UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Departamento de Engenharia de Fabricação

Dissertação de mestrado

Título : REDUÇÃO DO CICLO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DE MERGULHO COM AUXÍLIO DA EMISSÃO ACÚSTICA.

Autor : Édimo Dudas Baldo

Orientador : Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

Aprovado por :

Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, Presidente

Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira

Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Campinas, 01 de agosto de 1994

UNICAMP

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA POR Edmê Lucas Baldo E APROVADA PELA COMISSÃO JULGADORA EM 01 08 94.

Juselmo Eduardo Cruz
ORIENTADOR

Dedico este trabalho à minha mãe, Helena e às minhas irmãs, Claudia e Daniela, pelo apoio, incentivo, dedicação e paciência, fundamentais para a conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos às pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para com a realização deste trabalho :

- À Deus, que com sua sabedoria e bondade deu-me todos os recursos para que eu pudesse concluir este trabalho;

- À você, ***Paula****, pelo incentivo, apoio, paciência, e compreensão muito importantes para o término, com êxito, deste trabalho.*

- Ao amigo Moisés, pelo auxílio na área computacional.

- Aos colegas do departamento que me auxiliaram na execução deste trabalho.

- Ao CNPq e à FAPESP, pelos auxílios concedidos através de verbas destinadas à bolsa de pesquisador e à compra de equipamentos e materiais.

- Aos técnicos do Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia de Fabricação - FEM/UNICAMP , em especial ao Aristides, pelo auxílio na realização dos ensaios.

- Ao pessoal do Laboratório de Máquinas Ferramentas da USP-São Carlos, em especial aos professores João Fernando e Milton, pelo apoio técnico-operacional na realização dos ensaios.

- Ao pessoal do Laboratório de Fundição pelo auxílio na realização do tratamento térmico nas peças usadas nos ensaios.

- Às secretárias do DEF/FEM/UNICAMP pelos serviços prestados prontamente.

RESUMO

O estágio de centelhamento (também conhecido como faiscamento ou spark-out) ocupa uma grande percentagem de todo o ciclo de retificação cilíndrica de mergulho. Então, para se reduzir o ciclo de retificação, é muito interessante ter o menor estágio de centelhamento. Entende-se por centelhamento a etapa final do ciclo de retificação onde são removidas as deformações elásticas originadas durante a etapa inicial do ciclo de retificação, através da remoção de material sem a movimentação do rebolo na direção de avanço. Neste sentido, para obter o menor estágio de centelhamento, este trabalho usa o ciclo de centelhamento acelerado (proposto na literatura), implementado com o auxílio do monitoramento da emissão acústica gerada pelo processo de retificação.

Os experimentos estão divididos em duas fases : a primeira fase de experimentos teve o propósito de verificar a viabilidade do uso da emissão acústica para estabelecer os parâmetros necessários para implantar o centelhamento acelerado, e a segunda fase teve o propósito de implementar o centelhamento acelerado e comparar com o ciclo convencional em termos de tempo de ciclo e qualidade da superfície da peça (circularidade e acabamento superficial).

Os resultados mostraram que a emissão acústica é uma maneira muito boa para fornecer os parâmetros para implementar o centelhamento acelerado e que também o centelhamento acelerado não prejudica a qualidade da peça, pelo contrário, a superfície final é até mesmo melhor com esta espécie de ciclo.

ABSTRACT

The spark out stage occupies a very large percentage of the whole plunge grinding cycle. So, to reduce the grinding cycle is very interesting to have the shortest spark out stage. To get there, i.e., to get the shortest spark out stage, this work uses the accelerated spark out cycle (proposed in the literature), implemented with the help of the monitoring of the acoustic emission generated by the process.

The experiments were divided in two phases: the first phase of experiments had the purpose of verifying the feasibility of using acoustic emission monitoring to establish the necessary parameters to implement the accelerated spark out. The second phase had the purpose to implement the accelerated spark out and compare it with the conventional cycle in terms of time and part quality (surface finish and circularity).

The results show that acoustic emission is a very good way to get the parameters to implement the accelerated spark out and also show that the accelerated cycle does not damage the quality part, by the contrary, the surface finish is even better with this kind of cycle.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - Introdução. 01

CAPÍTULO 2 - O Processo de Retificação 04

2.1 - Introdução. 04
2.2 - Características e Propriedades de Rebolos. 05
2.2.1 - Introdução. 05
2.2.2 - Materiais Abrasivos Convencionais. 07
2.2.3 - Materiais Superabrasivos. 08
2.2.4 - Materiais Aglomerantes. 09
2.3 - Características da Operação de Dressagem. 11
2.4 - A Retificação Cilíndrica de Mergulho. 17
2.4.1 - Introdução. 17
2.4.2 - O Ciclo de Retificação Cilíndrica de Mergulho. 18

CAPÍTULO 3 - Fundamentos da Emissão Acústica e sua Aplicação no Monitoramento da Retificação. 20

3.1 - Introdução. 20
3.2 - Aspectos Físicos do Sinal de Emissão Acústica. 22
3.3 - Análise do sinal de Emissão Acústica. 24
3.4 - Sensor de Emissão Acústica. 27
3.5 - Condicionamento do Sinal de Emissão Acústica. 29
3.6 - O Monitoramento da Usinagem via Emissão Acústica. 33
3.6.1 - Emprego do Monitoramento do Processo de Retificação via Emissão Acústica. 36

CAPÍTULO 4 - Centelhamento Acelerado : Aspectos Teóricos e a Utilização da Emissão Acústica para sua Implementação. 41

4.1 - Introdução. 41
4.2 - Método do Centelhamento Acelerado descrito por Malkin. 42
4.2.1 - Formulação Matemática proposta para a Retificação Cilíndrica de Mergulho ...42
4.2.2 - Ciclo de Retificação Cilíndrica de Mergulho Convencional. 45
4.2.3 - Ciclo de Retificação Cilíndrica de Mergulho com Centelhamento Acelerado....47
4.3 - Ensaios Preliminares. 50
4.3.1 - Introdução. 50
4.3.2 - Metodologia dos Ensaios Preliminares 50
4.3.3 - Resultados e Discussões. 55

CAPÍTULO 5 - Implementação do Centelhamento Acelerado numa Retificadora CNC 59

5.1 - Introdução. 59
5.2 - Metodologia dos Ensaios. 60
5.3 - Resultados e Discussões 64

CAPÍTULO 6 - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros 72

BIBLIOGRAFIA 75

APÊNDICE 79
A.1 - Glossário de variáveis. 79
A.2 - Programa para o cálculo da Constante de Tempo (τ) e do Tempo deCentelhamento....80
A.3 - Tabelas do Capítulo 5. 83
A.3.1 - Resultados dos Ensaios 83
A.3.2 - Comparação dos tempos de centelhamento. 84
A.3.3 - Parâmetros para implementar o centelhamento acelerado. 85
A.3.4 - Condições de Trabalho dos ensaios do Capítulo 5. 86

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Macroefeito e microefeito produzidos por mecanismos de dressagem.....14
2.2 - Parâmetros presentes na operação de dressagem.....15
2.3 - Dressagem de um rebolo com dressador de ponta única.....15
2.4 - Dressador rotativo.....16
2.5 - Exemplo de retificação cilíndrica de mergulho.....17
2.6 - Exemplo de um ciclo de retificação cilíndrica de mergulho.....18
3.1 - Faixa de freqüência da onda de EA em comparação com as demais ondas.....22
3.2 - Representação esquemática do sinal de emissão acústica.....25
3.3 - Esquema de um sensor de EA.....28
3.4 - Exemplo de montagem para aquisição de dados via EA.....30
3.5 - Tipos de filtros.....31
3.6 - Geometria de um gravador de vídeo.....32
3.7 - Monitoramento do estado da ferramenta como um elemento da Manufatura Integrada por Computador.....34
3.8a - Geração de EA na retificação.....37
3.8b - Principais áreas de interesse de geração de emissão acústica.....37
3.9 - Valor médio de EA-rms versus número de passadas.....38
3.10 - Variação da emissão acústica com a distância entre rebolo-peça.....39
4.1 - Modelo idealizado de retificação cilíndrica de mergulho.....42
4.2 - Retificação cilíndrica de mergulho.....43
4.3 - Ciclo convencional de retificação cilíndrica de mergulho.....45
4.4 - Ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com centelhamento acelerado.....47
4.5 - Esboço do corpo de prova - 1.....51
4.6 - Esquema de fixação do sensor.....51
4.7 - Bancada de experimentos.....53
4.8a - Sinal de EA do início do ciclo de retificação com material temperado.....55
4.8b - Sinal de EA do início do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho para material sem tratamento térmico.....55
4.9a - Sinal de EA do centelhamento com velocidade de mergulho de 0,06 mm/s.....56
4.9b - Sinal de EA do centelhamento com velocidade de mergulho de 0,018 mm/s.....56
5.1 - Esboço do corpo de prova - 2.....60

5.2 - Retíficadora Cilíndrica à comando numérico.....62
5.3 - Esquema da bancada de experimentos.....63
5.4a - Variação da batida radial com a velocidade de mergulho para peça sem têmpera.....64
5.4b - Variação da batida radial com a velocidade de mergulho para peça com têmpera.....65
5.5a - Variação da rugosidade da peça (Ra) com a velocidade de mergulho.....66
5.5b - Variação da rugosidade da peça (Rmáx) com a velocidade de mergulho.....67
5.6 - Valores do RMS do sinal de emissão acústica contra a velocidade de mergulho.....67
5.7 - Tempo de centelhamento contra velocidade de mergulho.`.....68
5.8 - Constante de tempo contra velocidade de mergulho.....69

LISTA DE TABELAS

2.1 - Especificação de rebolos para retíficadora cilíndrica externa entre pontos. 07
2.2 - Algumas propriedades dos materias abrasivos. 08
2.3 - Condições de dressagem para dressadores de diamante de ponta única. 13
3.1 - Fontes geradoras de ruído no sinal de emissão acústica. 30
3.2 - Classificação dos métodos de monitoramento de ferramentas.....35
4.1 - Tempo de centelhamento e constante de tempo.....57

Capítulo 1 Introdução

Dentre os vários processos de usinagem, o processo de retificação faz parte da etapa final da sequência de operações de usinagem de elementos que requeiram tolerâncias dimensionais e de forma apertadas, bom acabamento superficial, difíceis de serem conseguidos com os demais processos de usinagem. Devido à ferramenta de corte empregada na retificação, o rebolo, esta operação assume características próprias, onde a aleatoriedade dos eventos que ocorrrem durante o corte é grande.

Sendo a operação de retificação um processo de remoção de material muito dispendioso e que geralmente constitui-se num gargalo na produção, é de interesse que o tempo total gasto com cada elemento que está sendo produzido (tempo de ciclo de retificação) seja o menor possível. Como o percentual da contribuição do tempo de centelhamento (que é uma etapa do ciclo de retificação) para o tempo total de ciclo é grande , uma maneira de reduzir-se o tempo total é diminuir o tempo de centelhamento. Um modo de se fazer isto é através do monitoramento do processo de retificação.

Há uma necessidade grande de sistemas de monitoramento confiáveis (Kakino, 1984). Vários métodos tem sido objeto de pesquisas para o monitoramento do comportamento das ferramentas em processos de usinagem ou dos próprios processos de usinagem (Inasaki, Wakuda, 1990). Tais métodos se enquadram dentro de duas categorias principais :

- Monitoramento direto : onde é avaliado o estado da ferramenta em estudo;
- Monitoramento indireto : onde são avaliados os parâmetros que estão correlacionados com a grandeza em estudo.

A tecnologia da emissão acústica expandiu-se durante a década passada no campo de corte de metal, sendo usada como ferramenta no monitoramento indireto de

operações de usinagem, como por exemplo a retificação cilíndrica de mergulho (Blum, Dornfeld, 1990).

Este trabalho tem como objetivo :

- Estudar a operação de retificação, o rebolo, o ciclo de retificação e a operação de dressagem; além de conhecer os princípios da Emissão Acústica.
- Mostrar os resultados práticos alcançados com uso do monitoramento da operação de retificação cilíndrica de mergulho via emissão acústica,
- Verificar a viabilidade de utilização da técnica de centelhamento acelerado (descrita oportunamente no capítulo 4) em um ciclo de retificação cilíndrica de mergulho, sendo que, para a implantação desta técnica, vai ser usada a emissão acústica para a determinação de todos os parâmetros necessários. Busca-se com isto, a redução da etapa de centelhamento. A partir daí efetuar-se uma comparação entre o ciclo de retificação convencional e o ciclo de retificação com centelhamento acelerado, no que se refere a condições de acabamento superficial (rugosidade superficial), desvios de forma (circularidade) e tempo de ciclo de retificação.

Este trabalho está dividido nos seguintes capítulos :

- Capítulo 1 : Introdução;
- Capítulo 2 : O Processo de Retificação - aqui procura-se descrever os princípios básicos deste processo, principalmente a retificação cilíndrica de mergulho e seu ciclo de centelhamento;
- Capítulo 3 : Fundamentos da Emissão Acústica e sua aplicação no monitoramento da retificação - neste capítulo descrevem-se os princípios físicos da emissão acústica e sua utilização como ferramenta para o monitoramento do processo de retificação;
- Capítulo 4 : Centelhamento Acelerado : Aspectos teóricos e a utilização da Emissão Acústica para sua implementação - neste capítulo busca-se analisar a viabilidade da utilização da emissão acústica no monitoramento da retificação cilíndrica de mergulho;
- Capítulo 5 : Implementação do Centelhamento Acelerado numa retificadora cilíndrica CNC - aqui analisa-se o comportamento do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho

frente a implantação da técnica de centelhamento acelerado. Avaliam-se também as alguns parâmetros que caracterizam a qualidade da superfície retificada;

- Capítulo 6 : Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros - apresentam-se as conclusões presentes nos capítulos 4 e 5 e indicam-se sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 — O Processo de Retificação

2.1) INTRODUÇÃO

O termo retificação, comumente é usado para um processo que utiliza partículas abrasivas duras para efetuar média remoção de material (Malkin,1989).

Dentro da gama de processos de usinagem a retificação é um exemplo ímpar devido à ferramenta usada para efetuar a remoção de material. Tal ferramenta, chamada de rebolo é composta, na sua essência, de duas espécies de materiais, a saber : partículas abrasivas que realizam o corte e um material aglomerante que mantém os grãos unidos possibilitando a sua ação sobre a superfície a ser trabalhada. O processo de retificação faz parte da fase final do processo de fabricação de componentes que requeiram tolerâncias apertadas, difíceis de se conseguir com os demais processos de usinagem disponíveis, além de formas e acabamento superficial de alto nível.

O processo de retificação além de se prestar para acabamento fino, pode também ser usado para desbaste leve desde que se use um rebolo afiado de modo adequado.

As operações de retificação são de vários tipos, que se diferenciam de acordo com a forma do rebolo e com sua movimentação cinemática sobre (ou em direção) o componente a ser trabalhado. De acordo com a norma ISO a operações de retificação são classificadas em retificação cilíndrica, plana e de forma, a qual é subdividida em retificação por geração de perfis, de rosca e cilíndrica de forma . Tal tipo de classificação se prende à forma da superfície usinada, deixando a desejar quanto às características do processo (Oliveira ,1989).

Para que se faça a distinção entre os diversos processos de retificação, seria mais adequado adotar uma classificação baseada no processo de retificação. Algo próximo disto pode ser obtido com a norma DIN 8589 que classifica as operações de retificação em :

tangencial de mergulho e de passagem, lateral (ou de face) de mergulho e de passagem. As formas geométricas das superfícies obtidas são subdivididas em : cilíndrica externa e interna, plana e plana rotativa (Oliveira, 1989).

Algumas das características da operação de retificação são apresentadas de modo diferente das demais operações de usinagem como foi mencionado por Oliveira (1989) :

- Maior força radial por unidade de área total de corte;
- Maior número de cortes subsequentes;
- Geralmente maior exatidão nas peças produzidas.

2.2) CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DE REBOLOS

2.2.1) Introdução

Rebolos para retificação e segmentos abrasivos, estão inseridas na categoria de ferramentas abrasivas aglomeradas. Tais ferramentas consistem em grãos abrasivos duros, os quais fazem o corte, impregnados numa matriz aglomerante. Dependendo do tipo particular de aglomerante, os espaços entre as partículas abrasivas podem apenas ser parcialmente preenchidos com aglomerantes, gerando porosidades ou podem ser totalmente preenchidos (Malkin, 1989). Além dos grãos abrasivos e do aglomerante, partículas e materiais que auxiliam a retificação podem ser adicionados. O desempenho e as propriedades das ferramentas abrasivas aglomeradas dependem do tipo de grão abrasivo, do tamanho do grão, do material aglomerante, de propriedades abrasivas do aglomerante, além da porosidade do conjunto (Malkin, 1989).

Rebolos para retificação são fabricados com diversos tipos de grãos em uma ampla faixa de tamanhos, em conjunto com diversos tipos de aglomerantes em composições diversas. Um rebolo convencional de uso comum contém óxido de alumínio ou carboneto de

silício com aglomerantes vitrificados ou resinas. Rebolos abrasivos com diamante ou nitreto cúbico de boro (CBN) são produzidos com aglomerantes de resina, metálicos ou vitrificados. O rebolo convencional tem toda a sua estrutura formada por uma massa de aglomerante e abrasivo. Nos rebolos superabrasivos tem-se geralmente uma fina camada de abrasivo depositada na periferia de um núcleo (que pode ser metálico) com o intuito de reduzir os custos com o diamante e com o CBN. Os diferentes tipos de rebolos para retificação, juntamente com a requerida variedade de tamanhos e de formas, adaptam-se às diversas máquinas de retificação e aos trabalhos a serem feitos, conduzindo para uma quase interminável diversidade e rebolos (Malkin, 1989).

Em termos de abrasivos duas propriedades merecem ser citadas : a Tenacidade e a Friabilidade. Deve-se entender tenacidade como a quantidade de trabalho necessária para quebrar um grão abrasivo sob determinadas condições/esforços aplicados. Quanto maior o esforço aplicado para produzir a ruptura do grão, maior é a tenacidade. O conceito oposto ao da tenacidade é o de friabilidade, que corresponde a facilidade para quebrar o grão abrasivo em pedaços sob uma determinada força ou impacto. A friabilidade caracteriza muito bem uma divisão importante entre os abrasivos : os apropriados para trabalhos duros e pesados e os adequados para trabalhos de retíficação de precisão que, geralmente são mais duros e friáveis que os outros (Nussbaum, 1988).

A especificação de rebolos define em geral os seguintes parâmetros, segundo Malkin (1989) :

- Tipo de abrasivo;
- Tamanho do grão abrasivo;
- Dureza do rebolo;
- Estrutura do rebolo;
- Tipo de aglomerante;
- Outros códigos de identificação do fabricante.

A tabela 2.1 dá uma idéia da especificação de rebolos para diversos tipos de aços e condições de operação (Nussbaum, 1988).

Materiais	Diâmetro < 350mm	Diâmetro de 350 à 450 mm	Diâmetro de 450 à 600 mm
aço carbono : - desbaste	A 60 M6 V	A 60 L6 V	A 54 M6 V
- acabamento	A 80 N6 V	A 80 M6 V	A 80 M6 V
aços liga			
dureza < 58 Rc - desbaste	DA 60 L6 V	DA 54 L6 V	DA 46 L6 V
- acabamento	DA 80 M6 V	DA 80 L6 V	DA 80 K6 V
aços liga			
dureza > 58 Rc - desbaste	AA 60 K6 V	AA 54 K6 V	AA 46 K6 V
- acabamento	AA 80 K6 V	AA 80 J6 V	AA 80 J6 V
aço inox austenítico	C 80 K6 V	C 80 J6 V	C 60 J6 V
aço inox duro	AA 60 K6 V	AA 60 J6 V	AA 54 J6 V
aço rápido - dureza < 63 Rc	AA 60 K6 V	AA 54 J6 V	AA 46 J6 V

tabela 2.1 : Especificações de rebolos para retíficação cilíndrica externa entre pontos. (Nussbaum, 1988).

2.2.2) Materiais Abrasivos Convencionais

Grãos abrasivos, que são a ferramenta de corte no processo de retificação, podem ser naturais ou sintéticos. Algumas das propriedades importantes presentes nos abrasivos são dadas na tabela 2.2.

Classicamente, o principal requisito de um material abrasivo é o de ser mais duro que o material com o qual ele trabalha. A dureza de um abrasivo, geralmente é determinada por um teste de dureza KNOOP. Outra importante propriedade é a resistência dinâmica ou tenacidade. Alta tenacidade implica que o grão abrasivo é menos suscetível à fratura a cada impacto com a peça. Abrasivos mais frágeis e duros são usados em retificação

de precisão, enquanto os mais tenazes são usados em operações de retificação de desbaste (Malkin, 1989).

	MATERIAL			
	óxido de alumínio	carboneto de silício	nitreto de boro cúbico	diamante
estrutura cristalina	hexagonal	hexagonal	cúbica	cúbica
densidade (g/cm^3)	3,98	3,22	3,48	3,52
ponto de fusão (^oC)	2040	2830	3200 a 105Kbar (ponto triplo)	3700 a 130Kbar (ponto triplo)
dureza KNOOP (kg/mm^2)	2100	2400	4700	8000

* ponto triplo : é o ponto no qual coesistem três estados físicos : sólido, líquido e vapor.

tabela 2.2 : Algumas propriedades dos materiais abrasivos (Malkin, 1989).

2.2.3) Materiais Superabrasivos

O diamante e o Nitreto Cúbico de Boro (CBN) que são os dois materiais mais duros dentre os usados como abrasivos para rebolos. O diamante é usado na sua forma natural ou na forma sintética, embora a tendência seja o uso da forma sintética devido ao alto custo do diamante natural. Já o CBN é um material sintético por excelência (Malkin,1989). As aplicações de rebolos de CBN abrangem desde o trabalho com aço rápido até ferro fundido, passando por aços de alta liga, refratários e aços ligados ao Ni, Cr, Ti, etc (Nussbaum, 1988).

Apesar de sua extrema dureza, o diamante não tem sido econômico na retificação de alguns materiais ferrosos, exceto para alguns ferros fundidos duros, devido à grafitização e à difusão de carbono para dentro do ferro, causando excessivo desgaste do diamante. Assim o CBN tem emergido como uma importante alternativa superabrasiva para a

retificação de aços, de alguns materiais não ferrosos e de ligas de alta resistência (Malkin,1989). O diamante atualmente é produzido em todas as geometrias requeridas pelas suas aplicações industriais (Nussbaum, 1988).

Em comparação com o diamante, uma importante vantagem do CBN é a sua estabilidade térmica. O diamante e o CBN, são termicamente estáveis no vácuo em temperaturas até 1400^0C. Em atmosfera normal, uma camada protetora de B_2O_3 formada sobre o CBN previne a oxidação até 1300^0C. Em contraste, o diamante é termicamente estável a temperaturas de até 800^0C em atmosfera normal (Nussbaum, 1988). Uma importante consequência disto é que rebolos de CBN com aglomerante vitrificado queimam a uma temperatura bem mais alta que o diamante, além de uma ampla gama de aglomerantes vitrificados poderem ser utilizados na sua confecção, oferecendo maiores opções de escolha (Malkin, 1989).

2.2.4) Materiais Aglomerantes

Grãos abrasivos são mantidos unidos pela ação de materiais aglomerantes. Em geral um aglomerante deve ser forte o suficiente para resistir às forças de retificação, à temperatura, às forças centrífugas (sem se desintegrarem) e ao ataque químico que pode ser provocado pelo fluído de corte. O aglomerante deve ter habilidade suficiente para tornar o rebolo rígido o bastante, de modo a segurar os grãos abrasivos, a fim de que estes sejam desgastados vagarosamente durante o uso. Os tipos principais de aglomerantes para rebolos convencionais são : as resinas (incluindo as reforçadas com fibra de vidro), goma laca, oxiclorados, silicatos, vitrificados e os de goma elástica. Os superabrasivos são usados com aglomerantes vitrificados, metálicos e resinóides (Malkin, 1989).

Os vitrificados provavelmente somam a metade dos rebolos convencionais. Historicamente a velocidade periférica máxima do rebolo vitrificado era de 30 m/s devido à limitações de resistência, mas com o auxílio de reforços é possível chegar-se a 80-90 m/s (Malkin, 1989).

Os rebolos resinóides são feitos com uma mistura de resinas fenólicas ou plásticas e grãos abrasivos. São largamente empregados em retificação de desbaste devido à sua elevada resistência e habilidade de suportar impactos de cargas. Seu uso é mais comum entre os rebolos superabrasivos, sendo que sua aplicação mais importante, com abrasivos de diamantes para a retificação de carbonetos cementados e com CBN para a retificação de aços endurecidos. No entanto, tais aglomerantes são suscetíveis à ataques químicos provocados por fluídos de corte alcalinos (Malkin,1989).

Aglomerantes de goma elástica são constituídos de borracha natural vulcanizada ou por borracha sintética. Sua principal aplicação é em rebolos finos para operações de corte com fluído para a produção de corte livre de queima e com rebolos de arraste para retíficadoras sem centros. O uso de rebolos de borracha foi bastante difundido na retificação de mancais e ferramentas de corte, mas este tipo de utilização tem declinado (Malkin, 1989).

Os aglomerantes a base de silicatos tem a vantagem (frente aos vitrificados) de possuírem uma temperatura de processamento mais baixa e um menor ciclo de aquecimento. Podem ser utilizados na produção de rebolos extragrandes de baixa velocidade periférica, destinados à algumas operações de acabamento ou de geração de forma (Malkin, 1989).

A goma laca é um material orgânico natural que raramente é utilizado hoje como aglomerante de rebolo. Era usado na confecção de rebolos de corte flexível (daí o nome de rebolos elásticos), utilizados em retificação fina de cilíndros laminadores, cutelaria e eixos de comando de válvulas (Malkin, 1989).

Os aglomerantes oxiclorados são menos comuns, sendo hoje usados para retificação em disco. São suscetíveis a ataques químicos (Malkin, 1989).

Os aglomerantes metálicos são extremamente usados com rebolos superabrasivos. Os mais comuns são de bronze sinterizado, os quais são produzidos por metalurgia do pó. Tem-se também pó de ferro, de níquel e de tungstênio. Outro processo de fabricação de rebolos superabrasivos a base de aglomerante metálico é o de eletrodeposição, o qual consiste numa camada de diamante ou de CBN retida sobre um elemento pré-formado

por eletrodeposição. Em geral, rebolos abrasivos eletrodepositados são menos caros que os demais, pois contém menor quantidade de diamante ou de CBN (Malkin, 1989).

2.3) CARACTERÍSTICAS DA OPERAÇÃO DE DRESSAGEM

O rebolo, como qualquer outra ferramenta de corte, sofre desgaste durante seu uso e sua topografia muda consideravelmente sendo prejudicada, dentre outras coisas, a sua capacidade de remoção de material. Nestes termos, tem-se a necessidade de preparar o rebolo para que ele possa ser utilizado novamente (Malkin, 1989).

Existem dois conceitos distintos de desgastes. O primeiro está relacionado com a perda diametral do rebolo (desgaste volumétrico) e o segundo trata da perda da capacidade de corte da superfície de trabalho, sendo que normalmente estes dois fenômenos ocorrem de forma isolada. O desgaste volumétrico proporciona uma auto-afiação da face de trabalho. A perda da afiação é resultante da falta de auto-afiação e, portanto, vem dissociada de desgaste volumétrico (Oliveira, Bianchi, Souza, 1992).

A operação responsável pelo reestabelecimento da face de trabalho do rebolo chama-se Dressagem (conhecida também por afiação, retificação do rebolo, dressamento ou diamantação), a qual tem três objetivos principais (Oliveira, 1989) :

- Obter concentricidade da face de trabalho com relação a seu eixo de giro;
- Reestabelecimento de forma (perfilamento da face de trabalho);
- Retirada de grãos abrasivos gastos visando aumentar a capacidade de retirar material do componente a ser retificado.

O ponto de dressagem ou avivamento da ferramenta abrasiva determina o fim de vida da face de trabalho do rebolo. Nesta situação os grãos abrasivos estão

excessivamente gastos e o rebolo já não consegue remover o material de forma adequada. A dressagem deve ser feita o mais próximo possível deste ponto porque (Oliveira, Bianchi, Souza, 1992) :

- se a dressagem ou avivamento forem feitos após o ponto de reafiação poderão ser produzidas peças com queima superficial, trincas ou rugosidade fora de especificação.
- se a dressagem ou avivamento forem feitos antes do ponto de reafiação, haverá perda de tempo e de rebolo, pois o rebolo ainda pode produzir peças dentro da qualidade especificada.

As ferramentas de dressagem estão divididas, de acordo com seu princípio de atuação cinemática, em dois grupos : dressadores estáticos e dressadores rotativos. No grupo de dressadores estáticos há dois tipos de ferramentas : as ferramentas de ponta única e as conglomeradas. As primeiras são constituídas por um corpo ou suporte onde é fixado um diamante de ponta única (Oliveira, Purquerio, 1989). Como uma alternativa para os dressadores de diamante de ponta única, os dressadores de diamantes sintéticos policristalinos de variadas geometrias tem sido utilizados (Malkin, 1989). Nas ferramentas conglomeradas, diversos diamantes são posicionados numa liga metálica e, de acordo com a configuração diamante/liga, têm-se alguns tipos característicos como : bastão dressador, fliese (Oliveira, Purquerio, 1989).

Como resultado da operação de dressagem, dois efeitos podem ser reconhecidos : o macroefeito e o microefeito. O primeiro é causado pelo formato do dressador e pelas condições de dressagem, pois durante a dressagem, os grãos do rebolo são cortados ou fraturados pelo dressador e a composição de movimentos entre o rebolo e o dressador forma uma rosca na superfície do rebolo na qual as arestas dos grãos estão situadas. Este tipo de efeito é visível com a dressagem grosseira de um rebolo com granulometria muito fina (Oliveira, Purquerio, 1989). Para os dressadores de ponta única as condições de dressagem podem ser vistas na tabela 2.3.

Tipo de operação de retificação	Prof. de penetração do dressador : a_d [mm]	Passo de dressagem : s_d [m/min]
- Ret. cil. ext. desbaste	0,02 / 0,03	0,2
- Ret. cil. ext. acabamento	0,01 / 0,02	0,06
- Ret. cil. int. desbaste	0,02	0,6
- Ret. int. acabamento	0,02	0,2

tabela 2.3 : Condições de dressagem para dressadores de diamante de ponta única . (Malkin, Oliveira, Nussbaum, 1988).

O microefeito é causado pela fratura das partículas dos grãos onde novas arestas de corte são criadas pelo dressador. A agressividade das arestas dependem da friabilidade (capacidade do grão quebrar-se) do grão e também das condições de dressagem. Na dressagem fina com profundidade de penetração e avanço do dressador pequenos, partículas muito pequenas são removidas ou fraturadas, causando a criação de planos nas superfícies de corte dos grãos, tornando-os menos agressivos. Na dressagem grossa, profundidade de penetração e avanço grandes, grandes partes dos grãos são quebradas e arestas afiadas e maiores são formadas (Oliveira, Purquerio, 1989).

Na figura 2.1 pode se ter uma idéia do macroefeito e microefeito produzidos pela dressagem.

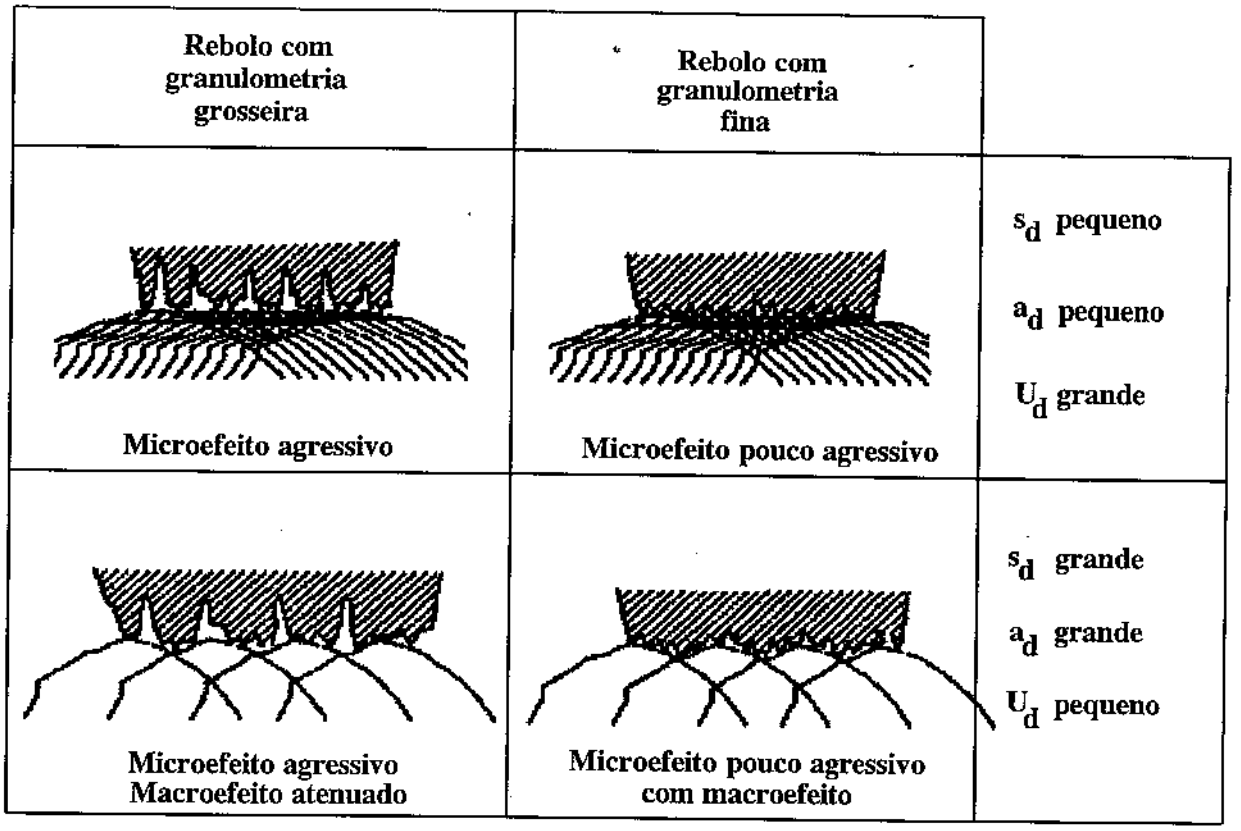


figura 2.1 : Macroefeito e microefeito produzidos por mecanismos de dressagem (Oliveira, Purquerio, 1989).

Um parâmetro importante para a caracterização da condição de dressagem é o grau de recobrimento, U_d. Este parâmetro é definido como sendo a relação entre a largura de atuação do dressador (b_d) e o avanço por volta (s_d), ou seja :

$$U_d = \frac{b_d}{s_d} \qquad (1)$$

Os parâmetros presentes no cálculo de Ud podem ser observados na figura 2.2.

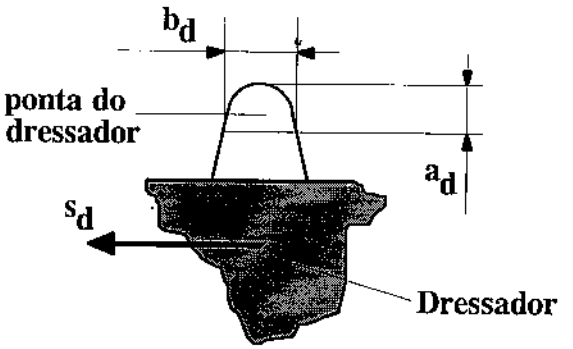


figura 2.2 : Parâmetros presentes na operação de dressagem.

Uma operação de dressagem em um rebolo convencional, de Al_2O_3, pode ser observada na figura 2.3. Nela pode-se ver um dressador de ponta única percorrendo a superfície de trabalho do rebolo(Malkin,1989).

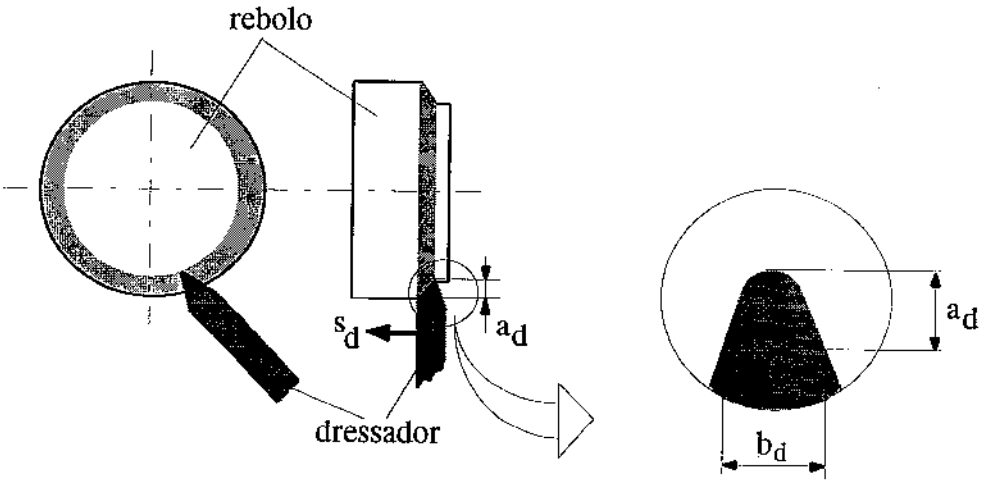


figura 2.3 : Dressagem de um rebolo com dressador de ponta única (Malkin,1989).

Durante cada passe a ferramenta de dressagem (dressador) atravessa a face do rebolo e uma camada de profundidade a_d é removida, no caso, no raio. A movimentação do dressador é idêntica à da ferramenta de torneamento (Malkin,1989). Como etapa final da operação de dressagem, passes de centelhamento (Sparkout) podem ser feitos, no qual o dressador atravessa a superfície do rebolo sem entretanto incrementar qualquer movimentação no sentido radial. Cada passe de centelhamento sucessivo remove menos material do rebolo, conferindo uma topografia cada vez mais fina ao rebolo (Malkin,1989).

Com o uso contínuo, o dressador de diamante de ponta única desgasta-se, alterando a topografia do rebolo dressado, causando uma subsequente mudança no comportamento da operação de retificação. Eventualmente, pode tornar-se necessário recompor o diamante expondo uma ponta nova. Com uma ferramenta multi-ponto a performace da retificação durante a vida do dressador tende a permanecer mais constante, sendo uma vantagem definitiva para a produção automatizada (Malkin, 1989).

Outro método de dressagem, que é especialmente usado para a geração de perfis, é o dressador rotativo de diamante. Consiste num corpo assimétrico com partículas de diamantes impregnadas numa matriz metálica. O rolo dressador tem o mesmo perfil que o requerido pela peça e pode ser visto na figura 2.4, onde a_r é a profundidade por revolução e v_i é a velocidade de avanço e v_d é a velocidade de rotação do rolo (Malkin, 1989).

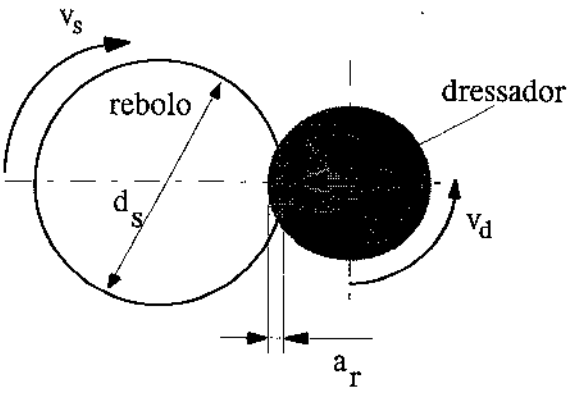


figura 2.4: Dressador rotativo (Malkin,1989).

Os rebolos superabrasivos apresentam uma pequena camada de grãos que estão aderidas à superfície. Assim, o avivamento pode ser feito pressionando-se contra o rebolo uma barra de óxido de alumínio, ou uma barra de cera hidrossolúvel impregnada com abrasivo. ou ainda submetendo-se o rebolo a uma condição muito serera de trabalho (Oliveira, Bianchi, Souza, 1992)

2.4) A RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA DE MERGULHO

2.4.1) Introdução

Este procedimento destaca-se dos outros pela alta produtividade, removendo mais material por unidade de tempo e pela sua versatilidade, podendo retificar peças com diferentes diâmetros, peças perfiladas, etc (Nussbaum, 1988). Neste procedimento a retificação é feita simultaneamente sobre todo o comprimento da peça, sem precisar realizar movimentos longitudinais. O avanço em profundidade, no início da operação ou desbaste, oscila entre 0,4 e 2,0 mm/min., retirando até 95% do material. O restante é acabado reduzindo o avanço entre 0,1 e 0,3 mm/min.

Para se iniciar uma operação cilíndrica de mergulho, ajusta-se um certo avanço radial por volta a para uma certa velocidade de mergulho v_f. Com o início do corte, como acontece em todo processo de retificação, aparecem esforços que são proporcionais à penetração e o conjunto formado por máquina, rebolo e peça passa a se deformar de modo proporcional aos esforços normais. Tais deformações irão proporcionar uma diferença entre a posição instantânea do rebolo em relação a sua posição real. Após um certo número de voltas, esta diferença precisa ser eliminada, até que se atinja a dimensão o final da peça desejada (Malkin, 1989). Uma operação cilíndrica de mergulho pode ser vista na figura 2.5 .

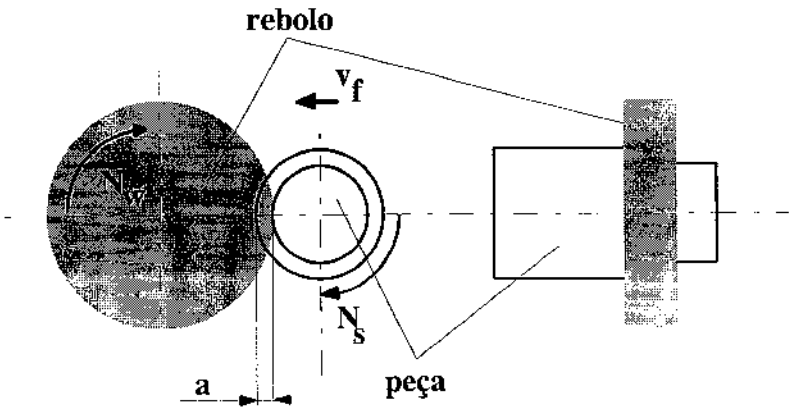


figura 2.5 : Exemplo de retificação cilíndrica de mergulho (Malkin,1989).

2.4.2) O Ciclo de Retificação Cilíndrica de Mergulho

O ciclo de retificação compreende um conjunto de atividades realizadas durante o processo de retificação, indo desde a colocação até a saída da peça da máquina . Para cada uma destas atividades ou etapas é demandado um tempo. O tempo total do ciclo de retificação é então a somatória de todos os tempos destas etapas (Oliveira, 1989).

Tais etapas estão divididas como mostrado na figura 2.6 (Oliveira, 1989) :

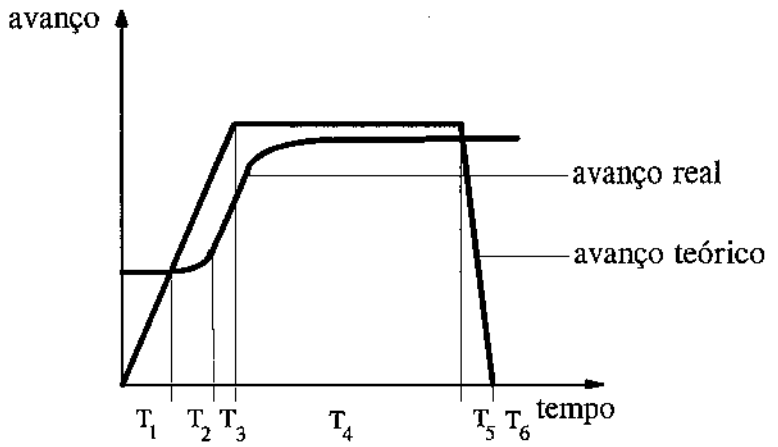


figura 2.6 : Exemplo de um ciclo de retificação cilíndrica de mergulho (Oliveira, 1989).

Desta figura tem-se que :

- Movimentação do rebolo em direção a peça sem remoção de material, mas já com avanço de trabalho : T_1.
- Início da remoção de material com a conseguente deformação do conjunto Máquina-Rebolo- Peça : T_2.
- Remoção de material com avanço real tornando se igual ao avanço nominal : T_3.
- Centelhamento, nesta etapa atinge-se a dimensão final da peça : T_4.
- Recuo do rebolo sem corte de material : T_5.
- Tempo gasto com uma possível dressagem (reafiação do rebolo), troca de peça ou balanceamento do rebolo : T_6.

Pode se notar que a curva de avanço real acumulado está atrasada em relação a de avanço teórico, e isto se deve ao acúmulo de deflexões elásticas ocorridas durante uma fase inicial conhecida como centelhamento inicial (T_2), demandando para isto um certo intervalo de tempo que será oportunamente caracterizado.

Tais deformações fazem com que as dimensões da peça não sejam as pretendidas já que ocorreu um "atraso dimensional". É necessário então efetuar-se uma operação de retirada de material sem movimento de avanço mantendo o rebolo sobre a peça, para que a recuperação desta deformação elástica sofrida pelo sistema Máquina-Rebolo-Peça (M-R-P) possa ser eliminada, atingindo-se então a dimensão desejada. Tal operação é, conhecida por centelhamento (ou faiscamento, ou sparkout), e demanda uma boa parte do tempo de ciclo de retificação.

Como a operação de retificação é um tanto onerosa no que se refere a custos operacionais, é necessário que o tempo do ciclo de retificação seja o menor possível, fazendo-se necessária sua otimização. Isto pode ser feito atuando-se no sentido de :

- Diminuição de tempos improdutivos, sem remoção de cavaco como centelhamento, aproximação e recuo do rebolo;
- Otimização da ferramenta abrasiva e do sistema M-R-P;

Dentro deste contexto pode-se definir otimização como (Allanson et al, 1989) : "A necessidade de mínimo custo alcançando as qualidades pré- determinadas."

Este trabalho visa otimizar o ciclo de retificação cilíndrica de mergulho atuando na diminuição do tempo de Ciclo de retificação.

No capítulo seguinte serão expostos os fundamentos da emissão acústica e sua aplicação no monitoramento da operação de retificação bem como as áreas de geração de emissão acústica durante a operação de retificação, análise e condicionamento do sinal de emissão acústica.

Capítulo 3 Fundamentos da Emissão Acústica e sua aplicação no monitoramento da retificação

3.1) INTRODUÇÃO

Diversos autores propuseram-se a definir emissão acústica. Abaixo seguem algumas destas definições :

- "Ondas acústicas geradas no interior de um material quando este está sujeito a estímulos externos" (Beattie, 1983).

- "Emissão Acútica pode ser entendida como o relaxamento de uma onda vibracional na estrutura de materiais cristalinos, possibilitando o rearranjo da estrutura interna do material, ao qual foi imposto um estímulo" (Blum, Dornfeld, 1990).

- "Emissão Acústica é uma espécie de vibração ultrassônica tipicamente gerada durante a deformação e fratura de materiais sólidos" (Kakino, 1984).

- "São ondas de tensão elásticas transientes geradas por uma fonte, pelo rápido relaxamento de energia de tensão dentro de um material" (Boness, McBride, 1991).

- "São ondas de tensão transiente que são geradas quando o estado de tensão de um corpo se altera" (Hanchi, Klamecki, 1991).

- "Emissão Acústica refere-se a ondas de tensão elásticas geradas pela rápida liberação de energia de deslocamento provenientes de fontes localizadas dentro do material" (Liu, 1992).

O uso de ondas de emissão acústica (E.A.) em diversas áreas vem sendo discutido a algumas décadas. Nos anos 60 e 70 eram usadas como ferramenta de monitoramento de estruturas mecânicas como uma espécie de ensaio não destrutivo, de crescimento de trincas, além de uma infinidade de usos na área da ciência de materiais. Dentro da área de corte de metais vem, desde então, sendo usada para monitorar operações de usinagem (torneamento, fresamento, furação e retificação). Na retificação seu uso mais promissor é o monitoramento de operações de precisão (Blum, Dornfeld, 1990).

A técnica de monitoramento baseada na geração de ondas de emissão acústica tem sido bastante usada durante a usinagem de metais. Ela é sensível a remoção de material, ao escorregamento de um material sobre outro, à transformação de fase, à deformação plástica, a micro-quebras, a fraturas e impactos. As técnicas de monitoramento via emissão acústica usam as informações contidas nas ondas de tensão elásticas transientes, as quais são geradas pela rápida liberação de energia dentro do material, fornecendo conhecimento a respeito do processo (Liu, 1991). Mudanças no estado de deformação plástica do corpo resultam na geração de ondas de tensão ou ondas de emissão acústica (Hanchi, Klamecki, 1991).

Devido a várias vantagens como o baixo custo, alta sensibilidade, flexibilidade de montagem, robustez e pequeno tamanho dos sensores, simples instalação e processamento de sinal, a técnica de monitoramento via emissão acústica tem potencial de aplicação no campo industrial (Liu, 1991).

O termo Acústica deve-se ao fato destas ondas caminharem no meio sólido a mesma velocidade do som. Tais ondas não são audíveis pois sua faixa de frequência vai de 15 KHz a 1200 KHz segundo Konig e Meyen (1990) ou de 50 KHz a 1000 KHz por Dornfeld e Blum (1990). O efeito da propagação destas ondas, como o deslocamento da superfície do corpo, podem ser avaliados por sensores adequados. A figura 3.1 mostra a faixa de frequência do sinal de emissão acústica em comparação com frequências de diversas outras ondas.

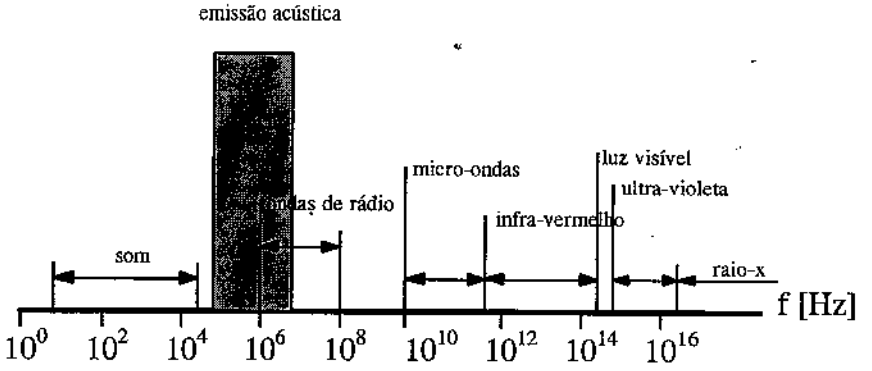


figura 3.1 : Faixa de frequência da onda de EA em comparação com as demais ondas (Dornfeld, Blum, 1990).

3.2) ASPECTOS FÍSICOS DO SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA

Ondas de emissão acústica podem ser geradas por uma grande quantidade de mecanismos como : fraturas ou deformações de estruturas cristalinas, nucleação e crescimento de grãos de fases metálicas, transformações de fase em materiais metálicos, descargas elétricas, atrito entre peças metálicas além de mecanismos de propagação de trincas.

Com o intuito de compreender melhor o mecanismo de geração de emissão acústica em processos de remoção de material metálico, o conhecimento do comportamento microscópico de sólidos cristalinos frente à deformação plástica, tensão de fricção, propagação de trincas, se faz necessário (Liu, 1991).

Na deformação plástica de um sólido cristalino, uma pequena porção de energia de deformação é armazenada em um campo residual de tensão de discordâncias. A maior parte da energia de deformação é consumida no incremento da energia térmica. Este efeito, causado pelo deslocamento transversal de "defeitos" (discordâncias) através da estrutura cristalina, soma-se ao movimento de vibracão dos átomos. Como resultado, uma pequena porção da energia, da ordem de um décimo da energia total envolvida no processo, está associada ao incremento no número de discordâncias e outros defeitos na estrutura cristalina. Estas discordâncias (defeitos de linha existentes na estrutura do material) tornam

possível a existência de deslocamento a um nível de tensão abaixo da tensão de cisalhamento teórica do cristal. Alguns pesquisadores tem postulado que esta movimentação de discordâncias durante a deformação plástica é responsável pela geração de ondas de emissão acústica (Liu, 1991)

Além da deformação plástica, a fratura, a transformação de fase, a corrosão, deformações devido a movimentos torcionais e fontes de fricção também podem gerar emissão acústica (Lui, 1991).

A emissão acústica devido à fratura é atribuída à formação e propagação de micro-trincas na estrutura cristalina. As micro-trincas são iniciadas por discordâncias empilhadas devido às tensões de têmpera. Estas micro-trincas podem não crescer até que uma energia suficiente seja liberada durante a propagação da trinca para que se supere as barreiras de energia requeridas para a geração de uma nova superfície. Altas tensões são aplicadas para o início de propagação da trinca. O trabalho feito pelas cargas externas pode ser absorvido pela energia térmica associada com a criação de novas superfícies e pela energia cinética usada na movimentação de separação do material (trincas). Uma porção desta energia cinética é transmitida à vizinhança do material na forma de ondas elásticas, as quais são detectadas como ondas de emissão acústica (Liu, 1991).

A produção de emissão acústica por fricção é atribuída à deformação plástica de camadas superficiais ásperas e por fratura frágil. Quando duas superfícies ásperas estão em contato, a área de contato real é menor que a esperada em virtude da existência de irregularidades. Como as superfícies movem-se uma em relação a outra, as junções de ambas se aquecem e ficam expostas ao cisalhamento, podendo gerar fratura das irregularidades ocasionando ondas de emissão acústica (Liu, 1991).

Todos estes mecanismos, que geram ondas de emissão acústica, tem em comum a movimentação rápida de um grupo de átomos em torno de sua posição de equilíbrio, movimentação esta que, mantida pela tendência dos átomos a retornarem a sua posição de equilíbrio. Isto caracteriza a deformação elástica do meio, responsável pela geração da onda.

É comum usar-se os termos ondas de emissão acústica e sinal de emissão acústica de modo confuso, havendo necessidade de se efetuar uma distinção entre ambos.

Emissão acústica designa uma onda gerada no interior do material, enquanto que sinal de emissão acústica é um sinal elétrico produzido por sensor apropriado em resposta a uma onda que o atingiu.

As características do sinal de emissão acústica dependem do mecanismo que a gerou, do material através do qual ela se propaga e do sensor que transforma a onda em sinal (Blum, Dornfeld, 1990). Mudanças nas propriedades metalúrgicas do material metálico associadas à mudanças em parâmetros mecânicos do processo em análise, produzem modificações no sinal. Tais modificações podem ser caracterizadas por parâmetros como o valor RMS (raiz quadrada da média do sinal de entrada) do sinal primitivo, a distribuição de amplitude do sinal, o espectro de frequência e taxa do número de picos (Liu, 1991).

Quanto à sua natureza, as ondas de Emissão Acústicas podem ser de cisalhamento ou longitudinal. A reflexão e a difusão da onda durante a sua propagação faz com que não haja uma direção preferencial para sua propagação, assim o nível de amplitude do sinal de EA independe da orientação do sensor. Entretanto, a existência de interfaces mecânicas podem distorcer e amortecer o sinal (Blum, Dornfeld, 1990). A atenuação do sinal deve-se principalmente ao material e as interfaces como adesivos ou parafusos e interferências de uniões encaixadas (Kakino, 1984).

3.3) ANÁLISE DO SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA

Em geral o sinal de emissão acústica pode ser classificado como sinal do tipo contínuas ou transiente (burst), figura 3.2 (Hanchi, Klamecki, 1991). As emissões transientes são produzidas quando a tensão em um material excede um nível necessário para causar um evento discreto, como uma fratura acompanhada da energia de relaxamento. Já as emissões contínuas são superposições de emissões transientes aleatórias para as quais a taxa média de repetição é muito maior que a duração do transiente. O primeiro tipo está associado com eventos superficiais como micro-quebras superficiais e formação de linhas de escorregamento. O último está geralmente associado com mecanismos internos tal como ondas de emissão acústica observados durante o corte de metal, no estado estacionário (Lui, 1991).

Dois tipos de análise de sinal são usualmente reconhecidos : análise no domínio do tempo e análise no domínio da frequência. No monitoramento via emissão acústica em tempo real, o uso da análise no domínio do tempo é comum. Alguns parâmetros que medem emissão acústica no domínio do tempo podem ser vistos também na figura 3.2. Desta figura tem-se que o evento pode ser definido como o sinal de emissão acústica detectado, o número de picos como o número de picos que excederam o limite de voltagem, a taxa do número de picos como sendo a taxa de ocorrência destes picos, amplitude de pico como maior pico de voltagem do sinal do evento e a energia de emissão acústica que é a energia correspondente à energia liberada pela fonte geradora de emissão acústica (Hanchi, Klamecki, 1990).

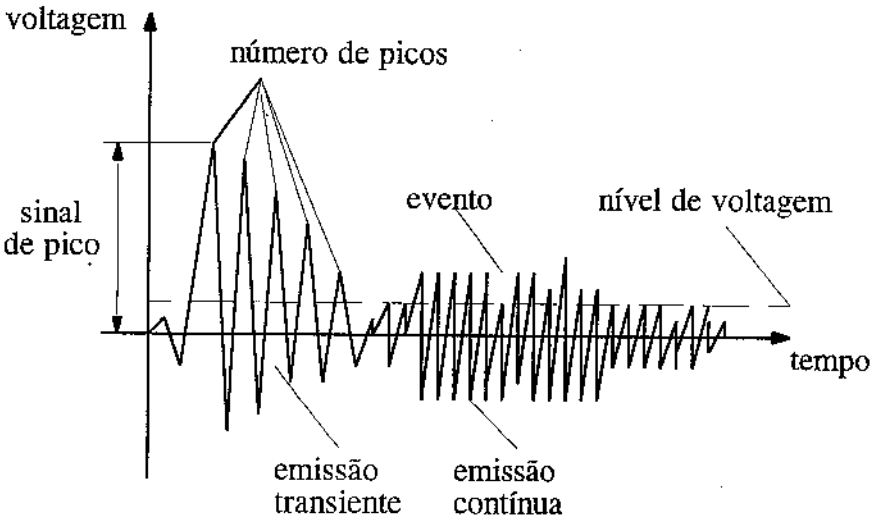


figura 3.2 :Representação esquemática do sinal de emissão acústica (Hanchi, Klamecki, 1990).

A natureza de alta frequência dos sinais de EA faz com que eles sejam menos influenciados pelos ruídos de baixa frequência. A ordem de grandeza do sinal de EA está na faixa do MHz enquanto que, por exemplo, a ordem de grandeza do sinal proveniente de um dinamômetro está na faixa do KHz. Isto significa que o sinal bruto de EA necessita de uma placa analógica-digital que tenha uma frequência de amostragem 1000 vezes maior, além de uma maior capacidade de memória por parte do computador. Algumas soluções para este

problema envolvem o uso da faixa de baixa frequência presente na ampla banda de frequência do sinal bruto de EA, através da passagem deste sinal bruto por um voltímetro RMS ou por um circuito retificador passa-baixa, assim o sinal de saída tem uma frequência menor que o sinal bruto. O inconveniente deste processo é que a análise do sinal não vai ser feita em cima do sinal bruto. Uma outra opção seria a gravação do sinal bruto em um gravador de vídeo, para uma análise posterior (Liu, 1991).

O sinal bruto contínuo de EA, para o corte de metal, tem como característica a aleatoriedade, baseando-se nisto, pode ser enunciada a afirmação : o sinal bruto de EA passado por um filtro passa-alta e amplificado pode ser tratado como um processo de distribuição Gaussiana contínua no tempo. Pode-se assim assumir que este processo seja estacionário (mantém o mesmo estado independente do tempo) para que se possa determinar alguns parâmetros estatísticos, para uma amostra finita, que pode auxiliar na análise do sinal de EA. A seguir tem-se a descrição de alguns destes parâmetros (Liu, 1991; Beattie, 1983; Dornfeld, Teti, 1989).

- **O RMS do sinal de EA :** é a raiz quadrada da média do sinal de entrada. Matematicamante é dado por :

$$EA_{RMS}(t) = \left[\int_{-\infty}^{t} V^2(\mathrm{T}).w(t-\mathrm{T})d\mathrm{T} \right]^{1/2} \qquad (2)$$

onde t é o tempo, T é uma função variável no tempo, $V^2(t)$ é a variável de interesse e $w(t)$ é uma função do tipo :

$$w(t) = \left(\frac{1}{R.C} \right).e^{\frac{-t}{R.C}} \qquad (3)$$

Para a maioria dos voltímetros RMS comercializados, R e C são respectivamente a resistência e a capacitância usadas no circuito passa-baixa do aparelho. O produto (R.C) é uma grandeza chamada constante de tempo, a qual determina a frequência do filtro passa-baixa, isto é, determina o tempo em que se passa amostrando o sinal bruto de entrada e calculando o RMS para proporcionar a saída. Este parâmetro é utilizado neste trabalho.

- **Amplitude média da voltagem do sinal de EA :** é o valor médio do sinal retificado. Para se ter este sinal, deve-se passar o sinal bruto por um retificador de onda ou por um voltímetro de corrente alternada.
- **Número de picos e Taxa do número de picos :** o número de picos é o número de vezes o sinal ultrapassa um valor limite pré-estabelecido de voltagem. Medindo-se o número de picos dentro da unidade de tempo tem-se a taxa do número de picos.
- **Modo de EA :** é o valor máximo da função densidade de probabilidade do sinal que passou por um retificador de onda (para se ter a amplitude média de voltagem) e por um filtro passa-baixa.
- **SKEW (S) e KURTOSIS (K) :** são aplicados sobre o sinal bruto, sendo definidos respectivamente como os momentos normalisados de terceira e quarta ordem da distibuição de amplitude. São expressos por :

$$S = \frac{M_3}{M_2^{\frac{3}{2}}} \quad \text{e} \quad \text{por} \quad K = \frac{M_4}{M_2^{\,2}} \qquad (4)$$

onde M_i é o momento de i-ésima ordem da distribuição.

O Skew mede a simetria da função densidade de probabilidade em torno da sua média, enquanto o Kurtosis é uma medida da deformação da função densidade de probabilidade. Um Skew negativo indica que a maior parte dos pontos encontra-se à esquerda da média e um Skew positivo indica o oposto. Um Kurtosis alto indica pequeno achatamento da função ao passo que um valor pequeno indica que a função está bastante achatada.

3.4) SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA

O sensor de EA é um dispositivo que gera um sinal elétrico quando estimulado por uma onda de emissão acústica. O sensor ideal deve produzir uma curva de voltagem em função do tempo idêntica à curva de amplitude de onda em função do tempo, sendo que seu funcionamento está baseado em princípios físicos como os de capacitividade, piezoeletricidade e de interferometria. A relação exata entre a característica da onda e o tipo de sinal gerado depende de ambos, onda e sinal (Beattie, 1983).

Uma grande parte dos sensores está baseada no princípio de piezoeletricidade que é apresentado por alguns tipos de cristais que ao serem atingidos por estímulos que provoquem um certo grau de deformação, são capazes de se polarizarem gerando uma diferença de potencial capaz de produzir um sinal. Os cristais piezoelétricos mais usados são o quartzo , sal Rochelle, dihidrogenofosfato de amônio (Beattie, 1983).

O uso de acoplantes é especialmente indicado quando se quer detectar sinal de emissão acústica de baixo nível. Em escala microscópica, a superfície do material e do sensor são rugosas e não estão intimamente em contato, havendo um espaço preenchido por ar entre eles, fazendo com que a tensão transmitida, por unidade de área, seja pequena. Se o espaço existente for preenchido por um fluido, a onda de tensão poderá ser transmitida de modo mais uniforme (Beattie, 1983).

As características predominantes que um sensor deve apresentar para sua utilização em aplicações industriais são a alta resistência ao meio agressivo de trabalho (resistência aos fluidos refrigerantes e temperatura de trabalho), ser resistente aos esforços presentes nas operações as quais estão monitorando, ser de custo reduzido e de fácil manuseio (Konig, Meyen, 1990) e não ser intrusivo ao processo a ser monitorado. Levando-se isto em conta, apenas uma pequena parcela dos sensores disponíveis comercialmente pode ser usada no monitoramento em ambiente de trabalho com os requisitos citados acima (Konig, Meyen, 1990). Um exemplo de sensor típico usado em emissão acústica pode ser visto na figura 3.3.

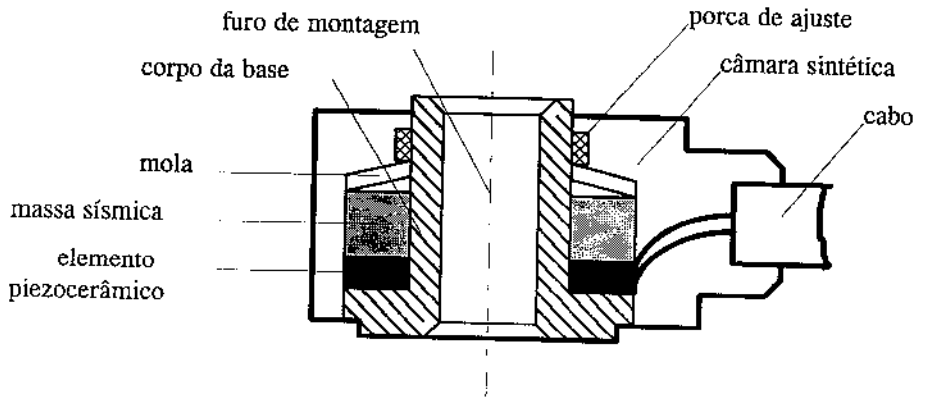


figura 3.3 : Esquema de um sensor de EA (Beattie, 1983).

A sensibilidade de um sensor de EA é controlada pela sensibilidade intrínsica do material piezoelétrico, das dimensões do elemento piezoelétrico, além do formato e do tipo de material usado em cada caso (Beattie,1983).

A fixação de um sensor na operação de retificação em particular pode ser feita na própria mesa de trabalho no caso de retificação plana (Dornfeld, Cai, 1984), (Blum, Dornfeld, 1990), (Eda et al, 1984). Se for retificação cilíndrica externa, o sensor pode ser fixado no contra-ponto (Blum, Dornfeld, 1990), (Konig, Meyen, 1990), (Chang, Diniz, Dornfeld, 1991), (Inasaki, 1984); ou ainda no bocal de saída do fluido refrigerante (Chang, Diniz, Dornfeld, 1991). Na retificação cilíndrica interna, o sensor pode ser colocado na tubulação de fluido refrigerante (Wakuda, Inasaki, (1990). No caso de se usar retificação cilíndrica externa com rebolo de CBN pode-se colocar o sensor na alma do rebolo (Wakuda, Inasaki, 1990). No monitoramento da operação de dressagem o local preferido é o próprio dressador (Konig, Meyen, 1990), (Inasaki, 1985). O sensor deve estar o mais próximo possível da região geradora de emissão acústica para se evitar a criação de muitas interfaces que pode ocasionar, como já apresentado, a atenuação do sinal.

3.5) CONDICIONAMENTO DO SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA

O sinal proveniente do sensor de emissão acústica é alternado e de alta frequência. A análise direta deste sinal é geralmente pouco informativa, dado à dificuldade de se interpretar um sinal de tal natureza, além dos ruídos existentes.

Torna-se necessário efetuar um tratamento deste sinal através de alguns dispositivos como : filtros de baixa e de alta frequência, pré-amplificadores, amplificadores e voltímetros.

Em geral as interferências no sinal primitivo podem ser de natureza elétrica, mecânica ou diversas. Kakino (1984) elaborou uma classificação de ruídos e suas respectivas fontes geradoras, que são apresentados na tabela 3.1.

Ambiente	• mecânico : outras máquinas e/ou veículos. • elétrico : máquinas de descargas elétricas, solda elétrica e por indução, interruptores de lâmpadas fluorescentes e de outras máquinas
Ruídos auto-induzidos pela máquina	• troca automática de ferramentas e mudança de engrenamento; • fuso girante, engrenagens, mancais.
Máquina em operação	• deformação plástica, mecanismo de geração de cavaco, fricção.

tabela 3.1 : Fontes geradoras de ruído no sinal de emissão acústica (Kakino, 1984).

O esquema de montagem de uma sequência de instrumentos visando o monitoramento via EA na retificação é mostrado na figura 3.4 (Inasaki,1990).

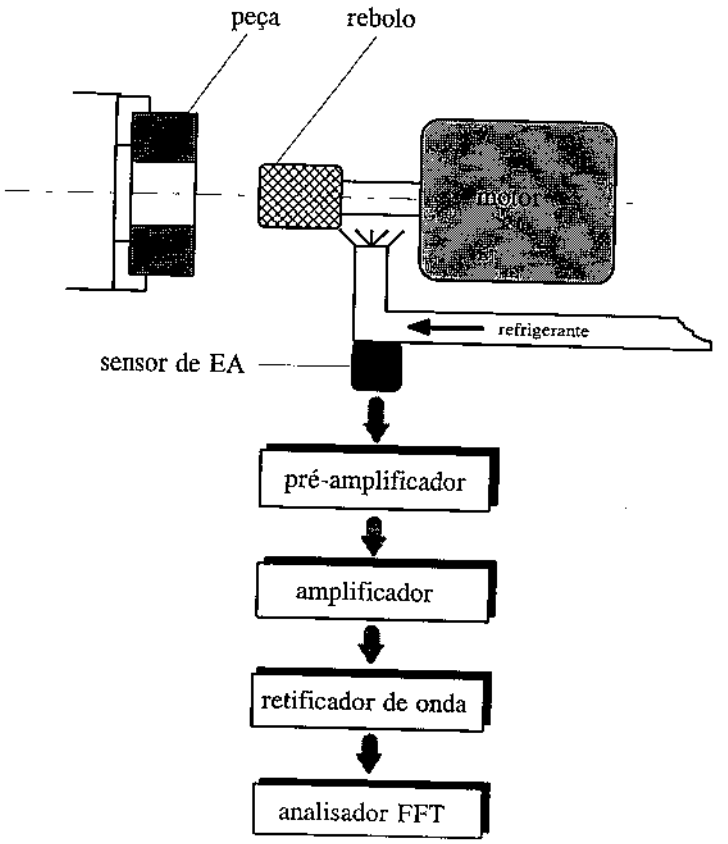


figura 3.4 : Exemplo de montegem para aquisição de dados via EA (Inasaki, 1990).

Os filtros podem ser do tipo passa-baixa, passa-alta ou passa-banda. O passa-baixa filtra as frequências acima de um valor determinado, deixando passar apenas as frequências baixas. O passa-alta filtra as frequências abaixo de um valor determinado, deixando passar apenas as altas frequências. O passa-banda é usado para filtrar uma banda de frequência eliminando as interferências mecânicas e elétricas. Exemplos destes tipos de filtros são apresentados na figura 3.5 (Konig, Meyer, 1990).

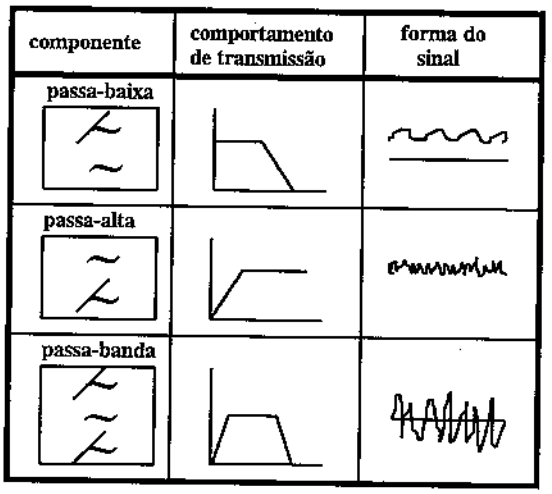


figura 3.5 : Tipos de filtros (Konig, Meyer, 1990).

Um retificador (ou voltímetro) RMS converte o sinal bruto saído do amplificador em uma voltagem direta cujo nível de sinal é proporcional a raiz quadrada da o sinal em bruto para calcular o seu valor RMS. Este sinal, após passar por uma placa de conversão analógico digital pode ser então armazenado num micro computador para que possa ser analisado posteriormente.

O sensor quando é conectado a um amplificador por um cabo longo, acaba perdendo sensibilidade. Uma maneira de se revolver este problema é usando um pré-amplificador que permite um ganho fixo de 40 ou 60 dB em relação ao sinal em bruto, e tem uma frequência de resposta entre 20 a 2000 KHz. Em geral é colocado perto do sensor. Os pré-amplificadores de sinal de EA são divididos entre aqueles com filtros de banda fixos e os com filtros de banda variáveis (Beattie, 1983).

Quando o sinal ao sair do sensor tem um grande percurso a percorrer, há uma grande perda de voltagem, havendo a necessidade de amplificar o sinal. Para resolver este problema pode-se dividir o sistema de amplificação do sinal em um pré-amplificador com ganho fixo (colocado perto do sensor) e um amplificador com ganho variável (colocado junto com os outros instrumentos de condicionamento de sinal). Os pré-amplificadores de emissão acústica são projetados para ter um frequência de resposta entre 20 KHz e 2 MHz, sem a utilização de filtro, isto é eles já funcionam como um pré-filtro. Quase sempre tem um ganho fixo de 40 ou 60 dB. O ganho pode ser medido em escala linear ou em escala logarítmica (decibéis). Muitos amplificadores podem ter filtro passa-banda embutidos (Beattie, 1983).

Os instrumentos de gravação possuem a cabeça de gravação e a cabeça reprodutora fixas e uma fita move-se sobre eles a alta velocidade. Os dados podem ser armazenados na fita, cada um com uma amplitude ou sinal de frequência modulada. Os gravadores mais antigos são máquinas complexas e não tem a reputação de apresentarem boa repetibilidade. Os mais atuais tem tamanho e peso mais reduzidos sem perderem repetibilidade, mais tem como desvantagem o preço elevado. Há a necessidade de se utilizar um gravador para que os dados possam ser posteriormente analisados (Beattie, 1983).

Os gravadores de vídeo diferem-se dos instrumentos de gravação devido à velocidade relativa entre a cabeça de gravação e a fita. No gravador de vídeo, a fita move-se a baixa velocidade sobre uma cabeça girante. A figura 3.6 apresenta a geometria de um gravador de vídeo.

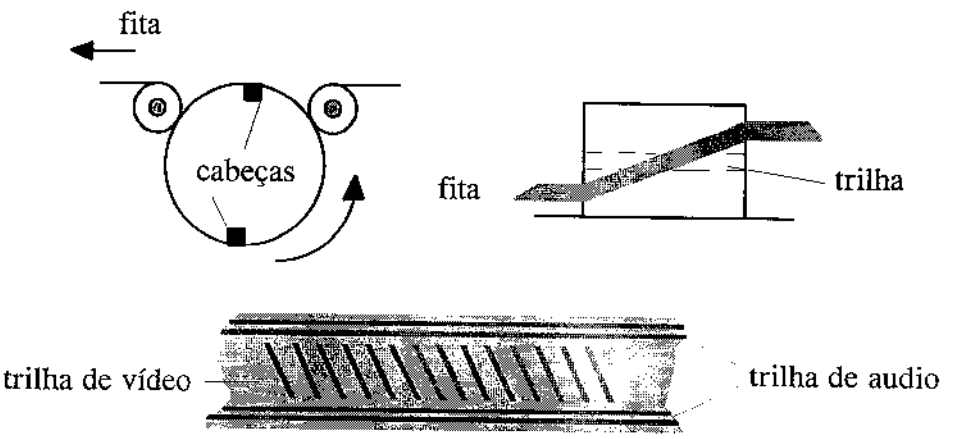


figura 3.6 : Geometria de um gravador de vídeo (Beattie, 1983).

Há geralmente duas cabeças de gravação que lêem ou escrevem o sinal de entrada sobre a fita, sequencialmente. Desde que a velocidade necessária entre a cabeça e a fita é fornecida primeiramente pela rotação da cabeça, a fita pode ser parada e o resultado da gravação pode ser exposta repetitivamente. Isto permite examinar transientes no sinal de EA (Beattie, 1983).

3.6) O MONITORAMENTO DA USINAGEM VIA EMISSÃO ACÚSTICA

A tendência atual quando do projeto de uma planta industrial é o emprego cada vez maior da automação nas etapas de um processo de fabricação. Neste contexto está inserido o Sistema Flexível de Manufatura (FMS) englobando uma série de sistemas que auxiliam a manutenção e o controle do sistema de produção. Em indústrias do ramo metal-mecânico, dentro dos inúmeros subsistemas que fazem parte do sistema de corte de metais, as ferramentas de corte (dentre os quais os rebolos de retificação) tem vida extremamente pequena quando comparada a outros componentes (máquinas operatrizes), tendo um efeito vital dentro da produtividade de uma dada máquina e na acuracidade dos elementos por eles produzidos (Kakino, 1894).

A tecnologia da emissão acústica expandiu-se durante a década passada no campo de corte de metal, sendo usada como uma ferramenta no monitoramento de operação de usinagem (Blum, Dornfeld, 1990). Dentro da Manufatura Integrada por Computador (CIM) tem-se o Monitoramento do Estado da Ferramenta (THM), do qual a emissão acústica é uma de suas principais ferramentas com a finalidade de monitoramento. Este sistema está instalado num complexo Sistema de Controle de Ferramentas (TMS), necessário para permitir o uso de Sistemas Flexíveis de Manufatura, trocas de ferramentas ou o supervisionamento de operações de usinagem (Blum, Dornfeld, 1990). Isto pode ser visualizado na figura 3.7.

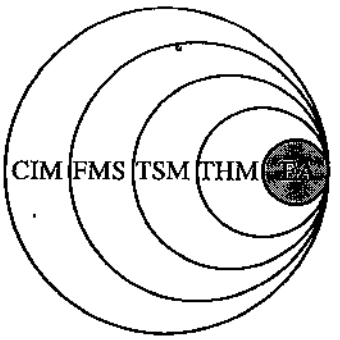


figura 3.7 : Monitoramento do estado da ferramenta, como um elemento da manufatura integrada por computador (Blum, Dornfeld, 1990).

Há uma forte demanda de sistemas de monitoramento confiáveis (Kakino, 1984). Vários métodos tem sido alvo de pesquisa para o monitoramento do comportamento das ferramentas em processos de usinagem ou dos próprios processos de usinagem (Inasaki, Wakuda, 1990). Tais métodos se enquadram dentro de duas categorias principais (Dan, Mathew, 1990) :

- Monitoramento direto : onde é avaliado o estado da ferramenta em estudo;
- Monitoramento indireto : onde são avaliados parâmetros que estão correlacionados com a grandeza em estudo.

Avanços na área de controle adaptativo e manufatura assistida por computador tem demandado sistemas de monitoramento adequados aos diversos ambientes onde os mesmos serão usados. No caso de monitoramento de desgaste de ferramenta a classificação dos métodos de sensoreamento pode ser visto na tabela 3.2 (Dan, Mathew, 1990).

Na operação de retificação nem sempre é fácil se obter os resultados requeridos. Isto se deve ao fato do processo de retificação ser afetado por uma grande gama de fatores que alteram a reprodutibilidade dos resultados. Como foi dito anteriormente o sinal de emissão acústica, gerado diretamente na zona de deformação do processo de corte relatando vigorosamente o mecanismo do processo, provê uma fonte segura para a investigação do centelhamento, do dressamento, da força de retificação e do desgaste do rebolo (Blum, Dornfeld, 1990).

Procedimento	medição	Transdutor	
direto	óptico	forma ou posição da aresta de corte	óptico, câmera de tv
	partículas desgastadas	tamanho das partículas	espectrofotômetro
	radioatividade	concentração de partículas	cintilador
	junção ferramenta-peça/resistência	mudança de resistência	voltímetro
	tamanho da peça	dimensão	micrômetros pneumáticos, eletromagnéticos, ultrassônicos
	distância ferramenta/peça	distância ferramenta/peça	calibrador, transdutor de deslocamento, micrométricos, pneumáticos
indireto	força de corte	mudança na força de corte	dinamômetros
	EMISSÃO ACÚSTICA	ONDAS DE TENSÃO	SENSOR DE EMISSÃO ACÚSTICA
	som	ondas acústicas	microfones
	temperatura	variação da temperatura de corte com a potência ou corrente do motor de avanço	termopar ou pirômetro
	potência de entrada	potência ou corrente do motor de avanço	amperímetro ou dinamômetro
	rugosidade superficial	mudança na rugosidade da peça	rugosímetro
	vibração	vibração da ferramenta ou do porta-ferramenta	acelerômetros

tabela 3.2 : Classificação dos métodos de monitoramento de ferramantas (Dan, Mathew, 1990).

Diversos trabalhos já foram apresentados na área de monitoramento via emissão acústica nas mais variadas áreas. A seguir tem-se alguns exemplos da aplicação desta técnica em algumas áreas, que não a usinagem.

Boness e McBride (1991) pesquisaram o uso da emissão acústica no estudo de adesão e desgaste abrasivo. Concluíram que existe uma correlação empírica entre o valor RMS integrado do sinal de Emissão Acústica e o volume de cavaco removido de uma bola

padronizada em um teste de bola rolando sobre um cilíndro, além de mostrar-se uma ferramenta valiosa no estudo do desgaste entre superfícies lubrificadas.

Hanchi e Klamecki (1991) pesquisaram o uso de emissão acústica para monitorar o processo de desgaste de metais por fricção. Os resultados demonstraram que mudanças na taxa do número de picos no sinal de Emissão Acústica são acompanhados por uma mudança na taxa de desgaste. A distribuição da amplitude bem como a energia do sinal indicam um forte potencial para o uso destes dois parâmetros na identificação de diferentes modos de fratura durante o processo de desgaste.

A retificação é um dos processos de usinagem que mais tem sido alvo de pesquisas visando a utilização da emissão acústica para seu monitoramento. A seguir, narra-se alguns destes trabalhos.

3.6.1) Emprego do monitoramento do processo de retificação via emissão acústica

Muitos estudos tem sido realizados para investigar a relação entre a emissão acústica e os processos de manufatura, estando a atenção voltada principalmente para aqueles processos que empregam ferramentas com uma única aresta de corte. Na retificação, a ferramenta é composta por grãos abrasivos individuais os quais tem geometria irregular e estão aleatoriamente distribuídos ao longo do perímetro do rebolo. Existem similaridades entre a geração de emissão acústica na retificação e nos outros processos citados anteriormente. As maiores fontes de geração de ondas de emissão acústica na retificação são:

- Escorregamento do grão abrasivo sobre a superfície de trabalho;
- Deformação plástica do grão e riscamento da superfície da peça de trabalho, sem a remoção de material;
- O processo de formação de cavaco durante a operação de retificação;

A figura 3.8-a mostra estas fontes (Konig, Meyen, 1990 e Blum, Dornfeld, 1990) :

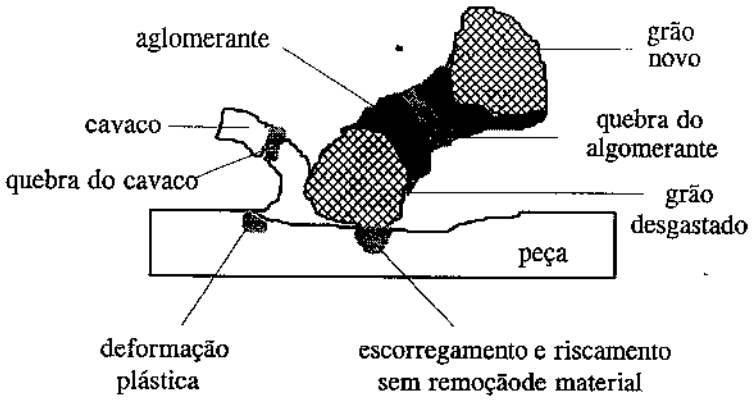


figura 3.8a : Geração de emissão acústica na retificação

(Konig, Meyen, 1990 e Blum, Dornfeld, 1990).

Na figura 3.8-b são apresentadas as três zonas de deformação que são fontes de emissão acústica.

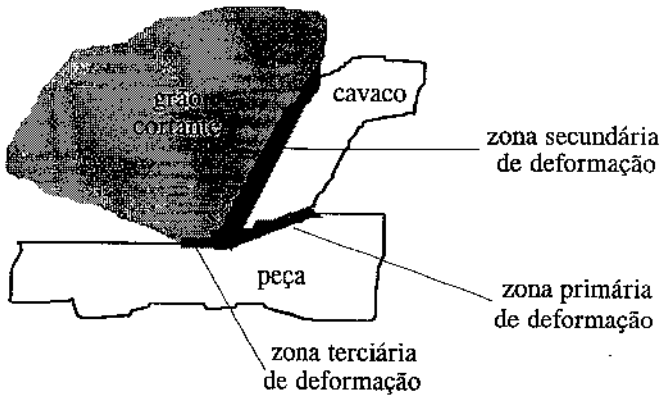


figura 3.8b :Principais áreas de interesse de geração de emissão acústica

(Konig, Meyen, 1990 e Blum, Dornfeld, 1990).

Na zona de deformação primária, que é também chamada de zona de cisalhamento, tem-se o início e o fim do proceso de formação de cavaco. Na zona secundária identifica-se a área de contato entre cavaco e grão. A zona terciária refere-se à área de contato entre peça de trabalho e grão na qual ocorre deformação plástica devido ao desgaste do grão abrasivo (Blum, Dornfeld, 1990).

Dornfeld e Cai (1984) concluíram em suas investigações que energia do sinal de emissão acústica (RMS^2) aumenta com o entupimento da porosidade do rebolo e que existe uma relação entre o RMS^2 e a profundidade de corte para o processo de retificação com rebolo recém dressado ou com rebolo desgastado. Os resultados obtidos mostraram que a aplicabilidade do uso de emissão acústica, como ferramenta de monitoramento de força de retificação, é muito boa. Devido à sua sensibilidade para detectar o contato rebolo-peça e reconhecer a etapa de centelhamento, a emissão acústica pode ser usada na otimização de tempo do ciclo de retificação. Tais resultados podem ser vistos nas figuras 3.9 e 3.10. Na figura 3.9 pode-se notar um decréscimo do valor de EA-RMS para um aumento no número de passadas do rebolo, tanto para um rebolo em início de vida quanto para um rebolo desgastado. Este resultado possibilita a determinação do número de passadas necessárias para o centelhamento, pois quando o valor de EA-RMS se torna constante já não há mais retirada de material e a operação pode ser interrompida. Na figura 3.10 são identificados três níveis de emissão acústica : 1) somente o ruído proveniente da instrumentação é detectado, 2) EA vinda da interação entre peça-fluido e rebolo-fluido e 3) EA gerada devido ao contato peça-rebolo. Isto possibilita a redução do tempo em vazio.

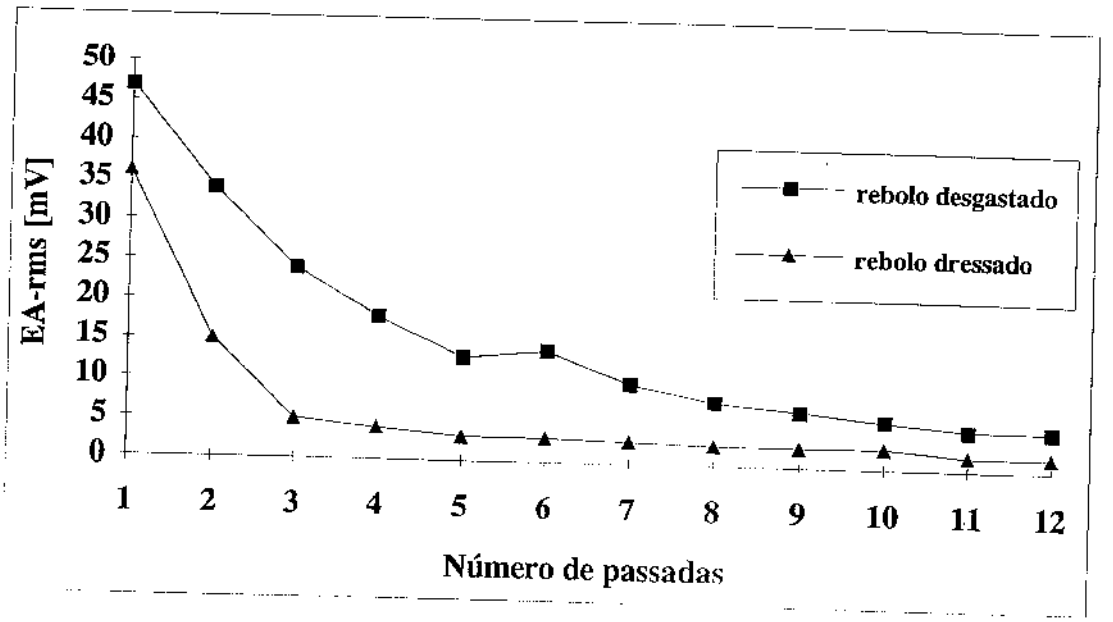


figura 3.9 : Valor médio de EA-rms versus número de passadas (Dornfeld, Cai, 1984).

Blum e Dornfeld (1990) constataram que embora existam diferenças entre os processos de torneamento e retificação, o sinal de Emissão Acústica é uma ótima fonte indireta de monitoramento em ambos os processos de usinagem. A alta sensibilidade do sinal frente às mudanças ocorridas no processo de retificação, fazem da emissão acústica uma ferramenta muito útil no monitoramento "on line" de ferramentas ou de processos. O uso para propósitos variados do sinal de Emissão Acústica gerado durante o processo de retificação torna possível o monitoramento do contato entre rebolo e peça de trabalho e identificação de períodos de centelhamento. Resultados experimentais sugerem que é possível o uso de Emissão Acústica como um sinal de controle em sistemas de controle adaptativo por otimização para operações de retificação.

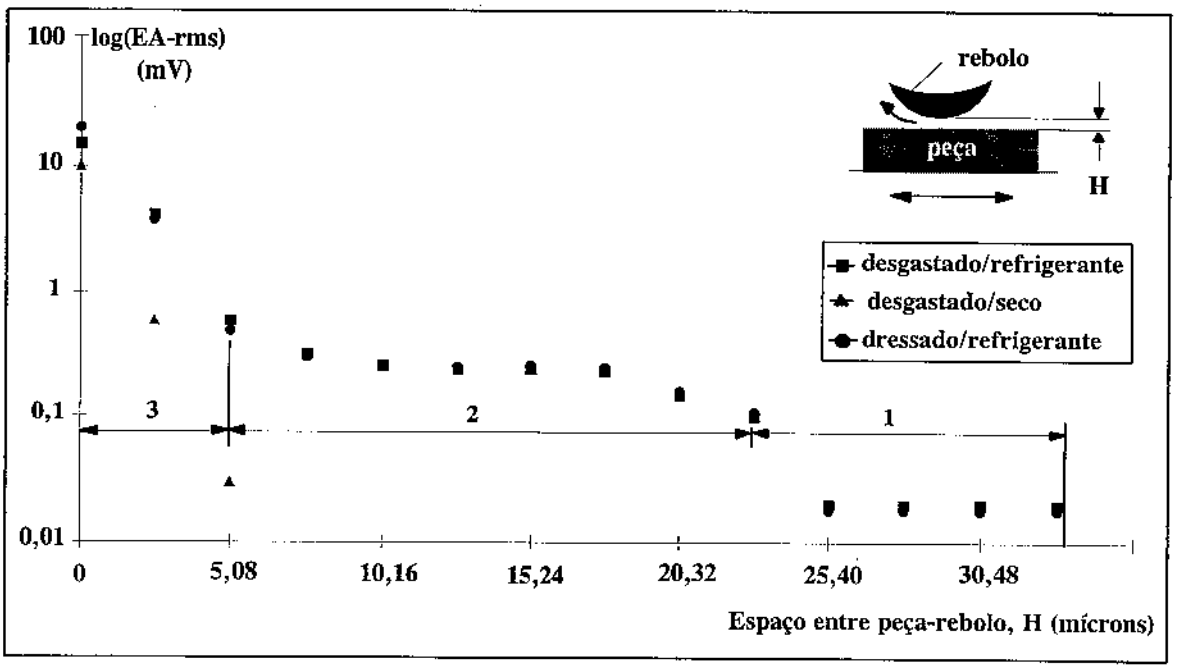


figura 3.10 : Variação da EA com a distância entre rebolo e peça (Dornfeld, Cai, 1984).

Inasaki e Okamura (1985) concluíram que o sensor de emissão acústica é uma ferramenta muito útil para monitorar o dressamento, bem como o processo de retificação. A vida do rebolo pode ser avaliada pela emissão acústica uma vez que os valores médios da amplitude do sinal de emissão acústica aumentaram a medida que elevou-se a energia necessária para o processo de retificação, evidenciando a possibilidade do uso de emissão acústica para avaliar a vida de rebolos.

Wakuda e Inasaki (1990) observaram em seus estudos que a emissão acústica, gerada durante o processo de retificação, tem provado estar bem relacionada com as condições do processo e com o grau de desgaste do ferramental usado durante o corte, tendo várias aplicações no processo de retificação.

Hiroshi et al, (1985) verificaram a correlação entre a existência de trincas térmicas durante o processo de retificação e a geração de ondas de emissão acústica. Eles observaram que quando surgem picos pontiagudos na amplitude do sinal, imediatamente após o término do processo de retificação, uma substancial quantidade de trincas é encontrada na superfície retificada podendo ser detectadas inclusive as trincas de tamanho pequeno.

Eda et al (1984) demonstraram em seus trabalhos que existe uma relação entre a coloração da superfície, onde ocorreu a queima, e algumas componentes do espectro de frequência, bem como a amplitude do sinal de emissão acústica. Além disso o sinal de emissão acústica aumenta com o decorrer do processo de queima.

No capítulo seguinte será exposta a parte teórica da técnica do centelhamento acelerado proposta por Malkin (1989) além de se avaliar a utilização da emissão acústica na implementação desta técnica.

Capítulo 4

Centelhamento Acelerado : aspectos teóricos e a utilização da emissão acústica para sua implementação.

4.1) INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo expor a teoria utilizada para avaliar o estágio de centelhamento dentro do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho, bem como mostrar alguns resultados práticos alcançados com o uso do monitoramento via emissão acústica para este fim. Foi utilizada a teoria desenvolvida por Malkin (1989), a qual será mostrada a seguir, que busca através de uma técnica chamada de Centelhamento Acelerado, a diminuição do tempo de centelhamento dentro do processo de retificação cilíndrica de mergulho, tornando-o mais "curto" que os ciclos convencionais. Segundo Malkin (1989), o tempo de centelhamento depende do quanto se quer remover da diferença dimensional gerada pela deformação elástica do sistema durante o transiente no início do ciclo, sendo necessário no centelhamento normal, um tempo de cerca de duas vezes o tempo gasto no estágio inicial de deformação elástica para eliminar 90% desta diferença. Os resultados obtidos com o monitoramento da retificação via emissão acústica provam que consegue-se estimar com boa precisão, os parâmetros necessários ao equacionamento desenvolvido por Malkin.

UNICAMP

4.2) Método do Centelhamento Acelerado descrito por Malkin (1989)

4.2.1) Formulação Matemática para a Retificação Cilíndrica de Mergulho

Para analisar a deformação elástica causada no sistema formado por máquina-rebolo-peça durante o processo de remoção de cavaco foi tomado o modelo mostrado na figura 4.1:

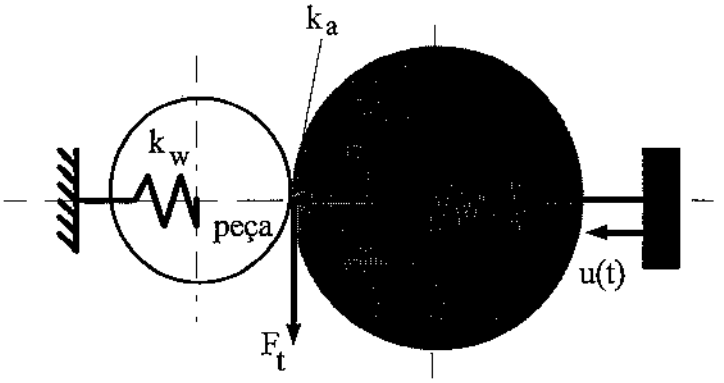


figura 4.1 : Modelo idealizado de retificação cilíndrica de mergulho (Malkin, 1990).

Com base neste modelo tem-se que a constante de rigidez do sistema máquina-rebolo-peça no sentido radial é dada por :

$$k_e^{-1} = k_s^{-1} + k_w^{-1} \tag{5}$$

onde :

k_e^{-1} : constante de rigidez do sistema;
k_s^{-1} ; constante de rigidez do rebolo;
k_w^{-1} : constante de rigidez da peça;

A zona de contato entre rebolo peça contém uma certa flexibilidade que é representada pela constante de rigidez k_a. Assim a constante de rigidez do sistema é dada por

$$k_e^{-1} = k_a^{-1} + k_s^{-1} + k_w^{-1} \tag{6}$$

onde :

k_a : constante de rigidez do contato.

Desprezando-se o desgaste do rebolo, durante a retificação com avanço controlado, na fase de deformação elástica, a velocidade de avanço real v(t) é menor que

a velocidade de avanço comandado na máquina u(t) e esta diferença é dada pela taxa de deformação elástica do sistema máquina-rebolo-peça ($\frac{d\varepsilon}{dt}$), que é expressa por :

$$u(t) - v(t) = \frac{d\varepsilon}{dt} \tag{7}$$

onde a deformação elástica é dada por : $$\varepsilon = \frac{F_n}{k_e} \tag{8}$$

onde F_n é a força radial.

Assumindo-se que F_n é proporcional à taxa de remoção volumétrica de material (Q_w) tem-se :

$$F_n = F_0 . Q_w \tag{9}$$

onde F_0 é uma constante de proporcionalidade.

Para uma dada velocidade da peça (v_w) e largura de retificação (b), F_n é proporcional ao avanço radial por volta da peça (a):

$$F_n = k_c . a \tag{10}$$

Agrupando-se a equação (9) com a equação (10) temos que :

$$k_c = F_0 . b . v_w \tag{11}$$

Neste caso é conveniente colocar a força normal em função da velocidade de mergulho (v). A figura 4.2 apresenta uma operação de retificação cilíndrica de mergulho.

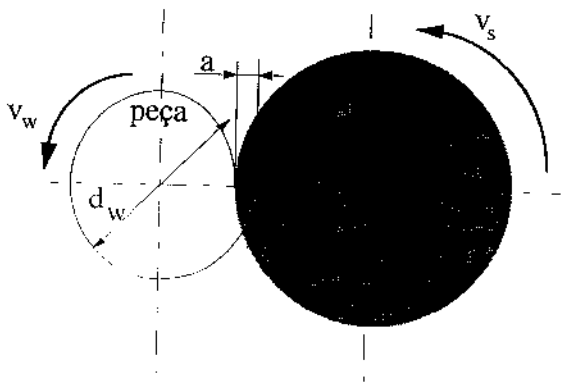


figura 4.2 : Retificação cilíndrica de mergulho (Malkin, 1990).

Sendo a taxa de remoção de material é dada por :

$$Q_w = d_w.b.v.\pi \tag{12}$$

portanto :

$$F_n = \pi.b.d_w.F_0.v \tag{13}$$

onde :

$$F_n = F_v.v \tag{14}$$

Das equações (7) (8) e (14) temos que :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{\tau}[u(t) - v(t)] \tag{15}$$

onde :

$$\tau = \frac{F_v}{k_e} \tag{16}$$

sendo que τ é a constante de tempo do sistema (tempo gasto com a deformação elástica) e $\frac{dv}{dt}$ é a aceleração radial do rebolo.

Na equação (16) tem-se a dificuldade de se obter os valores de F_v e de k_e . Uma maneira experimental de se estimar o valor da constante τ é através da medição do atraso na dimensão do raio, no estágio de retirada de material com movimentação de mergulho, com o uso de um apalpador e dividir este valor por u_1 . Na retificação cilíndrica de mergulho, os valores de τ caem geralmente dentro da faixa de 0,5s a 1,0s para retificação externa e entre 1,0s e 10,0s para retificação interna. Deve-se lembrar que τ é inversamente proporcional à constante de rigidez do sistema.

A taxa de redução do raio é :

$$\frac{dr}{dt} = v(t) \tag{17}$$

onde r é a redução acumulada no raio da peça.

O processo de redução no raio da peça durante a retificação é dado pelas equações (15) e (17) juntamente com as condições iniciais $v(0)= v_0$ e $r(0)=r_0$.

4.2.2) Ciclo de retificação cilíndrica de mergulho convencional

Na figura.4.3 tem-se um ciclo de retificação cilíndrica de mergulho tradicional.

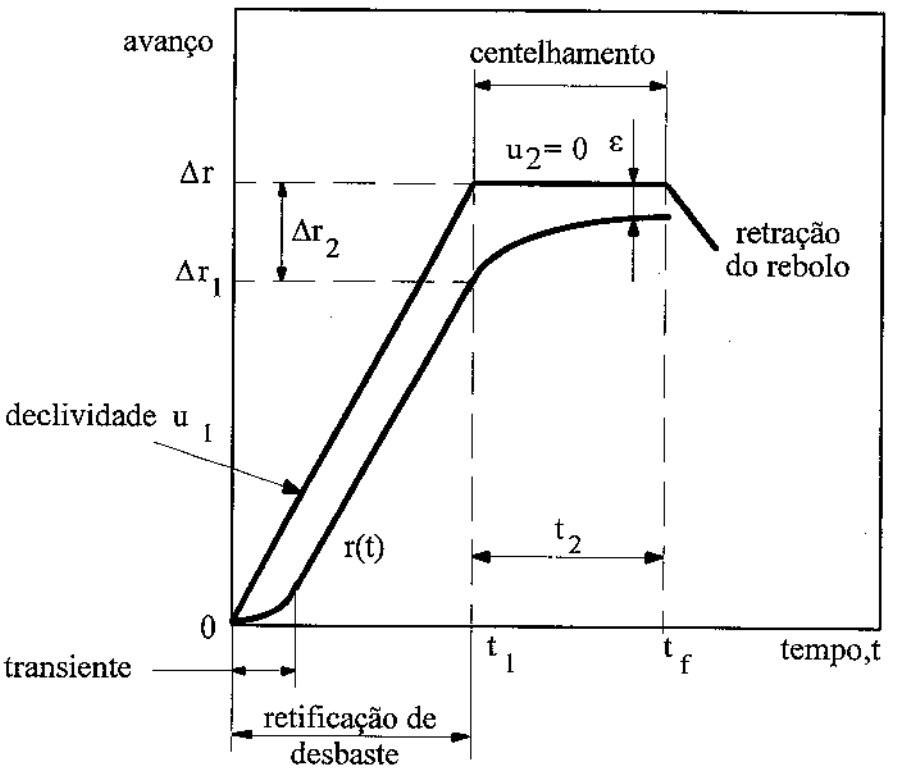


figura 4.3 : Ciclo convencional de retificação cilíndrica de mergulho (Malkin, 1989).

Pode-se notar neste ciclo, que após um transiente, tem-se um estágio de retificação de "desbaste" com retirada de material com velocidade de mergulho controlada u_1, seguida por um período de centelhamento com velocidade controlada u_2=0 . Resolvendo as equações (15) e (17) para o estágio de retificação de desbaste, com as condições : v(0) = 0 e r(0) = 0 tem-se que :

$$v(t) = (1 - e^{-t/\tau}).u_1 \qquad (18)$$

$$r(t) = (t + \tau.e^{-t/\tau} - \tau).u_1 \qquad (19)$$

No início do processo ocorre um transiente no qual se dá a deformação elástica do sistema máquina-rebolo-peça. Após este período a velocidade de mergulho real, que

corresponde à declividade da curva r(t), aproxima-se da velocidade de mergulho controlada. A rapidez com que ocorre este transiente depende da constante de tempo do sistema, chamada de τ , ou seja, da rigidez do sistema e também de F_v . Para um tempo de retificação $t >> \tau$ tem-se o chamado estado estacionário, onde ocorre que :

$$u_1 = v(t) \tag{20}$$

$$r(t) = u_1.t - u_1.\tau \tag{21}$$

sendo que a quantidade $u_1.\tau$ representa o atraso ocorrido no raio.

Após o término do estágio de retirada de material com movimentação de avanço, segue-se a fase de centelhamento, com $u(t) = 0$, no qual ocorre retirada de material sem a movimentação de mergulho. Tal estágio visa a remoção de material proveniente da recuperação das deformações elásticas sofridas durante o início da retificação (transiente). Busca-se eliminar o atraso dimensional ocorrido no raio da peça.

Resolvendo as equações diferenciais (15) e (17) para o intervalo $t_1 \leq t \leq t_f$ com as condições iniciais que correspondem ao início do estágio de centelhamento, ou seja, equações (20) e (21) com $t = t_1$ para $t_1 \geq \tau$ temos :

$$v(t) = u_1.\exp(-\frac{t - t_1}{\tau}) \tag{22}$$

$$r(t) = u_1.t_1 - u_1.\tau.\exp(-\frac{t - t_1}{\tau}) \tag{23}$$

Na equação (23) o primeiro termo representa o avanço acumulado total Δr durante o estágio de retirada de material com movimentação de mergulho, e o segundo corresponde à deformação elástica, a qual decresce exponencialmente a zero.

4.2.3) Ciclo Retificação Cilíndrica de Mergulho com centelhamento acelerado

Um modo de se reduzir o tempo de centelhamento e consequentemente o tempo total do ciclo de retificação é alterar o ciclo de retificação como mostrado na figura 4.4.

A idéia deste método é ultrapassar a dimensão desejada de um valor pré-determinado com a velocidade de mergulho de trabalho (u_1) e depois voltar à dimensão desejada com uma velocidade de recuo (u_m)

Na retificação cilíndrica pode ocorrer que um intervalo de tempo correspondente ao tempo para se dar uma volta da peça ($1/n_w$) seja necessário com o intuito de se completar o centelhamento ao redor de todo o perímetro da peça, especialmente em peças de diâmetro grande a baixas rotações.

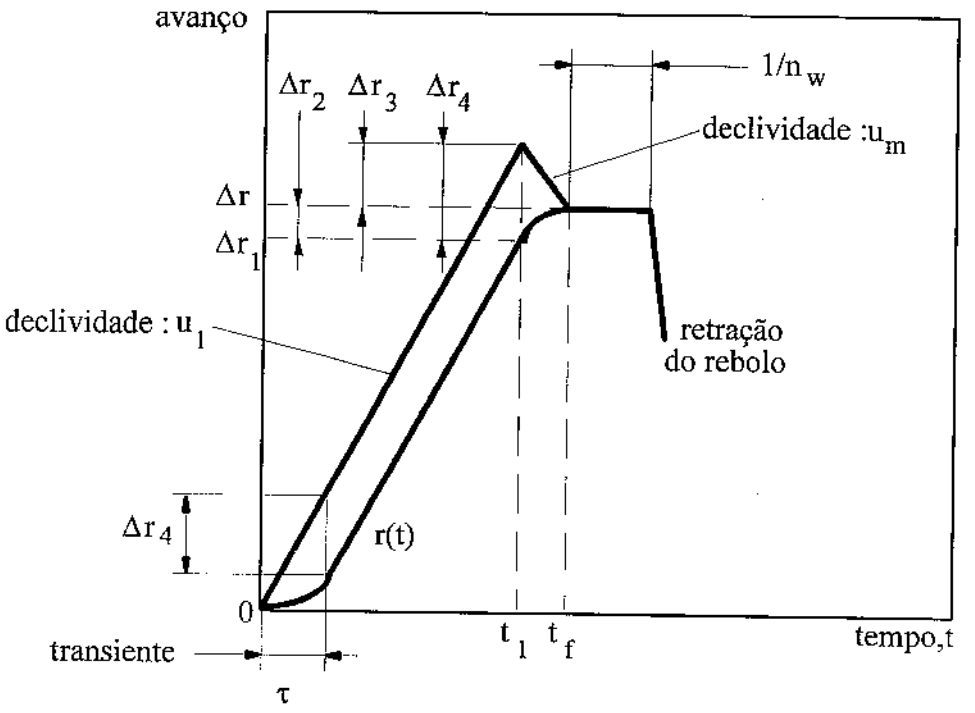


figura 4.4 : Ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com centelhamento acelerado (Malkin, 1990).

Usando o equacionamento já obtido para o ciclo de retificação convencional para $t = t_1$ no ciclo de retificação com centelhamento acelerado, temos das equações (18) e (19) que a velocidade de mergulho real e o avanço acumulado são dados por :

$$v(t_1) = (1 - e^{-t_1/\tau}).u_1 \qquad (24)$$

$$r(t_1) = (t_1 + \tau.e^{-t_1/\tau} - \tau).u_1 \qquad (25)$$

Tomando estes valores como condição inicial o comportamento do ciclo durante o centelhamento acelerado é dado resolvendo-se as equações (15) e(17) :

$$v(t') = e^{-t'/\tau}.(1 - e^{-t'/\tau}) + (1 - e^{-t'/\tau}).u_m \qquad (26)$$

$$r(t') = r(t_1) + \tau.(1 - e^{-t'/\tau}).(1 - e^{-t_1/\tau}).u_1 + (t' + \tau.e^{-t'/\tau} - \tau).u_m \qquad (27)$$

onde $t' = t - t_1$. Para simplificar estas relações assume-se que as condiçoes de estado estacionário foram atingidas no fim do estágio de retificação bruta, logo :

$$v(t') = u_1.e^{-\frac{t'}{\tau}} + (1 - e^{-\frac{t'}{\tau}}).u_m \qquad (28)$$

$$r(t') = r(t_1) + \tau.(1 - e^{-\frac{t'}{\tau}}).u_1 + (t' + \tau.e^{-\frac{t'}{\tau}} - \tau).u_m \qquad (29)$$

O tempo total requerido para cada estágio é dado por :

$$t_1 = \frac{\Delta r}{u_1} - \frac{\tau}{u_1}.[u_m.\ln(\frac{u_1 - u_m}{-u_m})] \qquad (30)$$

$$t_2 = t_f - t_1 = \tau.\ln(\frac{u_1 - u_m}{-u_m}) \qquad (31)$$

Somando-se a contribuição de cada estágio do ciclo, o tempo total do ciclo de retificação (negligenciando o tempo de permanência final dado por n_w^{-1}) é dado por :

$$t_f = \frac{\Delta r}{u_1} + [(1 - \frac{u_m}{u_1}).\ln(\frac{u_1 - u_m}{-u_m})] \qquad (32)$$

O primeiro termo será o tempo para se remover o Δr total permitido num sistema infinitamente rígido, e o segundo termo corresponde ao tempo adicional devido o transiente.

Com o intuito de implementar a estratégia de centelhamento acelerado, necessita-se especificar o tempo t_1, o qual é o ponto de mudança de u_1 para u_m. Na prática o tempo t_1 não pode ser medido com suficiente precisão, devido à variação no diâmetro inicial das peças que chegam de outros processos de fabricação anteriores à retificação. Tem sido proposto mudar a velocidade de avanço de u_1 para u_m quando a compensação remanescente Δr_2, medida com um apalpador, atingir um valor especificado.

Combinando as equações (17) e(27) tem-se que :

$$\Delta r_2 = \Delta r - r(t_1) = u_1.\tau + u_m.\tau.\ln(\frac{u_1 - u_m}{-u_m}) \qquad (33)$$

Em geral, a performace do sistema pode ser limitada pela precisão com que Δr_2 pode ser medido em processo. Uma vez especificada o valor de Δr_2 , a velocidade de retrocesso u_m pode ser obtida resolvendo-se a equação (33). Este cálculo é muito tedioso, mas pode ser mostrado que para $0,2 \leq (\Delta r_2 / u_1.\tau) \leq 0,8$ é uma boa aproximação para o cálculo de u_m , segundo Malkin (1984). Assim, com a equação abaixo e mais a atribuição de um valor para a relação $\Delta r_2/u_1.\tau$ dentro do intervalo sugerido, só resta determinar o valor de τ para que Δr_2 e um possam ser calculados :

$$u_m = -u_1.e^{(1,65-5,15\frac{\Delta r_2}{u_1.\tau})} \qquad (34)$$

Foi então sugerido um valor de $(\frac{\Delta r_2}{u_1.\tau}) = 0,3$ pois este valor substituido na equação (34) fornece um valor de $u_m = u_1$. De posse do valor de τ, que será calculado através deste trabalho por emissão acústica, pode-se então calcular o valor de Δr_2 . Feito isto pode-se calcular a quantidade de sobremetal a ser avançada além da dimensão desejada (Δr_3).

$$\Delta r_3 = \Delta r_4 - \Delta r_2 \qquad (35)$$

$$\Delta r_4 = u_1.\tau - \frac{u_1.\tau}{e} = u_1.\tau.(1-\frac{1}{e}) \qquad (36)$$

A constante de tempo τ, que é necessária para o cálculo de u_m, pode ser estimada em processo medindo-se o atraso estacionário no estágio de retificação bruta e dividindo-se este valor por u_1, como mencionado anteriormente. Este procedimento porém, não tem grande precisão devido aos diferentes sobremetais das peças que chegam para a retificação.

4.3) Ensaios preliminares

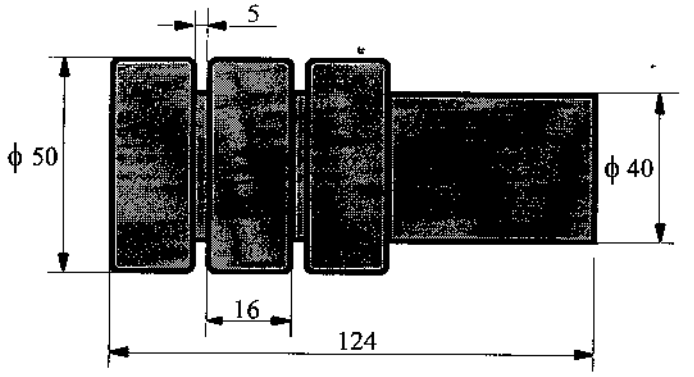
4.3.1) Introdução

Os ensaios a seguir foram realizados com o objetivo de se propor um método para o cálculo da constante de tempo do sistema máquina-rebolo-peça, e da duração do centelhamento, baseado na emissão acústica, além de se avaliar o comportamento do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho via emissão acústica.

4.3.2) Metodologia dos ensaios preliminares

Os ensaios preliminares consistiram de operações de retificação cilíndrica de mergulho (movimentação de avanço apenas no sentido radial), onde um corpo de prova de aço ABNT 4340 em duas versões de tratamento térmico, uma sem tratamento térmico com uma dureza superficial média de 28Rc e outra temperada com dureza superficial média de 52 Rc, eram retificados, mudando-se apenas as condições de avanço radial (velocidade de mergulho).

O esboço do corpo de prova utilizado está mostrado na figura 4.5.



dimensões em [mm]

figura 4.5 : Esboço do corpo de prova.

Este corpo de prova foi fixado por placa e ponto, sendo o sensor fixado no contra-ponto através do mecanismo apresentado na figura 4.6.

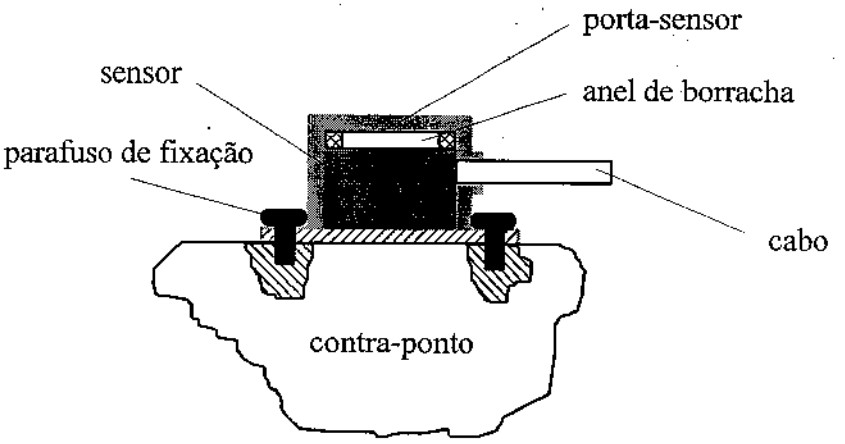


figura 4.6 : Esquema de fixação do sensor.

As condições de trabalho dos ensaios são :

- Velocidade de Mergulho [mm/s] :

baixa	alta
0,012	0,020
0,018	0,040
0,024	0,060

- Rotação da peça : 120 RPM

- Rotação do rebolo : 2000 RPM
- avanço radial por volta da peça : 0,02 mm/volta.
- fluido de corte : presente (óleo solúvel);
- Tipo de máquina : Retificadora Cilíndrica marca FERDIMAT
- Rebolo :

    a) tamanho : 350 x 19 x 127 mm

    b) especificação : D-A-46-K-5-V-10-W

        D : prefixo do fabricante

        A : tipo de grão abrasivo : óxido de alumínio

        46 : tamanho do grão abrasivo

        K : indicação de adesão do grão abrasivo :

        leve média forte

        A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

        5 : tipo de estrutura (densa: 1 a 16, aberta mais de 16)

        V : tipo de algomerante : vitrificado

        10 : identificação do rebolo pelo fabricante, uso opcional

        W : identificação do rebolo pelo fabricante, uso opcional

    c) marca : Carborundum

- As condições de dressagem são dadas a seguir (Malkin, 1989, Nussbaum, 1988) :

    a) tipo de dressador : ponta única de diamante

    b) profundidade de penetração do dressador (a_d) : 30 μm

    c) largura de atuação do dressador (b_d) : 0,65 mm

    d) passo de dressagem (s_d) : 0,13 mm/volta

    e) grau de recobrimento (U_d) : 5

Foi montada a bancada de experimentos, mostrada na figura 4.7, para que se efetue a coleta de dados.

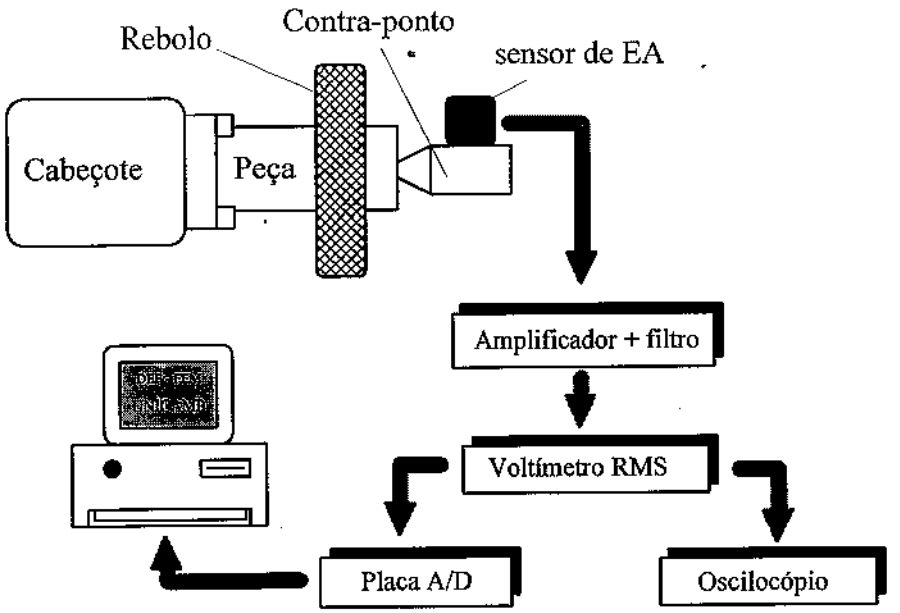


figura 4.7: Bancada de experimentos.

Para se ajustar a máquina na velocidade de mergulho desejada foi utilizado um relógio comparador, colocado no cabeçote da máquina, e um cronômetro. Eram feitas medições sucessivas de distância percorrida pelo cabeçote e de tempo. Pela divisão de ambos chegava-se ao valor da velocidade de mergulho. Este método foi utilizado pelo fato da máquina não possuir um avanço controlado na direção radial. No voltímetro RMS foi usado uma constante de tempo de 2 ms.

Para iniciar os ensaios que não objetivavam a coleta do início do ciclo de retificação, o rebolo era aproximado à peça até tocá-la, posição na qual era deixado até se regularizar a dimensão do diâmetro.

Nos ensaios onde o início do ciclo era importante o mesmo procedimento anterior era realizado porém, antes de se iniciar o corte, o rebolo era afastado a uma distância de 0,01 mm no raio. Feito isto, era acionada a retificadora com a velocidade de mergulho desejada e a aquisição dos dados era acionada. Em todos os ensaios o fim da aquisição ocorria quando o número de pontos aquisitados alcançavam o valor estabelecido pelo programa de aquisição.

O final dos ensaios era possível de ser observado pelo decaimento do sinal de EA, na tela do osciloscópio, até um nível mínimo.

Os dados coletados eram armazenados no disco rígido de um computador PC 286 na forma de arquivo de pontos. Para a análise destes pontos foram utilizados aplicativos em ambiente Windows como Excel e Matlab.

4.3.3) Resultados e Discussões

As figuras 4.8a, 4.8b e 4.9a, 4.9b mostram exemplos dos sinais de EA provenientes respectivamente da fase inicial do ciclo de retificação e de centelhamento.

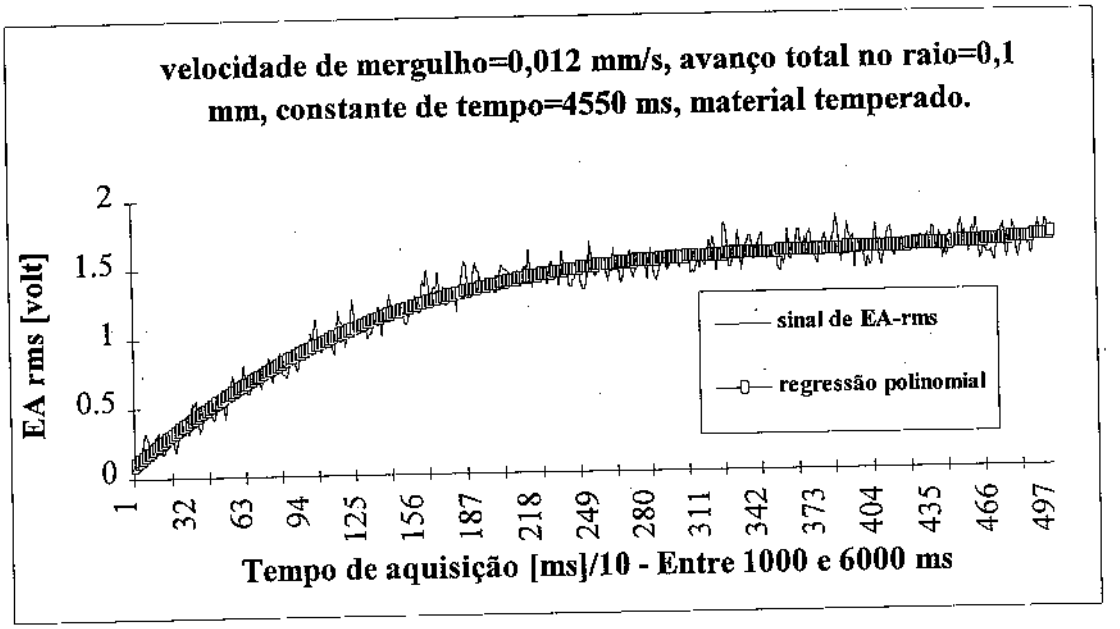


figura 4.8a : Sinal de EA do início do ciclo de retificação com material temperado.

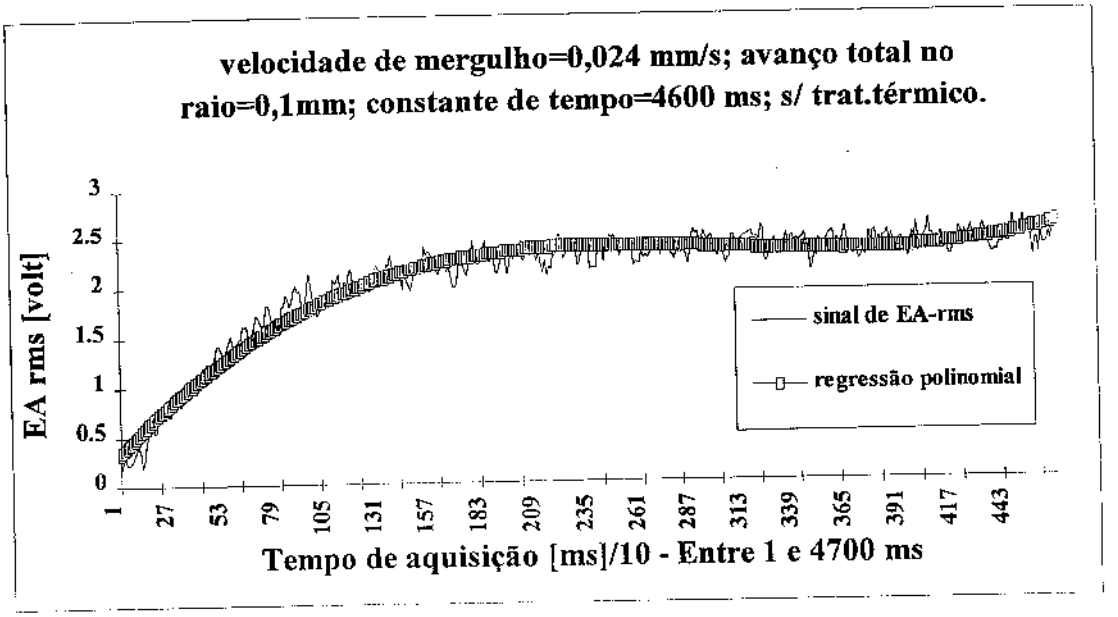


figura 4.9b : Sinal de EA do início do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho para material sem tratamento térmico.

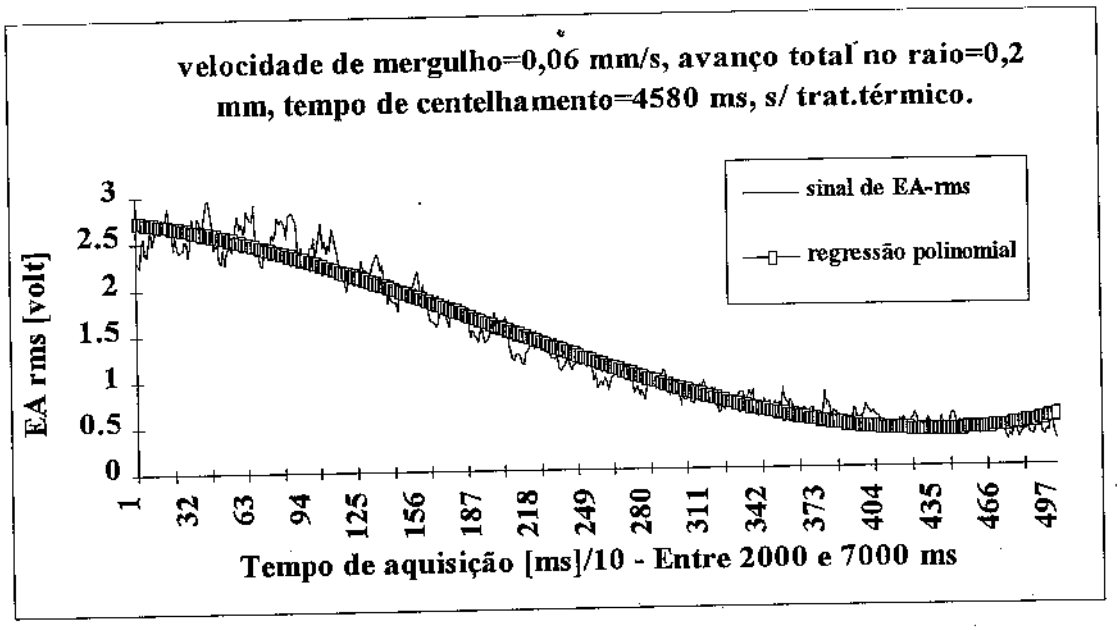


figura 4.9a : Sinal de EA do centelhamento com velocidade de mergulho de 0,06 mm/s.

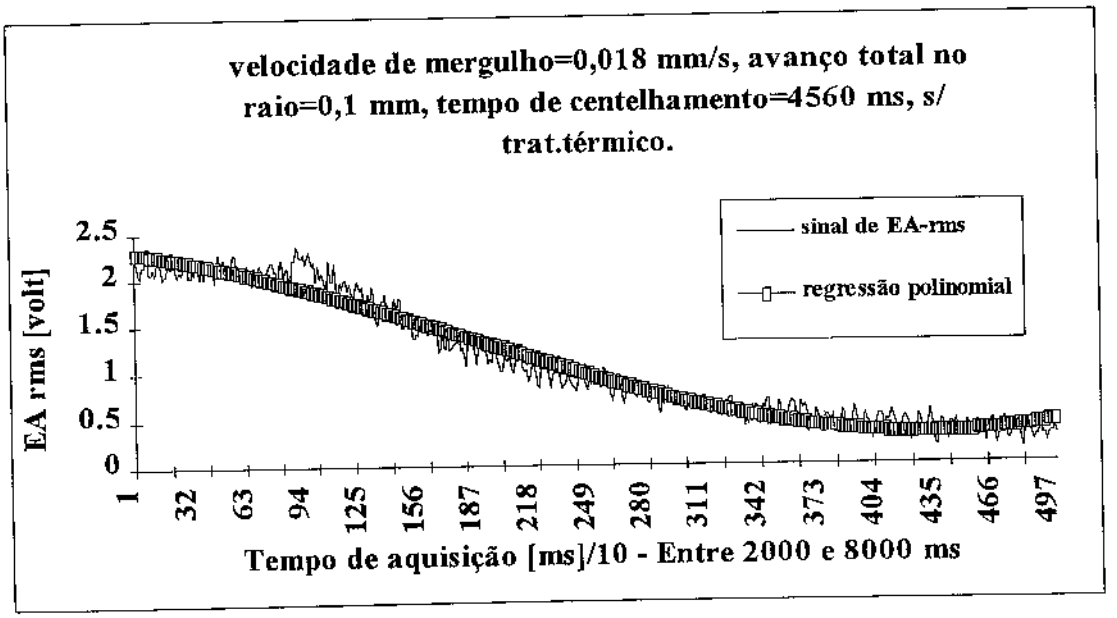


figura 4.9b : Sinal de EA do centelhamento com velocidade de mergulho de 0,018 mm/s.

Fica claro nestas figuras que a emissão acústica é uma ferramenta valiosa para se estabelecer exatamente o final da fase de centelhamento e o final do estágio de deformação elástica inicial do sistema no ciclo de retificação. Para isto, basta estabelecer o momento em que as curvas das figuras 4.10a e 4.10b param de decrescer (derivada igual a

zero), quando se deseja calcular o fim da fase de centelhamento, ou estabelecer o momento em que as curvas das figuras 4.9a e 4.9b param de crescer (também derivada igual a zero), quando se deseja calcular o final do estágio de deformação elástica. Foi desenvolvido um programa computacional uitlizando o software MATLAB que calcula estes instantes baseado no valores gerados por uma regressão polinomial aplicada à curva dos sinais de EA-rms e calcula a velocidade de retorno u_m. Este programa está mostrado no apêndice no final do trabalho.

A tabela 4.1 mostra os valores do tempo de centelhamento e da constante de tempo τ para os ensaios realizados.

Além das conclusões já citadas acima que apontam para a viabilidade do uso de emissão acústica no estabelecimento do fim da fase de centelhamento e da constante de tempo τ, a análise das figuras 4.9a, 4.9b, 4.10a, 4.10b e da tabela 4.1, permite as seguintes conclusões :

velocidade de mergulho [mm/s]	tratamento térmico da peça	tempo de centelhamento [ms]	constante de tempo,τ , [ms]
0,012	ausente	não calculado	5958
0,012	têmpera	não calculado	4550
0,018	ausente	4560	3844
0,018	têmpera	não calculado	3820
0,024	ausente	não calculado	4600
0,024	têmpera	não calculado	4110
0,060	ausente	4580	não calculado

tabela 4.1 : Tempo de centelhamento e constante de tempo τ.

- A EA é bastante sensível à variação da quantidade de material removida na unidade de tempo, no processo de retificação. Esta característica possibilita visualisar bem o início do ciclo, bem como o estágio de centelhamento.
- A EA visualiza bem a deformação elástica do sistema dando uma idéia de sua rigidez, que pode ser observado pela ordem de grandeza da constante de tempo do sistema. Segundo Malkin (1989) quanto maior a rigidez do sistema, menor será o tempo para o

sistema se deformar e consequentemente menor é a deformação elástica. Uma análise melhor da influência do avanço radial e da dureza da peça no valor deτ será realizada no próximo capítulo, onde a máquina utilizada possui maior rigidez.

Frente a estes resultados, chega-se a conclusão de que o uso de EA é viável para o cálculo da constante de tempo do sistema, embora os valores obtidos estejam fora do esperado por Malkin (1989) para retificação cilíndrica externa. Isto se deve ao fato da máquina utilizada não apresentar rigidez suficiente, o que se traduz diretamente no valor da constante de tempo, aumentando-a.

Como a máquina utilizada não apresentava mecanismo de controle de avanço radial, será necessário o uso de uma máquina CNC para a implementação da estratégia de centelhamento acelerado, baseado nos valores de τ calculados usando sinais de EA.

A próxima etapa de ensaios, descrita no capítulo seguinte, teve este propósito, isto é, verificar se realmente o valor deτ pode ser calculado usando EA e qual o prejuízo para a peça em termos de tolerâncias dimensionais e de forma e em termos de rugosidade superficial, quando se adota o centelhamento acelerado.

Capítulo 5

Implementação do centelhamento acelerado numa retificadora CNC

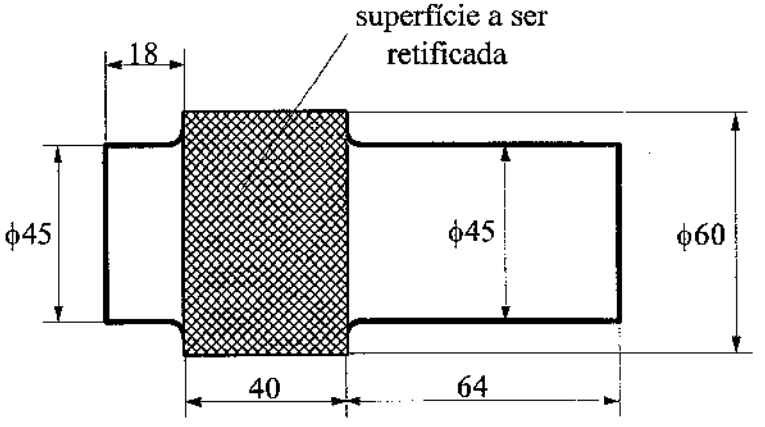
5.1) INTRODUÇÃO

A viabilidade de utilização do centelhamento acelerado em um ciclo de retificação cilíndrica de mergulho, com o auxílio da emissão acústica, foi verificada no capítulo anterior, onde a emissão acústica demonstrou ser uma ferramenta de grande valia para o cálculo dos parâmetros envolvidos na implementação da estratégia do centelhamento acelerado (em especial da constante de tempo do sistema τ). Sendo a retificação um processo de fabricação relativamente dispendioso e que geralmente constitui-se em gargalo na produção, é de interesse que o tempo de retificação seja o menor possível por razões óbvias. Além disso o percentual do tempo total de retificação dispendido com o centelhamento convencional é muito grande, em operação de retificação cilíndrica de mergulho. Diminuir este tempo significa reduzir consideravelmente o tempo total do ciclo de retificação.

Este capítulo tem por objetivo implementar a estratégia do centelhamento acelerado num ciclo de retificação cilíndrica de mergulho e efetuar uma comparação com um ciclo convencional, buscando a otimização do tempo de ciclo de retificação, reduzindo a parcela, deste ciclo, referente ao tempo de centelhamento. Isto foi feito calculando-se o tempo de centelhamento de ambos os ciclos para condições de trabalho diferentes, e efetuando-se uma comparação entre os dois. Comparou-se também a qualidade da peça obtida com os dois ciclos, em termos de circularidade e de rugosidade superficial.

5.2) METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Todos os ensaios consistiram em fazer a operação de retificação cilíndrica de mergulho num corpo de prova cilíndrico como o da figura 5.1. Foram realizados basicamente quatro tipos de ensaios. No primeiro foram retificados corpos de prova sem tratamento térmico, com dureza superficial de 27 Rc, no segundo usou-se corpos de prova temperado com dureza superficial de 52 Rc. Em todos os ensaios usaram-se cinco valores diferentes de velocidade de mergulho e o centelhamento era o convencional. Após cada troca de velocidade de mergulho o rebolo era dressado para garantir a influência mínima do desgaste do rebolo nos resultados finais.Os dados adquiridos para este tipo de ensaio (valores de EA-rms) alimentavam um programa de um computador PC 286 (o mesmo usado no capítulo anterior) que realizava os cálculos para a obtenção dos parâmetros que seriam utilizados na implementação do centelhamento acelerado. Definidos estes parâmetros, eram efetuados o terceiro e o quarto tipo de ensaios. O terceiro ensaio possuia as mesmas condições primeiro e o quarto as mesmas condições do segundo, com a diferença de possuírem centelhamento acelerado.



dimensões em [mm]

figura 5.1 : Esboço do corpo de prova.

A fixação do corpo de prova foi feita entre pontos, tomando-se o cuidado de colocar graxa nos furos de centro do corpo de prova para que não houvesse geração de

ruídos no sinal de EA, além do que uma possível camada de ar existente entre o acoplamento do contra-ponto com o corpo de prova poderia servir como um atenuador do sinal de EA gerado na região de corte.

O sensor foi colocado no mesmo dispositivo (porta-sensor, feito em aço ABNT 1045) usado nos ensaios preliminares do capítulo anterior. Este dispositivo foi fixado por parafusos também no contra-ponto, para que o sensor pudesse ficar o mais próximo possível da região de corte, diminuindo o número de interfaces entre a região geradora do sinal de EA e a superfície do sensor, o que contribui para uma menor atenuação do sinal de EA. A pressão do sensor contra o corpo de prova era dada por um anel de borracha dura.

A medição dos parâmetros indicadores da qualidade superficial foi feita numa bancada de medições, após a realização de cada ensaio. A bancada era composta por um rugosímetro, com o qual se media a rugosidade superficial (R_a e $R_{máx}$), e por relógio comparador (Mitutoyo com 0,001 mm de menor divisão) com o qual se media a batida radial. A medição da rugosidade era feita na própria bancada. Foram efetuadas três medições de rugosidade, uma a cada 120^0 ao longo de uma volta da peça à cada ensaio. A medição da circularidade era feita na retificadora, com a peça entre pontos. Nos ensaios foi utilizada uma retíficadora à comando numérico ZEMA como é apresentado na figura 5.2.

Foram empregadas as seguintes condições de trabalho :

- Velocidade de mergulho (mm/s):

  a) 0,011 d) 0,017

  b) 0,013 e) 0,020

  c) 0,015

- Velocidade periférica da peça : 25 m/min (para ambos os materiais)
- Velocidade do rebolo :45 m/s
- Avanço radial total (no raio) : 0,15 mm
- Fluido de corte : óleo solúvel;
- Tipo de máquina : Retificadora Cilíndrica CNC, marca ZEMA

- Rebolo :

  a) tamanho : 500 x 50 mm

  b) especificação : A A 80 K V

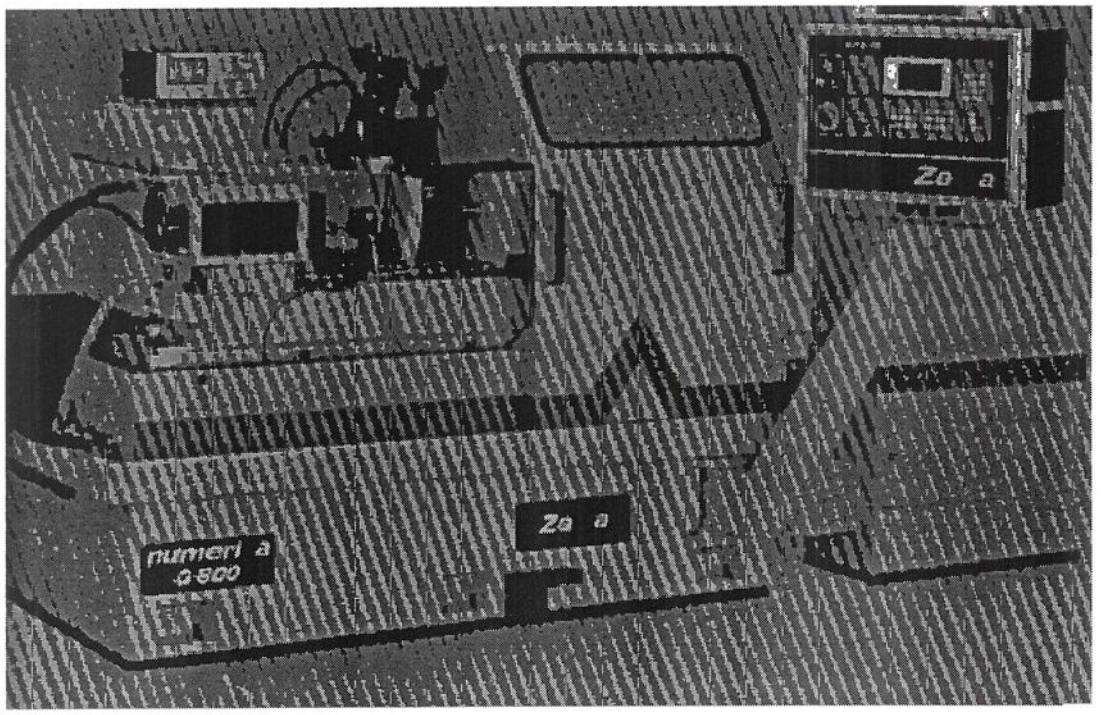


figura 5.2 : Retíficadora Cilíndrica à comando numérico.

- condições de dressagem (Malkin,1989; Nussbaum, 1988) :

  a) tipo de dressador : fliese fbs 140 h - WINTER

  b) profundidade de penetração do dressador (a_d) : 30 μm

  c) largura de atuação do dressador (b_d) : 0,26 mm

  d) passo de dressagem (s_d) : 0,63 mm/volta

  e) grau de recobrimento ($U_d=b_d/s_d$) : 5

A bancada de experimentos foi a mesma utilizada no capítulo anterior, só que agora usou-se uma retificadora CNC. O esquema da bancada de experimentos é apresentado na figura 5.3.

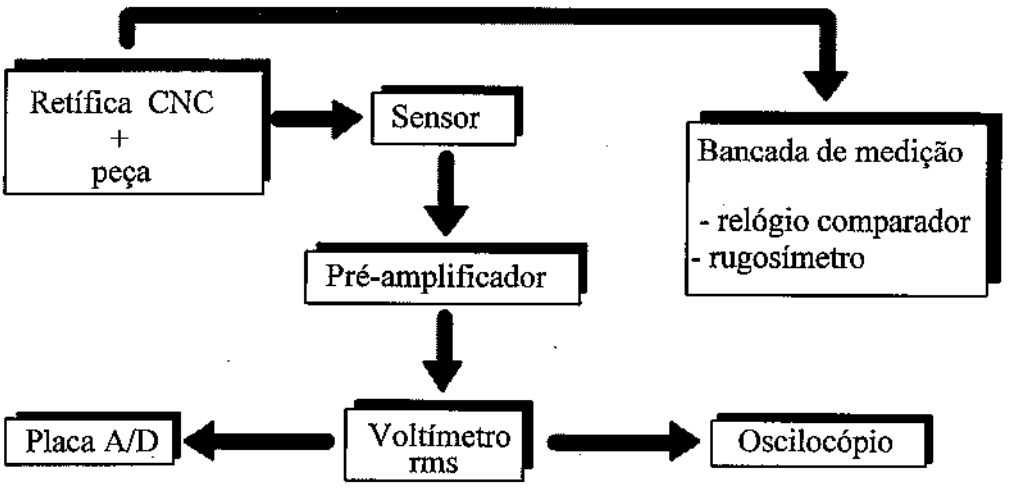


figura 5.3 : Esquema da bancada de experimentos.

Neste esquema tem-se os mesmos aparelho utilizados na bancada de experimentos do capítulo 4.

Para o início de cada ensaio, foram dados alguns passes de retificação cilíndrica externa do corpo de prova com o intuito de regularizar o diâmetro a ser retificado em mergulho. Quando desejava-se a aquisição de um ciclo completo de retificação, o rebolo, após tocar levemente a peça, era afastado da mesma à uma distância de 0,01mm , a partir da qual ele era acionado com velocidade de mergulho, e ao mesmo tempo era inicializada a aquisição de dados. Para se determinar o número de pontos a serem amostrados e garantir que todo o ciclo fosse amostrado, foi necessário determinar o tempo total de ciclo para a menor velocidade de mergulho utilizada. Isto foi feito utilizando-se o osciloscópio e um cronômetro em um ensaio prévio. Na aquisição do sinal foi também utilizada uma constante de tempo do voltímetro RMS de 2ms. No pré-amplificador ajustou-se um ganho de 40 dB.

5.3) RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como já foi citado anteriormente, esta parte do trabalho tem o objetivo de implementar o centelhamento acelerado usando a constante de tempo τ determinada através dos sinais de emissão acústica e comparar a qualidade da peça obtida neste tipo de ciclo, em termos de circularidade e de rugosidade superficial, com a qualidade da peça obtida com o centelhamento comum.

A figura 5.4a e 5.4b mostram a variação dos valores de batida radial em função da velocidade de mergulho para o ensaio de peça sem tempera.

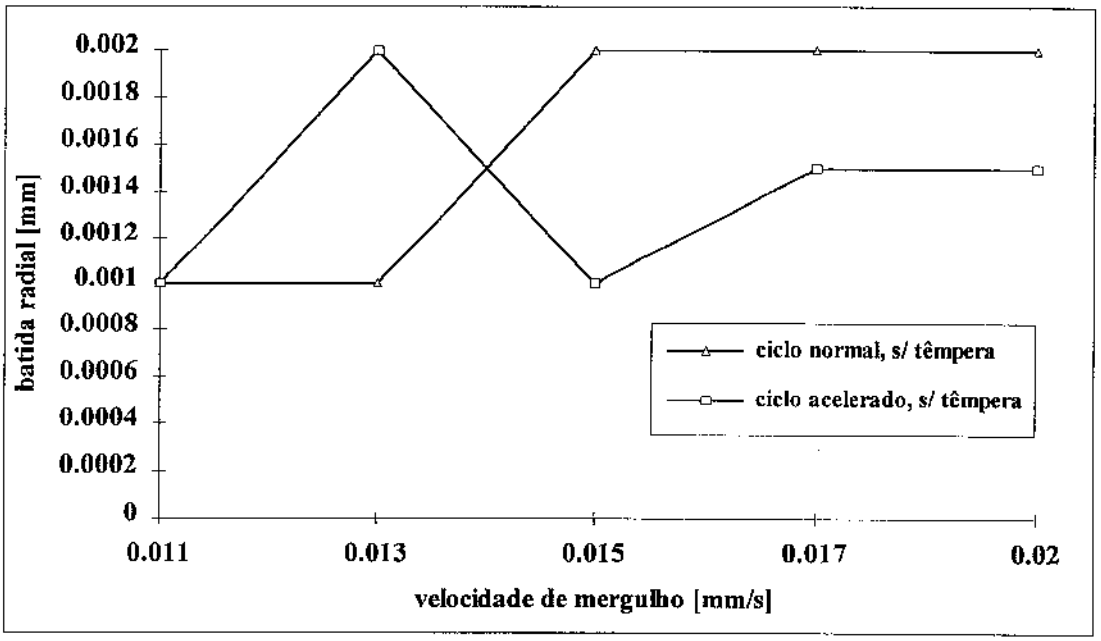


figura 5.4a : Variação da batida radial da peça com a velocidade de mergulho para peça sem tempera.

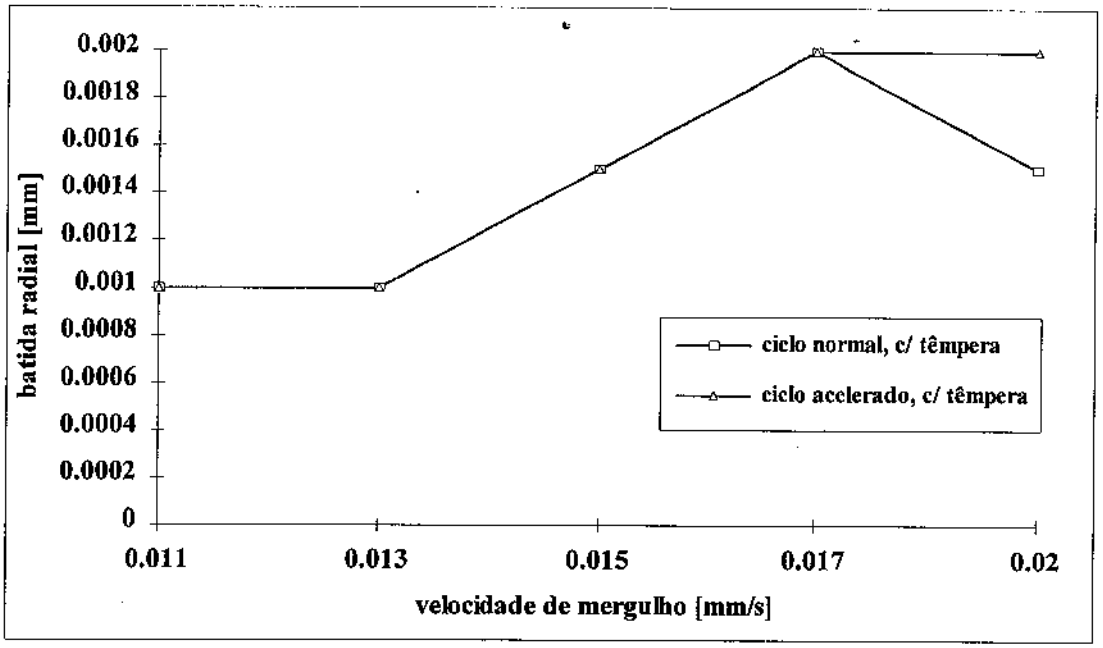


figura 5.4b : Variação da batida radial da peça com a velocidade de mergulho para peça com tempera.

Nestas figuras podem ser observados os seguintes pontos :

- A ordem de grandeza da batida radial não variou. A variação máxima entre os pontos foi da ordem de 0,001 mm, o que está dentro do erro de medição do relógio comparador que efetuou as medições.
- A velocidade de mergulho não influência a batida radial.
- O centelhamento acelerado provocou um leve decréscimo na batida radial, não aumentando-a .
- A maior dureza da peça temperada não teve influência nos valores de batida radial.
- O valores de batida radial obtidos estão dentro da faixa permitida para a retificação que é de 0,005 a 0,015 mm, segundo Agostinho (1977).
- para o aço temperado existe a coincidência dos 4 pontos iniciais o que significa que a batida radial é mais estáveis para aços duros.

A figura 5.5a e 5.5b mostram a variação da rugosidade da peça, R_a e $R_{máx}$ repectivamente, com a velocidade de mergulho.

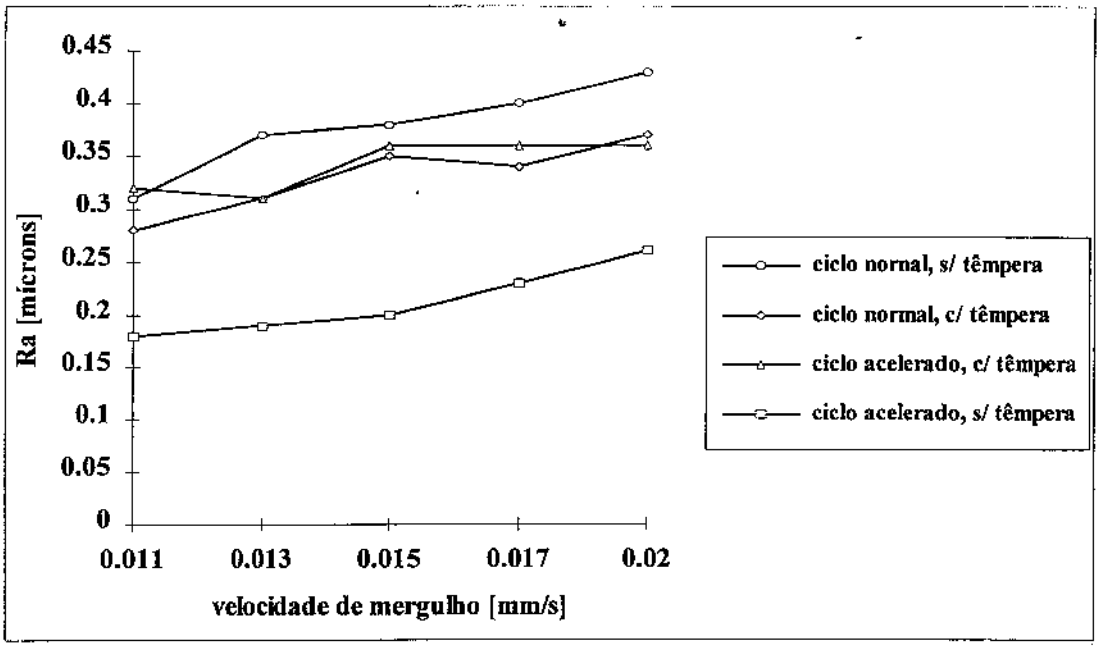


figura 5.5a : Variação da rugosidade da peça (Ra) com a velocidade de mergulho.

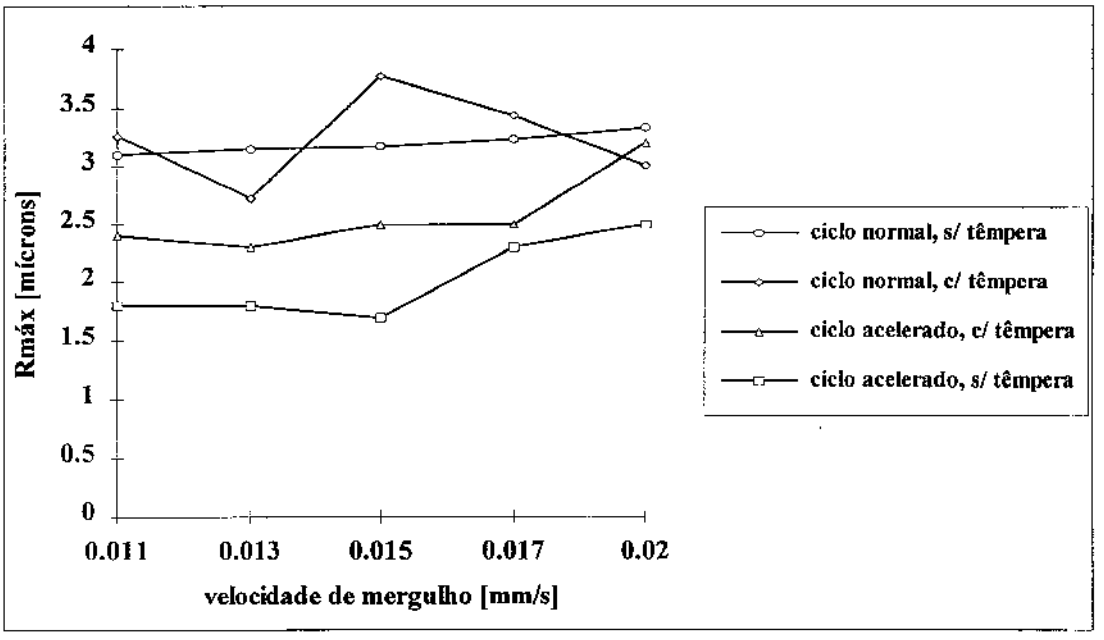


figura 5.5b : Variação da rugosidade ($R_{máx}$) com a velocidade de mergulho.

Nestas figuras pode-se observar o seguinte :

- Tanto R_a quanto $R_{máx}$, cresceram moderadamente com a velocidade de mergulho, nos dois tipos de centelhamento. Isto era de se esperar, já que quando se aumenta a velocidade

de mergulho, aumenta-se o avanço por volta e mais material é removido na unidade de tempo.

- A rugosidade apresentou-se menor quando se utilizou o centelhamento acelerado (principalmente o $R_{máx}$). Isto se deve ao fato de que o centelhamento normal sempre deixa um remanescente de sobremetal (da ordem de grandeza dos picos de rugosidade), enquanto no centelhamento acelerado, devido ao fato do rebolo acompanhar a peça até uma posição menor que o diâmetro desta última, não existe o remanescente de sobremetal.
- A menor rugosidade obtida se deu com a peça sem tratamento térmico em um ciclo de centelhamento acelerado. Isto se explica pelo fato de que a constante de tempo τ (e consequentemente as deformações) foi menor para a peça sem têmpera que para a peça com têmpera, facilitando a quebra dos picos de rugosidade na fase de centelhamento.

A figura 5.6 mostra os valores de RMS da emissão acústica na fase de desbaste do ciclo de retificação (depois de ultrapassado o tempo τ e antes do centelhamento).

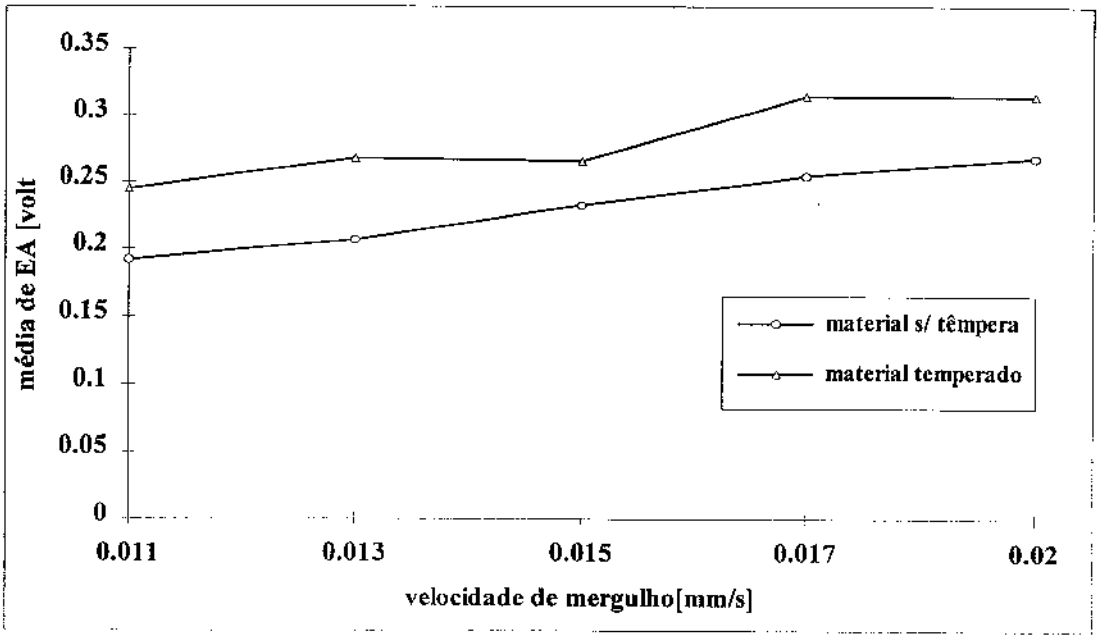


figura 5.6 : Valores do RMS do sinal de emissão acústica contra a velocidade de mergulho.

Nesta figura pode-se observar os seguintes pontos :

- O sinal de EA apresenta tendência de crescimento, em ambos os casos, com o aumento da velocidade de mergulho. Resultados semelhantes foram obtidos por Dornfeld, Diniz, Chang (1991). Isto se deve ao fato de que o aumento da velocidade de mergulho provoca um aumento na força de retificação radial, ocasionando um consequente aumento da EA , como foi constatado por Dornfeld,Cai (1984).
- Na retificação do material temperado (52 Rc) tem-se um aumento do sinal de EA em comparação com o material sem tratamento térmico (27 Rc). O fato do material ter sido endurecido faz com que a força de retificação exigida seja maior, aumentando o nível de tensões e, consequentemente, o nível de EA. É interessante notar que o crescimento da dureza de um material para outro (cerca de 100%) foi bem maior que o crescimento do sinal de EA (na casa dos 20%).

A figura 5.7 mostra os valores dos tempos dispendidos com o centelhamento nas diversas velocidades de mergulho.

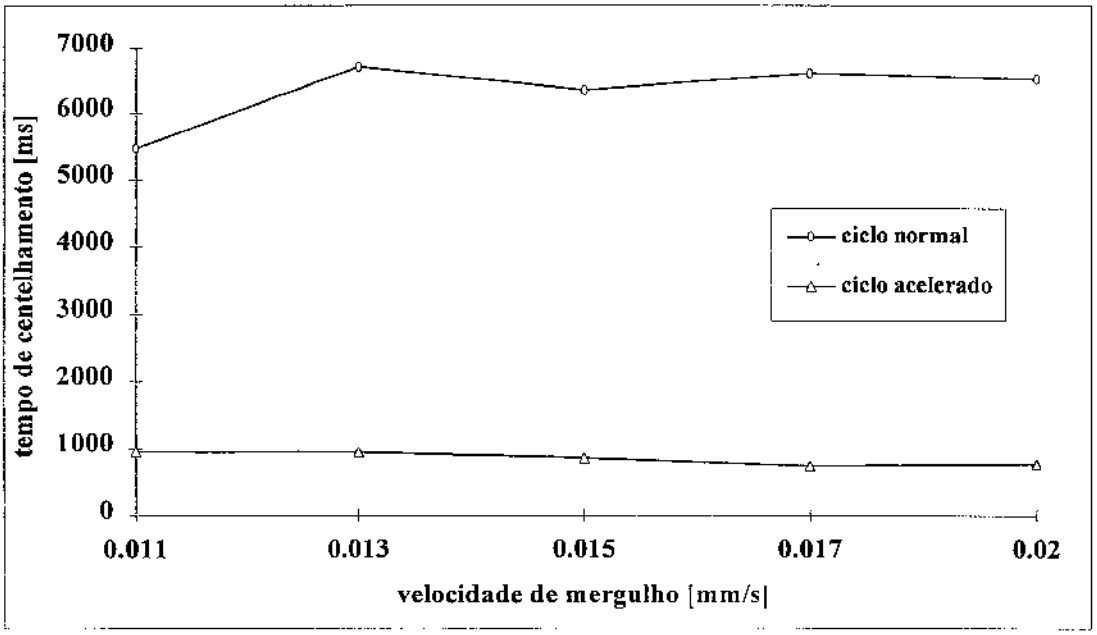


figura 5.7 : Tempo de centelhamento contra velocidade de mergulho.

Analisando esta figura pode-se observar que :

- como era de se esperar, no ciclo com centelhamento acelerado, o tempo de centelhamento é da ordem de 5 vezes menor.
- o tempo de centelhamento parece não depender da velocidade de mergulho. Depende principalmente de τ e do "sobremetal" do centelhamento acelerado (Δr_3).
- a economia de tempo é da ordem de 5s para o caso do centelhamento acelerado, em ciclos de retificação que tem em média 10 a 15s.

A figura 5.8 mostra a influência da velocidade de merguho na constante de tempo τ.

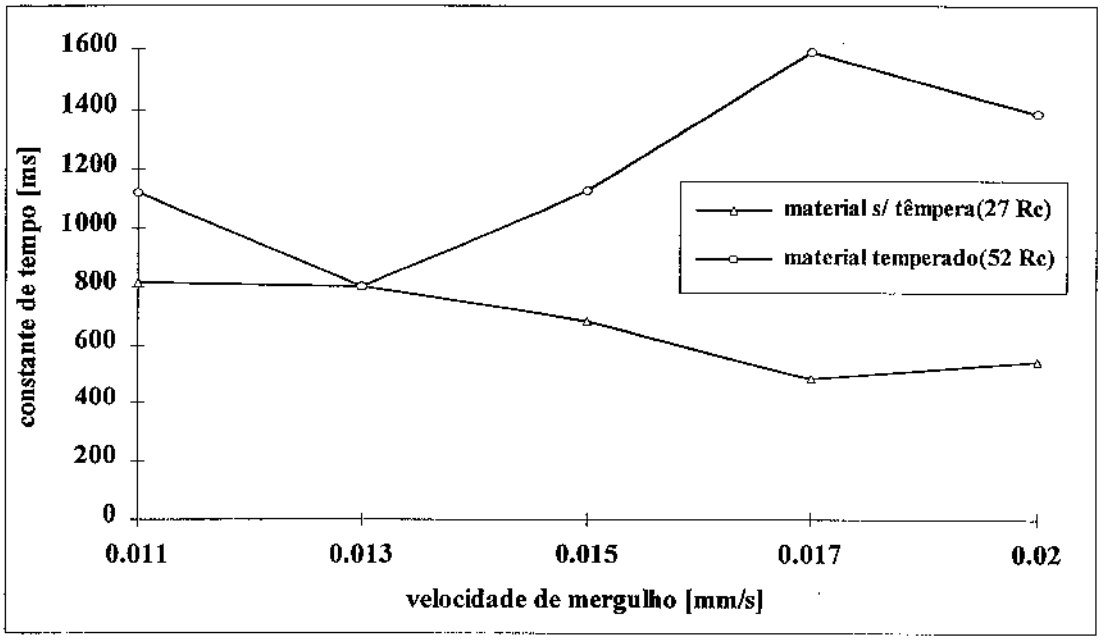


figura 5.8 : Constante de tempo contra velocidade de mergulho.

Nesta figura pode-se observar que :

- Vê-se na figura que τ é sempre maior para materiais temperados em quaisquer das velocidades de mergulho experimentais. A rigidez da peça (k_e) não muda quando se tempera um material, pois ele continua com a mesma forma e com a mesma massa. Porém, os esforços de corte são maiores em materiais temperados, pois estes são mais resistentes.

Assim, lembrando-se que $\tau = \frac{F_v}{k_e}$ e $F_n = F_v . v \Rightarrow \tau = \frac{F_n}{v.k_e}$, para um determinado valor de v tem-se k_e igual para os dois materiais e F_n maior para o material temperado, o que gera um maior valor de τ para este material.

- Observa-se também na figura que τ tem uma tendência decrescente com a velocidade de mergulho para o material sem têmpera e ascendente para o material temperado. Segundo Dornfeld, Chang e Diniz (1991) , o aumento da velocidade de mergulho (v) gera um aumento de F_n devido ao maior volume de cavaco retirado na unidade de tempo. Para que τ diminua com v (caso dos materiais sem têmpera) é necessário que a relação $\frac{F_n}{v}$ também decresça, já que a rigidez (k_e) permanece constante. Isto quer dizer que o crescimento de F_n com v tem que ser menor que o próprio crescimento de v. Exemplificando, quando se dobra o valor de v, o crescimento de F_n tem que ser menor que duas vezes. Isto acontece para materiais moles, porque eles tem grande região plástica, sofrendo grande deformação antes da ruptura do cavaco. Assim, quando v cresce, cresce também a área da secção de corte e diminui a pressão específica de corte (força por unidade de área) devido a diminuição da perda ded energia que se tem por deformação plástica antes da ruptura do cavaco. Em vista disso, a força cresce porque o volume de cavaco é maior, mas não cresce na mesma proporção do crescimento deste volume, porque a força por unidade de área (ou de volume) é menor, assim $\tau = \frac{F_n}{v.k_e}$ decresce.

Já em materiais endurecidos, onde a região plástica é muito menor, o fenômeno citado acima não se pronuncia e a força F_n pode crescer numa proporção até maior que v gerando o crescimento de τ.

Este capítulo demonstrou a eficiência da utilização tanto do artifício do centelhamento acelerado, quanto da emissão acústica como auxílio para a realização deste ciclo. Verificou-se além da esperada substancial redução de tempo total do ciclo de retificação, causada pela aceleração do centelhamento, a qualidade da peça não diminuiu com a implantação deste procedimento, pelo contrário, em termos de qualidade superficial

até melhorou. Além disso, a realização do centelhamento acelerado não implica em gastos substanciais com equipamentos, nem na utilização de equipamentos complexos.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Os resultados obtidos nos capítulos anteriores permitem concluir que a técnica de emissão acústica é uma ferramenta eficaz para o cálculo da constante de tempo do sistema formado por máquina-rebolo-peça e para a determinação do tempo de centelhamento do ciclo de retificação. A emissão acústica é sensível à variação da quantidade de material removida, o que permite observar de modo claro o início e o final do ciclo de retificação. Além disso, pode-se ter uma idéia da rigidez e consequentemente da deformação elástica sofrida pelo sistema máquina-rebolo-peça.

A técnica de centelhamento acelerada proposta por Malkin (1989), auxiliada pela emissão acústica, mostrou-se ser eficaz na redução do tempo total do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho, sem que isto implique na deterioração da qualidade superficial das peças trabalhadas.

Quanto aos parâmetros monitorados temos que :

- A ordem de grandeza da batida radial não variou. A variação máxima entre os pontos foi da ordem de 0,001 mm, o que está dentro do erro de medição do relógio comparador que efetuou as medições.
- A velocidade de mergulho não influencia significativamente a batida radial.
- O centelhamento acelerado provocou um leve decréscimo na batida radial.
- A maior dureza da peça temperada não teve influência nos valores de batida radial.
- O valores de batida radial obtidos estão dentro da faixa permitida para a operação de retificação que é de 0,005 a 0,015 mm, segundo Agostinho (1977), tanto com o centelhamento acelerado, quanto com centelhamento convencional.
- Tanto R_a quanto $R_{máx}$, cresceram moderadamente com a velocidade de mergulho, nos dois tipos de centelhamento.

- A rugosidade apresentou-se menor quando se utilizou o centelhamento acelerado (principalmente o $R_{máx}$).
- A menor rugosidade obtida se deu com a peça sem tratamento térmico em um ciclo de centelhamento acelerado.
- O sinal de EA apresenta tendência de crescimento, em ambos os casos de centelhamento, com o aumento da velocidade de mergulho.
- Na retificação do material temperado (52 Rc) tem-se um aumento do sinal de EA em comparação com o material sem tratamento térmico (27 Rc), mas o crescimento do nível de EA foi bem menor que o crescimento da dureza.
- Como era de se esperar, no ciclo com centelhamento acelerado, o tempo de centelhamento é da ordem de 5 vezes menor.
- O tempo de centelhamento parece não depender da velocidade de mergulho. Depende principalmente de τ e de Δr_3 (sobremetal de centelhamento).
- A economia de tempo é da ordem de 5s para o caso do centelhamento acelerado, em ciclos de retificação que tem em média 10 a 15s.
- A constante de tempo τ apresenta uma tendência ascendente com o aumento da velocidade de mergulho para material temperado, e descendente para material sem tratamento térmico. Em geral os valores da constante de tempo são menores para material sem tratamento térmico do que para material temperado.

Frente a estes resultados fica evidente a eficiência da utilização tanto do artifício do centelhamento acelerado, quanto da emissão acústica, que auxilia a realização deste ciclo. Verificou-se que, além da esperada substancial redução de tempo total do ciclo de retificação, causada pela aceleração do centelhamento, a qualidade geométrica e superficial da peça não diminuiu. Pelo contrário, em termos de qualidade superficial, melhorou. Além disso, a realização do centelhamento acelerado não implica em gastos substanciais com equipamentos, nem na utilização de equipamentos complexos.

Como sugestões para trabalhos futuros , pode-se citar :.

- Para que se possa tirar proveito destas conclusões e aplicá-las no meio industral, é necessário que o centelhamento acelerado via emissão acústica seja implementado em tempo real e com comunicação direta com a máquina CNC. Para que isto ocorra é preciso que haja um esquema de controle adaptativo, o qual não foi desenvolvido neste trabalho pois não era seu objetivo.
- Aplicar aos dados coletados uma regressão exponencial e comparar estes resultados com os obtidos via regressão polinomial, uma vez que a formulação de Malkin foi feita com base em funções exponenciais. Neste trabalho não foi feita a regressão exponencial pois com a regressão polinomial obteve-se os resultados esperados.
- Outra proposta seria efetuar um tratamento de sinal mais refinado para que os dados pudessem ser analisados com a menor influência possível de ruídos contaminantes, antes de se efetuar a regressão polinimial ou exponencial.
- Estudar outras aplicações da emissão acústica no processo de retificação, como o monitoramento da vida de rebolo e da operação de dressagem.
- Efetuar o cálculo da constante de tempo para outros valores de $\left(\Delta r_2 / u_1 . \tau\right)$ dentro do intervalo $0,2 \leq \left(\Delta r_2 / u_1 . \tau\right) \leq 0,8$, como proposto por Malkin, para a verificação da possibilidade de se obter um ciclo acelerado de retificação cilíndrica de mergulho ainda mais rápido.

BIBLIOGRAFIA

- Agostinho, O.L., Rodrigues, A.C.S., Lirani, J., 1977, "Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análises de Dimensões", Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo - S.P, Brasil.

- Asibu, E.K.Jr., Dornfeld, D.A., 1982, "A Study of Tool Wear using Statistical Analysis of Metal-cutting Acoustic Emission.", Wear, vol. 76, pp. 247-261.

- Bianchi, E.C, 1990, "Ação das Condições de Dressagem na Vida de Rebolos na Retificação de Precisão.", Dissertação de Mestrado - Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 116 pp.

- Blum, T., Inasaki, I., 1990, "A Study on Emission Acoustic from the Orthogonal Cutting.", Journal of Engineering for Industry, vol. 112, pp. 203-211.

- Blum, T., Dornfeld, D.A., 1990, "Grinding Process Feedback using Acoustic Emission.", 4th International Grinding Conference, Technical Paper MR90-525, SME, Detroit, Michigan.

- Boness, R.J., McBride, S.L., 1991, "Adhesive and abrasive wear studies using acoustic emission techniques.", Wear, vol. 149, pp. 41-53.

- Beattie, A.G.,1983, "Acoustic Emission, Principles and Instrumentation.", Journal of Acoustic Emission, vol. 2, pp. 95-128.

- Brinksmeier, E., 1991, "A Selftuning Adaptive Control System for Grinding Process.". Annls of CIRP, vol. 40, nº 1, pp. 355-358.

- Chang, Y.P., Diniz, A.E., Dornfeld, D.A., 1992, "Monitoring the Grinding Process through Acoustic Emission Using a Squirter.", Japan - U.S.A. Symposium on Flexible Automation, pp. 335-340.

- Dan, L., Mathew, J., 1990, "Tool Wear and Failure Monitoring Techniques for Turnig-A Review.", Journal of Machining Tools Manufacturing., vol. 30, nº 4, pp. 579-598.

- Dornfeld, D.A., Cai, H.G., 1984, "An Investigation of Grinding and Wheel Loadind using Acoustic Emission.", Journal of Engineering for Industry, vol. 106, pp. 28-33.
- Eda, H., et al, 1984, "In Process Detection of Grinding Burn by Means of Utilizing Acoustic Emission.", Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., vol. 18, nº 4, pp. 299-304.

- Eda H., et al, 1985, "In-Process Detection of Grinding Cracks by the Use of Acoustic Emissions.", Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., vol. 19, nº 3, pp. 181-186.

- Hanchi, J., Klamecki, B.E., 1990, "Acoustic emission monitoring of the wear process", Wear, vol. 145, pp. 1-27.

- Inasaki, I., 1985, "Monitoring of Dressing and Grinding Process with Acoustic Emission Signals.", Annals of CIRP vol. 34, nº 1, pp. 277-280.

- Inasaki, I., 1990, "Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process.", Annals of CIRP, vol. 40, nº 1, pp. 359-362.

- Kakino, Y., 1984 "Monitoring of Metal Cutting and Grinding Process by Acoustic Emission.", Jounal of Acoustic emission, vol.3, nº 3, pp. 108-116.

- Konig, W., Meyen, H.P., 1990, "AE in grinding and Dressing : Accuracy and Process Realiability.", 4th International Grinding Conference, MR90-526, pp. 1-20.

- Koren, Y., 1989, "Adaptive Control Systems for Machining", Manufacturing Review, vol. 2, nº 1, pp. 6-15.

- Liu, J.J.B., 1991, "Monitoring the Precision Machining Process : Sensor, Signal, Processing and Information Analysis, PhD Thesis, Dept. of Mech. Engr., University of California, Berkeley, 171 pp.

- Malkin, S., 1981, "Grinding Cycle Optimization.", Annals of CIRP, vol. 30, nº 1, pp. 223-226.

- Malkin, S., Koren, Y., 1984, "Optimal Infeed Control for Accelerated Spark-out in Plunge Grinding.", Journal for Egineering for Industry, vol.106, pp. 70-74.

- Malkin, S., 1989, "Grinding Technology ; Theory and Applications of Machinig with Abrasives.", Ellis Horwood Limited publishers, Chichester, England.

- Maris, M., Snoeys, R., Péters, J., 1975, "Analysis of Plunge Grinding Operations.", Annals of CIRP, vol. 24, nº 1, pp. 225-230.

- Moriwaki, T., Tobito, M., 1990, "A new Approach to Automatic Detection of life of Coated Tool Basead on Acoustic Emission Measurement", Journal of Engineering for Industry, vol. 112, pp. 212-218.

- Nussbaum, G.C., 1987, "Princípios da ação de corte da ferramenta abrasiva.", Maquinas e Metais, nº 260, pp. 55-62.

- Nussbaum, G.C.,1988, "Rebolos e Abrasivos : Tecnologia Básica.", Ícone Editora Ltda, São Paulo - S.P, vol. 1-3.

- Oliveira, J.F.G., Purquério, B.M., 1989, "Dressagem controlada : uma solução para os problemas.", Máquinas e Metais, nº 283, pp. 58-66.

- Oliveira J.F.G., 1989, "Tópicos Avançados sobre o processo de retificação, Pulicação 048/89, LAMAFE - Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 93 pp.

- Oliveira, J.F.G., 1992, "Controle do Estado de Afiação de Rebolos na Retificação de Precisão.", Tese de Livre Docência - Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 172 pp.

- Oliveira, J.F.G., Bianchi, E.C., Souza, G.F., 1992, "O desempenho de rebolos pode ser controlados pela dressagem.", Máquinas e Metais, nº 317, pp. 12-24.

- Peters, J., Aerens, R., 1980, "Optimization Procedure of Three Phase Grinding Cycles of a Series without Intermediate Dressing.", Annals of CIRP, vol.29, nº 1, pp. 195-200.

- Teti, R., 1989, "Tool Wear Monitoring Throught Acoustic Emission", Annals of CIRP, vol. 38, nº 1, pp. 99-102.

- Teti, R., Dornfeld, D.A., 1989, "Modeling and Experimental Analysis of Acoustic Emission from Metal Cutting.", Journal of Engineering for Industry, vol. 111, pp. 229-237.

- Tönshoff, H.K., Zinngrebe, M., Kemmerling, M, 1986, "Optimization of Internal Grinding by Microcomputer-Based Force Control.", Annals of CIRP, vol. 35, nº 1, pp. 293-296.

- Tönshoff, H.K., et al, 1992, "Modelling and Simulation of Grinding Process.", Annals of CIRP, vol. 41, nº 2, pp. 677-688.

- Yen, D.W., Wright, P.K., 1983, "Adaptive Control in Machining - A new Approach Based on the Physical Constraints of Tool Wear Mechanisms.", Journal of Engineering for Industry, vol. 105, pp. 31-38.

- Wakuda, M., Inasaki, I, 1991, "Detection of Malfunctions in Grinding Processes, Proc, 4 th World Meeting of Acoustic Emission, ASNT, Boston, MA, pp. 494-501.

APÊNDICE

A.1) Glossário de variáveis

- a : avanço radial por volta da peça;
- ad : profundidade de penetração do dressador;
- a_r : profundidade de penetração do dressador rotativo;
- b: largura de retificação;
- b_d : largura de atuação do dressador;
- d_s : diâmetro do rebolo;
- d_w : diâmetro da peça;
- F_t : força de retificação tangencial;
- F_n : força de retificação radial;
- F_0 : constante de proporcionalidade;
- k_a : constante de rigidez de acoplamento;
- k_c : constante de rigidez de corte;
- k_e : constante de rigidez do sistema máquina-rebolo-peça;
- k_s : constante de rigidez do rebolo;
- k_w : constante de rigidez da peça;
- Q_w : taxa de remoção volumétrica de material;
- s_d : passo de dressagem;
- τ : constante de tempo do sistema;
- u(t) : velocidade de avanço controlada;
- U_d : grau de recobrimento;
- u_m : velocidade de recuo;
- v_s : velocidade periférica do rebolo;
- v(t) : velocidade de avanço radial real;
- v_w : velocidade periférica da peça;
- v_i : velocidade periférica do dressador rotativo;

A.2) Programa para o cálculo da constante de tempo (τ) e do tempo de centelhamento.

```
%ENTRADA DE DADOS  [1]
clc
format long
load ensb14.txt
Nw=input('Entre com a rotação da peça em RPM : ');
u1=input('Entre com o valor da velocidade de mergulho em mm/s (vf) :  ');
l=input('Entre com o valor da distância precorrida pelo rebolo,antes de tocar a peça,em
velocidade de trabalho [mm ] :  ');
a=input('Entre com o valor da profundidade de corte no raio [mm] : ');
disp('  ');
disp('O valor do limite inferior do intervalo deve ser maior que : ');
f=1000*(l\u1)
inf=input('Entre com o valor do limite inferior do intervalo : ');
sup=input('Entre com o valor do limite superior do intervalo : ');
disp('Para implementar a estratégia de sparkout acelerado,');
disp('de o valor de (Dr2/u1*tau) dentro do intervalo: [0.2,0.8].');
disp('  ');
K=input('Entre com o valor de Dr2/u1*tau : ');
y=ensb14(inf:sup);
y=y';
k=sup-inf;
t=inf:1:sup;
%REGRESSÃO POLINOMIAL  [2]
n=input('Entre com o grau do polinomio :  ');
p=polyfit(t,y,n);
h=polyval(p,t);
pause
```

%REGRESSÃO POLINOMIAL X VALOR BRUTO DO SINAL [3]

```
plot(t,y,'g',t,h,'-')
pause
title('Regressão polinomial X valor bruto')
xlabel('tempo de aquisição em ms')
ylabel('E.A  Vrms  volts')
grid
```

%CÁLCULO DA CONSTANTE DE TEMPO E DURAÇÃO DO CENTELHAMENTO [4]

```
da=abs(diff(h)./diff(t));
m=min(da);
j=k-1;
w=find(da==m);
tau=t(w+1);
pause
disp('Tempo para o calculo do sparkout [ms] ');
ts=tau
disp('CONSTANTE DE TEMPO DO SISTEMA EM [ms]');
tau=tau-f
pause
tau=tau/1000;
```

%CÁLCULO DA DEFORMAÇÃO ACUMULADA [5]

```
disp('DEFORMAÇÃO ELÁSTICA ACUMULADA NO SPARKIN');
Dr=tau*u1*(1-1/(exp(1)))
```

%CÁLCULO DE um [6]

```
disp('VELOCIDADE DE RECUO');
um=-u1*exp(1.65-5.15*K)
```

%CÁLCULO DO VALOR DE Dr2 [7]

```
Dr2=u1*tau+um*tau*log(1-(u1/um));
```

%CÁLCULO DE Dr3 [8]

```
disp('SOBREMETAL DO SPARKOUT ACELERADO ');
Dr3=Dr-Dr2
```

%CÁLCULO DO TEMPO DO CICLO DE RETIFICAÇÃO [9]

```
ts=(60/Nw);
disp('TEMPO DE CICLO DE RETIFICAÇÃO ESPERADO');
tf=(a/u1)+tau*((1-(um/u1))*log(1-(u1/um)))+ts
```

Esta programa contém 9 blocos, sendo que nesta fase dos ensaios apemas foram usados os blocos : [1], [2], [3] e [4] :

- [1] : propicia a entrada de dados para os cálculos que seguem;
- [2] : efetua a regressão polinomial dos pontos aquisitados;
- [3] : exibe na tela, para efeito de comparação visual, os valores de EA em bruto e resultantes de regressão em função do tempo de aquisição;
- [4]: efetua o cálculo da derivada aproximada para todos os pontos dentro de um intervalo escolhido objetivando encontrar o ponto onde ocorre a derivada zero, pois este ponto, dependendo do intervalo escolhido, pode indicar o valor da constante de tempo do sistema máquina-rebolo-peça, ou o início e o fim do centelhamento.

A.3) TABELAS DO CAPÍTULO 5

A.3.1) Tabela 5.1 : Resultados dos ensaios

ENSAIOS : USP - São Carlos - LAMAFE							
ENSAIO	v_f	circ.	Ra	Rmáx	τ	EArms	tciclo
	[mm/s]	[mm]	[mícrons]	[mícrons]	[ms]	[volt]	[ms]
SCA2	0,011	0,0010	0,31	3,10	815	0,192	10917
SCA4	0,013	0,0010	0,37	3,15	801	0,207	9188
SCA6	0,015	0,0020	0,38	3,17	683	0,233	7849
SCA8	0,017	0,0020	0,40	3,23	485	0,255	6714
SCA10	0,020	0,0020	0,43	3,33	546	0,269	6133
CICLO NORMAL S/ TRAT. TÉRM.							
SCB2		0,0010	0,28	3,26	1122	0,245	11333
SCB4		0,0010	0,31	2,73	801	0,268	9189
SCB6		0,0015	0,35	3,77	1129	0,266	8469
SCB8		0,0020	0,34	3,43	1591	0,315	8213
SCB10		0,0015	0,37	3,00	1386	0,315	7172
CICLO NORMAL , TEMPERADO							
SCC1		0,0010	0,32	2,4			
SCC2		0,0010	0,31	2,3			
SCC3		0,0015	0,36	2,5			
SCC4		0,0020	0,36	2,5			
SCC5		0,0020	0,36	3,2			
CICLO C/ CENTELHAMENTO ACELERADO, TEMPERADO.							
SCD1		0,001	0,18	1,8			
SCD2		0,002	0,19	1,8			
SCD3		0,001	0,20	1,7			
SCD4		0,0015	0,23	2,3			
SCD5		0,0015	0,26	2,5			
CICLO C/ CENTELHAMENTO ACELERADO, S/ TRAT.TÉRM.							

v_f : velocidade de mergulho;
circ : circularidade;
τ : constante de tempo do sistema máquina-rebolo-peça;
EA-rms : valor médio do sinal de EA, estabilizado;

A.3.2) Tabela 5.2 : Comparação dos tempos de centelhameneto

ENSAIOS : USP - São Carlos-LAMAFE				
CICLO NORMAL DE RETIFICAÇÃO				
ensaio	**v_f(mm/s)**	**t_{sc}(ms)**		
Material s/ trat.térm.				
sca1	0,011	5480		
sca3	0,013	6710		
sca5	0,015	6350		
sca7	0,017	6610		
sca9	0,020	6520		
Material temperado [52 Rc]				
scb1		não aquisitou o sparkout		
scb3		não aquisitou o sparkout		
scb5		não aquisitou sparkout		
scb7		4340		
scb9		6680		
CICLO DE RETIFICAÇÃO ACELERADO				
Material s/ trat. térmico [27 Rc]				
ensaio	v_f	t_{sa}(ms)		
scd1	0,011	958		
scd2	0,013	949		
scd3	0,015	862		
scd4	0,017	744		
scd5	0,020	773		
Material temperado [52Rc]				
scc1	0,011	1154		
scc2	0,013	949		
scc3	0,015	1131		
scc4	0,017	1463		
scc5	0,020	1333		

t_{sc} : tempo de centelhamento comum;
t_{sa} : tempo de centelhamento acelerado;
v_f : velocidade de mergulho

A.3.3) Tabela 5.3 : Parâmetros para implantar o centelhamento acelerado

ENSAIOS : USP - São Carlos - LAMAFE							
SCA2.0	**inf**	**sup**	**g**	**τ [ms]**	**u_m [mm/s]**	**Δr_3 [mm]**	**t_f [ms]**
1	1500	2100	3	872	0,0118	0,0048	10993
2	1400	2000	3	626	0,0118	0,0029	10663
3	1300	2100	3	948	0,0118	0,003	11096
média				815	0,0118	0,0036	10917
SCA4.0	**inf**	**sup**	**g**	**τ [ms]**	**u_m [mm/s]**	**Δr_3 [mm]**	**t_f [ms]**
1	1000	2000	3	1081	0,0145	0,0029	9567
2	1200	2000	3	661	0,0145	0,0048	8998
3	1100	2100	3	662	0,0145	0,0030	9000
média				801	0,0145	0,0036	9188
SCA6.0	**inf**	**sup**	**g**	**τ [ms]**	**u_m [mm/s]**	**Δr_3 [mm]**	**t_f [ms]**
1	1000	2000	3	623	0,0171	0,0033	7768
2	1100	2100	3	811	0,0171	0,0043	8023
3	1000	1800	3	615	0,0171	0,0032	7757
média				683	0,0171	0,0036	7849
SCA8.0	**inf**	**sup**	**g**	**τ [ms]**	**u_m [mm/s]**	**Δr_3 [mm]**	**t_f [ms]**
1	700	1400	3	446	0,0191	0,0031	6662
2	900	1700	3	494	0,0191	0,0033	6725
3	800	1500	3	516	0,0191	0,0032	6756
média				485	0,0191	0,0032	6714
SCA10.0	**inf**	**sup**	**g**	**τ [ms]**	**u_m [mm/s]**	**Δr_3 [mm]**	**t_f [ms]**
1	1000	2000	3	578	0,0223	0,0042	6176
2	900	1500	3	455	0,0223	0,0034	6009
3	800	1800	3	606	0,0223	0,0041	6214
média				546	0,0223	0,0039	6133

inf : limite inferior do intervalo;
sup : limite superior do intervalo;
g : grau do polinômio da regressão;
τ : constante de tempo do sistema máquina rebolo-peça;
t_f : tempo total de ciclo desconsiderando n_W^{-1} (tempo para a peça dar uma revolução);
u_m : velocidade de recuo;
Δr_3 : sobremetal de centelhamento acelerado;