foi utilizado um valor da janela de tempo  $t_w$  igual a 1 segundo e o valor da constante  $k$  igual a 0,5. A figura 4.12 mostra os sinais obtidos da colisão onde se percebe que a EA detecta rapidamente através de um pico acentuado enquanto que a potência, mais lenta, detecta com um pico amortecido aproximadamente 0,2 segundos depois da EA. Devido a esse fato, o sinal do parâmetro FAP apresenta tanto o pico detectado rapidamente pela EA, quanto o pico atrasado apresentado pelo sinal de potência. Isso pode ser útil no

processo de monitoramento, caracterizando o fenômeno, pois é possível se reconhecer o momento exato da colisão, bem como o nível de potência (ou energia, pela integral da potência) consumido no evento.

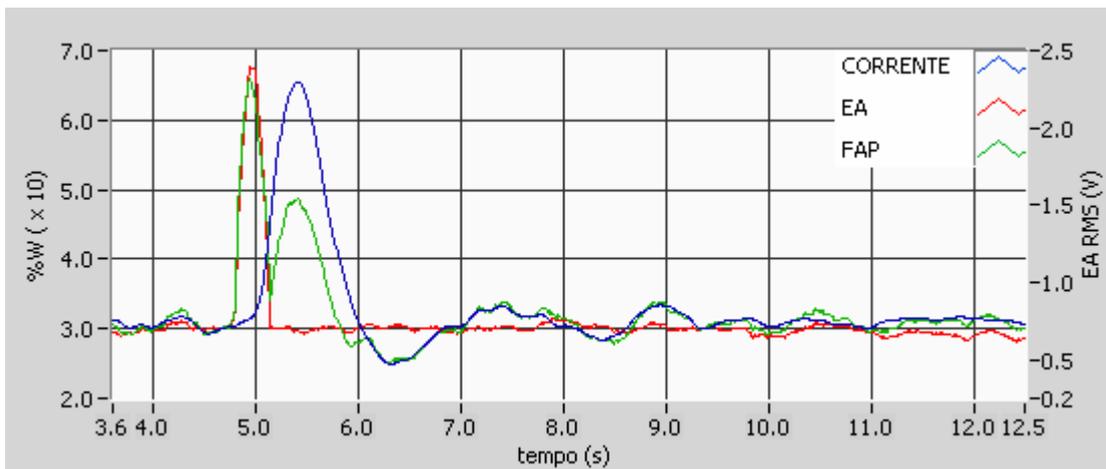


figura 4.12 - Sinais da colisão entre o rebolo e a peça

Outro fenômeno detectado pelo FAP é a queda da potência a -30% da potência (nível do rebolo rodando em vazio), próximo a 6 segundos (figura 4.12). Isso ocorre porque durante a reaceleração do motor responsável pela rotação do eixo principal após a colisão, há simultaneamente um afastamento do rebolo, o que faz com que a rotação nominal seja ultrapassada por alguns instantes e o inversor de frequência responda com uma corrente mais baixa, para que a rotação atinja o valor nominal. Essa situação é mantida até que o sistema se acomode na velocidade programada.

#### 4.4 Rebolo Desbalanceado

A fim de avaliar o desempenho do parâmetro FAP na percepção do desbalanceamento do rebolo durante um processo de retificação, foi realizado um experimento no qual o corpo-de-prova<sup>1</sup> foi retificado com o rebolo desbalanceado (causado pela mudança na posição das massas de balanceamento). As informações da configuração utilizada no experimento estão inseridas na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Parâmetros do processo e aquisição de sinal do experimento

Ciclo de retificação	Sobre Metal ( <i>mm</i> )	Desbaste	0,2
		Semi-acabamento	0,05
		Acabamento	0,02
	Avanço ( <i>mm/min</i> )	Desbaste	0,35
		Semi-acabamento	0,15
		Acabamento	0,05
	Tempo de Spark-out ( <i>s</i> )		1
	Rotações peça ( <i>RPM</i> )		120
	Rotações do rebolo ( <i>RPM</i> )		1891
Sinais	Constante de tempo – EA ( <i>ms</i> )		0,05
	Ganho de sinal – EA		2
	Redução de ruído – EA		25
	Faixa do valor eficaz RMS – EA ( <i>ptos</i> )		750
	Filtro passa-baixa – corrente ( <i>Hz</i> )		3
	Taxa de aquisição ( <i>ptos/s</i> ) ou ( <i>ptos/rot. do reb.</i> )		31516,67 ou 1000

A figura 4.13 mostra a medida da circularidade ( $RONt = 5,32\mu\text{m}$ ) da peça. Como a razão da rotação do rebolo (1891RPM) em relação a rotação da peça (120RPM) é de 15,76, isso quer dizer que a peça deve apresentar 16 lóbulos em sua circularidade. A figura mostra que em um quadrante são percebidos 4 lóbulos, como

a circunferência possui 4 quadrantes isso quer dizer que a peça possui aproximadamente 16 lóbulos. Isso confirma que o rebolo estava desbalanceado durante a retificação.

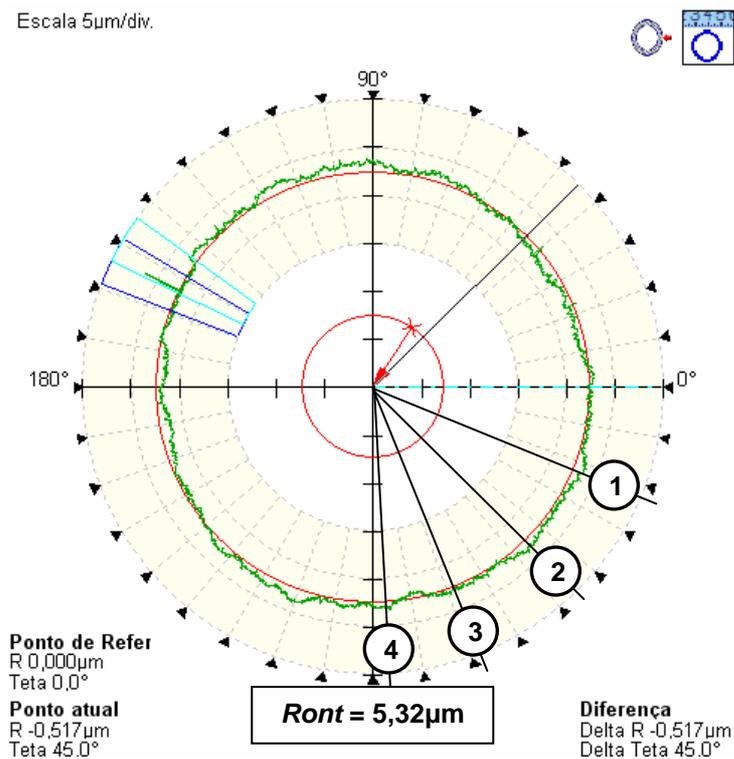


figura 4.13 - Circularidade do corpo-de-prova1 retificado com o rebolo desbalanceado

A figura 4.14 mostra o sinal obtido do ciclo de retificação. Foram utilizados no calculo do FAP os valores de  $t_w$  igual a 1 segundo e de  $k$  igual a 0,5.

Como a rotação do rebolo é de 1891RPM, a frequência com que o rebolo toca no corpo-de-prova 1 é de aproximadamente 31,52HZ. Sendo assim, o período do fenômeno é de aproximadamente 0,0317s. A figura 4.15 mostra o sinal em um intervalo de tempo igual a 0,0952s que corresponde a três períodos ou três ciclos do fenômeno. Isso verifica que o desbalanceamento é detectado pelos sinais do

parâmetro FAP e EA. O sinal de corrente permanece constante durante o intervalo de tempo, não detectando a frequência de desbalanceamento.

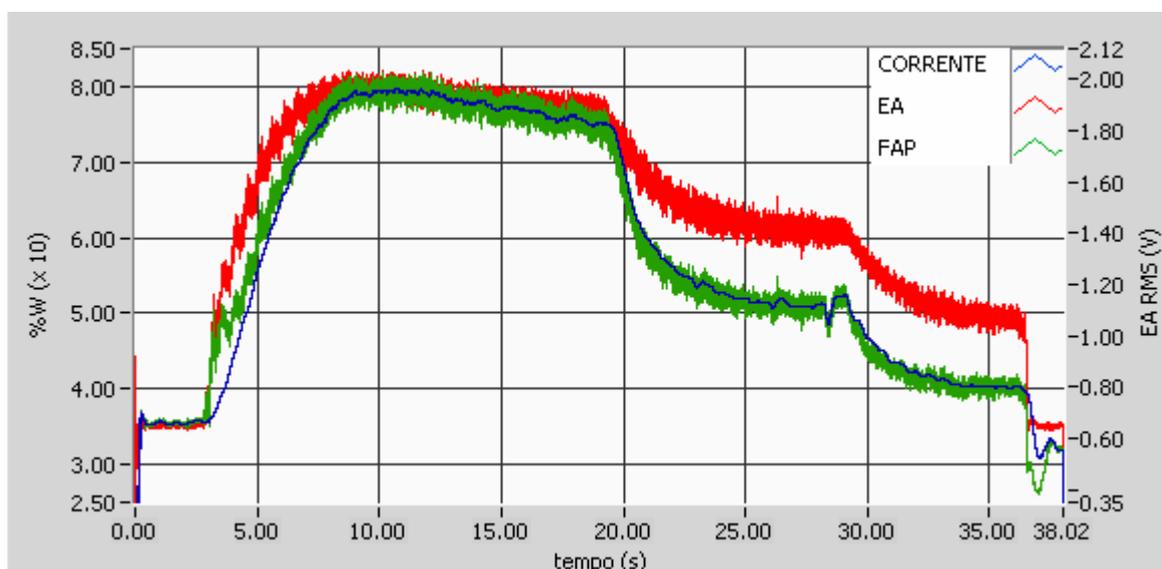


figura 4.14 - Sinais do ciclo de retificação com o rebolo desbalanceado

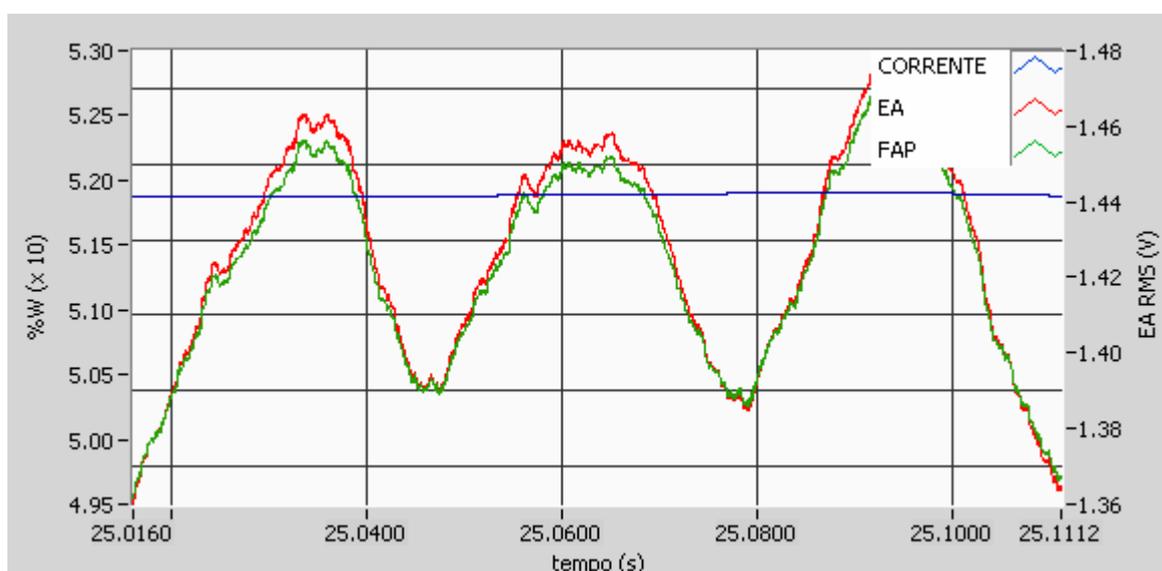


figura 4.15 - Sinais do ciclo de retificação com rebolo desbalanceado no intervalo de três períodos

No mapa do FAP e acústico (figura 4.16) também se pode verificar o rebolo desbalanceado, já que uma parte do rebolo (faixa mais escura entre as linhas pontilhadas) toca menos o corpo-de-prova. Neste caso, os mapas são muito similares, com a diferença que no mapa do FAP a escala de cores corresponde, de forma proporcional, aos níveis de potência consumidos pelo processo.

Os níveis máximos do FAP e da EA foram maximizados para que se possa visualizar o fenômeno na etapa de desbaste do ciclo, onde pode ser melhor percebido.

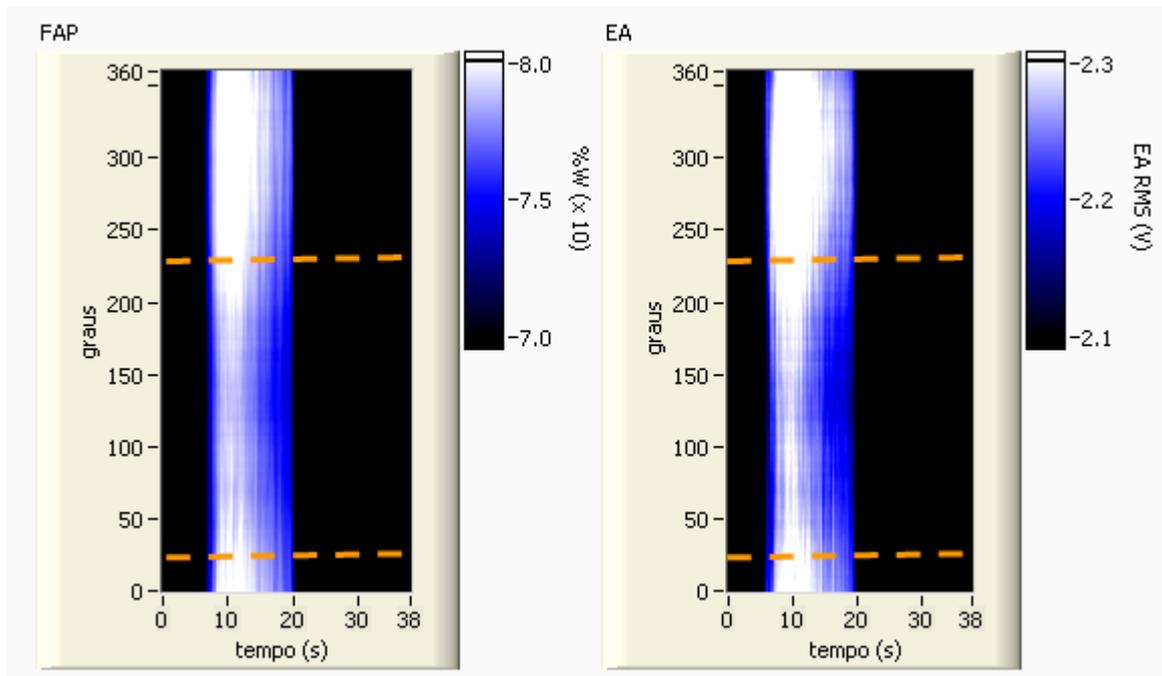


figura 4.16 - Mapa do FAP e EA do ciclo de retificação com rebolo desbalanceado

## 4.5 Vibração

Para verificar o efeito da vibração no sinal do FAP, o corpo-de-prova 1 foi retificado com a máquina vibrando. A vibração foi gerada prendendo-se uma porca no disco dressador (figura 4.17) o qual foi ligado com uma rotação de 4760RPM. A configuração utilizada está inserida na tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Parâmetros do processo e aquisição de sinal do experimento

Ciclo de retificação	Sobre Metal ( <i>mm</i> )	Desbaste	0,2
		Semi-acabamento	0,05
		Acabamento	0,02
	Avanço ( <i>mm/min</i> )	Desbaste	0,35
		Semi-acabamento	0,15
		Acabamento	0,05
	Tempo de Spark-out ( <i>s</i> )		1
Rotações peça ( <i>RPM</i> )		120	
Rotações do rebolo ( <i>RPM</i> )		1891	
Sinais	Constante de tempo – EA ( <i>ms</i> )		0,05
	Ganho de sinal – EA		2
	Redução de ruído – EA		25
	Faixa do valor eficaz RMS – EA ( <i>ptos</i> )		1000
	Filtro passa-baixa – corrente ( <i>Hz</i> )		5
	Taxa de aquisição ( <i>ptos/s</i> ) ou ( <i>ptos/rot. do reb.</i> )		31516,67 ou 1000

A figura 4.18 mostra a circularidade ( $R_{ont} = 8,56\mu\text{m}$ ) do corpo-de-prova após a retificação, onde se pode ver o efeito da vibração. A figura 4.19 mostra o sinal do ciclo de retificação completo com vibração ( $t_w$  igual a 1 segundo e de  $k$  igual a 0,5).



figura 4.17 - Detalhe da porca presa ao disco de dressagem.

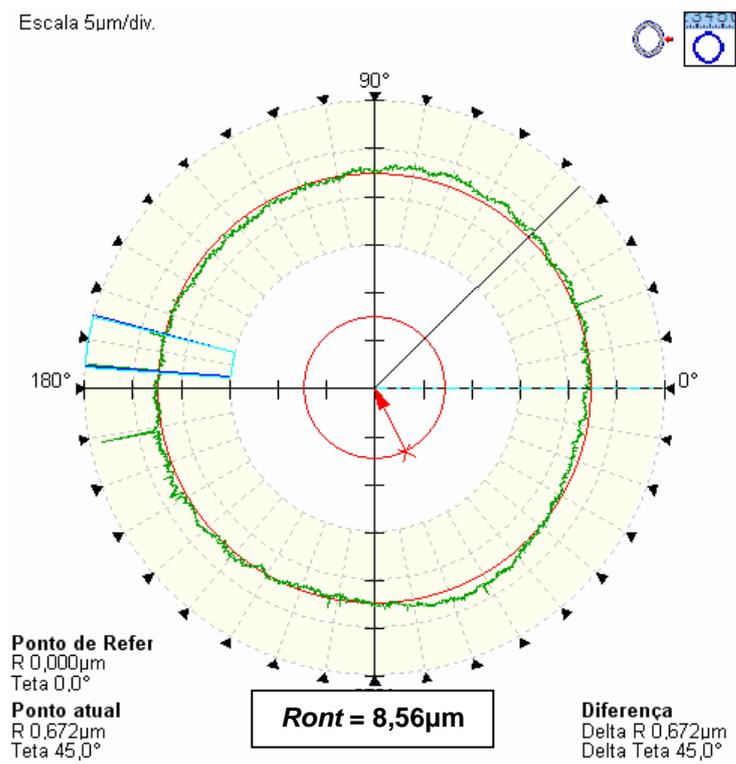


figura 4.18 - Circularidade da peça submetida a vibração durante a retificação

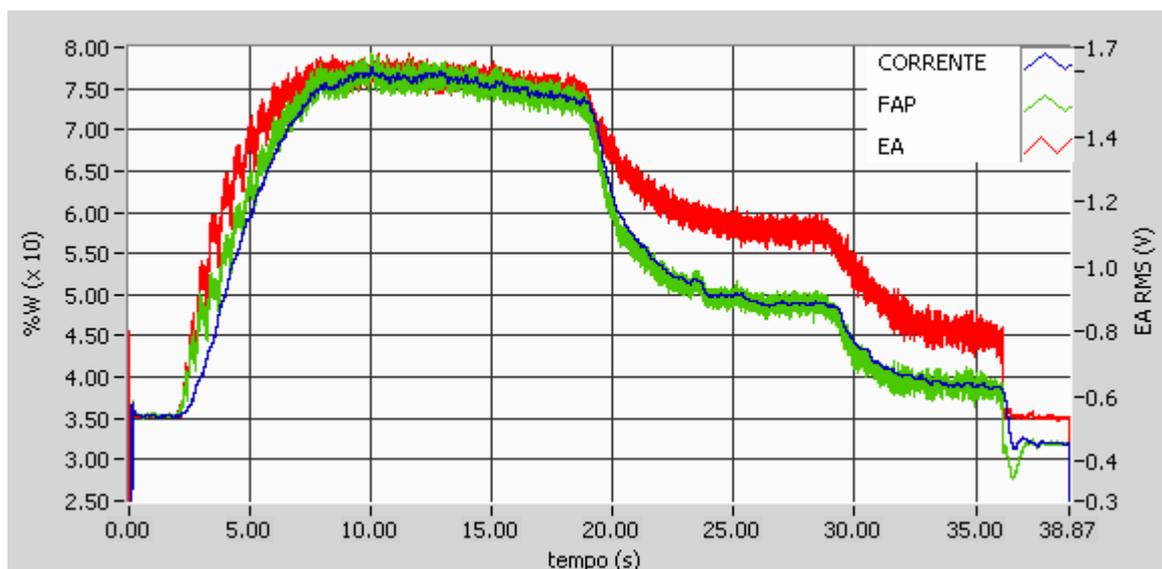


figura 4.19 - Sinais do ciclo de retificação com vibração

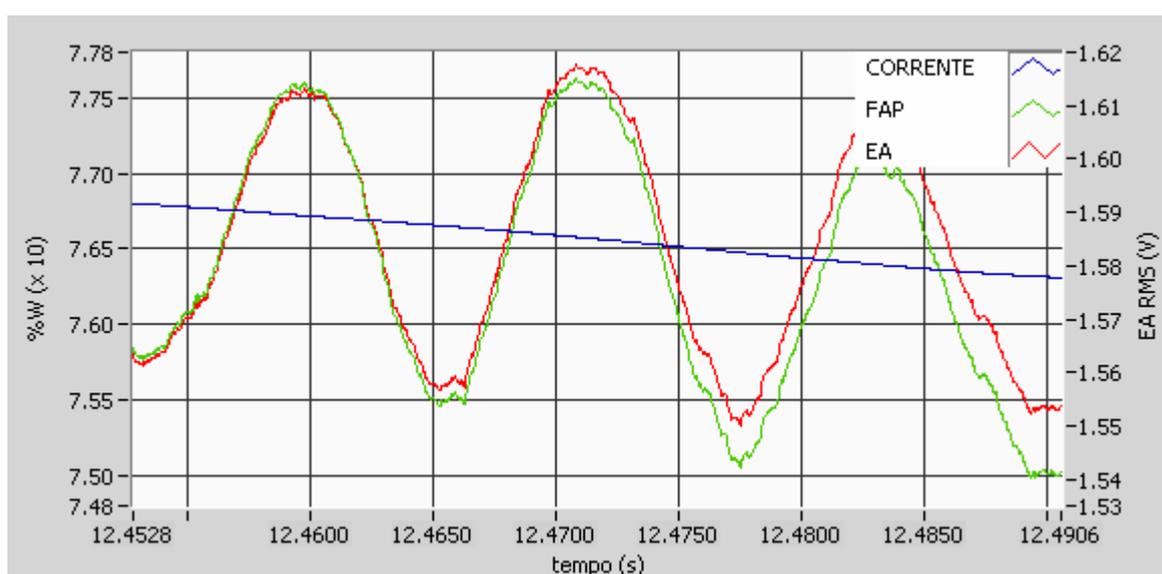


figura 4.20 - sinais do FAP e EA no intervalo de três períodos da retificação com vibração

O disco dressador gira com uma rotação de 4760RPM gerando uma vibração de 79,33Hz com período de 0,0126s. A figura 4.20 mostra os sinais do parâmetro FAP e EA com um intervalo de tempo igual a 0,0378 que corresponde a três

períodos. Como se pode perceber, tanto o FAP quanto a EA apresentam sinais com essas características, detectando a vibração.

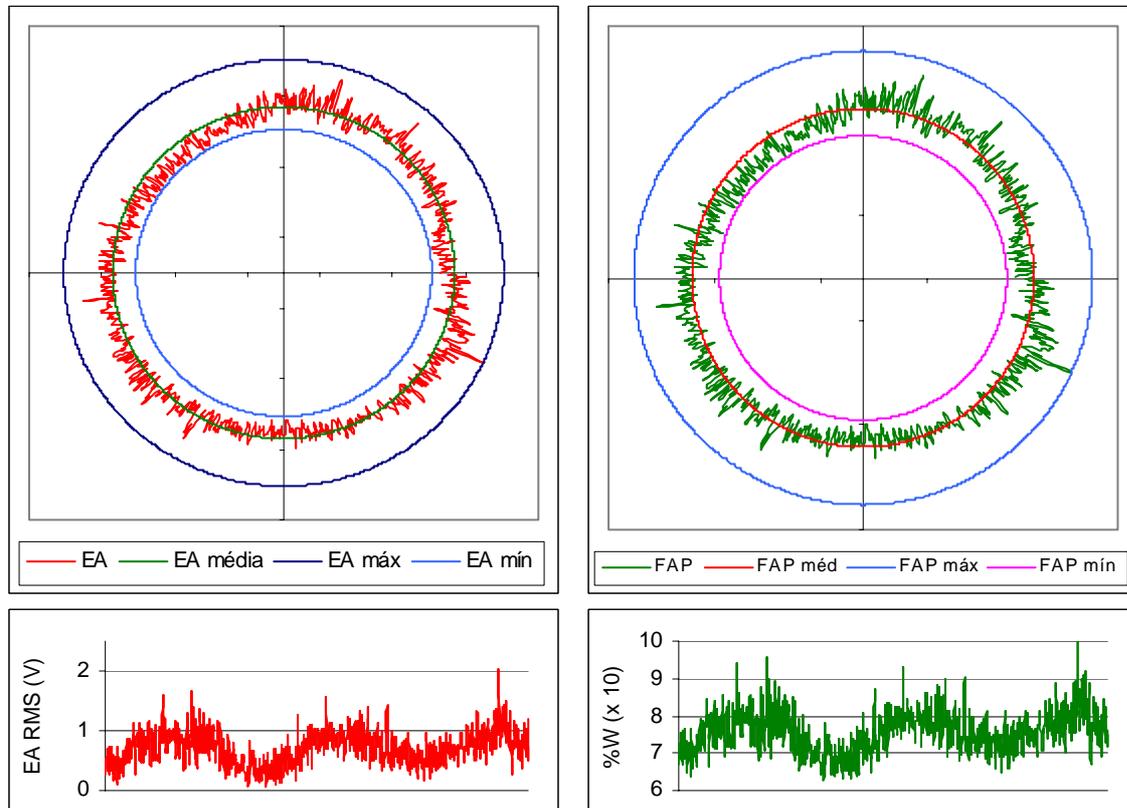


figura 4.21 - Sinal da EA e FAP de uma volta do rebolo (Faixa do valor eficaz RMS (ptos) – EA = -, Filtro passa-baixa – corrente (Hz) = -)

A figura 4.21 mostra os sinais de EA e do FAP para uma volta do rebolo. Como a vibração causada possui uma freqüência de 79,33Hz e o rebolo gira com uma freqüência de 31,51HZ isso quer dizer que ocorrem 2,51 vibrações por volta do rebolo. Isso pode ser verificado na figura 4.21, onde é possível perceber que os sinais ficam acima da média por dois períodos de maneira mais prolongada e também em um terceiro período de maneira mais curta. Esse fenômeno também pode ser percebido no gráfico da circularidade da peça que apresenta

aproximadamente 37 lóbulos, que coincide com o resultado aproximado do produto da vibração (2,51/volta) pela relação de rotação entre rebolo e peça ( $1891\text{RPM} / 120\text{RPM} = 15,76$ ) (figura 4.19).

A figura 4.22 mostra os mapas do FAP e acústico do processo de retificação com vibração apresentado anteriormente. Foram inseridas na figura linhas amarelas diagonais nas regiões mais escuras dos mapas, que indicam quando o rebolo não toca na peça. As duas linhas vermelhas indicam uma volta do rebolo. As setas brancas mostram o intervalo entre duas regiões escuras, isto é, o intervalo entre duas ocorrências de não-contato. A régua da figura 4.22 indica que o mapa possui 6,9cm de comprimento. Isso que dizer que cada intervalo entre ocorrências de contato ou não-contato entre o rebolo e a peça na figura deve medir aproximadamente 2,75cm ( $6,9\text{cm} / 2,51$ ). Isso é exatamente o que é mostrado na figura e indica que os dois mapas conseguem detectar a vibração.

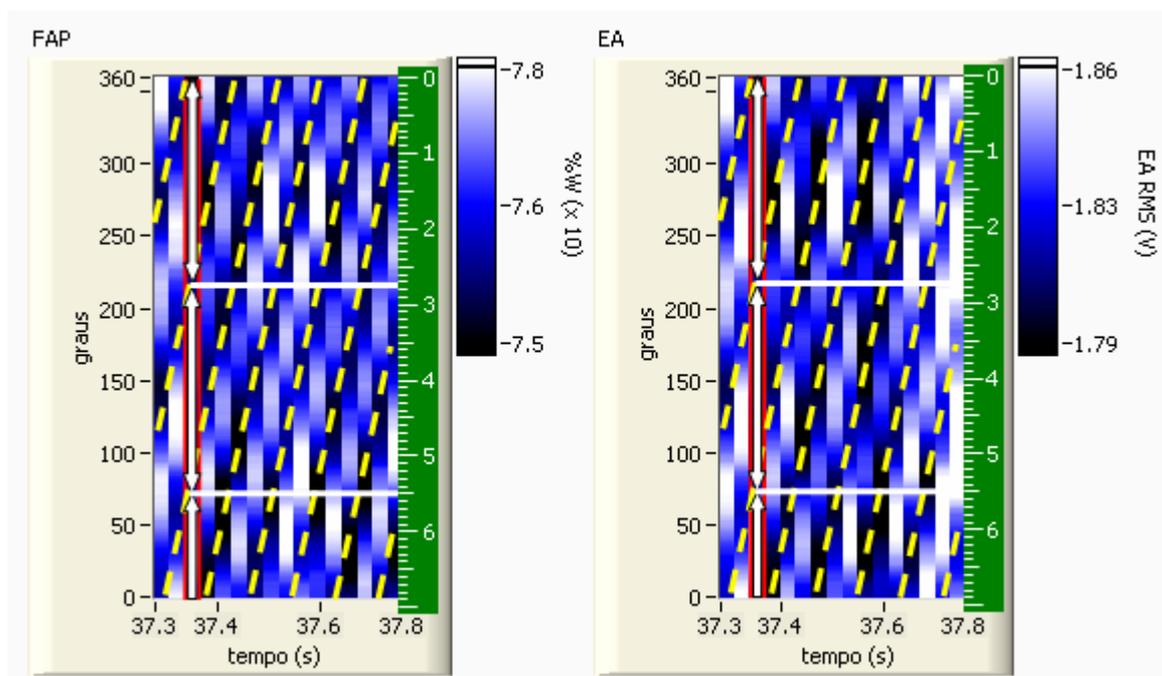


figura 4.22 - Mapa do FAP e EA da retificação com vibração



## Conclusões

---

# 5

## Capítulo

O objetivo principal deste trabalho foi analisar o desempenho do parâmetro FAP no monitoramento de processos de retificação simulando alguns problemas encontrados na indústria e em pesquisas da área. Essa análise foi feita comparando o comportamento do sinal obtido aos dos sinais de potência e emissão acústica.

Entre as contribuições deste trabalho na avaliação do sinal do FAP, além de aplicá-lo em retificação cilíndrica, destaca-se o seu emprego no processo de dressagem e a construção do seu mapa. Até o presente momento, o FAP havia sido empregado em rebarbação robótica e em retificação plana.

O sistema criado para obtenção do sinal do FAP mostrou-se de baixa complexidade de instalação e execução. Porém, seu uso só é justificado se apresentar alguma vantagem em relação aos sistemas isolados de emissão acústica e potência, já que eles logicamente são mais baratos e apresentam complexidade ainda menor.

Com base nos experimentos apresentados nesse trabalho, são delineadas as seguintes conclusões:

- O sinal do FAP apresentou respostas rápidas na detecção de alterações bruscas ocorridas durante a simulação dos problemas de retificação, o que é desejado. Essa característica é atribuída a influência da dinâmica da emissão acústica.
- O FAP não representa adequadamente o processo de dressagem, devido a influência da baixa variação do nível do sinal de potência e do ganho nas bordas do sinal de emissão acústica.
- A influência da potência é observada através de um suave amortecimento provocado no sinal do FAP, mas que não compromete a rapidez da resposta na detecção dos problemas simulados.
- Na maioria dos gráficos obtidos, os sinais de EA e FAP apresentam resposta muito similares, isso pode ser evidenciado principalmente se sobrepondo os sinais.
- O FAP apresenta o mesmo nível do sinal de potência, que é homogêneo durante todo o processo, oferecendo uma informação confiável sobre a energia consumida e proporcional à quantidade de material removido pela ferramenta abrasiva.

Através das conclusões acima, pode-se afirmar que o FAP apresenta uma velocidade de resposta maior que a potência e levemente amortecida em relação a emissão acústica. O nível do seu sinal é igual ao da potência, mantendo-se

homogêneo durante o processo, ao contrário da emissão acústica, que pode ser influenciada por diversos outros parâmetros, tais como geometria da peça, distância do sensor, montagem do sensor, entre outros, que independem da interação ferramenta-peça. O resultado é uma resposta dinâmica e confiável, associada à energia do sistema. Estas características são interessantes para o monitoramento de processos de retificação (excluindo a dressagem), sendo superiores àquelas apresentadas isoladamente pelos sinais de potência e emissão acústica.



## Referências Bibliográficas

---

BIERA, J.; VIÑOLAS, J.; NIETO F.J. (1997) Time-domain dynamic modeling of the external plunge grinding process. *International journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.37/11, p1555-1572

BIFANO, T. G.; Yi, Y. (1992). Acoustic Emission as an Indicator of Material-Removal Regime in Glass Micro-Machining, *Precision Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 219-228.

BLUM, T.; DORNFELD, D. A. (1993). Grinding process feedback using acoustic emission. *International Grinding Conference and Exposition*. Detroit, 10p.

BLUM, T.; SUZUKI, I.; INASAKI, I. (1988). Development of a Condition Monitoring System for Cutting Tools Using an Acoustic Emission Sensor. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 22, n.4, p.301-8.

BROOKS, R.R.; IVENGAR, S.S. (1998). *Multi-sensor fusion: fundamentals and applications with software*. Prentice Hall.

BYRNE, G.; DORNFELD, D.A.; INASAKI, I.; KETTELER, G.; KÖNIG, W.; TETI, R. (1995). Tool condition monitoring (TCM) - the status of research and industrial application. *Annals of the CIRP*, Vol.44/1.

CHEN, X.; ROWE, W. B.; CAI R. (2002) Precision grinding using CBN wheels. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, p. 585–593.

CHIU, S.L.; MORLEY, D.J.; MARTIN J.F. (1986). Sensor data fusion on a parallel processor. IEEE International Conference on Robotics and Automation. p.1629-1633, San Francisco

DINIZ, A. E.; PIGARI, A. (1995). Monitoramento do processo de torneamento em desbaste via emissão acústica. Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM.

DORNFELD, D.A. (2001). Principles of sensors in manufacturing. In: TÖNSHOFF, H.K.; INASAKI, I. *Sensors in Manufacturing* Vol.1. Wiley-VCH. Cap. 1, p.6-23.

DORNFELD, D.A.; LIU, J.J.B. (1993). Abrasive texturing and burnishing process monitoring using acoustic emission. *Annals of the CIRP*, Vol.42/1.

DORNFELD, D., (1992) Application of Acoustic Emission Techniques in Manufacturing. *NDT & International*, v.25, n.6, p259-269.

DORNFELD, D.A; CAI, H.G. (1984), Investigation of grinding and wheel loading using acoustic emission. *Journal of Engineering for industry*.

FACELI, K (2001). Combinação de inteligência artificial para fusão de sensores. 156p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Matemáticas e Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2001.

FELIPE Jr, J. (1996). Contribuição para Implementação de Funções de Retificação Inteligente (R.I.) Utilizando Técnicas de Monitoramento por Emissão Acústica, Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FRANÇA, T.V.; CASTELHANO, O.C.; BIANCHI, E.C.; AGUIAR, P.R. (2004). Aplicação de redes neurais artificiais no monitoramento de parâmetros do processo de retificação cilíndrica. XI Simpep.

GAWLAK, G. (1984) Some problems connected with balancing of grinding wheels, *Journal of Engineering for industry*, 106:233-236.

GRAHAM, T. S. (1989). Monitoring the unmanned machining systems. *FMS Magazine*, v.3, n.7, p. 127-31.

HAHN, R.S.; LINDSAY, R.P. (1971) The wheel removal parameter. In: Principles of Grinding. Machinery: 33-39, Sept., parte III.

HASSUI, A. (2002) Estudo da Vibração Durante o Corte e Centelhamento na Retificação Cilíndrica de Mergulho. 172 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas.

HONG, T.Y.; CHEN, D.J. (2005) Online dressing of profile grinding wheels. Int J Adv Manuf Technol Vol.27: 883–888

HUNDT, W.; LEUENBERGER, D.; REHSTEINER, F. (1994). Approach to monitoring of the grinding process using acoustic emission (AE) technique Annals of the CIRP, Vol.43/1.

INASAKI, I. (1997) Monitoring technology for achieving intelligent grinding system. ASME International, Vol.6/1, 75-81.

INASAKI, I. (1999). Sensor fusion for monitoring and controlling grinding processes. Annals of the CIRP, Vol.48/1.

INASAKI, I.; KARPUSCHEWSKI, B. (2001). Abrasive process In: TÖNSHOFF, H.K.; INASAKI, I. *Sensors in Manufacturing* Vol.1. Wiley-VCH. Cap.4 p.236-271.

INASAKI, I.; KARPUSCHEWSKI, B.; LEE, H.S. (2001). Grinding and suppression. Annals of the CIRP, Vol.50/2, p.515-534.

INASAKI, I.; TÖNSHOFF, H.K. (2001). Roles of sensors in manufacturing and application ranges In: TÖNSHOFF, H.K.; INASAKI, I. *Sensors in Manufacturing* Vol.1. Wiley-VCH. Cap.1 p.1-6.

JEMIELNIAK, K. (1999) Commercial tool condition monitoring systems. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.15, p.711-721.

KARPUSCHEWISKI, B. (2001) Sensor for physical properties. In: TÖNSHOFF, H.K.; INASAKI, I. *Sensors in Manufacturing* Vol.1. Wiley-VCH. Cap.3 p.123-142.

KLUFT, W. (1994). A monitoração dos processos reduz custos e desperdícios. Máquinas e Metais. Out, p.60-80.

KONIG, W.; Meyen, H.P. (1990) AE In Grinding And Dressing: Accuracy And Process Reliability. In: 4<sup>TH</sup> INTERNATIONAL GRINDING CONFERENCE, Dearborn, Michigan. Anais p256/1-526/20.

Landers, R.G.; Ulsoy, A.G.; Furness, R.J. (1999), Analysis of mechanical systems, CRC Press

LEE, D.E.; HWANG, I.; VALENTE, C.M.O.; OLIVEIRA, J.F.G.; DORNFELD, D.A. (2005) Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. International Journal of Machine Tools & Manufature (2005)1-13

LINDSAY, R.P. (1984) The effect of contact time on forces, wheelwear rate and G – ratio during, internal and external grinding, In: Annals of the CIRP, Vol. 33/1.

LUO, R.C.; KAY, M.G. (1992). Data fusion and sensor integration: state-of-the-art 1990s, In: *Data fusion in robotics and machine intelligence*. Academic Press. Cap.2 , p.7-135.

MAKSOULD, T.M.; AHMED, M.R.; KOURA, M. (2001) Improving wheel±workpiece contact detection using a hybrid neural network. Proc Instn Mech Engrs Vol 215 Part B

MALKIN, S. (1989). Grinding technology. Ellis Horwood Limited.

MATTHEWS, J. R. (1984), Acoustic Emission, Nondesructive Testing Monographs and Tracts, Vol. 2, Gordon and Breach Science Publishers, New York, NY, p. 1, pp. 14-103.

McKERROW, P.J. (1995). Introduction to robotics. Addison-Wesley.

MORIWAKI, T. (2001). Sensors in mechanical manufacturing – requirements, demands, boundary conditions, signal processing, comunication. In: TÖNSHOFF, H.K.; INASAKI, I. *Sensors in Manufacturing* Vol.1. Wiley-VCH. Cap.1 p.24-46.

MORIWAKI, T.; DORNFELD, D.A.; BYRNE, G. (1993). Presentation at working group meeting, First Workshop on Tool Conditioning Monitoring, CIRP.

National Physical Laboratory (2006) Teddington, Middlesex, UK; Disponível em: <<http://www.npl.co.uk/force/faqs/transtypes.html>> Acesso em: nov. 2006.

*Nondestructive Testing Handbook*, (1987). American Society for Nondestructive Testing, Vol. 5.

OLIVEIRA, J.F.G.; VALENTE, C.M.O. (2004). Fast grinding process control with AE modulated power signals, *Annals of the CIRP*, Vol.53/1.

OLIVEIRA, J.F.G., DORNFELD, D.A. (2001). Applications of ae contact sensing in reliable grinding monitoring, *Annals of the CIRP*, Vol.50/1.

OLIVEIRA, J. F. G. (1995) Monitoramento de Operações de Retificação de Precisão. Apresentado em Concurso para Professor Titular – SEM-EESC-USP, São Carlos.

OLIVEIRA, J. F. G. (1989). Tópicos avançados sobre o processo de retificação. Apostila - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos.

PCB Group (2006) Disponível em: <[http://www.pcb.com/techsupport/tech\\_gen.php](http://www.pcb.com/techsupport/tech_gen.php)> Acesso em: nov. 2006.

POLLOCK, A. A. (1989). Acoustic emission inspection, *American Society for Metal Handbook*. Ohio, USA, Metals Park.. v17, p.278-294.

RAO, K.R.; AHMED, N. (1975). Orthogonal transforms for digital signal processing. *IEEE International Conference on ICASSP '76*. Vol.1, p.136- 140.

ROWE, W. B.; MORGAN, M. N.; ALLANSON, D. A. (1991) An advance in the modeling of thermal effects in the grinding process. *Annals of the CIRP*, Vol.40, n.1, p.339-342.

SAKAKURA, M.; INASAKI, I. (1993). Intelligent data base for grinding operations. *Annals of the CIRP*, Vol.42.

SOARES, D. D. (2002). Desenvolvimento de um sistema de apoio ao diagnóstico à distância para processos de retificação Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2002.

SOARES, D. D.; OLIVEIRA, J. F. G. (2001). Diagnóstico de processos de retificação através da análise de sinais. COBEM. Nov, 10p.

SOUZA, A. J. (1999). Desenvolvimento e implementação de funções de automação inteligentes num torno CNC utilizando técnicas de monitoramento por emissão acústica. São Carlos,. 82p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1999.

SHAW, M. C. (1996) Principles of abrasive processing, Clarendon Press – Oxford.

TÖNSHOFF, H.K.; FRIEMUTH, T.; BECKER, J.C. (2002). Process monitoring in grinding. Annals of the CIRP, Vol.52/2, p.551-571.

VALENTE, C.M.O. (2003) Implementação de sistema para eliminação automática de rebarbas resultantes de processos de usinagem. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

## Apêndice I – Programa CNC

```
01520 (MERGULHO SG) ;
N10 #1 =33.6665 (DIAM. BRUTO) ;
N15 #2 =15.5536 (POS. INI. EM Z) ;
N20 #3 =0.2 (SM DESBASTE) ;
N30 #4 =0 (SM SEMI-ACABAMENTO) ;
N35 #5 =0.05 (SM ACABAMENTO) ;
N40 #6 =0.1 (AVANCO DESBASTE) ;
N50 #7 =0 (AVANCO SEMI-ACAB) ;
N60 #8 =0.05 (AVANCO ACABAMENTO) ;
N70 #9 =1 (TEMP. SPARK-OUT ACAB.) ;
N80 #10 =150 (ROTACAO PECA) ;
N90 #11 =1 (OSC SIM =0) ;
N95 #12 =1 (NR PECAS/DRESSAGEM) ;
N96 #13 =0 (COMPENSACAO DIA. ) ;
N97 #14 =1 (NUM. CICLOS) ;
N100 G94 ;
N105 M61 ;
N110 G0 X[#500+2.0] ;
N115 #980 =#4001 ;
N120 M3 S#10 ;
N130 G0 Z#2 ;
N140 X[#1+0.150] M8 ;
N150 G1 X[#1] F#6 ;
N155 #980 =#4001 ;
N160 G01 U[-#3+#13] F#6 ;
N170 G01 U-#4 F#7 ;
N175 G01 U-#5 F#8 ;
N180 G04 X#9 ;
N181 #532 =5041 ;
N182 #14 =[#14-1] ;
N183 IF[#14 NE 0] G0T0160 ;
N185 IF[#11 EQ 1] G0T0200 ;
```

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)