

... não se pode tentar mais nada do que estabelecer o princípio e a direção de uma estrada infinitamente longa. A pretensão de qualquer plenitude sistemática e definitiva seria, pelo menos, uma auto-ilusão. Aqui a perfeição só pode ser obtida pelo estudante individual no sentido subjetivo, de que ele comunica tudo quanto conseguiu ver

GEORGE SIMMEL

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, pela sua participação ativa como orientador, sempre prontamente disposto a ajudar.

Ao Prof. Dr. Nivaldo pela colaboração, enquanto meu orientador estava em viagem ao exterior.

À FAPESP pelo suporte financeiro.

À SANDVIK, em nome do Eng. Francisco Marcondes, pela doação das ferramentas.

Aos técnicos Aristides e Claudiomiro pela colaboração e paciência durante a realização dos ensaios.

À Rita, do laboratório de microscopia eletrônica, que foi muito atenciosa, quando por mim solicitada.

Aos amigos, professores e funcionários do DEF que de maneira direta ou indireta contribuíram neste trabalho.

Aos alunos de iniciação científica Wilson e Rafael, pela colaboração e empenho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo da vibração do sistema porta-ferramenta - ferramenta - peça para monitorar-se o processo de desgaste e quebra da ferramenta de usinagem em operações de torneamento em acabamento e o relacionamento deste sinal com a rugosidade superficial da peça usinada. Para isso, montou-se um sistema no qual constam, acelerômetros piezoelétricos adaptados ao porta-ferramentas, acopladores que permitem a leitura do sinal emitido pelos acelerômetros e placa analógica/digital que transforma esses sinais, que podem então ser lidos e armazenados através de microcomputador.

Foram realizados diversos ensaios usinando-se um aço ABNT 4340 em diferentes velocidades de corte, avanços e profundidades de usinagem. O sinal bruto de vibração, medido em cada ensaio e armazenado, foi analisado no domínio do tempo (RMS) e no domínio da frequência (FFT). Mediu-se o R_a e R_{max} das peças ensaiadas e fotografou-se, quando desejado, a região de desgaste da ferramenta.

A conclusão mais significativa deste trabalho, indica que, quando a rugosidade superficial da peça tem um crescimento abrupto, depois de um período de estabilidade e até de certa queda, (indicando o momento de troca da ferramenta), também o sinal de vibração cresce de maneira súbita, mostrando que o monitoramento da vibração da ferramenta é um bom meio de se estabelecer o fim de vida da mesma em torneamento de acabamento.

ABSTRACT

The main goal of this work is to study the vibration of the tool holder - tool - workpiece system to monitor the tool wear process and tool breakage in finish turning operations and to correlate that signal with the workpiece surface roughness. So, an experimental setup was built with accelerometers attached to the tool holder, couplers, oscilloscope, A/D board and computer.

Several experiments were carried out, turning an AISI 4340 steel with different cutting speeds, feeds and depths of cut. The raw vibration signal was analyzed in time domain (RMS of the signal) and in frequency domain (FFT). The surface roughness of the parts was also measured (Ra and Rmax) and, sometimes, pictures of the tool wear zone were taken.

The main conclusion of this work points out that, when a sudden growth of surface roughness happens, after a period of stability and even small decrease (moment to change the tool), the vibration signal also increases quickly, showing that the monitoring of tool vibration is a good way to automatically establish the end of tool life in finish turning.

LISTA DE SÍMBOLOS E DE SIGLAS UTILIZADOS

| | | |
|------|-------|-------------------------------------|
| f | ----- | avanço [mm] |
| ap | ----- | profundidade de usinagem [mm] |
| rp | ----- | raio de ponta da ferramenta [mm] |
| Vc | ----- | velocidade de corte [m/min] |
| Ra | ----- | rugosidade média [μm] |
| Rmax | ----- | rugosidade máxima [μm] |
| lc | ----- | comprimento de corte [m] |
| FFT | ----- | transformada rápida de Fourier |
| RMS | ----- | raiz quadrada da média |
| A/D | ----- | analógico-digital |
| q | ----- | carga elétrica [pC] |
| C | ----- | capacitância [mF] |
| F | ----- | força [N] |
| e | ----- | tensão [V] |
| PSD | ----- | densidade de potência espectral |
| Vb | ----- | desgaste de flanco [mm] |
| Fc | ----- | força principal de corte |
| EA | ----- | emissão acústica |
| W | ----- | Rmax - Rmax(teorico) |

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1- INTRODUÇÃO----- | 01 |
| 2- DESGASTE E CRITÉRIO DE FIM DE VIDA DE FERRAMENTAS----- | 03 |
| 2-1- DESGASTE DE FERRAMENTAS REVESTIDAS----- | 03 |
| 2-2- CRITÉRIO DE FIM DE VIDA DE FERRAMENTAS----- | 07 |
| 2-3- RUGOSIDADE X DESGASTE----- | 10 |
| 3- MONITORAMENTO DA USINAGEM----- | 13 |
| 3-1- INTRODUÇÃO----- | 13 |
| 3-2- MÉTODOS DIRETOS DE MONITORAMENTO DE USINAGEM----- | 17 |
| 3-2-1- ÓPTICO----- | 17 |
| 3-2-2- RADIOATIVIDADE----- | 17 |
| 3-2-3- RESISTÊNCIA ELÉTRICA NA JUNÇÃO PEÇA/FERRAMENTA----- | 18 |
| 3-2-4- DIMENSÃO DA PEÇA USINADA----- | 18 |
| 3-2-5- DISTÂNCIA PEÇA/FERRAMENTA----- | 19 |
| 3-3- MÉTODOS INDIRETOS DE MONITORAMENTO DE USINAGEM---- | 19 |
| 3-3-1- FORÇAS DE USINAGEM----- | 19 |
| 3-3-2- EMISSÃO ACÚSTICA----- | 21 |
| 3-3-3- PARÂMETROS ELÉTRICOS DO MOTOR----- | 22 |
| 3-4- MONITORAMENTO DE USINAGEM VIA VIBRAÇÃO----- | 23 |
| 3-4-1- INTRODUÇÃO----- | 23 |
| 3-4-2- ORIGEM DAS VIBRAÇÕES EM USINAGEM E ESTABILIDADE DO SISTEMA----- | 24 |
| 3-4-3- INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM NA ESTABILIDADE DO SISTEMA----- | 25 |
| 3-4-4- INSTRUMENTAÇÃO APLICADA AO MONITO- RAMENTO DA VIBRAÇÃO----- | 27 |
| 3-4-5- ANÁLISE DO SINAL E ESTRATÉGIA DE MONITORAMENTO----- | 34 |

| | |
|---|----|
| 4- MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS--- | 40 |
| 4-1- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E MONTAGEM DO SISTEMA---- | 40 |
| 4-2- MONTAGEM DOS ACELERÔMETROS----- | 43 |
| 4-3- PROGRAMA DE AQUISIÇÃO E AMOSTRAGEM----- | 44 |
| 4-4- METODOLOGIA DOS ENSAIOS REALIZADOS----- | 45 |
| 4-4-1- ENSAIOS PRELIMINARES----- | 45 |
| 4-4-2- ENSAIO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM----- | 47 |
| 4-4-3- ENSAIO DE DESGASTE----- | 49 |
| | |
| 5- RESULTADOS E DISCUSSÕES----- | 52 |
| | |
| 6- CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS----- | 86 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS----- | 88 |
| | |
| BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR----- | 92 |
| | |
| APÊNDICE A----- | 93 |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Sistemas de monitoramento e controle do processo de usinagem vem sendo desenvolvido ao longo do tempo por muitos pesquisadores, utilizando-se de diversos sinais provenientes do processo de usinagem com o fim de auxiliar na completa automatização do processo. Tais sistemas já começam a ser implantados nas indústrias, como vai ser discutido adiante, cada sistema tem vantagens e desvantagens. Alguns fatores que permitirão a completa aplicação do monitoramento são:

- 1- Barateamento do sistema de aquisição e interpretação do processo de desgaste e quebra da ferramenta
- 2- Eficiência do processo
- 3- Portabilidade do sistema no nível de chão de fábrica
- 4- Facilidade de operação e manutenção do sistema
- 5- Não ser intrusivo na fabricação
- 6- Um mesmo processo de monitoramento cobrir várias condições e processos de usinagem
- 7- Relação custo/benefício ser compatível

Neste trabalho, procurou-se identificar através do sinal de vibração da ferramenta um parâmetro que representasse com fidelidade o processo de desgaste e quebra da ferramenta e o relacionamento destes fatores com a rugosidade da peça usinada. O objetivo principal não foi de explicar teoricamente através de formulações complexas os fenômenos de desgaste e quebra de ferramentas ou o processo de formação da rugosidade da peça e sua interrelação com a vibração do sistema, mas sim, através de ensaios

mostrar que o sinal de vibração é um bom parâmetro para se monitorar o processo de torneamento de acabamento (estabelecendo o momento de troca da ferramenta) e que ele é passível de aplicação a nível de chão de fábrica. Procurou-se, porém, conhecer os fatores que influenciam na vibração da ferramenta e na rugosidade da peça usinada.

Este trabalho é dividido em seis capítulos, quais sejam:

Capítulo 1 - Introdução

Capítulo 2 - Desgaste e critérios de fim de vida de ferramentas

Capítulo 3 - Monitoramento da usinagem

Capítulo 4 - Materiais, Equipamentos e Procedimentos Experimentais

Capítulo 5 - Resultados e discussões

Capítulo 6 - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

CAPÍTULO 2

DESGASTE E CRITÉRIO DE FIM DE VIDA DE FERRAMENTA

2.1- DESGASTE DE FERRAMENTAS REVESTIDAS

Para aumentar a vida de ferramentas e a resistência ao desgaste, insertos de carbonetos multirevestidos com substrato de metal duro foram e tem sido desenvolvidos em recentes anos. Tais ferramentas tem se mostrado altamente resistentes a todos os tipos de desgaste, mesmo para velocidades de corte altas, suprimindo uma necessidade sempre premente e uma das limitações da otimização do processo de usinagem.

Uma ferramenta de usinagem deve satisfazer três condições básicas [01] :

- a- resistência ao desgaste
- b- resistência à deformações plásticas
- c- tenacidade

Para uma ferramenta ser resistente ao desgaste, é preciso que ela seja estável quimicamente e apresente dureza em temperaturas elevadas. Em geral, um material com estas características não apresenta a tenacidade necessária para suportar os choques inerentes ao processo de usinagem. Foi pensando em se obter uma ferramenta com o núcleo tenaz (composto do metal duro mais tenaz - WC + Co) e com a parte que entra em contato com a ferramenta e com a peça resistente ao desgaste, é que as ferramentas de metal duro recobertas foram desenvolvidas.

Cinco mecanismos principais de desgaste podem ser identificados em ferramentas de metal duro recobertas [02] :

- 1- adesão
- 2- abrasão
- 3- oxidação associada com desgaste adesivo
- 4- difusão
- 5- deformação plástica da aresta da ferramenta

Estes mecanismos não são exclusivos, ou seja, muitas vezes eles podem operar simultaneamente.

O mecanismo de desgaste predominante no processo varia de acordo com a combinação ferramenta-peça e condições de usinagem. O conhecimento dos mecanismos de desgaste é útil para selecionar a ferramenta certa para uma determinada operação, sob condições específicas de usinagem, e é essencial para o desenvolvimento de novos materiais de ferramentas.

Durante o processo de desenvolvimento das coberturas do metal duro, começou-se com somente uma camada de cobertura (o TiC), depois passou-se para duas camadas (TiC + Al₂O₃), três camadas (TiC + Al₂O₃ + TiN) e hoje já se tem ferramentas com um número bem grande de camadas de cobertura.

Um dos exemplos que podemos citar é o "Widalon" [02]. Este inserto apresenta 13 camadas de coberturas compostas de TiC, Ti(CN) e AlON. O AlON é obtido a partir do Al₂O₃, e foi acrescentada por apresentar melhores características que o Al₂O₃. As 13 camadas apresentam espessuras inferiores a 0.2 µm cada [02], e são dispostas intercaladas umas às outras.

Multirevestimentos de carboneto, quando bem aderidos ao substrato ou a camada anterior e quando dispostos em uma sequência correta, apresentam vantagens consideráveis sobre coberturas

simples com respectivo aumento na vida da ferramenta [02].

A experiência mostra que os principais tipos de desgaste das ferramentas de metal duro recobertas estão sobre as superfícies de saída e de folga e nas extremidades da profundidade de corte (desgaste de entalhe) como mostra a figura 2.1 [02]. Alguns mecanismos de desgaste incluem deformação plástica, lascamento, trincas, quebra e sulcos.

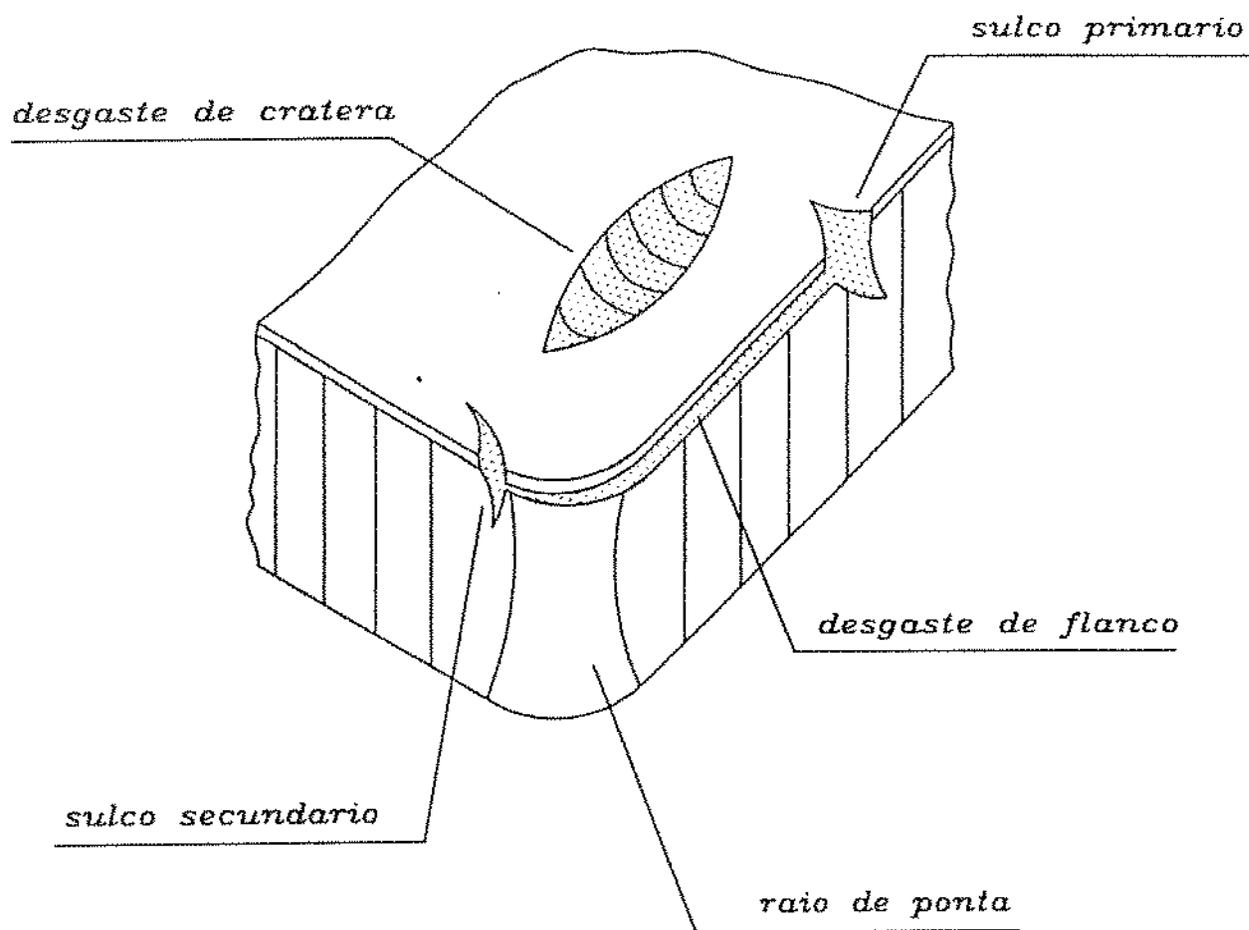


Figura 2.1 : princ. tipos de desgaste de ferramentas de metal duro

A maioria dos pesquisadores atribui o desgaste de flanco à abrasão. O desgaste de flanco ocorre pelo processo de abrasão, seguido por abrasão e difusão quando ocorre a penetração da cobertura [03]. Segundo Dearnley [04] o desgaste homogêneo ou liso na superfície de flanco da ferramenta é produzido por dissolução-difusão e pequenas deformações plásticas.

O desgaste de cratera é um processo complexo, combinando atrito-adesão, trinca térmica e difusão podendo também ser causado por dissolução-difusão em conjunção com uma pequena deformação plástica [03].

As camadas de cobertura mais utilizadas são o carboneto de titânio (TiC), o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o nitreto de titânio (TiN). O TiC é conhecido como sendo altamente resistente ao desgaste de flanco. O TiN apresenta características superiores quanto à resistência ao desgaste de cratera e à diminuição do coeficiente de atrito entre ferramenta-peça e ferramenta-cavaco. E o Al_2O_3 contribui fortemente para a estabilidade química e térmica a altas temperaturas.

O desgaste de cratera destes materiais é fortemente dependente das condições de usinagem e material da peça usinada. Segundo Khare and Sarmah [02], a cobertura de Al_2O_3 praticamente impede a formação de crateras quando da usinagem do aço 1045 com velocidade de corte de 260m/min, devido à sua estabilidade térmica. O TiC é o menos resistente ao desgaste de cratera nas velocidades de corte relativamente altas. Aumentando-se a espessura das coberturas, aumenta-se também a resistência ao desgaste de cratera, porém a tenacidade diminui [05]. O desgaste de flanco é insensível à espessura da camada de cobertura [04]. Nas baixas velocidades de

corte, onde o desgaste abrasivo é o mecanismo limitante, coberturas mais duras, como o TiC , representam um aumento na vida da ferramenta. A medida que as velocidades de corte vão sendo aumentadas, o desgaste químico (difusão) por causa das altas temperaturas, torna-se fortemente predominante, sendo necessária a presença de elementos com estabilidade química à altas temperaturas para aumentar a vida da ferramenta [06]. Estas conclusões apontam para elementos como o Al_2O_3 e o $AlON$ que são muito resistentes quimicamente em altas temperaturas.

Não só as coberturas e condições de usinagem influem no mecanismo de desgaste da ferramenta, como concluem Norgren & Melander [07] que experimentaram o desgaste de ferramentas de metal duro com cobertura em usinagem de aços com inclusões de sulfeto de cálcio (CaS). Neste caso houve o aparecimento da aresta postiça.

2.2- CRITÉRIO DE FIM DE VIDA DE FERRAMENTAS DE USINAGEM

A vida de uma ferramenta de usinagem é definida como o tempo que ela trabalha efetivamente (deduzido os tempos passivos), até perder a sua capacidade para desenvolver a usinagem dentro de critérios pré-estabelecidos. Atingindo este tempo, a ferramenta deve ser substituída ou reafiada [08]. Logo, a vida da ferramenta é o tempo entre duas afiações ou trocas sucessivas, no qual ela trabalha efetivamente.

O fim da vida da ferramenta ocorre quando a mesma não desempenha mais as funções a que ela se destina, enquanto a falha total da ferramenta acontece quando há uma completa destruição da aresta de corte devido ao crescimento dos desgastes ou a uma avaria

da ferramenta (quebra, trinca, etc.).

Dentro do que foi escrito acima, há de se ter um critério para substituição de uma ferramenta de usinagem, dentro de parâmetros lógicos, para se obter a melhor utilização possível desta ferramenta. Porém, em muitos casos, não há sequer um critério para substituição de ferramenta. Geralmente a decisão de troca de ferramenta é feita pelo operador da máquina, que não se utiliza de critérios lógicos. Ele apenas se baseia no comportamento da usinagem por experiência anterior. Utilizando-se deste critério qualquer anomalia do processo como sons estranhos, faiscamento, vibração temporária e outras, é tratada como fim de vida de ferramenta. Em outros casos, há uma tendência de operadores trocarem as ferramentas em ciclos de usinagem, usinando um determinado número constante de peças e procedendo a troca da ferramenta. Também o operador, por não desejar a quebra da ferramenta, faz sua substituição bem antes do tempo devido, causando bastante desperdício.

Pelo conhecimento do grande número de fatores que afetam a usinagem, e que são de difícil previsão e controle, certamente deixar a cargo de operadores o critério de fim de vida, não representa certamente, um aproveitamento ótimo da vida da ferramenta de usinagem. Portanto, há a necessidade de se estabelecer com alguma precisão o momento da troca da ferramenta de acordo com sua utilização. Uma ferramenta de usinagem deve ser substituída quando um ou mais fatores abaixo (critérios de fim de vida) acontecerem [08]:

a) Os desgastes atingem proporções tão elevadas que se receia uma quebra da aresta cortante.

b) Os desgastes chegam a valores em que a temperatura da aresta cortante é tal que ela perde suas características (como por exemplo dureza ou estabilidade química).

c) Devido ao desgaste não é possível mais manter as tolerâncias dimensionais, geométricas e de rugosidade da peça usinada.

d) O aumento da força de usinagem ou vibração do sistema atinge valores (devido ao desgaste), que interferem no funcionamento da máquina.

Em um processo de torneamento em acabamento, o desgaste da ferramenta não chega a atingir valores onde se receia a quebra da mesma e o crescimento da força de usinagem também não chega a comprometer o funcionamento da máquina. Nestes processos, o que determina o fim de vida da ferramenta é a precisão e/ou a rugosidade da peça. Quando a dimensão da peça começa a sair da faixa de tolerância dimensional exigida, ainda se tem o recurso de reposicionar a ferramenta de modo que o corte consiga produzir uma peça com tolerância desejada. Assim, monitorar-se a rugosidade da peça é um bom caminho a se seguir para se estabelecer com precisão o fim da vida da ferramenta. O principal objetivo deste trabalho é este: verificar se o monitoramento da vibração da ferramenta é um bom meio de se acompanhar o crescimento da rugosidade da peça e, com isso, estabelecer com confiança o fim de vida da ferramenta, em operações de torneamento de acabamento.

Mesmo tendo-se critérios pré-estabelecidos, há a necessidade de se tirar da mão de operadores essa decisão, para realmente se otimizar o uso da vida da ferramenta. Com isso vem sendo desenvolvido um número grande de trabalhos sobre monitoramento de

vida de ferramenta através de equipamentos que permitem medir com precisão o nível de desgaste de ferramenta e/ou outro parâmetro que determine o fim de vida. Com isso os critérios de fim de vida de ferramenta são constantemente modificados, ou melhor, surgem novas maneiras de se avaliar um determinado critério, a medida que se monitora o processo de usinagem e passa-se a conhecê-lo mais amplamente, e também com o avanço da tecnologia que permite avaliações rápidas e precisas do comportamento da usinagem. Dentre alguns destes meios de monitoramento, atualmente pesquisados, para se determinar fim de vida de ferramenta podemos citar:

- a) Amplitude do sinal de vibração
- b) Amplitude e comportamento do sinal de emissão acústica
- c) Monitoramento dimensional através de raios laser e câmaras de TV
- d) Medição de forças de usinagem por dinamometria

2.3 - RUGOSIDADE X DESGASTE

Muitos fatores influenciam na formação da rugosidade superficial no processo de torneamento. Estes fatores incluem deformação e fluxo lateral do cavaco, vibração do sistema ferramenta-peça-fixação-máquina, avanço, raio de ponta e desgaste da ferramenta [09].

O avanço e o raio de ponta da ferramenta de torneamento tem uma contribuição geométrica na formação da rugosidade superficial da peça, que pode ser calculada por [09] :

$$\begin{aligned} R_{\max} &= f^2/8r_p \\ &\text{ou} \\ R_a &= f^2/31.3 r_p \end{aligned} \quad (1)$$

O desgaste de flanco e o de entalhe secundário ("groove wear") são os dois tipos de desgaste que mais influenciam na formação da rugosidade superficial da peça. O desgaste de entalhe causa uma mudança na curvatura do raio de ponta da ferramenta e isto se reflete na superfície usinada. Ele também causa o aumento do fluxo lateral de cavaco [10] que é um outro fator da formação da rugosidade superficial. Muitos pesquisadores tem estudado a relação entre rugosidade superficial e desgaste de flanco (V_b). Sundaram e Lambert [10] estudaram o torneamento de um aço AISI 4140 com ferramentas de metal duro . Seus resultados são mostrados na figura 2.2. Este gráfico mostra que há um aumento da amplitude da rugosidade superficial no início da usinagem, uma tendência a decrescer num período intermediário de corte e novamente uma tendência de crescimento no fim de vida da ferramenta. A relação entre R_{max} , R_a e V_b com o comprimento de corte (l_c) foi estudado por Petropoulos [11] e os seus resultados para usinagem de um aço AISI 1060 são mostrados na figura 2.3. Esta figura mostra que R_{max} e R_a aumentam até V_b alcançar 0.2mm. Acima deste valor, R_{max} oscila em torno de um valor constante e R_a oscila enquanto cresce. O desgaste de flanco aumenta continuamente. Estes dois gráficos provam que o desgaste de flanco não é suficiente para explicar o comportamento da rugosidade superficial com o tempo de usinagem. Portanto faz-se necessário a análise do aparecimento e crescimento de outro tipo de desgaste que também influenciará na formação da rugosidade superficial que é o desgaste de entalhe ou ("groove wear").

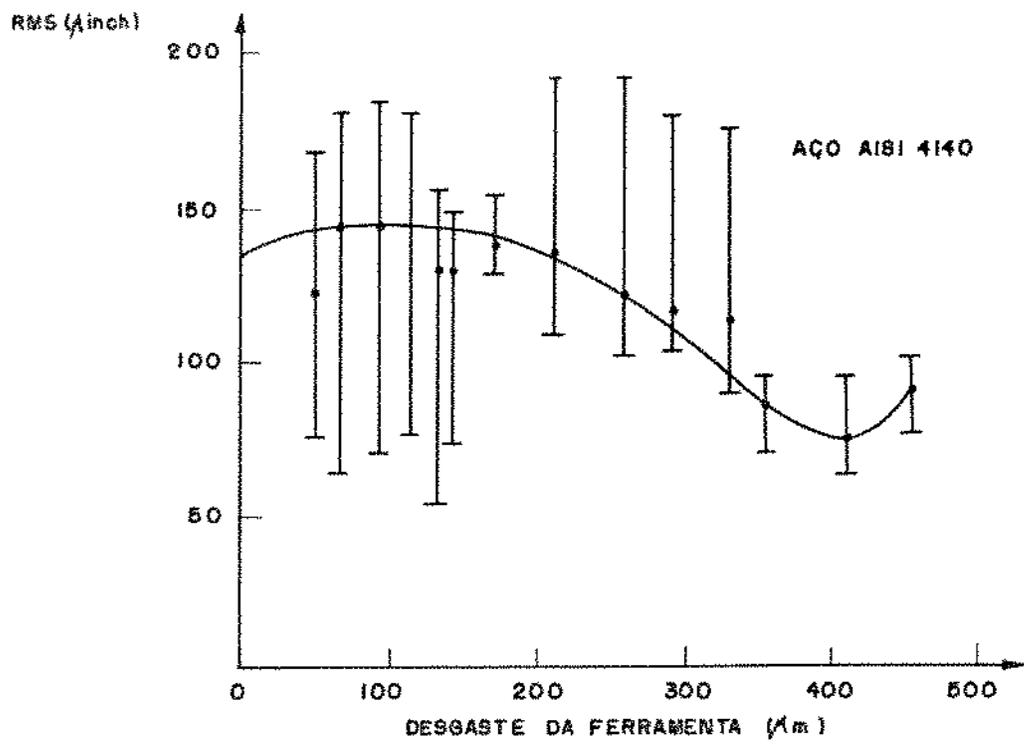


Figura 2.2 Rugosidade Superficial x Desgaste de Flanco [10]

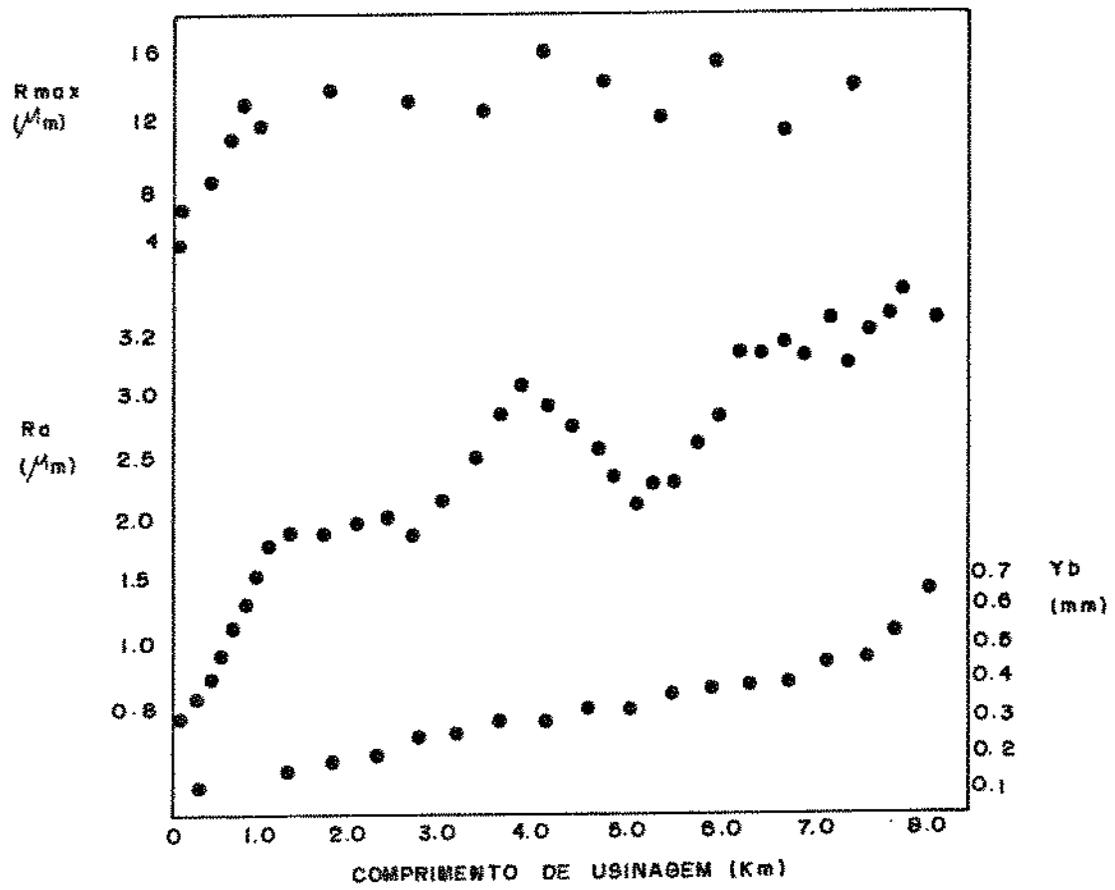


Figura 2.3 Rugosidade superficial e Y_b X l_c [11]

CAPÍTULO 3

MONITORAMENTO DA USINAGEM

3.1- INTRODUÇÃO

Ao longo de muitos anos vem sendo desenvolvido sistemas de monitoramento e controle em tempo real do processo de usinagem, com o objetivo de desenvolver detectores de falhas no processo de usinagem (principalmente o fim de vida da ferramenta), obtenção da usinagem não assistida (sem a participação do homem) e otimização dos recursos de usinagem. Apesar dos esforços empregados nessa área, o monitoramento ainda não alcançou um consenso para sua aplicação a nível de chão de fábrica ou a nível dos fabricantes de equipamentos de usinagem que poderiam por exemplo incluir sensores nas máquinas operatrizes e monitorar o processo [12].

Um dos fatores responsáveis por esse relativo insucesso, é que não se chega a um consenso quanto ao sinal ou efeito da usinagem que se deve monitorar, que represente o processo global da usinagem e que possa ser usado para uma ampla variedade de processos de usinagem e para todo campo de aplicação. Em outras palavras, diferentes tipos de materiais de ferramentas, diferentes condições de usinagem (velocidade de corte, profundidade de corte, avanço, etc), diferentes materiais a serem usinados, condições diferentes das máquinas ferramenta dentre outros, fazem com que os sistemas de monitoramento não sejam universais.

Esta dificuldade tem conduzido ao desenvolvimento de monitoramento em condições específicas, indicando-se um tipo de monitoramento mais adequado para cada condição específica.

O objetivo final de qualquer processo de usinagem é a produção

de uma peça de forma específica, com precisão dimensional aceitável e condição superficial apropriada. Desvios das condições de usinagem de um plano pré-determinado podem influenciar a qualidade final da peça e devem ser cuidadosamente examinados pelo operador da máquina.

Além das responsabilidades básicas como carregamento e descarregamento de peças e mudança de ferramentas, o operador da máquina também é responsável pelo monitoramento de vários aspectos do processo de usinagem, como desgaste ou quebra de ferramenta, remoção de cavaco, controle da temperatura de usinagem, vibração da máquina, etc. Fica claro aqui que, se algumas dessas funções pudessem ser levadas a cabo automaticamente, a responsabilidade do operador e o risco de erro humano seriam reduzidos. Além disso, quando se busca a completa automatização da manufatura, é necessário que todas as funções desempenhadas hoje pelo homem, possam ser realizadas por algum tipo de equipamento.

As novas técnicas de fabricação e a busca de uma eficiência maior dos sistemas produtivos com conseqüente redução de custos não podem correr riscos quanto à subutilização dos recursos destinados ao processo de usinagem (como por exemplo a troca de ferramentas antes do momento devido) e devem reduzir ao máximo possível o julgamento do operador quanto às condições de usinagem, pois este se baseia na sensibilidade e experiência humana, que é variável, tornando imprevisível as conseqüências da má utilização dos recursos disponíveis.

Algumas operações automáticas já são utilizadas em escala comercial para o controle da produção como por exemplo o controle dimensional da peça em um sistema "on-line".

Porém, parâmetros que representam o desgaste e quebra da ferramenta e medições de sinais que avaliam o processo de usinagem com precisão, ainda devem ser pesquisados, para se obter um processo aceitável de monitoramento.

Os diferentes métodos de monitoramento citados na literatura, são classificados em diretos e indiretos. Os métodos diretos são basicamente o monitoramento óptico do desgaste de ferramenta ou de medidas de grandezas relacionadas ao processo como dimensão da peça ou distância porta-ferramenta/peça. Nos métodos indiretos mede-se um parâmetro de saída do processo de usinagem como vibração, temperatura, emissão acústica, etc., e relaciona-se esse parâmetro a uma causa como desgaste e quebra de ferramenta, rugosidade.

Os métodos diretos, como o nome diz, por medirem diretamente a variável a ser monitorada, não apresentam interferências de outros parâmetros. Por outro lado, são muito difíceis de serem empregados na prática, pois, em geral não se consegue fazer as medições enquanto o processo está acontecendo ("on-line").

O método indireto tem como principal característica a sua fácil aplicação e pouca interferência no processo, pois pode-se utilizar equipamentos de dimensões reduzidas, e em muitos casos, mede-se um sinal ou efeito remotamente, ou seja, distante da zona de usinagem, não interferindo portanto no processo. A principal desvantagem está no fato de que não somente o que se quer medir (por exemplo, o desgaste da ferramenta) influencia no sinal medido, mas também outros fatores, como condições de usinagem, condições da máquina, etc..

A tabela 3.1 classifica e caracteriza alguns dos principais métodos de monitoramento pesquisados [13].

TABELA 3.1 : MÉTODOS DE MONITORAMENTO

| | PROCESSO | MEDIDA | SENSOR |
|---------|---|---|--|
| DIRETOS | Óptico | Forma ou posição da ponta da ferramenta | câmara de TV |
| | Desgaste de partículas e radioatividade | Tamanho de partículas e radiotividade | espectrofotômetro, medidores de radioatividade |
| | Resistência da junção peça/ferramenta | Variação da resistência da junção | Voltímetro |
| | Dimensão da peça | Dimensão da peça | Micrômetros e transdutores eletromagnéticos |
| INDIR. | Força de usinagem | Variação da força de usinagem | Dinamômetros |
| | Emissão acústica | Pressão da onda de energia | Transdutores piezoelétricos de emis. acúst. |
| | Som | Ondas acústicas | Microfone |
| | Vibração | Vibração na interface peça-ferramenta | Acelerômetro |
| | Temperatura | Variação de temperatura da ferramenta | Termopares, pirômetros, etc. |
| | Potência do motor princ. ou de avanço | Potência ou corrente | Amperímetros, voltímetros, etc |
| | Rugosidade | Variação da rugosidade da superfície | Transdutor óptico, rugosímetros |

3.2- MÉTODOS DIRETOS DE MONITORAMENTO DE USINAGEM

3.2.1- ÓPTICO

Uma ferramenta gasta reflete mais luz que uma ferramenta nova. As medidas ópticas de monitoramento de usinagem baseiam-se nesta "propriedade".

Dentre os vários métodos de monitoramento óptico pesquisados, podemos destacar o método no qual a zona de desgaste é iluminada por um feixe de laser e visualizada por uma câmera. A imagem obtida é então digitalizada e processada e a amplitude do desgaste obtida [14]. Este método foi inicialmente idealizado para se determinar o desgaste de flanco, porém pode ser utilizado também para outros tipos de desgaste. Outros métodos de medidas ópticas foram desenvolvidos [15, 16, 17] , Entretanto, deve-se ressaltar que essas medições não podem ser realizadas "on line", o que faz com que o processo tenha que ser interrompido para o desgaste ser analisado.

3.2.2- RADIOATIVIDADE

Sensores de radioatividade tem sido usados para se medir a perda volumétrica de material por desgaste [18, 19]. Este método baseia-se no fato de que as partículas que se despreendem da ferramenta originando o desgaste, são carregadas junto com os cavacos para fora da zona de usinagem. Baseando-se nisso, bombardeia-se a ferramenta com partículas radioativas. A medida que a ferramenta se desgasta, partículas ativadas radioativamente são extraídas da ferramenta, resultando num decaimento radioativo na zona de usinagem, que pode ser medido através de técnicas convenientes. É claro que o monitoramento por análise radioativa

tem aplicabilidade restrita para casos especiais, pois a radioatividade representa um sério risco a operadores ou mesmo ao ambiente e seu controle exige um alto investimento.

3.2.3- RESISTÊNCIA ELÉTRICA NA JUNÇÃO PEÇA/FERRAMENTA

Enquanto a ferramenta se desgasta, a área de contato entre peça e ferramenta aumenta e a resistência à passagem de corrente elétrica diminui. Este princípio tem sido utilizado para se monitorar o desgaste. O método pode ser exemplificado por um ensaio [20] onde uma película fina de um filme condutor é colado ao flanco de uma ferramenta; a medida que a ferramenta se desgasta essa película também se desgasta e a resistência a passagem de corrente através dessa película diminui, sendo medida por um multímetro na outra extremidade. A diferença da medida inicial com a medida instantânea é então relacionada ao desgaste. Apesar da aparente facilidade de aplicação e lógica do relacionamento entre as duas grandezas, existe complicações como temperatura e forças de usinagem que mascaram os resultados.

3.2.4- DIMENSÃO DA PEÇA USINADA

A medida que a ferramenta se desgasta, a aresta de corte recua e, conseqüentemente, a dimensão da peça varia. A medição da dimensão da peça pode ser feita com contato com a peça, através de apalpadores, ou sem contato com a peça através de feixes de laser [21, 22] ou sensores eletromagnéticos [23].

Estes métodos, porém, têm o inconveniente de não prevenir uma quebra súbita da ferramenta.

3.2.5- DISTÂNCIA FERRAMENTA/PEÇA

Durante uma operação de usinagem, a distância entre o porta-ferramenta e a peça diminui a medida que a ferramenta se desgasta. Esta distância pode ser medida diretamente usando-se técnicas como micrômetros eletrônicos ou outras técnicas que permitam medições de distância.

Uma técnica simples foi concebida [24] usando-se um micrômetro elétrico apalpador para medir diretamente a distância entre peça e porta ferramenta, com o micrômetro fixado no porta-ferramenta e o apalpador em contato direto com a peça de trabalho. Assim que a usinagem é iniciada o micrômetro mede constantemente a distância entre uma posição fixa de porta ferramenta e a peça. Alguns problemas surgem neste método e que são difíceis de serem controlados, como expansão térmica da ferramenta, irregularidades da superfície usinada, a vibração entre peça e ferramenta e a falta de precisão da máquina ferramenta.

3.3- MÉTODOS INDIRETOS

3.3.1- FORÇAS DE USINAGEM

As forças de usinagem são sem dúvida o método mais pesquisado para se monitorar o processo de usinagem por duas razões principais: a primeira é a facilidade de se medir as forças de usinagem por dinamometria, um método amplamente conhecido, e a segunda é que há um "consenso" de que a força de usinagem é um parâmetro bom indicador sobre desgaste, quebra ou outras anomalias referentes à ferramenta. O problema porém é a grande quantidade de informações conflitantes existentes na literatura. Na referência

[25] afirma-se, por exemplo que o melhor parâmetro de força para se monitorar o processo de usinagem seria a força principal de corte (F_c). Entretanto, outros trabalhos [26] afirmam que a força principal de corte não mantém qualquer relação com o desgaste e quebra da ferramenta.

Uma outra contradição existente no processo de monitoramento da força está na relação existente entre a força e o desgaste. Alguns resultados mostram que existe uma relação linear entre as forças e o desgaste da ferramenta, em outros casos, o comportamento não é linear [27]. Existem ainda resultados que mostram que a força não é um bom parâmetro para se medir o desgaste pois os esforços de usinagem apenas apresentam um crescimento razoável no instante anterior à quebra da ferramenta, sendo portanto eficientes, apenas como detector de falha da ferramenta.

Um dos equipamentos mais utilizados para se medir forças de usinagem é o dinamômetro piezoelétrico, que quando comprimido dinamicamente, produz um sinal elétrico proporcional às forças dinâmicas transmitidas através dele. O problema na sua utilização fora do ambiente de laboratório, é o fato de ser intrusivo (isto é, tem em geral grandes dimensões e tem que ser ligado a cabos que, no caso do torneamento, impossibilita a rotação da torre porta-ferramenta) e caro quando comparado a outros sensores. Os esforços de corte também podem ser medidos por dinamômetros ou torquímetros com extensômetros ou "strain gages" presos ao porta-ferramentas ou ao eixo-árvore, formando uma ponte de Wheatstone. O extensômetro tem a propriedade de, quando deformado, varia sua resistência elétrica. Assim, quando o porta-ferramenta ou eixo-árvore é deformado por uma força, as resistências da ponte

de Wheatstone mudam de valor, variando assim a corrente elétrica que sai da ponte, proporcionalmente à deformação causada pela força. Comparado com um dinamômetro piezoelétrico, este dinamômetro é mais barato, mas é menos preciso e sua resposta em frequência (resposta às forças dinâmicas) não é tão boa [28].

3.3.2- EMISSÃO ACÚSTICA

A emissão acústica pode ser definida como ondas de tensão/deformação elásticas liberadas espontaneamente pelos materiais em deformação ou sujeitos a fraturas [29]. As fontes de geração de emissão acústica no processo de usinagem são: deformação e ruptura do cavaco no plano de cisalhamento, atrito cavaco-ferramenta e ferramenta-peça. Como estes fenômenos que geram EA são influenciados pelo desgaste da ferramenta, a própria emissão acústica também é, o que a torna propícia a ser usada como um método de monitoramento indireto da vida da ferramenta.

O sinal de emissão acústica é geralmente detectado por sensores piezoelétricos, amplificado e transmitido para um osciloscópio, voltímetro RMS, gravador de sinal ou analisador de espectro. Os resultados obtidos de vários experimentos mostram que a faixa de interesse de frequência que deve ser analisada está entre 50 KHz e 1 MHz.

O nível de amplitude do sinal de emissão acústica aumenta proporcionalmente ao desgaste de flanco, principalmente em algumas faixas de frequência [30].

A EA apresenta algumas vantagens em relação a outros métodos de monitoramento indireto, quais sejam: o sensor é barato e pequeno (pouco intrusivo); as faixas de frequências estão acima das

frequências de vibração de certos elementos da máquina ferramenta como motores e rolamentos, fazendo com que tais vibrações não se constituam em ruído no sinal medido [31].

3.3.3- PARÂMETROS ELÉTRICOS DO MOTOR

Os esforços de corte são, como já visto, influenciados pelo desgaste da ferramenta, o que faz a potência consumida pelo processo também o seja.

Esta variação de potência pode ser explorada para o monitoramento de desgaste "on line", através da medição da corrente e/ou da voltagem dos motores de acionamento da máquina. Este método apresenta uma das características mais atraentes no processo de monitoramento que é ser totalmente não intrusivo ao processo de usinagem, pois os sensores ficam longe da zona de usinagem e em locais isolados. Além disso, são simples e baratos . Um problema muito citado na literatura, está no fato de que a potência ou corrente do motor é muito pouco sensível ao processo de desgaste e que o gradiente de potência entre ferramenta gasta e nova não afeta de forma explícita o total da potência requerida pelo sistema, pelo menos até a ferramenta apresentar um desgaste elevado, onde já se receia sua quebra [32]. Com isto, este método somente é indicado para processos de desbaste, onde não se está muito preocupado com a qualidade da peça , bastando-se apenas detectar a quebra da ferramenta. Nestes casos um valor de desgaste alto pode ser tolerado.

3.4- MONITORAMENTO DE USINAGEM VIA VIBRAÇÃO

3.4.1- INTRODUÇÃO

Sinais de vibração de vários processos de usinagem em faixas de frequências de poucos Hz a alguns kHz têm sido investigados por muitos pesquisadores para sua possível aplicação em sistemas de monitoramento em tempo real e alguns resultados têm sido relatados. Apesar de muitas demonstrações interessantes de praticabilidade em laboratório, algumas tentativas para aplicar a tecnologia para condições de fábrica não tem ainda alcançado sucesso . Os sinais de vibração dos processos de usinagem dos metais contém informações muito úteis e oferece excelentes possibilidades para diagnóstico em tempo real para muitos problemas críticos da usinagem dos metais, incluindo desgaste de ferramenta.

Muitos estudos tem sido realizados no sentido de se saber se o som ou vibração produzidos pela máquina carregam informações úteis para a manutenção de seus elementos estruturais. Em decorrência destes estudos, levantou-se a hipótese que da mesma maneira que a vibração ou som emitido pela máquina-ferramenta trás informações sobre o seu estado , estes mesmos sinais quando provenientes do par ferramenta - porta-ferramentas, também poderiam trazer informações sobre as condições da ferramenta ou do processo de formação de cavaco, o que possibilitaria o monitoramento em tempo real de diversos fatores do processo, dentre eles o desgaste e a vida da ferramenta. A dificuldade principal do monitoramento da vida da ferramenta via vibração está na identificação e isolamento da frequência de vibração que de fato influencia no processo de desgaste e quebra da ferramenta, pois o sistema global de usinagem possui vários fatores que induzema vibração e que não são

pertinentes ao processo de desgaste e quebra da ferramenta.

Um outro desafio relativo ao monitoramento via vibração está na universalização de um medidor que possa ser utilizado nos diversos tipos e condições de usinagem.

3.4.2- ORIGEM DAS VIBRAÇÕES EM USINAGEM E ESTABILIDADE DO SISTEMA

As fontes que geram vibração em um processo de usinagem, segundo Shaw [09], podem ser divididas em dois tipos, quais sejam:

- Vibração forçada
- Vibração auto-excitada

Entenda-se por vibração em usinagem como o movimento cíclico relativo entre peça e ferramenta.

a) VIBRAÇÃO FORÇADA:

Esta vibração acontece quando um carregamento externo variando ciclicamente, tem uma frequência que se aproxima da frequência natural do sistema (ferramenta-peça-máquina-dispositivo de fixação). Quando este é o caso, o sistema absorve ligeiramente mais energia por ciclo vibracional do que o sistema retorna ao meio através do amortecimento, e esta energia absorvida fica disponível para aumentar a amplitude vibracional.

A amplitude vibracional devido à vibração forçada pode ser reduzida por [33] :

- Eliminação das forças excitantes cíclicas
- Evitando coincidência da frequência da força excitante e a frequência natural do sistema.
- Aumentar rigidez
- Aumentar o amortecimento

Entre alguns fatores que contribuem para a geração de vibrações forçadas podemos destacar:

- Desbalanceamento de eixos
- Folga de mancais e rolamentos
- Má lubrificação do equipamento
- Quebra de dentes de engrenagem
- Utilização do equipamento além da sua capacidade

b) VIBRAÇÃO AUTO-EXCITADA

A vibração auto-excitada acontece quando mais energia é absorvida do que despreendida durante um ciclo simples. Para induzir uma vibração auto-excitada, a ferramenta necessita apenas ser batida ou encontrar uma pequena encrustação dura no material da peça. No mais, a vibração auto excitada pode ter origem em usinagem descontínua, espessura de cavaco variável e atrito, dentre outras [09]. O próprio processo de formação do cavaco por ser cíclico, pode gerar vibração auto-excitada.

Como pode ser deduzido das definições do dois tipos de vibração, a que interessa ao monitoramento do processo de desgaste e quebra da ferramenta é a vibração auto excitada, na qual está contida toda vibração originária do contato ferramenta-peça e cavaco- ferramenta.

3.4.3- INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM NA ESTABILIDADE DO SISTEMA

O sistema máquina-peça-ferramenta-dispositivo de fixação em uma operação de usinagem pode ser estável ou não dependendo de um certo numero de parâmetros. Tais parâmetros são:

- Velocidade de corte
- Avanço
- Condição da aresta de corte (forma, afiação, etc)
- Geometria de usinagem
- Material da ferramenta e peça

Com o desgaste da ferramenta, as forças de usinagem aumentam, causando maior vibração da ferramenta. Porém, é importante que se conheça não somente a influência do desgaste na vibração, mas também a influência dos fatores citados acima, pois muitas vezes, a variação de algum desses, mascara o monitoramento do desgaste via vibração.

A estabilidade do sistema pode ser melhorada pela variação de qualquer um dos elementos do sistema. Segundo Arshinov [34]:

- A vibração está associada ao material da peça a ser usinada. Geralmente com o aumento da dureza e do limite de resistência do material as vibrações reduzem-se.

- Em velocidades de corte baixas, a vibração do sistema aumenta com o crescimento da velocidade. A partir de um determinado valor de velocidade (que depende da rigidez do sistema), as vibrações tendem a decrescer. Isto coincide com o comportamento da superfície final em operações de acabamento, onde um melhor acabamento depende de vibrações menores e isto ocorre com o aumento da velocidade de corte.

- As vibrações do sistema tendem a aumentar com o aumento da profundidade de corte.

- O efeito do avanço pode ser considerado desprezível quando comparado com a velocidade e profundidade de corte.

- Quanto maior o raio de ponta, maior será a vibração do

sistema, devido ao aumento da largura do cavaco, o que diminui sua espessura média, aumentando a pressão específica de corte e, conseqüentemente, os esforços de corte.

- Na faixa de 3 à 20 graus o ângulo de saída não representa influência significativa na vibração do sistema.

- Variações na forma da ferramenta também influenciam na vibração. Por exemplo, ferramentas chanfradas tendem a diminuir a vibração do sistema.

- Muitas vezes, como por exemplo no torneamento de eixos finos e compridos ou de furos de diâmetro pequeno, onde o porta-ferramentas também tem que ter diâmetro pequeno, é muito difícil se conseguir evitar a vibração. Com isso tem-se maiores dificuldades para obter-se bons acabamentos superficiais e tolerâncias e a quebra da ferramenta é facilitada.

3.4.4- INSTRUMENTAÇÃO APLICADA AO MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO

Uma montagem completa de um sistema experimental de monitoramento via vibração é dada pela figura 3.1. Todos os equipamentos da figura serão comentados a seguir, reservando-se atenção especial aos acelerômetros e ao conversor A/D

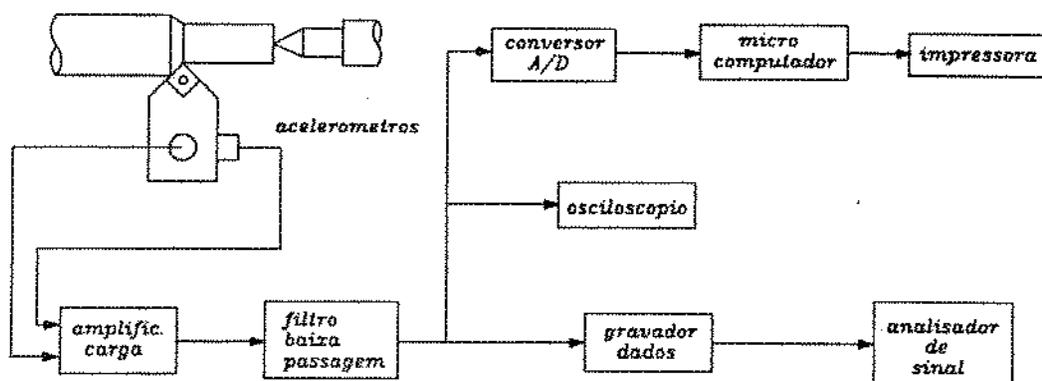


Figura 3.1 - Esquema de montagem do sistema de monitoramento

1) Amplificadores- Os sinais de saída dos sensores tem uma amplitude muito baixa , necessitando-se geralmente de uma amplificação que ajuste o nível de voltagem desejável.

2) Filtros de frequência- Como será citado posteriormente a gama de frequências de análise do sinal é, muitas vezes, restrita a uma determinada faixa, para possibilitar a eliminação de sinais provenientes de fenômenos alheios ao que se quer monitorar. Os filtros podem ser:

a) Passa baixa- Filtra os sinais com frequência superior a um determinado valor especificado no equipamento.

b)- Passa alta- Filtra os sinais com frequência inferior a um determinado valor.

c) Passa banda- Somente deixa passar os sinais com frequências em uma determinada faixa de frequências.

3) Gravador- Utilizado para armazenamento e gravação do sinal bruto, para possibilitar a análise posterior dos sinais e um estudo mais detalhado do processo, já que se pode gravar os sinais de vibração de todo o processo.

4) Analisador eletrônico de sinal- é um aparelho que permite a construção do espectro de frequência do sinal via "hardware"

5) Osciloscópio- é sempre importante, quando ainda se está na fase de análise do processo, para acompanhar visualmente a variação do sinal.

6) Microcomputador- Grava os dados, analisa o sinal, etc.

7) Conversor A/D [35]- é uma placa de expansão que permite integrar o uso de microcomputadores ao meio ambiente externo. Essas placas interfaceiam os micros aos diversos sinais existentes externamente, sejam estes sinais analógicos ou digitais, permitindo a utilização destes microcomputadores nos mais variados campos como por exemplo:

- Aquisição de sinais mecânicos, elétricos, etc
- Monitoramento de sinais em tempo real
- Supervisão e controle de processos
- Controle de qualidade, etc....

Essas placas são geralmente bastante flexíveis, permitindo a sua utilização em processos singulares de acordo com as necessidades dos usuários. Normalmente diversos sinais são adquiridos simultaneamente por uma mesma placa, pois ela possui

mais de um canal de entrada.

Dentre as necessidades mais comuns do usuário do sistema de aquisição de sinais estão:

- coleta e armazenamento do sinal

- monitoramento dos sinais para tomada de decisão durante o ensaio

- acionar um dispositivo em uma determinada condição

Além destas necessidades primárias, essas placas permitem, por exemplo, realizar coletas em tempo real, com várias atividades simultâneas: armazenamento em disco e visualização dos dados em paralelo com a aquisição, geração de sinais de excitação ou a reprodução de um sinal gravado anteriormente.

Essas placas são acessadas por "softwares" que utilizam linguagens largamente difundidas como Basic, Pascal, C, e utilizam os endereços de entrada e saída (input, output) específicos de cada "software" utilizado, de acordo com a disponibilidade e conveniência do usuário.

8) Acelerômetros piezoelétricos [36] (sensores de vibração).

Alguns materiais em estado sólido que respondem eletricamente a uma força mecânica, (chamados materiais piezoelétricos) são utilizados como dispositivos transdutores de choque, vibração e pressão. Os materiais piezoelétricos usados em acelerômetros geram uma força eletromotriz (fem) quando sujeitos a movimento mecânico, e não geram saída em condições de força estática. Estes materiais piezoelétricos tem um alcance elástico linear em que produzem uma "fem" proporcional ao esforço mecânico que recebem.

A ação piezoelétrica é representada em termos de carga "q",

capacitância "c", e da tensão de circuito aberto "e". Quando uma força mecânica "F" é exercida sobre o cristal piezoelétrico, é gerada uma carga "q" (figura 3.2).

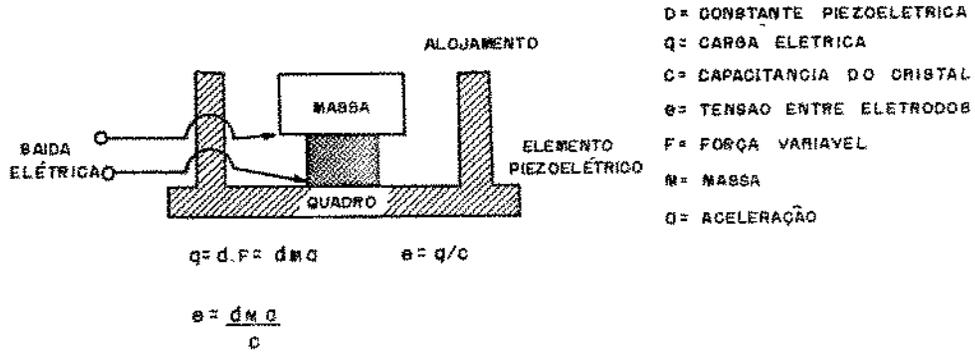
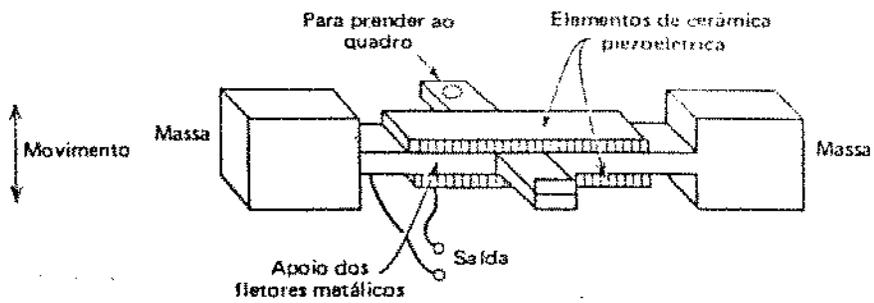
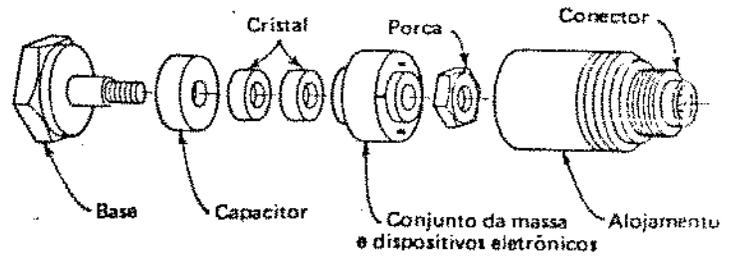
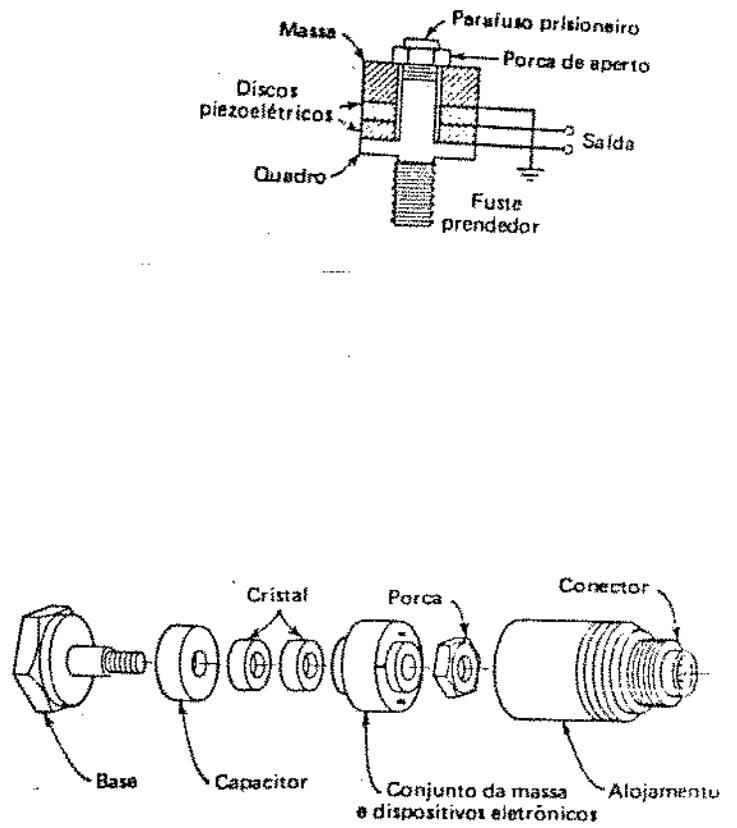
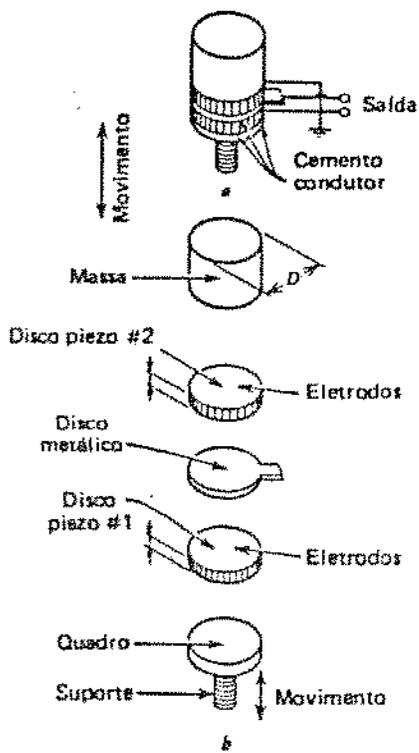


Figura 3.2 - Esquema de funcionamento de um acelerômetro

Um acelerômetro de compressão consiste basicamente em um disco de material piezoelétrico e uma massa colocada num quadro como na figura 3.2. O movimento na direção indicada provoca forças compressivas que agem no elemento piezoelétrico, produzindo uma saída elétrica proporcional à aceleração (dai o nome acelerômetro).

Alguns tipos básicos de acelerômetros são ilustrados nas figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7.[28]



Uma ênfase que se deve dar à utilização dos acelerômetros está no fato dos materiais piezoelétricos possuírem uma temperatura característica chamada ponto "Curie". Quando um elemento piezoelétrico é aquecido acima deste ponto, está permanentemente danificado e perde completamente sua ação piezoelétrica. Portanto, cuidados devem ser tomados para que a região em que o acelerômetro está colocado não se aqueça excessivamente.

Para uma medida correta dos dados do acelerômetro este deve estar acoplado adequadamente aos corpos de prova. Na prática muitos métodos são utilizados para a fixação, dependendo basicamente do sistema em que ele vai ser utilizado.

Quando possível é preferível sempre fixar o acelerômetro através de um parafuso prisioneiro, de modo que toda a base do acelerômetro faça um bom contato com a peça em teste.

Normalmente para esse fim um torque de 15 a 22 kgf.cm é adequado. Se o torque for excessivo pode danificar as roscas ou quebrar os prisioneiros. Já um torque insuficiente resulta em uma fixação pobre em contato e causa grandes erros nas medições.

Em superfícies que não podem ser perfuradas, cola-se o acelerômetro na peça ou a fixação é feita através de fitas sensíveis à pressão. Esses métodos, porém, devem ser evitados pois o seu controle é bastante complicado e quase sempre não apresentam os mesmos resultados em relação ao parafuso prisioneiro.

A realização de medição de aceleração pode afetar, e realmente afeta, alguns sistemas que estão sendo medidos por duas razões óbvias:

- O suporte necessário para acoplar o acelerômetro a uma estrutura flexível pode introduzir enrijecimento local na área de

fixação e mudar a resposta estrutural.

- A massa adicionada do transdutor pode fazer variar as características do sistema.

3.4.5 ANÁLISE DO SINAL E ESTRATÉGIA DE MONITORAMENTO DO DESGASTE VIA VIBRAÇÃO

A análise do sinal de vibração, como qualquer outro tipo de sinal, pode ser feita no domínio do tempo ou da frequência.

No domínio da frequência, a técnica mais utilizada é a da análise espectral. Para sinal simples ela possibilita avaliar a densidade de potência espectral (PSD), função que representa a distribuição de energia sobre o domínio de frequência. . Em outras palavras, quando um corpo vibra, em geral, ele o faz em infinitas diferentes frequências, cada uma com sua amplitude de vibração. Através do PSD (figura 3.8), pode-se ter uma idéia do valor desta amplitude para cada faixa de frequência

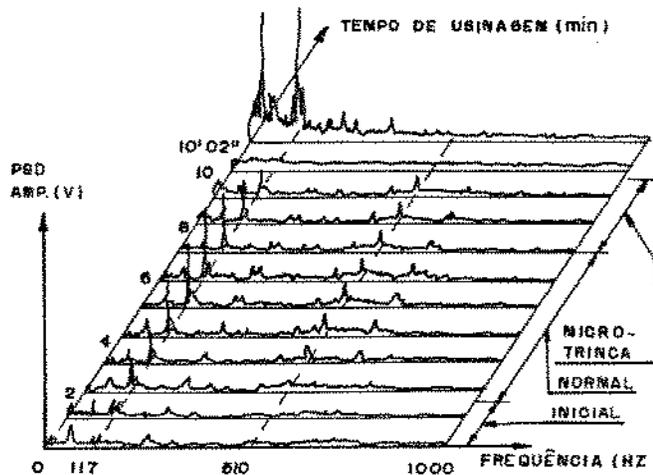


Figura 3.8 - Exemplo do diagrama PSD

A faixa de frequência para estudo do monitoramento de vibração está entre 0 - 20000 Hz, porém a maioria dos pesquisadores limitam a faixa de interesse até no máximo 8000 Hz.

Como mostrado no diagrama PSD da figura 3.8 apenas algumas faixas de frequências são sensíveis ao desgaste da ferramenta ou seja apresentam uma variação considerável do sinal ao longo do tempo. Dentre as faixas comumente citadas como sensíveis ao desgaste da ferramenta estão as faixas de frequência entre 0-200 Hz e uma outra faixa de frequência mais alta, geralmente citada como sendo associada a frequência natural do sistema ferramenta /porta-ferramenta e que, em toda literatura citada, não ultrapassa a barreira dos 8000 Hz.

Isto é ilustrado na tabela 3.1 a seguir onde relaciona-se alguns trabalhos de pesquisadores e suas respectivas faixas de frequências sensíveis ao desgaste.

Tabela 3.1 - Pesquisadores e faixas de frequência sensíveis

| PESQUISADOR | FAIXA DE FREQUÊNCIA SENSÍVEL |
|--------------------------------|--|
| XU-ZHANG-JIANG [37] | 0 - 117Hz 510Hz |
| RAO [38] | 1850Hz 3200Hz 4800Hz |
| AKIHIKO [39] | 500 - 800Hz |
| PANDIT-KASHOU [40] | 4300 - 4700Hz |
| WELLER-SCHRIER-WEICHBRODT [41] | 0 - 4000Hz |
| SOKOLOWSKI-KOSMOL [42] | 0 - 600Hz 5000 - 6000Hz |
| MARTIN-DRAPIER-MUTEL [12] | 2000 - 2500Hz |
| FANG-YAO-ARNDT [16] | 0 - 150Hz 2000 - 2500Hz |

Encontrar a faixa de frequência sensível ao desgaste é o principal aspecto do monitoramento via vibração, pois, como citado anteriormente, vários são os fatores causadores de vibração no sistema e estes fatores são aleatórios, o que impossibilitaria identificar e quantificar cada um deles no processo global de usinagem.

Uma vez determinada a faixa de frequência que realmente é sensível ao processo de desgaste da ferramenta, o monitoramento via vibração se torna extremamente atraente. O fato de uma dessas faixas estar associada à frequência natural do porta-ferramenta, torna o monitoramento bastante mais cômodo, pois essa frequência pode ser facilmente encontrada para os mais diversos tipos de ferramenta e porta-ferramenta, bastando para isso causar um impacto no porta-ferramenta, e com o próprio sistema de monitoramento, encontrar a frequência natural, que será a frequência do sinal de resposta causado na ferramenta pelo impacto. Feito isso, o próprio sistema pode selecionar a faixa de frequência do monitoramento.

Solucionada a questão da faixa de frequência sensível ao desgaste, vem a tona o problema de identificar o comportamento do sinal ao longo do tempo e relacionar esse sinal ao desgaste e quebra da ferramenta.

Na maioria dos casos estudados em virtude da grande quantidade de pontos por segundo gerado pela vibração, o processo tem que sofrer um tratamento do sinal e transferir o problema do domínio de frequência para o domínio do tempo. Isso pode ser feito usando-se diversos parâmetros como média, desvio padrão e raiz quadrada da média (RMS) do sinal.

Weller [41] sugere os seguintes procedimentos para a análise

do sinal de vibração no processo de usinagem: dividi-se o sinal, através de filtros de frequência, em duas faixas distintas, uma de 0 à 4000Hz e outra de 4000 à 8000Hz. Estes sinais passam por um circuito que divide o valor do sinal de um pelo outro, ou seja, calcula a relação entre os dois sinais. Como constatado pelos resultados obtidos, o sinal da faixa de frequência mais alta não se altera com o desenvolvimento do desgaste, o que acontece na faixa mais baixa. Quando então a relação atinge um nível pré-estabelecido, emiti-se um sinal indicando ferramenta gasta.

Martin [43] seleciona a faixa de frequência sensível ao desgaste e propõe um método para determinação da ferramenta gasta. Admiti-se uma relação 1:10 entre o nível de sinal emitido pela ferramenta gasta e aquele emitido pela ferramenta em início de vida. Esta relação é analisada constantemente no tempo e quando a relação atinge o valor de 1:10, como citado anteriormente, procede-se à troca da ferramenta. Este método é compartilhado também por Akihiko [39] que compara o sinal entre a ferramenta nova e o valor instantâneo da vibração, porém não determina um número exato para a relação. Somente cita que esta relação representa o fenômeno de desgaste da ferramenta. Um problema deste método é que não foi feita uma análise para o caso de quebra ou eminência de quebra da ferramenta. Não se saberia, nesse caso, qual o comportamento da relação do sinal de entrada e o sinal instantâneo de vibração, pois pode ocorrer uma quebra súbita da ferramenta antes que o sinal atinja o nível pré estabelecido. É citado por Jiang [37], que quando a ferramenta está na eminência de quebra, ocorre uma queda brusca do nível do sinal (o chamado ruído branco). Nesse caso, logicamente este tipo de relação citado acima não

funcionaria. O mais correto, então, seria a análise de uma taxa de variação instantânea no tempo.

Segundo Jiang [37] o processo de desgaste da ferramenta pode ser dividido em 5 estágios (figura 3.10):

- I) estágio inicial de desgaste
- II) estágio de desgaste normal
- III) estágio de micro trincas
- IV) estágio de desgaste rápido
- V) estágio de quebra da ferramenta

Segundo ele, estes processos podem ser identificados através do sinal de vibração usando-se o sistema representado pela figura 3.9. Como pode ser visto pela figura 3.10, os três filtros selecionados com a frequência adequada, apresentam os níveis de energia mostrados, analisando-se os sinais que passam pelos filtros e a relação de uns com os outros, pode-se facilmente identificar cada um dos estágios citados anteriormente, o que poderia monitorar por completo o processo. O problema principal deste método está na complexidade do sistema, o que talvez inviabilizaria a sua aplicação a nível prático.

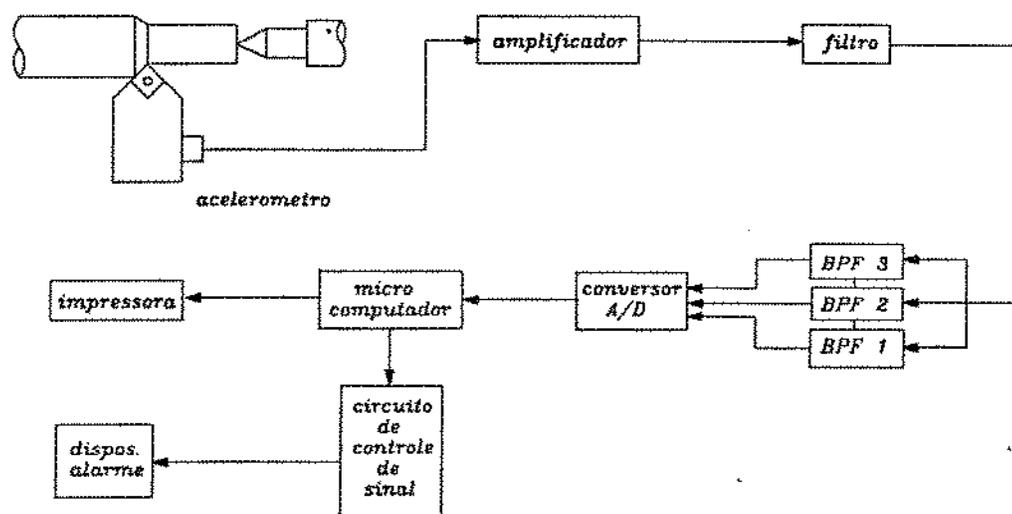


Figura 3.9 - Sistema de monitoramento do sinal [37]

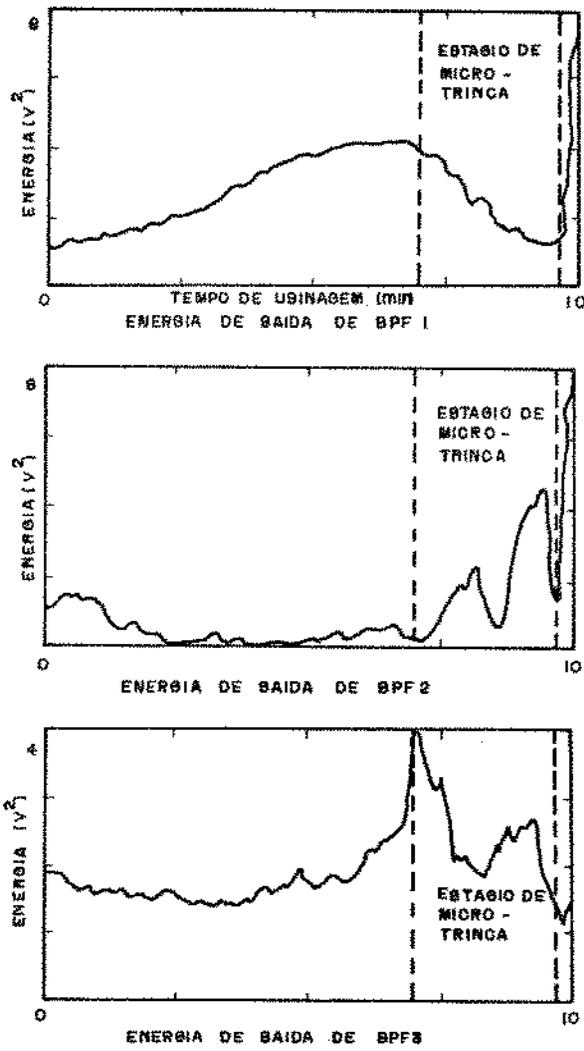


Figura 3.10 - Sinal de Vibração em diferentes faixas de frequência[37]

CAPÍTULO 4

MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS E MONTAGEM DO SISTEMA

Os sinais de vibração podem ser obtidos por uma série de equipamentos já discutidos anteriormente. Neste trabalho foi utilizado um acelerômetro piezoelétrico Kistler que transforma os sinais de vibração em voltagem, permitindo a leitura destes pontos via computador.

As principais características deste acelerômetro são listadas a seguir [44] :

Faixa sensível +500 -500 g

Sensibilidade a 100Hz 11.0 mV/g

Faixa de frequência 1..8000Hz

Faixa de temperatura de operação -50..120 °C

Frequência de ressonância 50kHz

Este acelerômetro apresenta características técnicas como tamanho, faixa de frequência , sistema de acoplamento, etc., adequadas aos experimentos deste trabalho.

O acelerômetro por si só não permite a leitura dos dados. Ele precisa de um equipamento chamado "Coupler" ou acoplador que supre o acelerômetro com uma corrente de excitação constante e liga o sinal dos acelerômetros ao equipamento de leitura do sinal, no nosso caso a placa A/D e o osciloscópio.

O acoplador utilizado no experimento foi um "Piezotron Coupler" da Kistler que é bastante versátil e é o tipo indicado para o acelerômetro utilizado [44].

A leitura dos sinais foi gravada na memória de um

microcomputador. Para que o sinal analógico possa ser lido pelo computador, precisa passar por uma placa de conversão analógica/digital que permita a conversão da voltagem em caracteres que possam ser lidos pela CPU do micro. A placa utilizada foi uma CAD 12/36 da empresa LINX que permite a leitura dos dados de até 16 canais distintos a uma frequência aproximada de 60000Hz [35]. No experimento foram utilizados dois canais distintos, medidos na faixa de frequência de 1 à 16000Hz.

Os ensaios foram executados em um torno CNC ROMI de 30Hp de potência, com motor principal e servo motores de avanço da ferramenta acionados por corrente contínua.

O esquema de montagem do sistema de monitoramento é mostrado pela figura 4.1.

Foram utilizados 38 corpos de prova (fig.4.2) com aço VM 40 (ABNT 4340) com a seguinte composição química:

C=0.43%

Si=0.35%

Mn=0.80%

Cr=0.90%

Ni=2.0%

Mo=0.30%.

Segundo o fabricante, o aço têm as seguintes propriedades mecânicas:

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| Limite de resistência | 95kgf/mm ² |
| Dureza | 250 HB |
| Alongamento | 28% |
| Limite de escoamento | 85kgf/mm ² |
| Estricção | 65% |

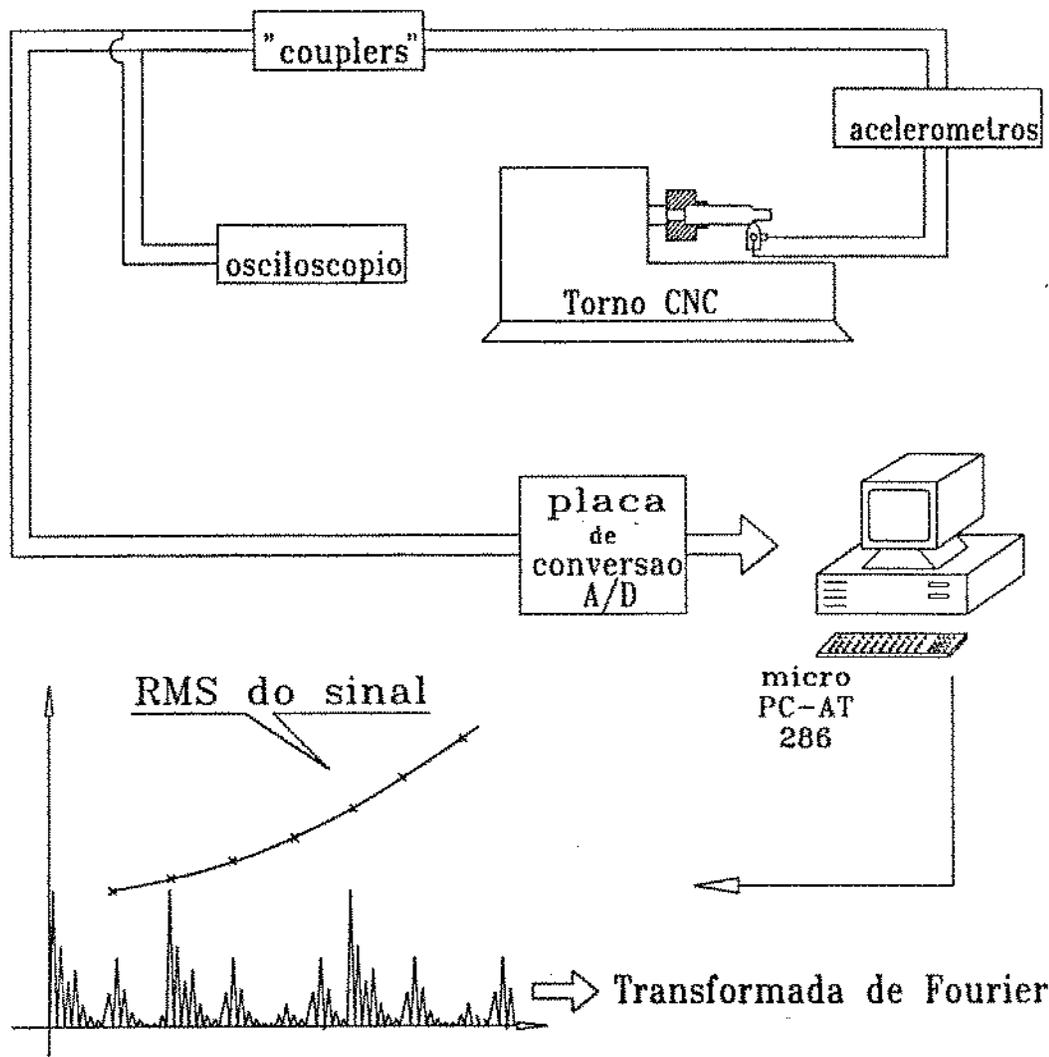


Figura 4.1 - Esquema da montagem do sistema de monitoramento

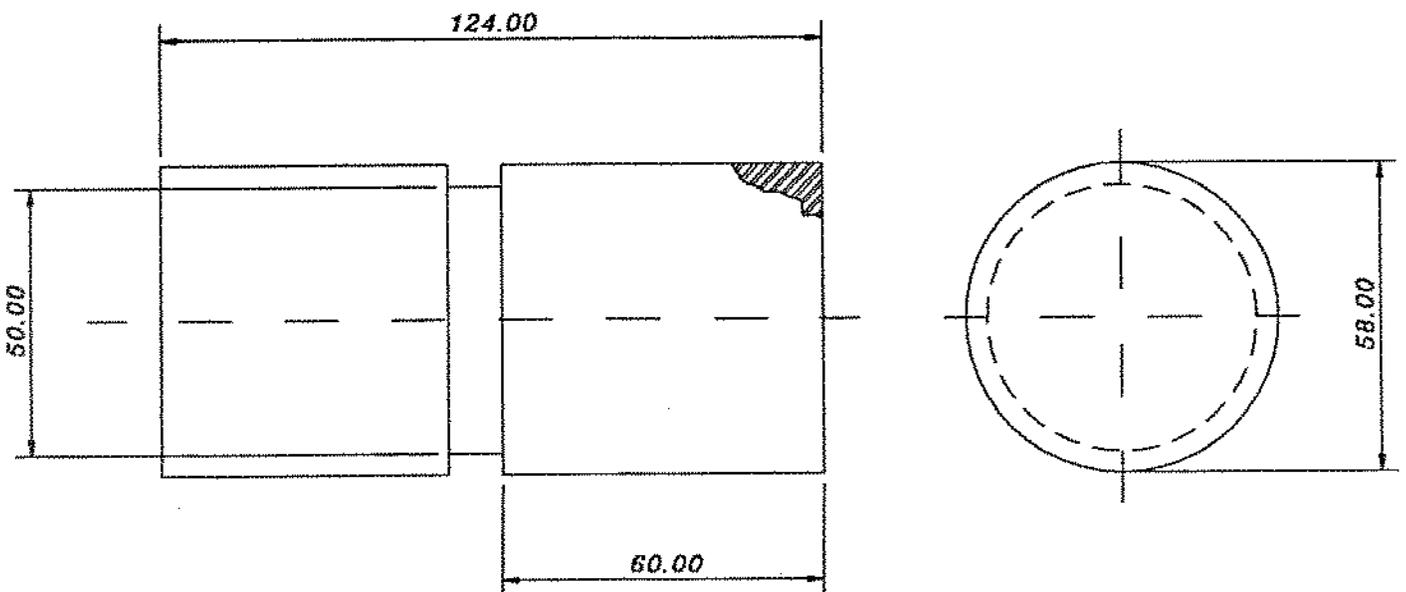


Figura 4.2 Desenho do corpo de prova utilizado

As ferramentas utilizadas no experimento foram os insertos TNMG 160404-61 e TNMG 160408-61 (geometria típica de operações de acabamento) da Sandvik com recobrimento GC 435 (classe ISO P35). O porta ferramentas utilizado foi um PTG NR 2525 M16 da Sandvik. Para as medições de rugosidade utilizou-se um rugosímetro da Mitutoyo, tipo "Surftest 211".

As fotografias de ferramenta utilizadas, foram feitas a partir de um microscópio eletrônico de varredura.

4.2 MONTAGEM DOS ACELERÔMETROS

Os acelerômetros foram montados no porta ferramentas, isto porque o sinal de vibração que interessa no monitoramento da vida da ferramenta é causado pelo contato ferramenta-peça e cavaco-ferramenta. Portanto, quanto mais próximo estiver montado o acelerômetro da região de corte, mais eficaz será o sinal captado.

Montou-se, como mostra a fig.4.3 dois acelerômetros no porta ferramentas. Um na direção principal de corte e outro na direção do avanço. Em todos os ensaios mediu-se a vibração nas duas direções para saber-se qual das direções representa melhor o processo de desgaste da ferramenta e de geração da rugosidade superficial da peça ou se uma complementa a outra ou ainda se são independentes.

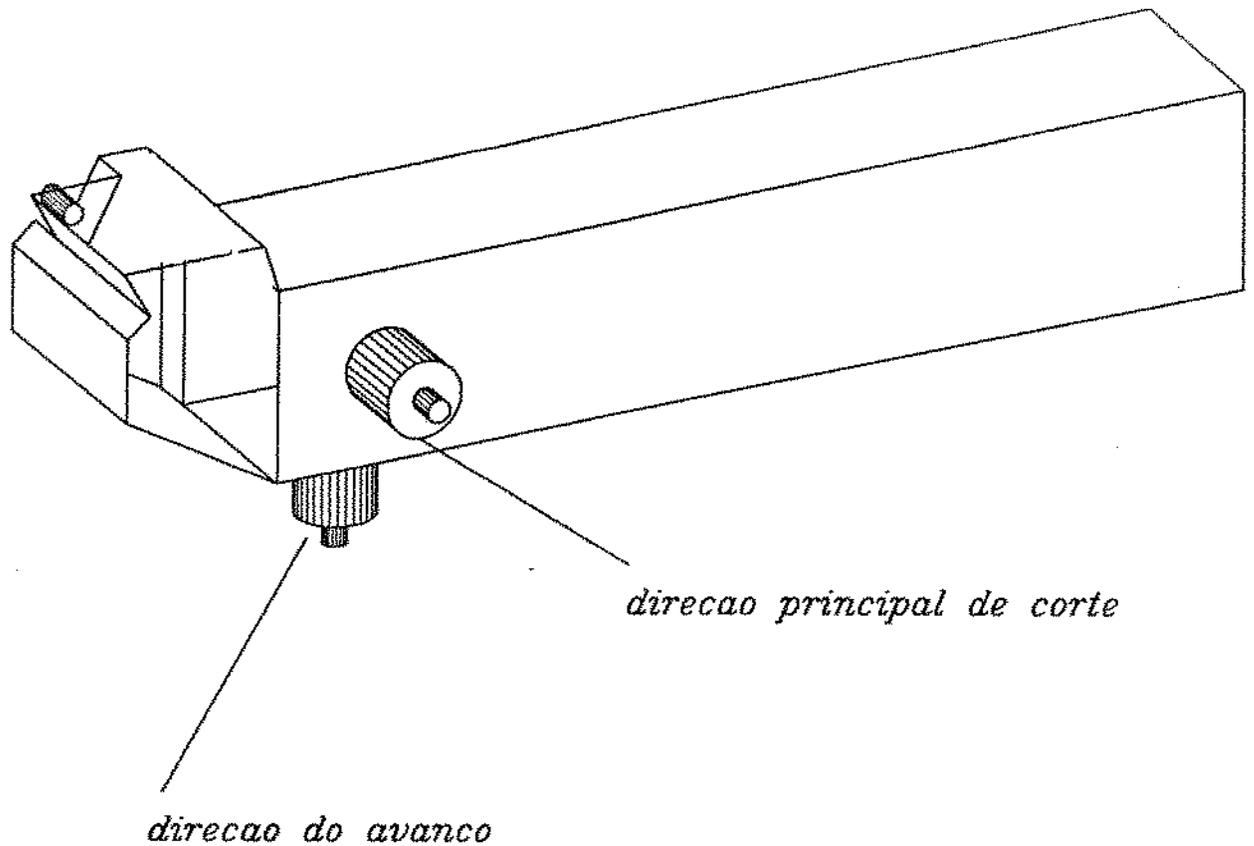


Figura 4.3 - Esquema da montagem dos acelerômetros

4.3 PROGRAMA DE AQUISIÇÃO E AMOSTRAGEM

A placa de aquisição analógica/digital necessita ser comandada via software para adquirir os sinais. Isto pode ser feito a partir de linguagens como Pascal, C, C⁺⁺, Basic etc. ou através de softwares específicos de aquisição de sinal. Neste trabalho, a placa foi programada a partir da linguagem pascal.

O programa completo de aquisição de sinal está listado e explicado em detalhes no apêndice A. Aqui deve-se ressaltar que a placa possui vários modos de operação ou aquisição. O modo de aquisição escolhido no nosso caso foi por DMA (Direct Memory Access) ou Acesso Direto a Memória. Este método é o que permite a maior velocidade de aquisição de dados, pois os dados ao serem coletados não passam pela CPU do microcomputador, sendo armazenados diretamente (no caso do Pascal no seu heap). Somente depois de

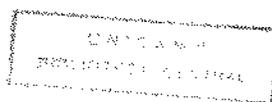
coletados é que esses dados serão processados, porém eles já estão armazenados e podem ser manipulados e gravados posteriormente de maneira adequada.

A amostragem foi feita a 16000Hz (62.5 μ s de tempo de amostragem) coletando-se 1024 pontos por canal (2 canais). Este valor foi escolhido porque desejava-se amostrar sinais até 8000Hz. O sistema de coleta era feito disparando-se o computador exatamente no momento em que a ferramenta tocava a peça. A partir desse momento, o computador processa o programa e espera um tempo até a ferramenta alcançar o meio do corpo de prova para coletar os dados. Isto foi feito para poder se medir posteriormente a rugosidade nesta mesma região, ou seja o centro da peça. Desta maneira, tinha-se a medição da vibração e da rugosidade no mesmo momento (mesma região da peça). Antes de cada ensaio ser realizado, rodava-se o programa com o torno desligado para se poder zerar o sinal de saída do "coupler". O zeramento, quando tornava-se necessário, era feito através do próprio "coupler", que permite esta operação. Para se saber se a placa estava lendo realmente os sinais com precisão, usava-se uma fonte de tensão constante com dois canais e alimentava-se o micro com um sinal previamente estabelecido e rodava-se o programa comparando-se o sinal do gerador de tensão constante com o arquivo gerado pelo programa.

4.4- METODOLOGIA DOS ENSAIOS REALIZADOS

4.4.1- ENSAIOS PRELIMINARES

Os ensaios preliminares tiveram por objetivo testar os parâmetros de usinagem, para regulagem do equipamento, pois não se sabia com precisão a amplitude de vibração para os parâmetros a



serem testados como desgaste de ferramenta, velocidade de corte, etc. Isto foi feito para se poder ajustar o fundo de escala da placa A/D que possui vários fundos de escala chamados de ganhos (isso está detalhado no apêndice A). Também foi testado o sinal da vibração para as três principais direções envolvidas no processo de usinagem; direção da profundidade de corte, direção principal de corte e direção do avanço, optando-se por medir apenas as duas últimas direções, pois a direção da profundidade de corte apresentou um sinal de bem menor amplitude que os demais. Além disto, o acelerômetro nesta direção não ficaria tão próximo da interface peça-ferramenta quanto se desejava e, principalmente, as outras duas direções apresentaram resultados bastante satisfatórios, adequados para atingir os objetivos.

Estes ensaios foram realizados do seguinte modo:

1- Selecionou-se as condições mínimas e máximas respectivamente:

Vc ---- 150 e 350m/min
ap ---- 0.4 e 1.5mm
f ---- 0.07 e 0.29mm/volta

2- Selecionou-se uma ferramenta nova e uma ferramenta completamente gasta, com desgaste provocado naturalmente.

3- Entrou-se no programa de aquisição do sinal e programou-se o fundo de escala ou ganho no máximo e bipolar(-10/+10V ou ganho1).

4- Testou-se primeiramente as condições mínimas com a ferramenta nova, ou seja:

Vc=150m/min ap=0.4mm f=0.07mm inserto novo

Depois analisou-se o resultado (amplitude do sinal).

5- Ídem item 4 com as condições máximas

Vc=350m/min ap=1.5mm f=0.29mm inserto novo

6- Ídem ítem 5 porém com a ferramenta gasta.

Depois de realizados estes ensaios, pode-se ter maior segurança quanto aos resultados que seriam obtidos nos ensaios posteriores e também quanto a própria segurança de operação dos equipamentos. O teste em condições reais também possibilitou testar o programa de aquisição de dados para se verificar a sua confiabilidade e eficiência.

4.4.2- ENSAIO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM

Este teste tem por objetivo comparar a influência dos parâmetros de usinagem na vibração do sistema ferramenta-peça e na rugosidade da peça.

No primeiro ensaio manteve-se f e ap constantes e variou-se a velocidade de corte (todas em condições de usinagem típicas de acabamento). Media-se a vibração durante a usinagem de cada peça e posteriormente a rugosidade de cada uma. Toda peça era usinada com uma aresta nova da ferramenta para se evitar a influência do desgaste da ferramenta. A tabela 4.1 mostra as condições de usinagem utilizadas.

Tabela 4.1- ensaio da velocidade de corte. Ins. TNMG 160408-61

| peça | Vc (m/min) | Ap (mm) | f (mm) | aresta |
|------|------------|---------|--------|--------|
| 01 | 150 | 1 | 0.2 | 001 |
| 02 | 200 | 1 | 0.2 | 002 |
| 03 | 250 | 1 | 0.2 | 003 |
| 04 | 300 | 1 | 0.2 | 004 |
| 05 | 350 | 1 | 0.2 | 005 |

No segundo ensaio manteve-se f e V_c constantes e variou-se a profundidade de corte (todas as condições de usinagem típicas de acabamento). As medições realizadas foram idênticas ao ensaio da velocidade de corte. A tabela 4.2 mostra as condições de usinagem utilizadas.

Tabela 4.2-ensaio da prof. de corte. Ins. TNMG 160408-61

| peça | a_p (mm) | V_c (m/min) | f (mm) | aresta |
|------|------------|---------------|----------|--------|
| 01 | 0.4 | 200 | 0.2 | 001 |
| 02 | 0.5 | 200 | 0.2 | 002 |
| 03 | 1.0 | 200 | 0.2 | 003 |
| 04 | 1.2 | 200 | 0.2 | 004 |
| 05 | 1.5 | 200 | 0.2 | 005 |

No terceiro ensaio para um dado raio de ponta (0.4 ou 0.8) manteve-se a_p e V_c constantes e variou-se o avanço (condições típicas de usinagem de acabamento). Para cada raio de ponta, o conjunto de avanços utilizados foi diferente, a fim de manter o conjunto de valores de $f^2/8r$ (rugosidade máxima teórica) constante para os dois raios de ponta testados. Assim, por exemplo, quando $f=0.10\text{mm/volta}$ e $r=0.8\text{mm}$, tem-se $f^2/8r=1.56\mu\text{m}$, idêntica quando se tem $f=0.07\text{mm/volta}$ e $r=0.4\text{mm}$. As medições realizadas foram idênticas ao ensaio anterior. A tabela 4.3 mostra as condições de usinagem utilizadas.

Tabela 4.3- Ensaio do avanço ins. TNMG 160404-61 e TNMG 160408-61

| peça | f (mm) | r (mm) | Vc(m/min) | ap (mm) | aresta | $f^2/8r(\mu m)$ |
|------|--------|--------|-----------|---------|--------|-----------------|
| 01 | 0.10 | 0.8 | 200 | 0.7 | 01 | 1.56 |
| 02 | 0.14 | 0.8 | 200 | 0.7 | 02 | 3.0 |
| 03 | 0.20 | 0.8 | 200 | 0.7 | 03 | 6.25 |
| 04 | 0.24 | 0.8 | 200 | 0.7 | 04 | 9.0 |
| 05 | 0.29 | 0.8 | 200 | 0.7 | 05 | 13.1 |
| 06 | 0.07 | 0.4 | 200 | 0.7 | 01 | 1.53 |
| 07 | 0.10 | 0.4 | 200 | 0.7 | 02 | 3.12 |
| 08 | 0.14 | 0.4 | 200 | 0.7 | 03 | 6.12 |
| 09 | 0.17 | 0.4 | 200 | 0.7 | 04 | 9.0 |
| 10 | 0.20 | 0.4 | 200 | 0.7 | 05 | 12.5 |

4.4.3- ENSAIO DE DESGASTE

Foram realizados 8 ensaios de desgaste divididos em duas partes. A primeira parte consistiu em medir somente a vibração e a rugosidade e a segunda além dos parâmetros citados, também fotografou-se a região do desgaste da ferramenta.

Os ensaios 06 e 07 foram realizados com as mesmas condições do ensaio 02 para se testar a repetibilidade. As condições de usinagem (típicas de acabamento) foram escolhidas de forma a se realizar ensaios em três diferentes velocidades de corte (com f constante) e em três diferentes avanços (com Vc constante). A tabela 4.4 mostra as condições de usinagem utilizadas.

Tabela 4.4 - Condições de usinagem para o ensaio de desgaste

| num do ensaio | Vc (m/min) | f (mm) | ap (mm) |
|---------------|------------|--------|---------|
| 01 | 300 | 0.16 | 1 |
| 02 | 300 | 0.20 | 1 |
| 03 | 300 | 0.24 | 1 |
| 04 | 250 | 0.20 | 1 |
| 05 | 350 | 0.20 | 1 |
| 06 | 300 | 0.20 | 1 |
| 07 | 300 | 0.20 | 1 |
| 08 | 300 | 0.20 | 1 |

O ensaio desenvolveu-se do seguinte modo:

1- Com uma aresta nova iniciava-se o ensaio nas condições determinadas.

2- O corpo de prova era usinado em três passes consecutivos de 1mm cada, e cada passe gerava um arquivo de sinal.

3- Depois de três passadas consecutivas, o corpo era levado ao rugosímetro e media-se a rugosidade, enquanto o ensaio no torno continuava.

4- Usinava-se um novo corpo de prova e repetia-se o procedimento 3 sucessivamente até um corpo de prova atingir uma rugosidade no mínimo 2.5 vezes maior que a do 1^o corpo a ser usinado (critério de fim de vida).

5- Ao atingir-se o fim de vida da ferramenta trocava-se a pastilha e reiniciava-se no item 1, com novas condições de usinagem.

A segunda parte do ensaio de desgaste (ensaio 8) consistiu além de se medir a rugosidade e vibração, também fotografar o

desenvolvimento do desgaste da ferramenta (inserto) através de um microscópio eletrônico de varredura.

O ensaio se desenvolveu similarmente aos ensaios 1 à 7, porém o ensaio era interrompido em períodos determinados e o inserto era levado ao microscópio e fotografava-se a zona de desgaste do inserto.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1- ENSAIO DE PARÂMETROS DE USINAGEM (V_c , a_p , f) DENTRO DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM EM ACABAMENTO

Foram testados os parâmetros de usinagem velocidade de corte, profundidade de corte e avanço. As condições e os resultados são mostrados nas figuras 5.1 à 5.8.

Nestes experimentos pôde-se verificar a influência desses parâmetros na amplitude de vibração do sistema peça-ferramenta, através da raiz quadrada da média (RMS) do sinal de vibração e da rugosidade superficial da peça usinada. Pode-se verificar que os três parâmetros testados afetam a estabilidade do sistema ou seja a medida em que aumentamos os valores de velocidade de corte, profundidade de corte e avanço há uma tendência a um aumento da amplitude do RMS, tanto na direção principal de corte como na direção de avanço. Uma aplicação bastante interessante para este ensaio seria a de se definir os valores limites das condições de usinagem em operação de acabamento que não podem superar uma dada amplitude de vibração, ou seja, onde o parâmetro limitante seja a vibração do sistema.

Pode-se ver pelos gráficos que existe uma sobreposição das condições de usinagem, isto é, os parâmetros de usinagem somam-se para compor a vibração do sistema.

Dentro das condições do ensaio, o parâmetro que aparentemente mais influenciou na amplitude do sinal foi a velocidade de corte, como pode-se observar na figura 5.1, onde varia-se a velocidade de corte.

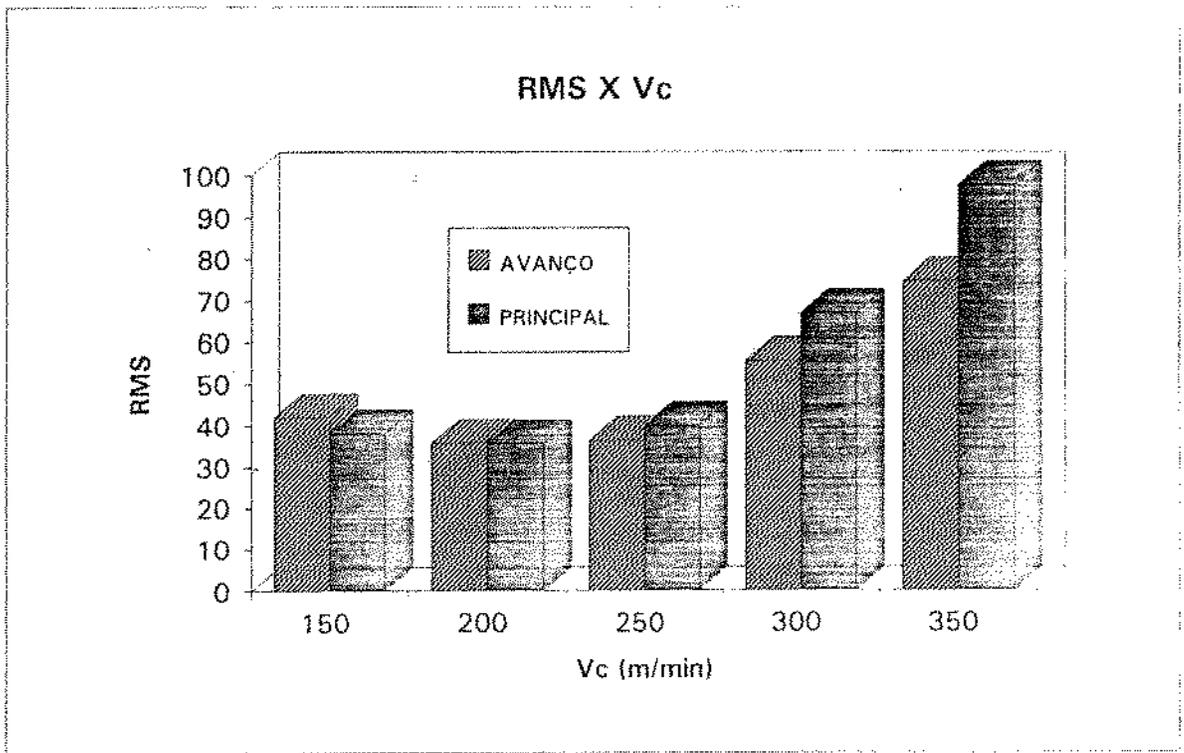


Figura 5.1 - Influência da velocidade de corte no RMS do sinal de vibração ($a_p=1\text{mm}$ $f=0.20\text{mm}$)

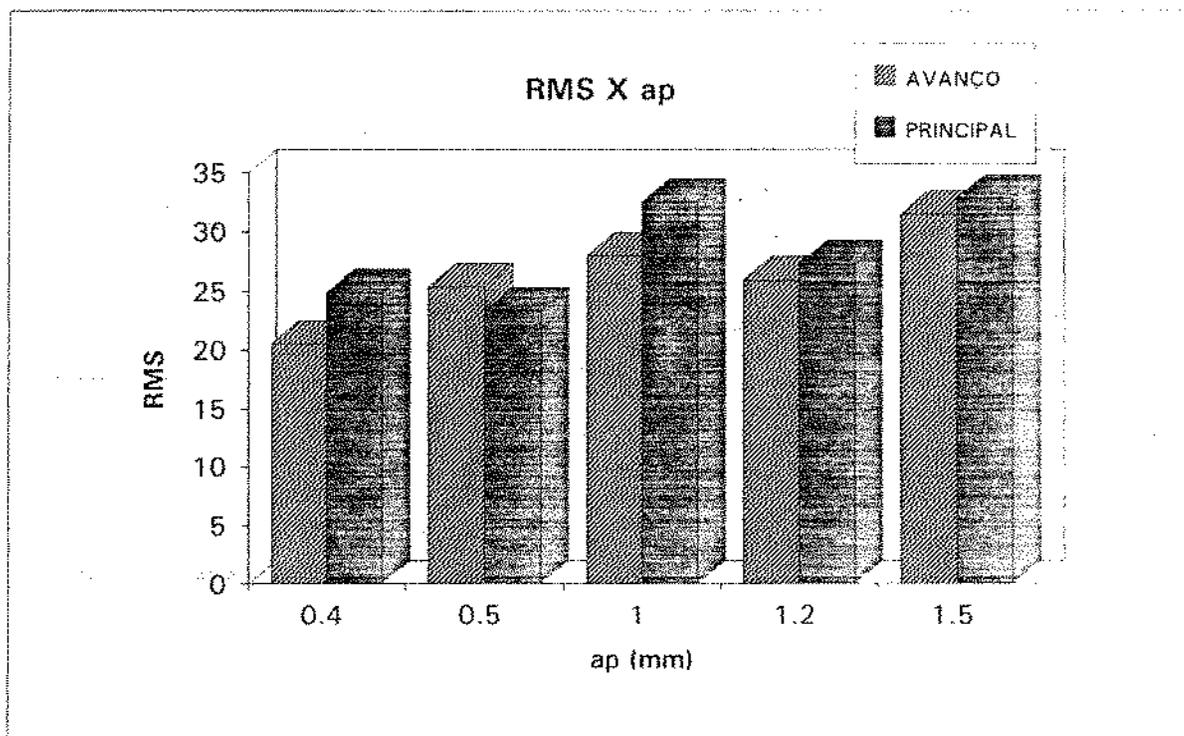


Figura 5.2 - Influência da profundidade de corte no RMS do sinal de vibração ($V_c=200\text{m/min}$ $f=0.2\text{mm}$)

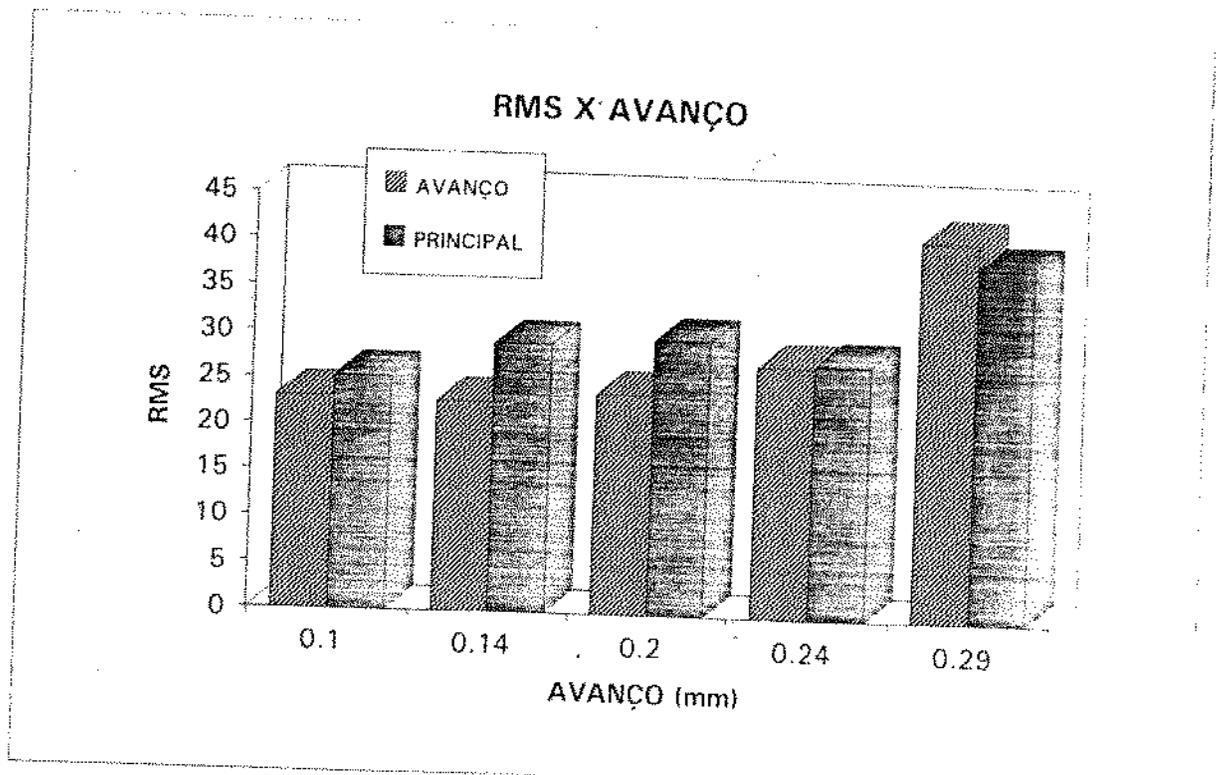


Figura 5.3 - Influência do avanço no RMS do sinal de vibração ($r_p=0.8\text{mm}$ $a_p=0.7\text{mm}$ $V_c=200\text{m/min}$)

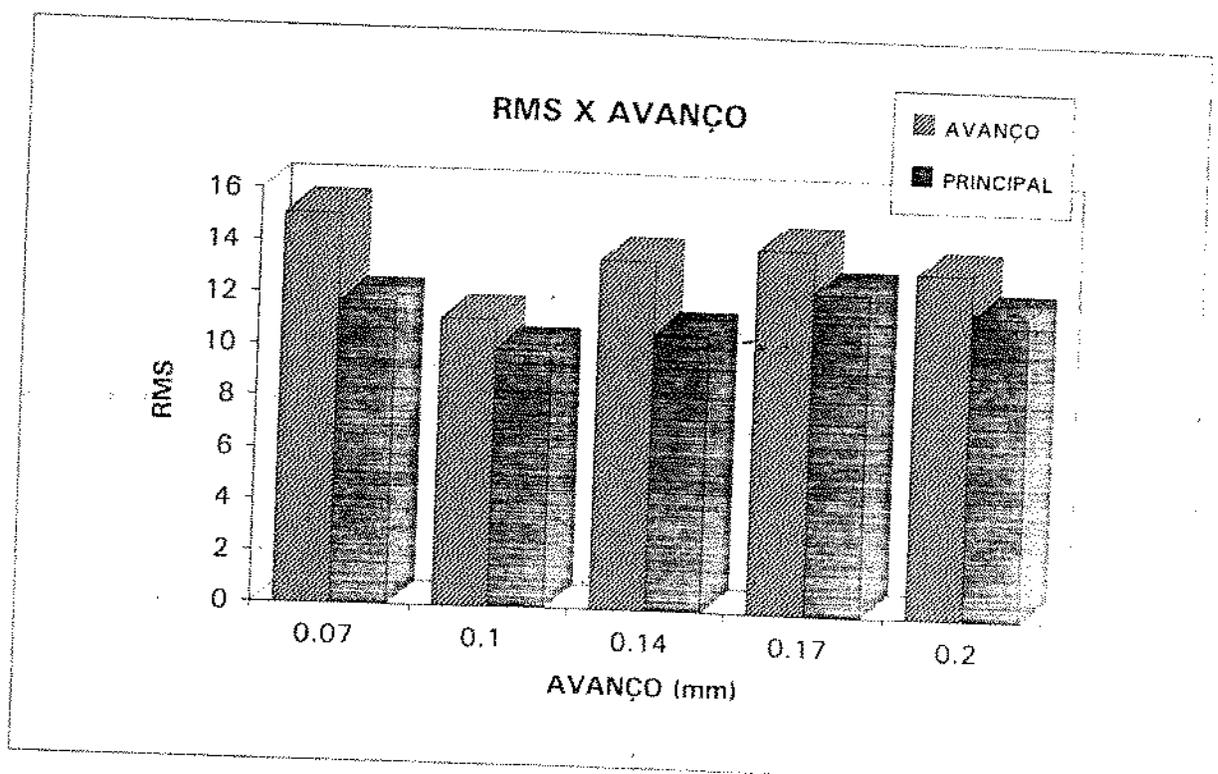


Figura 5.4 influência do avanço no RMS do sinal de vibração ($r_p=0.4\text{mm}$ $V_c=200\text{m/min}$ $a_p=0.7\text{mm}$)

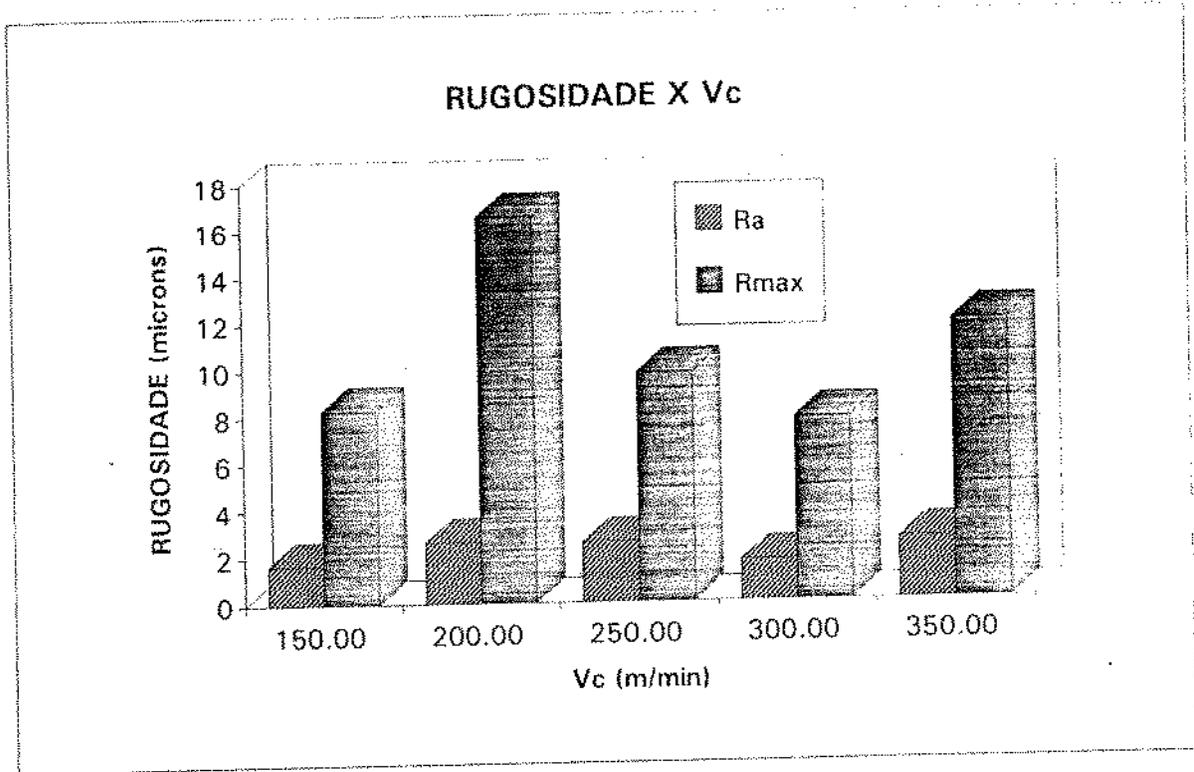


Figura 5.5- Influência da velocidade de corte na rugosidade da peça usinada ($a_p=1\text{mm}$ $f=0.2\text{mm}$)

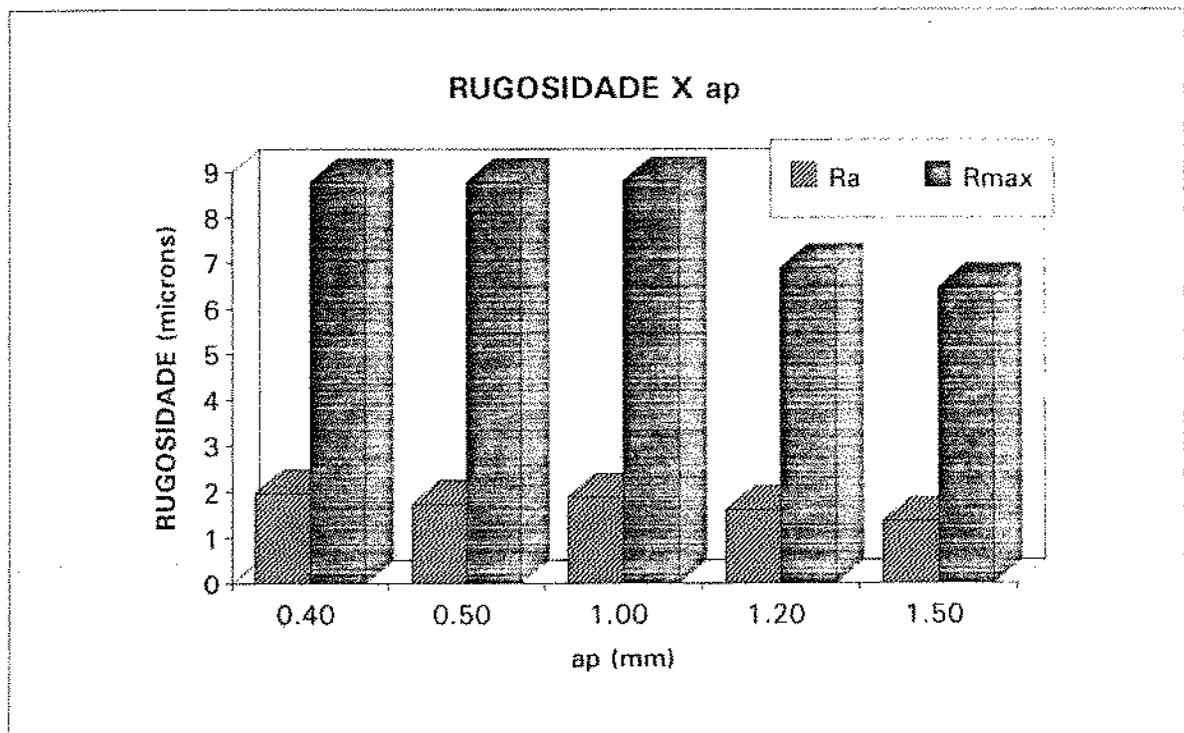


Figura 5.6 - Influência da profundidade de corte no valor da rugosidade ($V_c=200\text{m/min}$ $f=0.2\text{mm}$)

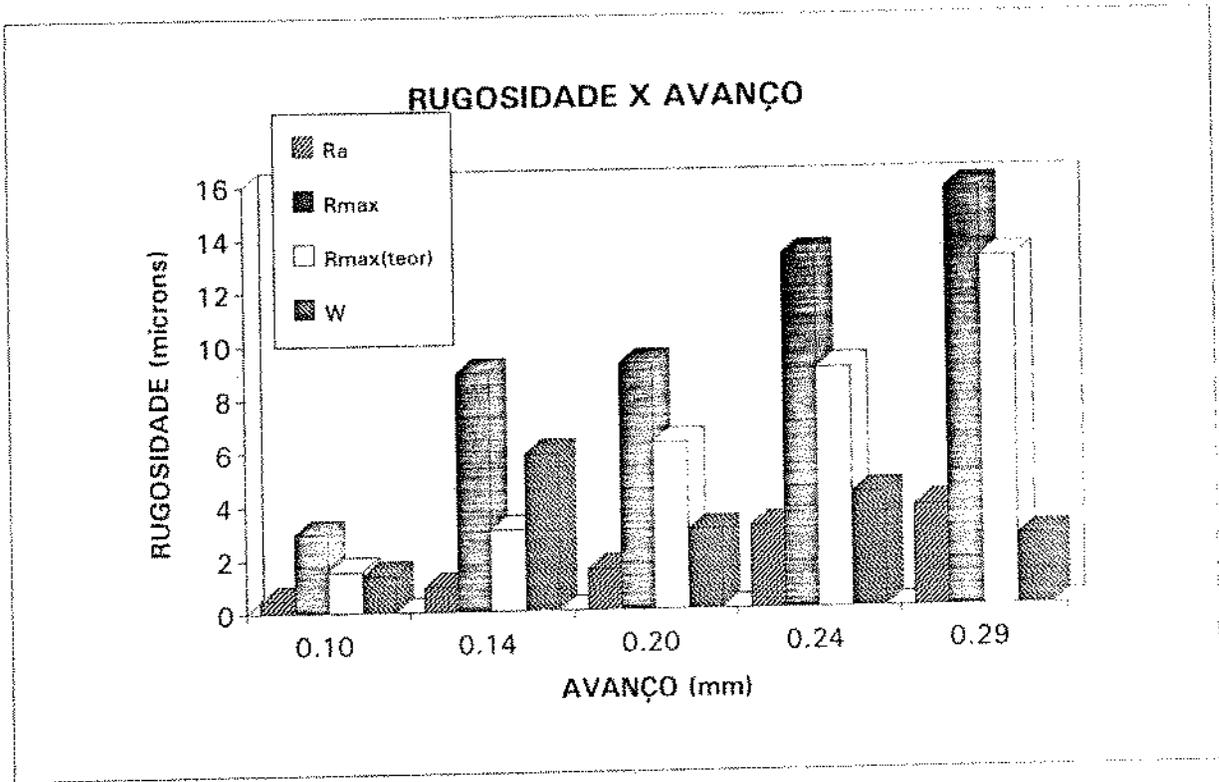


Figura 5.7 - Influência do avanço no valor da rugosidade ($r_p=0.8\text{mm}$ $a_p=0.7\text{mm}$ $V_c=200\text{m/min}$)

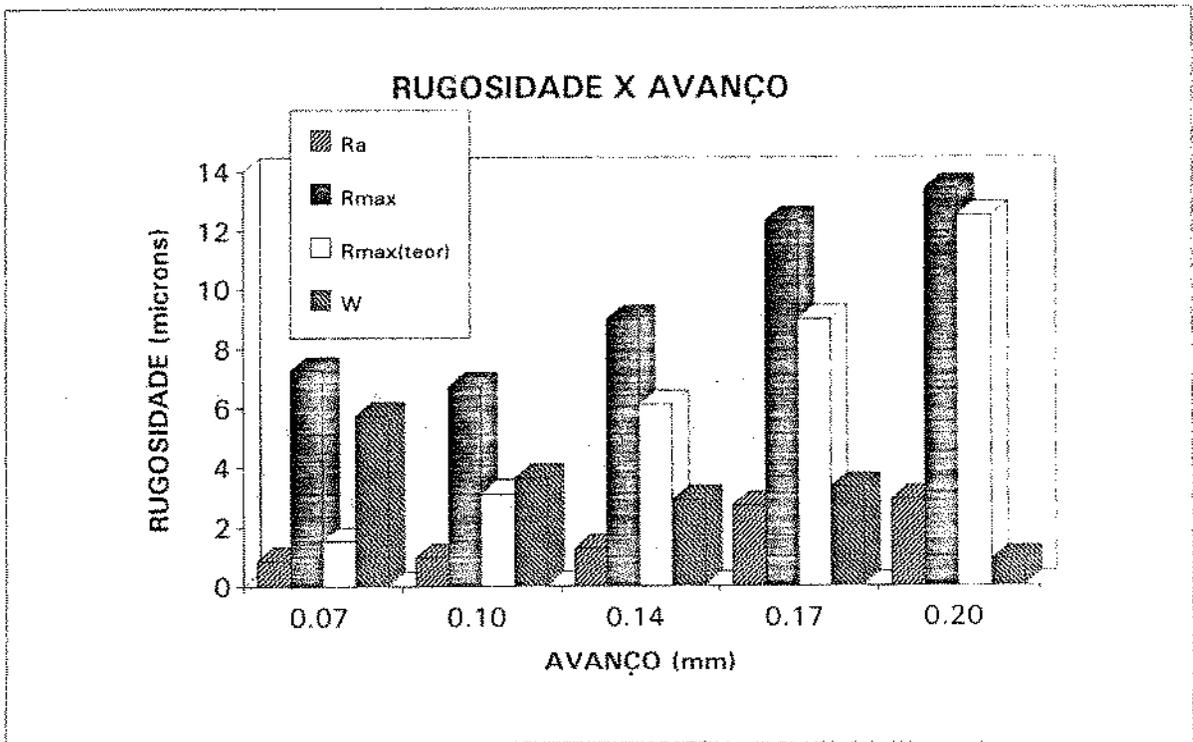


Figura 5.8 - Influência do avanço no valor da rugosidade ($r_p=0.4\text{mm}$ $a_p=0.7\text{mm}$ $V_c=200\text{m/min}$)

A razão da amplitude do maior sinal pelo sinal menor está na faixa de 2 à 2.5 enquanto nos gráficos onde a velocidade é constante (figura 5.2, 5.3 e 5.4) essa razão atinge um valor máximo em torno de 1.5. Uma comparação que pode ser feita nas figuras 5.3 e 5.4, cuja única diferença é o raio de ponta da ferramenta, é que com o raio de ponta 0.4mm o sistema vibra claramente, em amplitude menor. Este fato pode ser explicado pela menor área de contato peça-ferramenta que um raio de ponta de 0.4mm proporciona [09]. Esta observação das figuras 5.3 e 5.4 será importante mais adiante, quando será analisado o desgaste da ferramenta.

A influência do avanço no sinal de vibração foi menor que a influência da profundidade e da velocidade de corte, concordando com o que a literatura afirma.

Com relação à influência dos parâmetros de corte na rugosidade superficial e sua relação com a vibração, tem-se :

- Não existe uma tendência definida da rugosidade superficial com o aumento da velocidade de corte, isto é, a rugosidade oscila entre valores altos e baixos (principalmente o R_{max}) enquanto a velocidade cresce (fig. 5.5). Isto mostra que a influência da vibração na formação da rugosidade não foi marcante, pois o RMS do sinal de vibração sempre cresceu com a velocidade (fig. 5.1). Parece haver relação entre rugosidade e o RMS do sinal para velocidades altas como 350m/min, onde o sinal de vibração tem o aumento mais acentuado e onde a rugosidade passa a crescer. Isto sugere que existe relação entre rugosidade e vibração para condições de instabilidade do sistema. Isto será explorado mais adiante, nos ensaios de desgaste, onde o desgaste rápido e a desintegração da aresta de corte da ferramenta também representa um

fator de instabilidade do sistema.

- Não existe uma influência marcante da profundidade de usinagem na rugosidade. Com relação ao Ra, pode-se dizer que há um pequeno decréscimo deste com o crescimento de ap. Já o Rmax oscila, tendo seu valor máximo quando ap tem um valor intermediário (fig. 5.6). Talvez o crescimento acentuado de Rmax para ap = 1mm possa ser explicado pelo aumento de vibração, pois neste ponto, o valor do RMS da vibração também foi grande (fig. 5.2). Com certeza, porém, a vibração não explica sozinha a variação do Rmax, pois ela apresentou uma variação bem menor que a de rugosidade.

- O avanço tem uma grande influência na rugosidade, devido à sua contribuição geométrica (figs. 5.7 e 5.8). Quando, porém, se compara a relação $R_{max(Real)}/R_{max(Teórico)}$ para os dois raios de ponta diferentes, vê-se que essa relação é sempre maior quando o raio de ponta é maior ($r = 0.8$ mm), a não ser para avanços menores que 0.1 mm/volta. Assim, comparando-se os dois valores de Rmax (para os dois raios de ponta - 0.4 e 0.8 mm) para um mesmo valor de $R_{max(Teórico)} (f^2/8r)$, vê-se que ele é sempre maior quando $r=0.8$ mm devido à maior área de contato peça-ferramenta, com conseqüente maior atrito. Para valores pequenos de f (0.07 mm/volta para $r = 0.4$ mm e 0.1 mm/volta para $r = 0.8$ mm) o Rmax é maior quando $f=0.07$ mm/volta e $r = 0.4$ mm, devido à um maior valor da pressão específica de corte neste valor de avanço.

- Comparando o valor da rugosidade já descontado a contribuição geométrica de f e r (parâmetro "w" nas figs. 5.7 e 5.8) com o RMS do sinal de vibração (figs. 5.3 e 5.4), verifica-se que estes dois parâmetros oscilam com o avanço, mas de uma maneira completamente diferente um do outro. Assim, por exemplo, para $r =$

0.4 mm, quando "W" é mínimo ($W = 1.0$) e bem menor que os demais, o RMS da vibração é razoavelmente alto. Para $r = 0.8$ mm, quando $W = 2.6$ (o segundo menor valor) o RMS do sinal de vibração é o máximo de todos.

Concluindo, não se pode dizer que a variação da vibração com os parâmetros de usinagem teve influência marcante na variação da rugosidade superficial da peça.

Até esse momento do trabalho não foi possível uma conclusão precisa da relação da vibração na direção do avanço e na direção principal de corte, pois em alguns casos a amplitude da vibração é maior na direção principal, outras vezes na de avanço. A única observação a se fazer é que, aparentemente, as duas se comportam de maneira similar, ou seja, quando uma cresce a outra também cresce.

5.2- ENSAIO DE DESGASTE DE FERRAMENTA PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE USINAGEM DE ACABAMENTO

No ensaio de desgaste da ferramenta, além do sinal de vibração, acompanhou-se a evolução da rugosidade da peça. Também analisou-se o comportamento da vibração no domínio da frequência, através da transformada rápida de Fourier (FFT). A transformada de Fourier foi analisada para se confrontar resultados obtidos por diversos pesquisadores [40, 39, 13, 43, 37] que afirmam que a vibração é sensível apenas em determinadas faixas de frequência. Sendo assim, o sinal de vibração deve ser filtrado para essas faixas específicas para se obter uma relação mais precisa entre desgaste e sinal de vibração.

As figuras 5.9 e 5.11 mostram os valores de RMS da vibração

nas direções de corte e de avanço para diferentes valores da velocidade de corte (figura 5.9) e avanço (figura 5.11). Pode-se verificar por essas figuras, que o comportamento do sinal RMS de vibração na direção principal de corte e na direção de avanço são praticamente idênticos e tem também amplitudes similares. Com isso pode-se concluir que, quando a economia de sensores e processamento de sinal se faz necessário, somente uma das direções de usinagem pode ser monitorada. Nesses gráficos mediu-se o sinal de vibração desde a ferramenta nova até o fim de vida da mesma, segundo o critério adotado. Uma outra análise a ser feita é que todas as curvas referentes a esses gráficos tem a mesma tendência de crescimento no tempo, isto é, tem um período de certa estabilidade, (com uma inclinação levemente positiva) seguido de um aumento brusco. Como para cada curva isolada as condições de usinagem são constantes durante o ensaio, a única explicação para esse crescimento do sinal é o desgaste da ferramenta. Observando-se ainda esses gráficos, podemos verificar o comportamento exponencial das curvas. Isto sugere uma divisão dessas curvas em áreas distintas para identificação de estágios do estado da ferramenta. Pode-se dividir essas curvas em quatro áreas e identificar cada uma delas, como por exemplo:

área 1 ----> ferramenta nova

área 2 ----> ferramenta em estágio inicial de desgaste

área 3 ----> ferramenta em estágio de desgaste rápido

área 4 ----> ferramenta gasta

Essas áreas devem ser definidas para cada critério de fim de vida escolhido. Uma outra observação interessante é que esses estágios podem ser facilmente definidos através da variação do

sinal de vibração em um intervalo de tempo pré-determinado. Em termos práticos, está se determinando a tangente da curva do sinal em intervalos pré determinados. Como por exemplo, dividi-se a curva em intervalos de valores e associa-se esses valores às quatro áreas definidas anteriormente.

$0 < \Delta RMS/\Delta t \leq 0.1$ ----> ferramenta nova

$0.1 < \Delta RMS/\Delta t \leq 0.3$ -----> fer. em estágio inic. de desgaste

$0.3 < \Delta RMS/\Delta t \leq 0.6$ -----> fer. em estágio de desgaste rápido

$0.6 < \Delta RMS/\Delta t$ -----> ferramenta gasta

Com isto, pode-se construir um sistema automático de controle do processo. Assim, quando a inclinação da curva ($\Delta RMS/\Delta t$) ultrapassar um determinado valor (no exemplo 0.6) o computador, que está realizando este cálculo em tempo real, informa a máquina ou o operador que está na hora de trocar a ferramenta

Esses valores mostrados acima servem apenas para exemplificar, não sendo portanto regras sugeridas por esse trabalho.

Pelo que foi exposto, montou-se a partir dos gráficos das figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12, tabela 5.1, que mostra o comprimento de usinagem correspondente à vida da ferramenta. O fim de vida da ferramenta foi retirado destes gráficos no ponto anterior à elevação brusca dos parâmetros: RMS (principal), RMS (avanço), R_a e R_{max}

Tabela 5.1: Valores de vida de ferramenta (em metros de comprimento de corte) para diferentes critérios

| f (mm/r) | Vc(m/min) | Critério | | | |
|----------|-----------|----------|------|--------------|-----------|
| | | Ra | Rmax | RMS (princ.) | RMS (av.) |
| 0.16 | 300 | 1450 | 1450 | 1300 | 1400 |
| 0.20 | 300 | 1500 | 1530 | 1650 | 1650 |
| 0.24 | 300 | 1430 | 1550 | 1350 | 1350 |
| 0.20 | 250 | 2500 | 2600 | 2400 | 2500 |
| 0.20 | 350 | 650 | 650 | 700 | 700 |

Como pode-se observar através da tabela 5.1, tanto os critérios de rugosidade, quanto os critérios de vibração, apresentam valores muito próximos para a vida da ferramenta, o que mostra a adequação do uso da vibração para estabelecimento do fim de vida da ferramenta em operações de torneamento em acabamento. Outro fator que confirma isto é o comportamento da rugosidade superficial e da vibração, isto é, não é o valor absoluto da vibração que é importante, mas sua variação, e isto é válido para todas as condições de usinagem. O momento de trocar a ferramenta não depende do valor do RMS do sinal, mas do momento em que este sinal muda bruscamente. Assim, a estratégia de sempre comparar a inclinação da curva com valores anteriores (como citado há pouco) pode ser feita, independentemente da condição de usinagem, eliminando-se então uma das principais deficiências do monitoramento indireto que é só ser válido para condições de usinagem constantes.

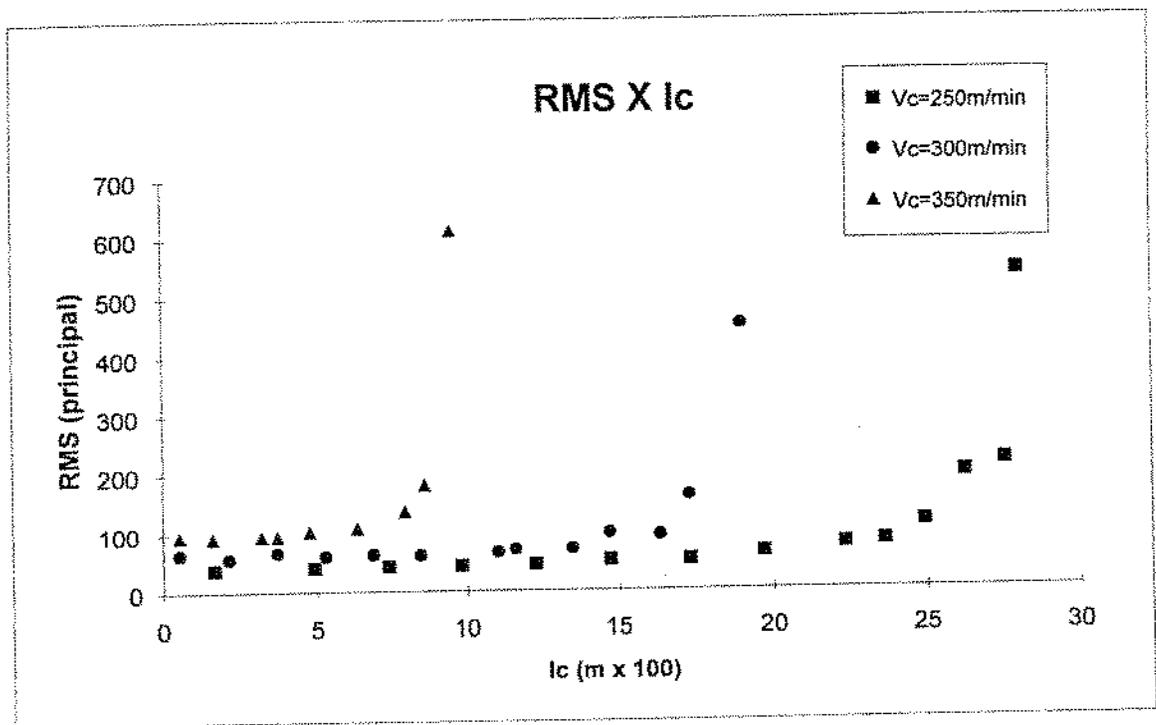
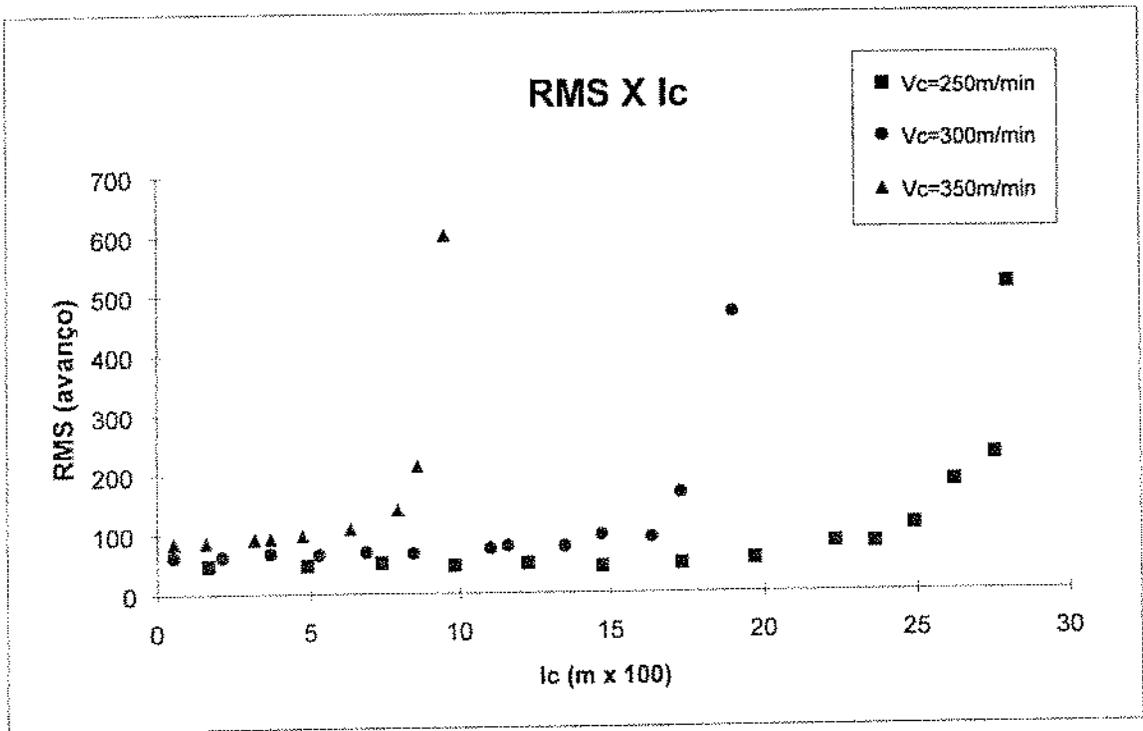


Figura 5.9 - Ensaio de desgaste de ferramenta para diferentes Vc (sinal de vibração) ap=1mm f=0.2mm

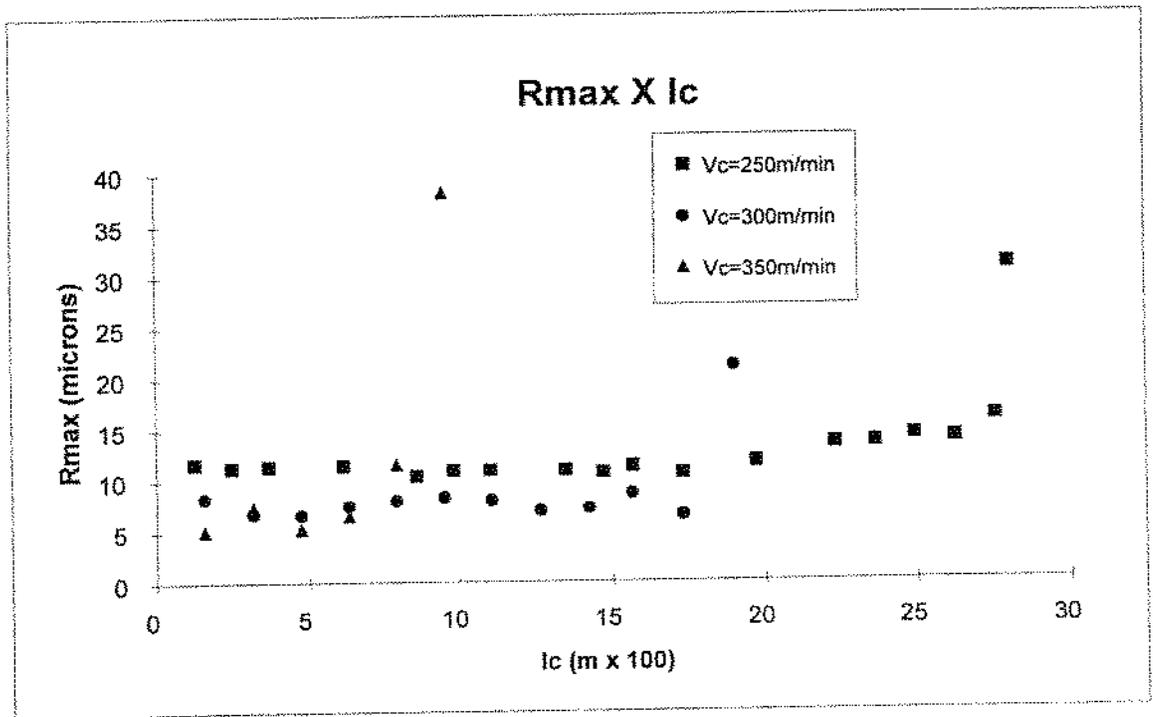
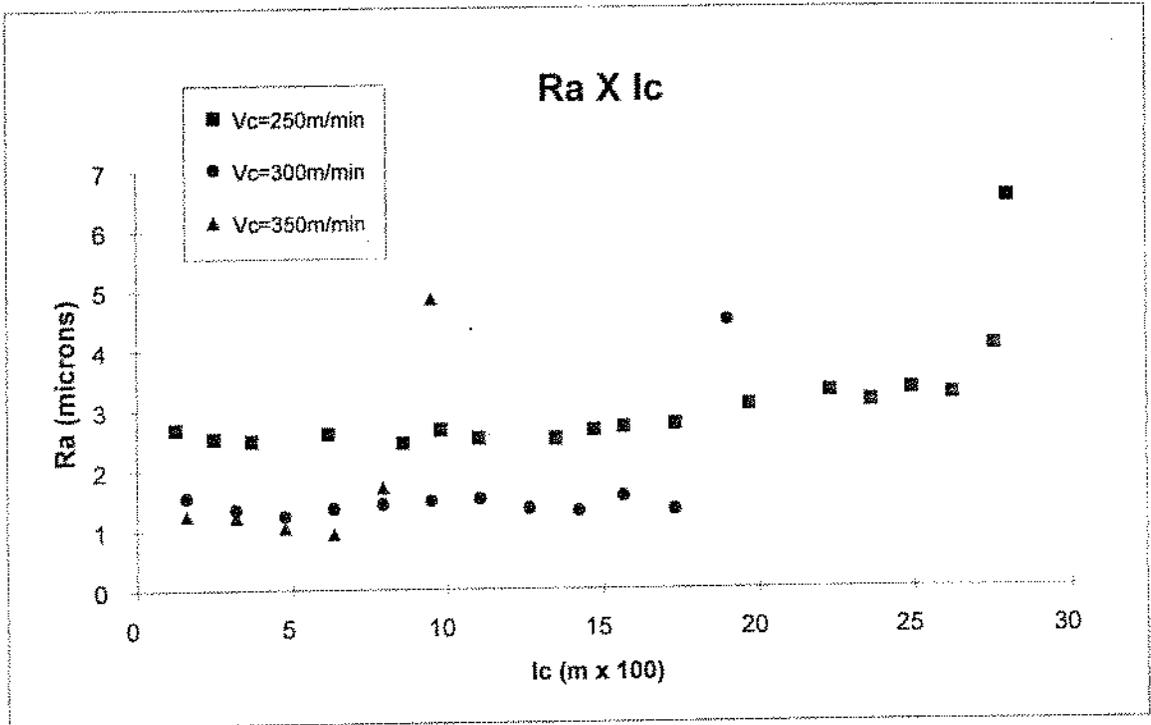


Figura 5.10 - Ensaio de desgaste de ferramentas para diferentes Vc (rugosidade)
 $a_p=1\text{mm}$ $f=0.2\text{mm}$

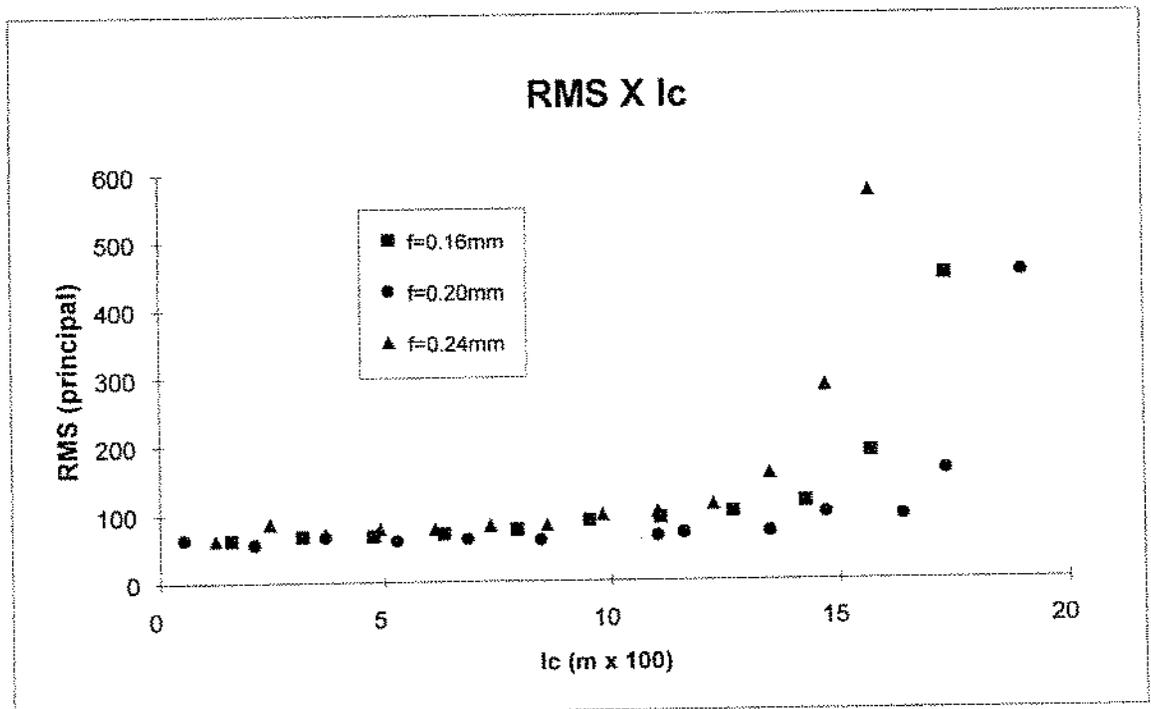
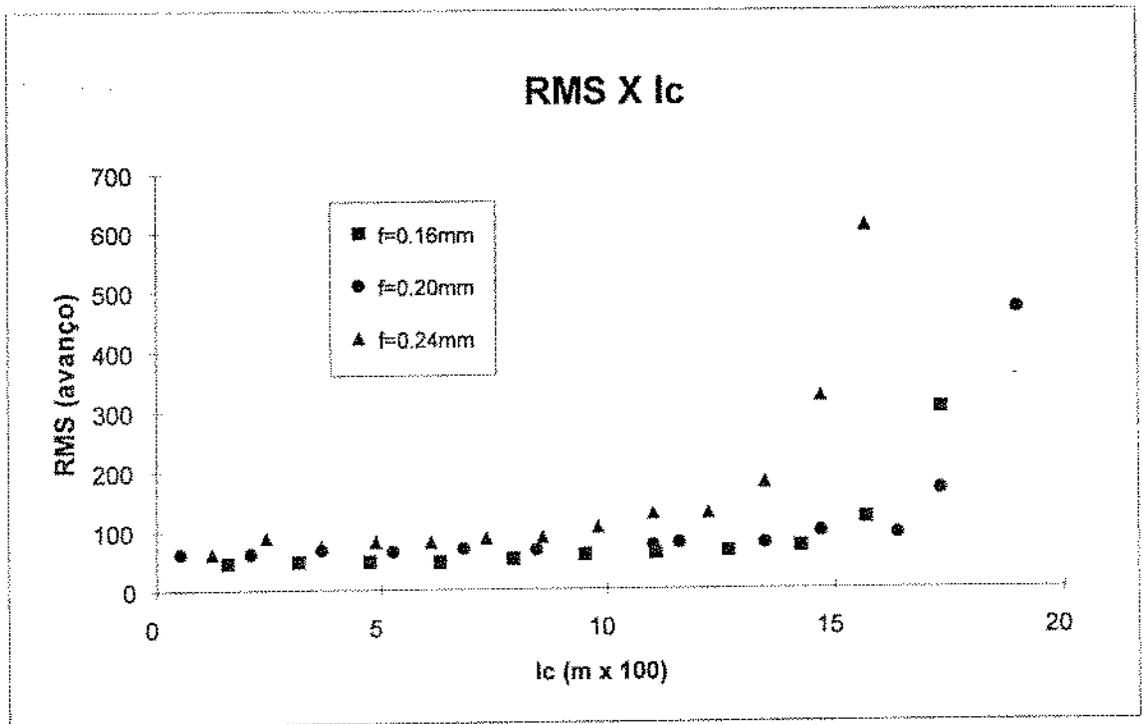


Figura 5.11 - Ensaio de desgaste de ferramenta para diferentes valores de "f" (sinal de vibração) $a_p=1\text{mm}$ $V_c=300\text{m/min}$

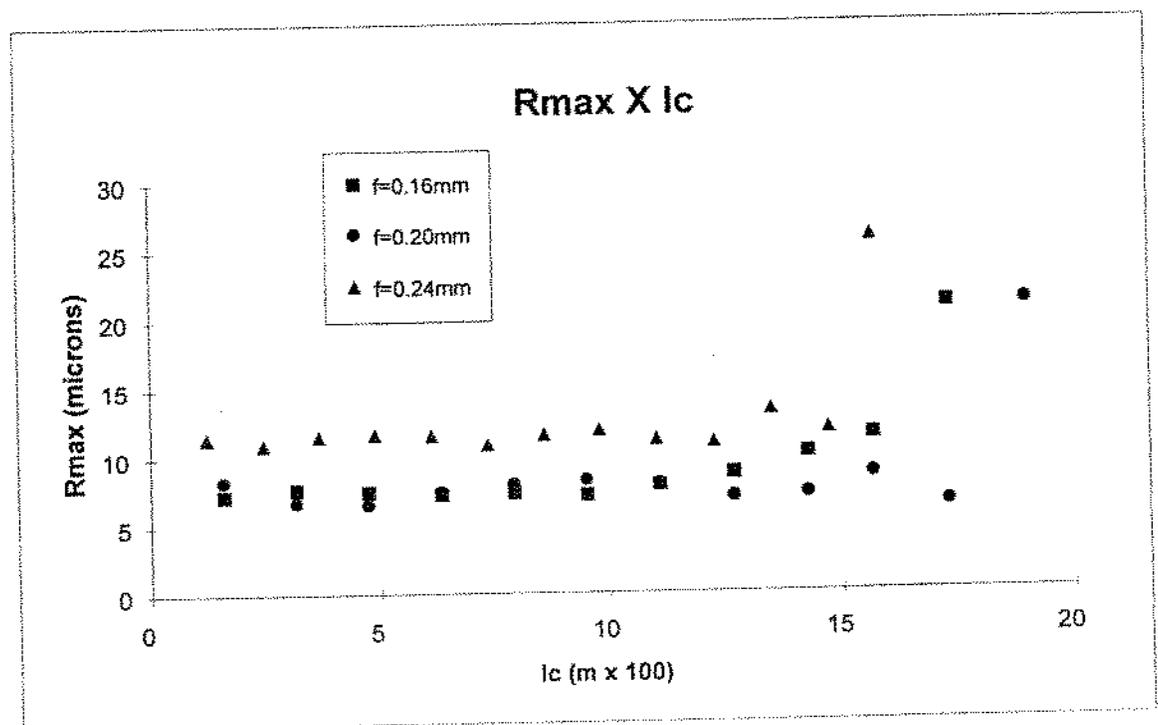
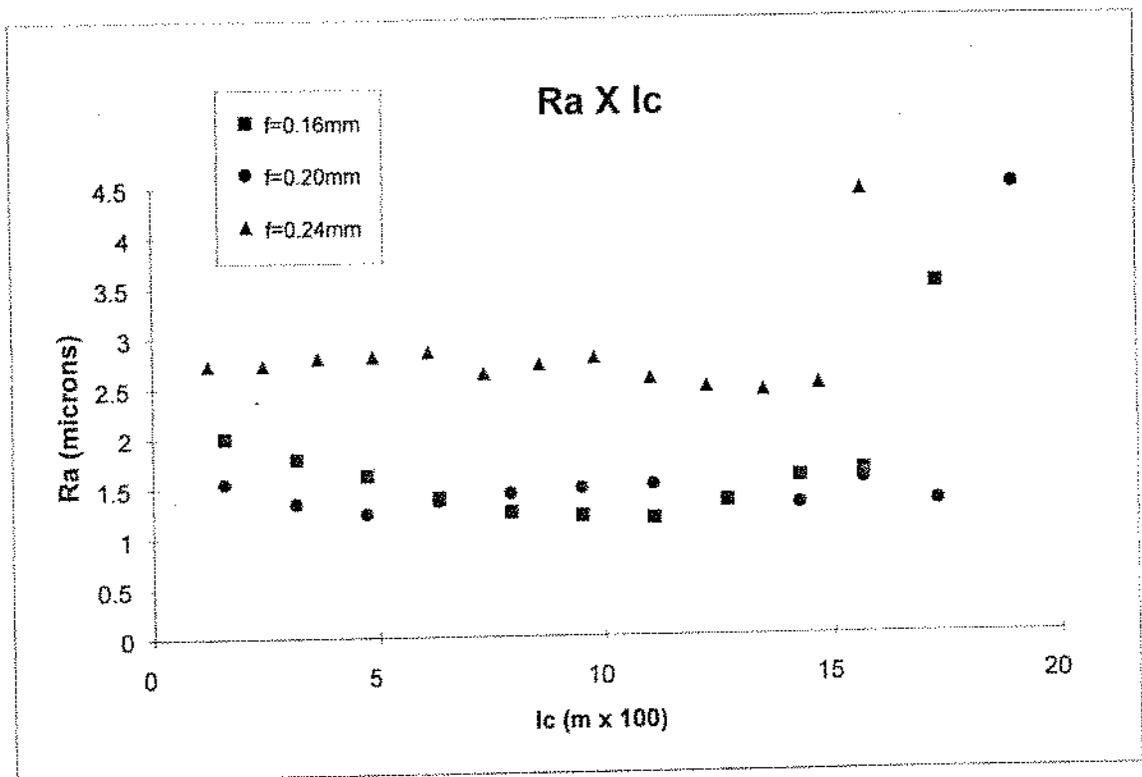


Figura 5.12 - Ensaio de desgaste de ferramenta para diferentes valores de "f" (rugosidade) $a_p=1\text{mm}$ $V_c=300\text{m/min}$

As figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16 mostram espectros de frequência para diversos valores de comprimento de corte . Algumas observações podem ser feitas, quais sejam: a) a ferramenta vibra em frequências diferentes para as duas direções medidas (principal e de avanço), apesar de terem RMS semelhantes; b) não é tão fácil, como citado por alguns pesquisadores, determinar-se quais as faixas de frequência que predominam no processo de desgaste. Isto pode ser afirmado com segurança, pois apesar de nos gráficos serem mostrados apenas duas condições de usinagem e alguns poucos pontos, essa análise foí feita para todos os pontos dos ensaios e para todas as condições usinadas, não se chegando a uma visão clara sobre o comportamento de cada faixa de frequência ao longo do desgaste da ferramenta.

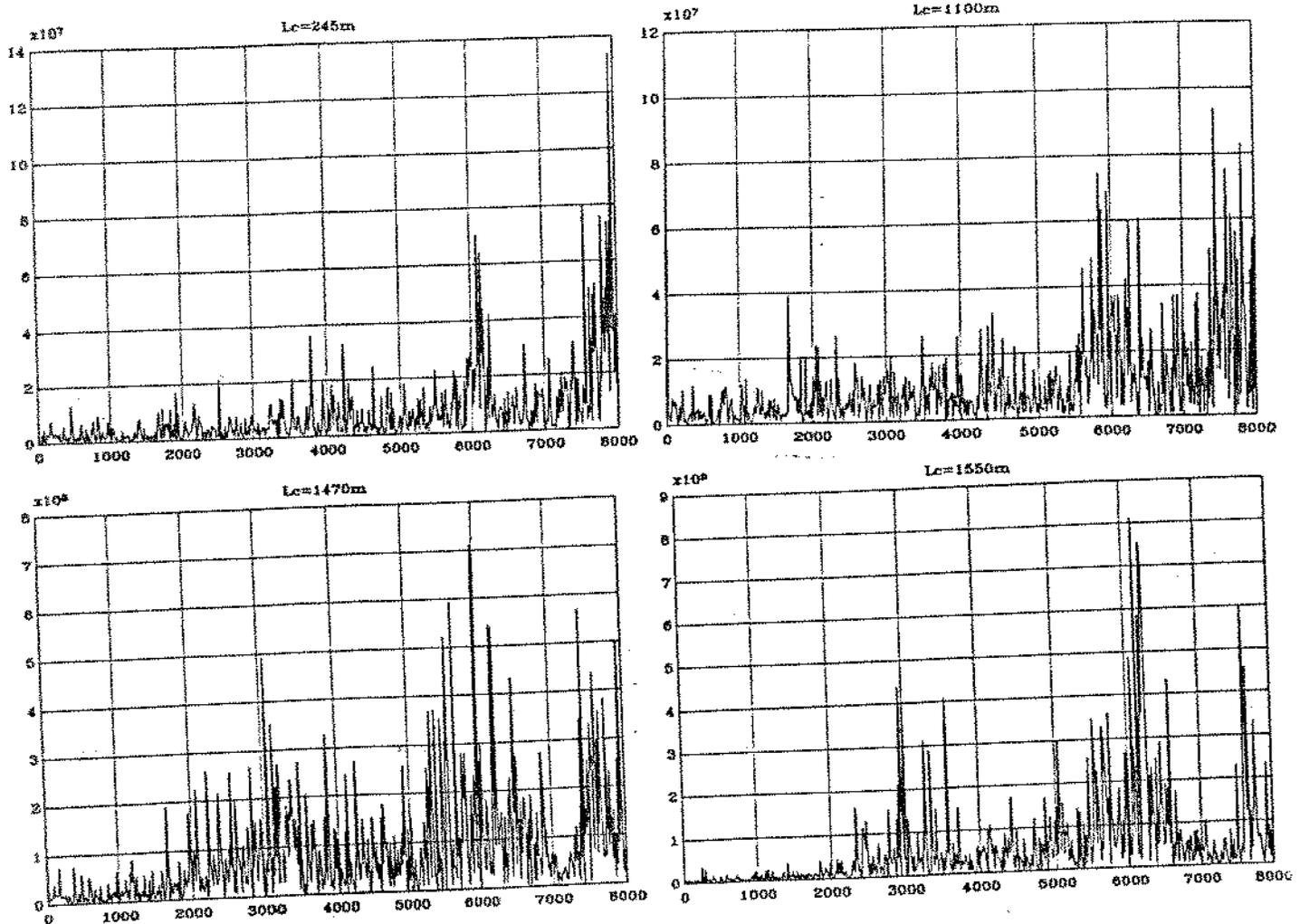


Figura 5.13 - gráficos de fft do ensaio de desgaste em 4 diferentes comprimentos de corte sendo que os dois maiores valores de l_c representam o instante anterior e posterior à quebra da ferramenta
 $V_c=300\text{m/min}$ $a_p=1\text{mm}$ $f=0.24\text{mm}$
 DIREÇÃO PRINCIPAL DE CORTE

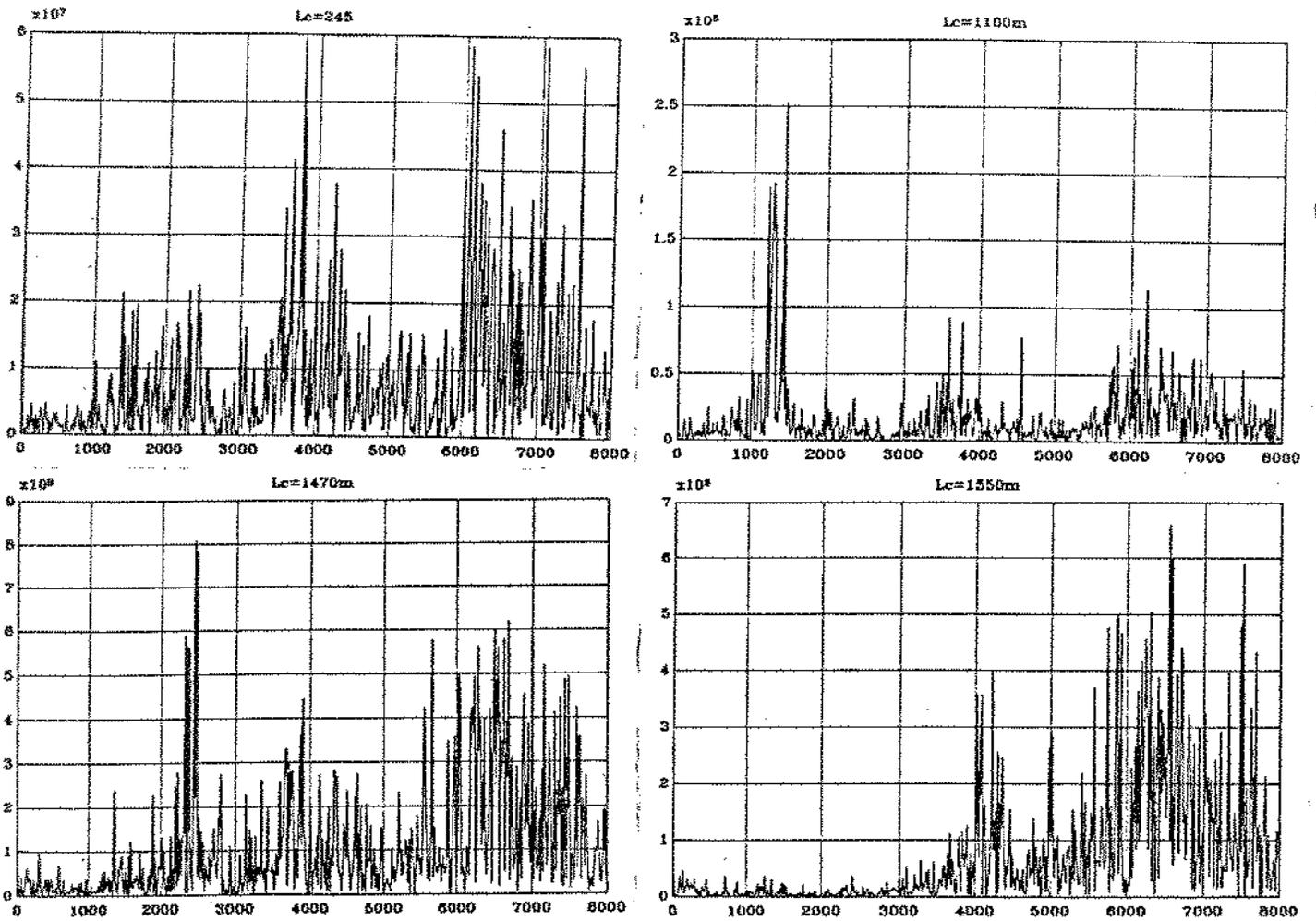


Figura 5.14 - gráficos de fft do ensaio de desgaste em 4 diferentes comprimentos de corte sendo que os dois maiores valores de l_c representam o instante anterior e posterior à quebra da ferramenta
 $V_c = 300m/min$ $a_p = 1mm$ $f = 0.24mm$
 DIREÇÃO DO AVANÇO

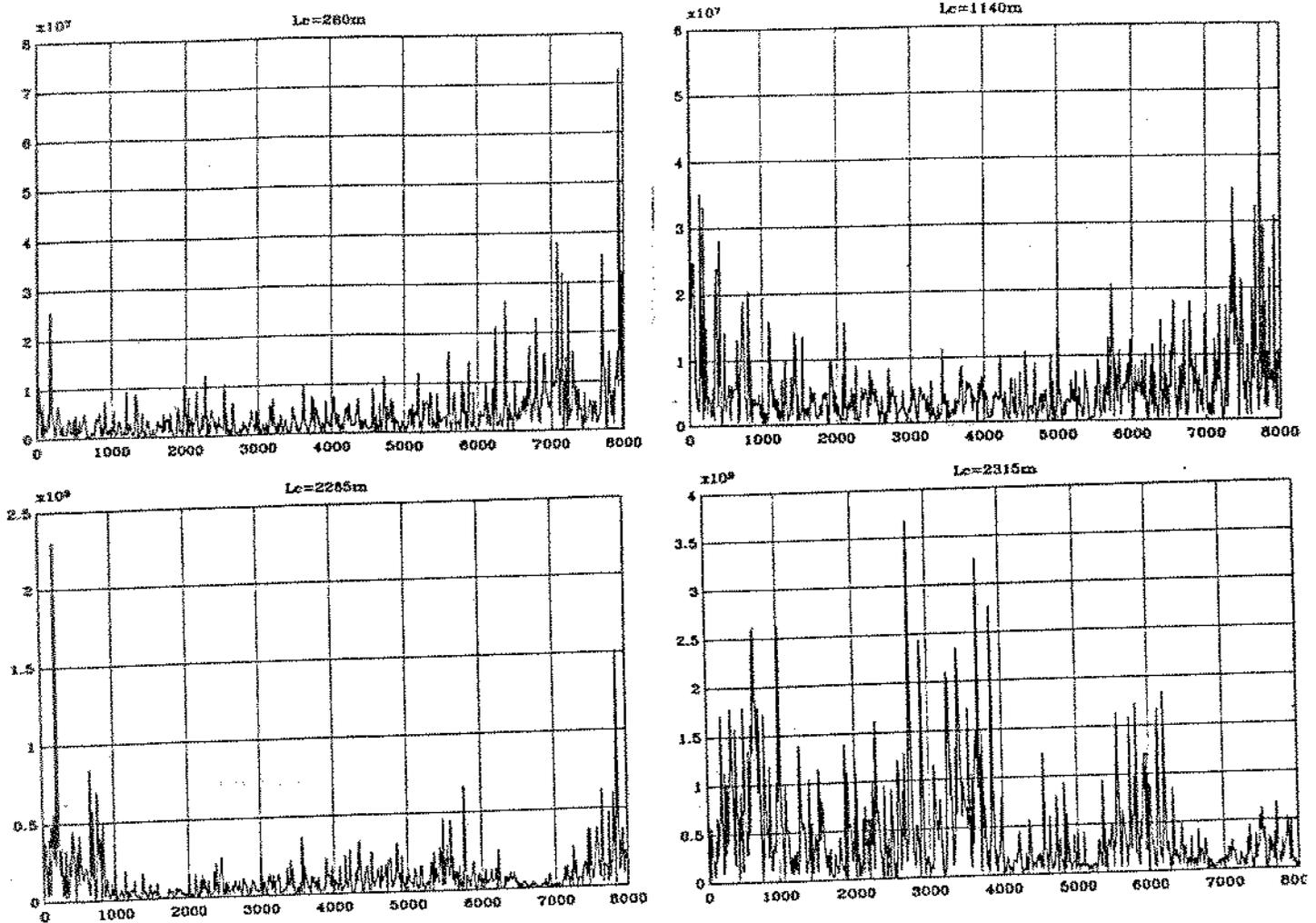


Figura 5.15 - gráficos de fft do ensaio de desgaste em 4 diferentes comprimentos de corte sendo que os dois maiores valores de l_c representam o instante anterior e posterior à quebra da ferramenta
 $V_c=300\text{m/min}$ $a_p=1\text{mm}$ $f=0.20\text{mm}$
 DIREÇÃO PRINCIPAL DE CORTE

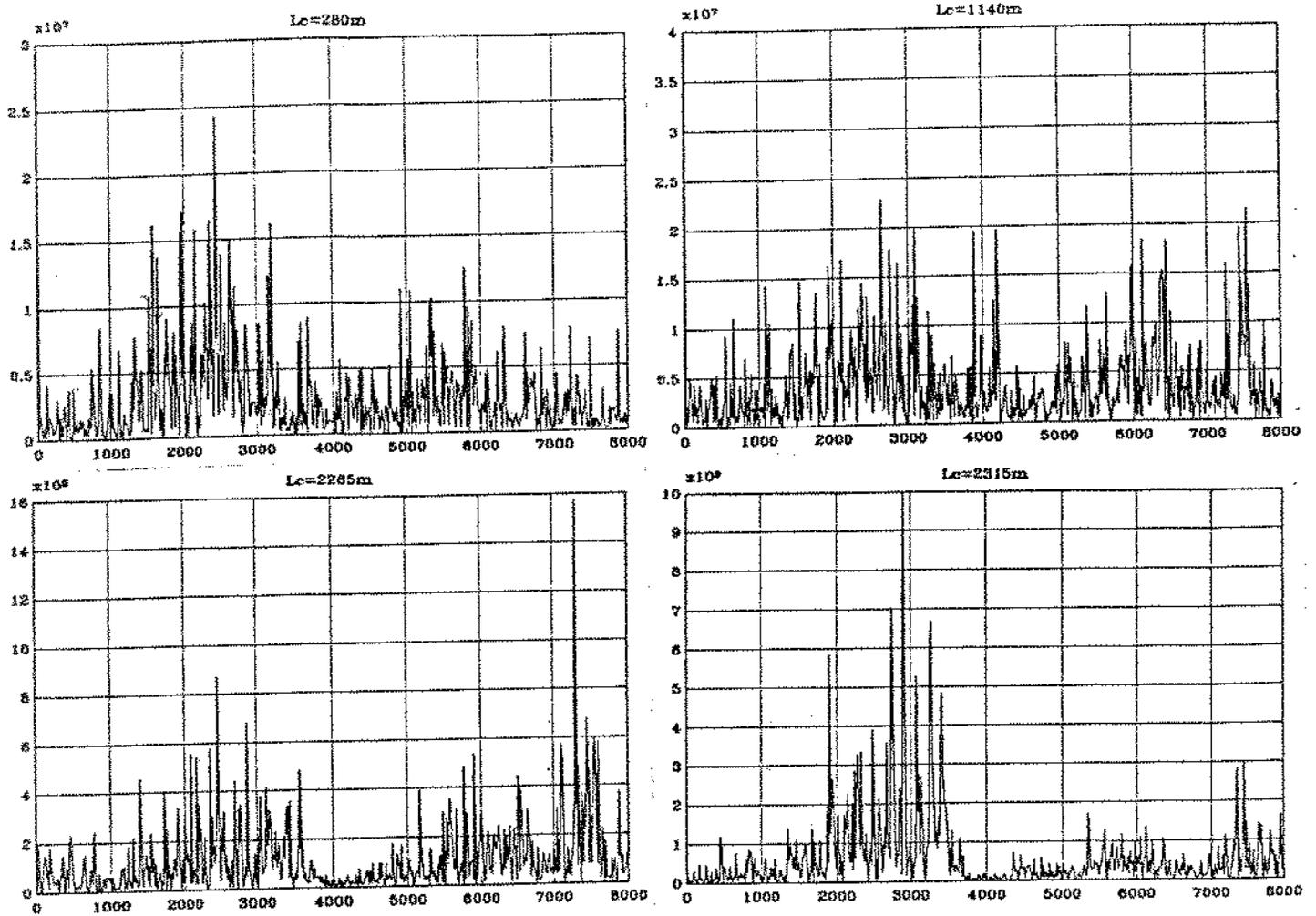


Figura 5.16 - gráficos de fft do ensaio de desgaste
 em 4 diferentes comprimentos de corte sendo que os
 dois maiores valores de l_c representam o instante
 anterior e posterior à quebra da ferramenta
 $V_c=300\text{m/min}$ $a_p=1\text{mm}$ $f=0.20\text{mm}$
 DIREÇÃO DO AVANÇO

A única conclusão que tirou-se do gráfico de FFT que mostrou-se útil ao processo de monitoramento, é que apesar de algumas faixas se sobressairem em cada ensaio, a amplitude em todas as frequências, teve uma tendência de crescimento com o comprimento de corte. Isto leva a conclusão de que todas as faixas do espectro de frequência são influenciadas pelo desgaste, o que possibilita monitoramento em faixas mais estreitas de frequência. Uma mostra disso é a figura 5.17 onde se têm o RMS do sinal de vibração x_{lc} em uma faixa de 0 a 4000Hz ($V_c=300$ m/min, $f=0.24$ mm/volta e $ap=1$ mm). Pode-se ver que tal parâmetro continua a ter um comportamento bastante razoável para se monitorar o processo, ou seja, a vida da ferramenta é 1350 m para os critérios utilizando o sinal de vibração nas duas direções (principal de corte e avanço), valor idêntico àquele obtido quando da utilização do RMS do sinal como critério de fim de vida com frequência de 0 à 8000 Hz (tabela 5.1)

Se a faixa de monitoramento for mudada, como foi feito de 0-8000Hz para 0 - 4000Hz ou menos, o monitoramento se torna mais simples a nível de equipamento e de amostragem do sinal, além de se ter uma resposta mais rápida o que simplifica o processo de monitoramento.

Com as figuras 5.9 e 5.10 (respectivamente sinais de vibração e rugosidade superficial da peça contra comprimento de corte para os ensaios com diferentes velocidades de corte) e figuras 5.11 e 5.12 (respectivamente sinais de vibração e rugosidade superficial da peça contra comprimento de corte, para ensaios com diferentes avanços) pode-se relacionar a rugosidade superficial da peça com os sinais de vibração. Pode-se dizer que não houve para o tipo de ferramenta ensaiada (metal duro com cobertura de TiC, TiN e Al_2O_3)

o mesmo comportamento da curva de RMS com a curva de rugosidade ao longo do tempo de usinagem. Uma mostra típica do que aconteceu em todos os ensaios, antes do momento de deterioração completa da ferramenta esta mostrado na figura 5.18.

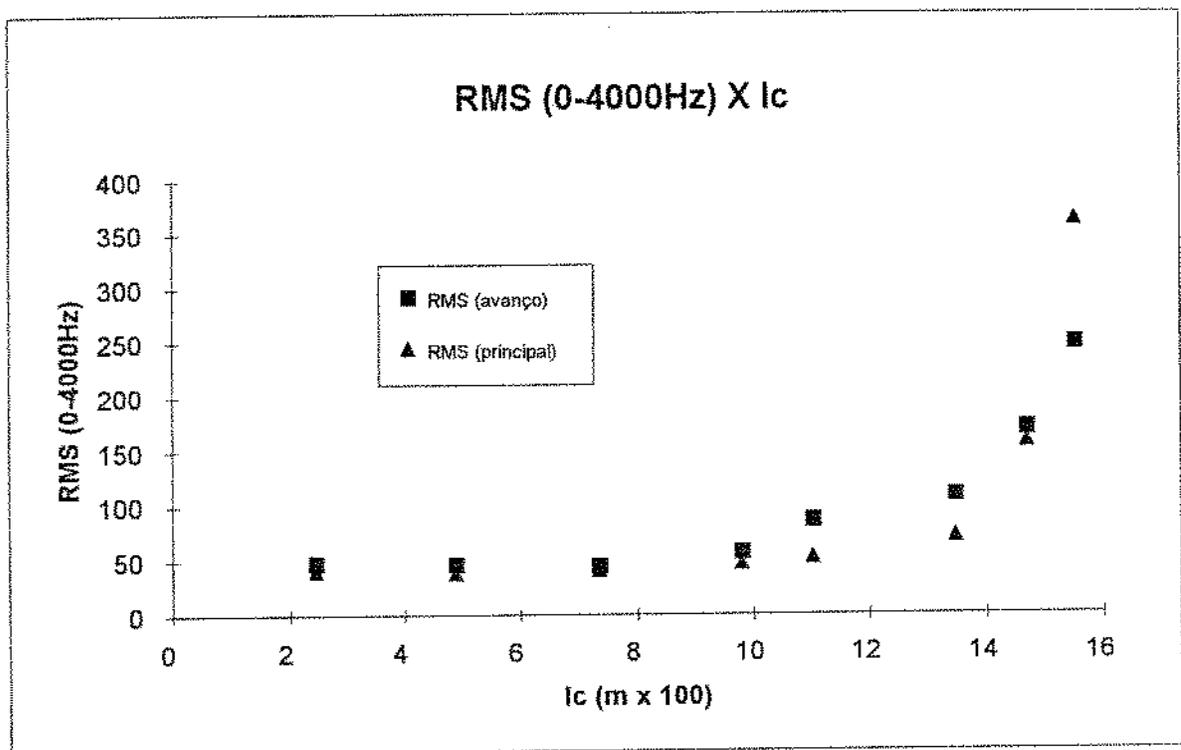


Figura 5.17 - RMS do sinal de vibração medido na faixa de 0 à 4000 Hz

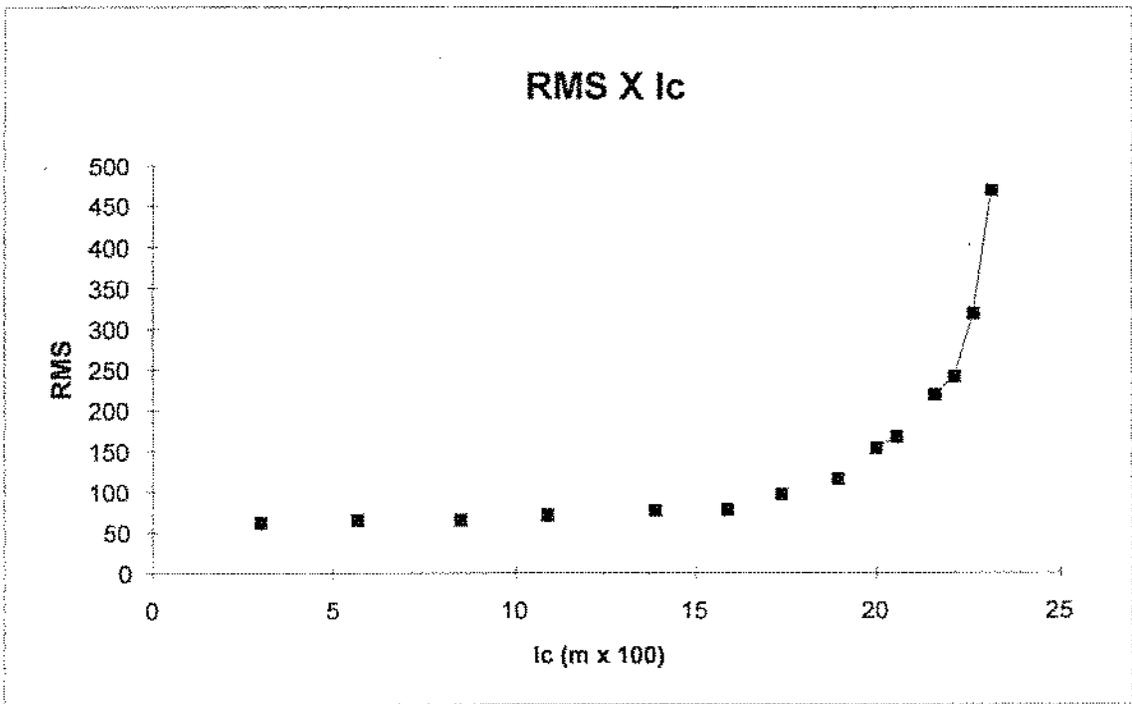
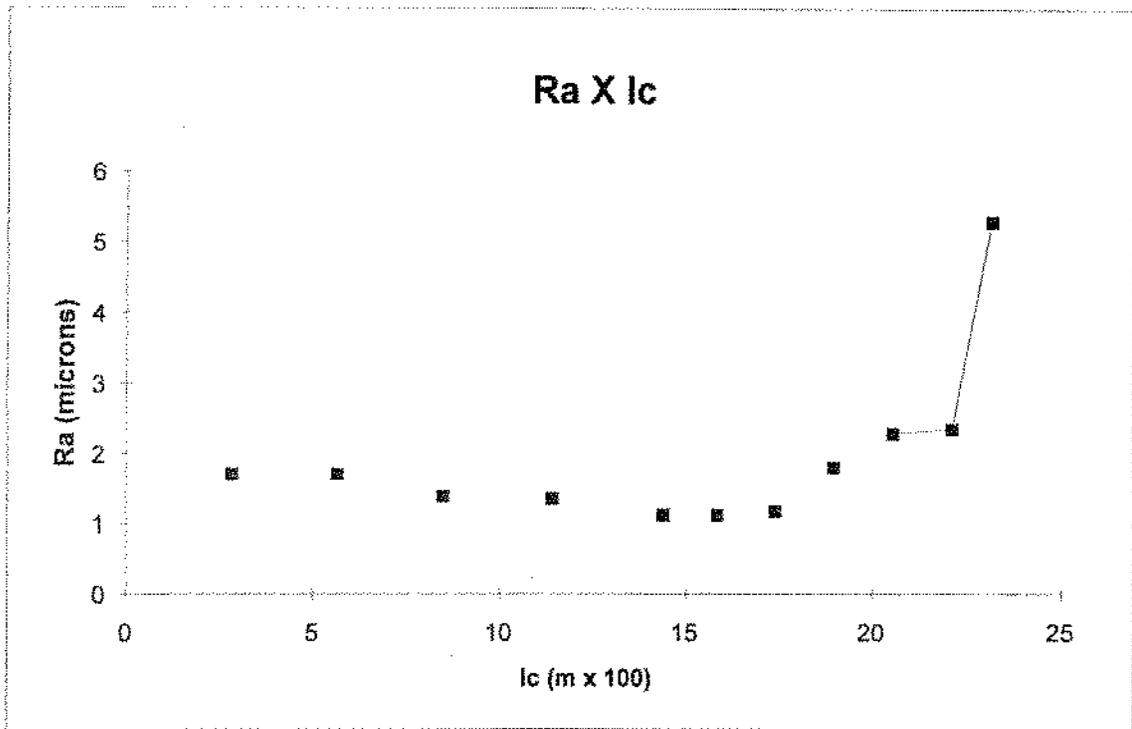


Figura 5.18 - Comportamento típico do sinal de vibração e rugosidade (Ra) durante ensaio de desgaste

Conforme pode-se ver nestes gráficos, a rugosidade superficial teve uma tendência a diminuir até alcançar um mínimo para depois começar a crescer novamente, até que, em um dado momento, tem um crescimento muito acelerado (fim da vida da ferramenta). Esta não é a conclusão de alguns pesquisadores como por exemplo Diniz [45], que conclui que a rugosidade apresenta crescimento com o tempo, com alguma oscilação em torno de uma reta com inclinação positiva. Este fato não ocorreu no presente trabalho. Isto pode ser devido ao fato da ferramenta ensaiada ser diferente nos dois casos (Diniz utilizou pastilhas sem cobertura). Na ferramenta aqui utilizada, o fato acima exposto pode ter ocorrido pela diferente característica de cada camada quanto ao acabamento superficial. Como as camadas são superpostas umas sobre as outras, o desgaste começa em uma determinada camada que apresenta uma característica específica quanto ao acabamento superficial. A medida que essa camada se desgasta e surge uma nova camada, esta pode apresentar características diferentes, que alteram o comportamento da rugosidade superficial das peças usinadas. Essas camadas se desgastam sucessivamente até atingir o substrato de metal duro, que se desgasta evidentemente mais rápido, elevando-se rapidamente a rugosidade da peça ensaiada.

Uma outra possível explicação, seria o fato do mecanismo de desgaste que ocorreu para esse tipo de ferramenta nas condições ensaiadas. O único desgaste observado durante o ensaio foi o desgaste de flanco, que não interfere marcadamente na formação da rugosidade superficial, como visto em capítulo anterior. O aumento progressivo da rugosidade da superfície usinada segundo Diniz [48], deve-se ao fato do aparecimento do "groove wear" ou desgaste de

entalhe o que não ocorreu neste trabalho.

Já o sinal RMS da vibração se mostra indiferente ao fenômeno exposto acima, parecendo ser sensível ao crescimento da área de contato peça-ferramenta, que aumenta com o desgaste de flanco da ferramenta. Assim pode-se ver na figura 5.18b que o RMS da vibração tem uma leve tendência de crescimento até próximo da deterioração completa, quando acontece o crescimento abrupto. Isto é, o sinal de vibração parece ser adequado também para acompanhar o crescimento do desgaste de flanco, o que seria interessante para processos de torneamento de desbaste. Isto não pode ser afirmado com certeza, pois não houve medição do desgaste de flanco nos ensaios, mas fica aqui uma sugestão para trabalho futuro. Nas condições ensaiadas, o desgaste predominante e limitante do processo foi exatamente o desgaste de flanco. Essa observação parece reforçar a comparação feita anteriormente entre o sinal RMS da vibração para ferramentas com diferentes raios de ponta, onde uma ferramenta com maior raio de ponta e, conseqüentemente, maior área de contacto com a peça, apresenta maiores valores de RMS da vibração.

5.3- ENSAIO DE DESGASTE DE FERRAMENTA COM MONITORAMENTO VIA VIBRAÇÃO E FOTOGRAFIA

Este ensaio teve por objetivo entender o fenômeno de desgaste que dá origem ao crescimento da rugosidade superficial da peça e da vibração. Conduziu-se este ensaio identicamente ao ensaio de desgaste, porém em determinados instantes retirava-se a ferramenta do porta ferramenta e fotografava-se a região do desgaste em um microscópio eletrônico de varredura. Os resultados obtidos são

mostrados nas figuras 5.19 à 5.23. As figuras 5.20 à 5.22 são compostas de duas fotografias, a da esquerda com amplificação de 22x e a da direita com ampliação de 50x do mesmo desgaste, e o gráfico representa a transformada de Fourier. Os gráficos e as fotografias foram feitos respectivamente com a ferramenta em início de vida, $lc=730m$, $lc=1650m$ e $lc=2160m$.

Nesse ensaio podemos visualizar e facilitar a interpretação de alguns resultados anteriormente discutidos. Quanto à área de contato peça-ferramenta (ou desgaste de flanco V_b) fica claro que existe essa relação com o valor do RMS do sinal de vibração, pois como vê-se pelas figuras, a área de contato peça-ferramenta apresenta uma aumento constante ao longo do comprimento usinado, porém esse aumento se acentua realmente na foto da figura 5.22. O mesmo acontece com a figura 5.23 onde o RMS do sinal de vibração tem um pequeno crescimento nas três primeiras fotos e um crescimento elevado na última foto.

Como mostrado anteriormente, o gráfico da FFT não parece apresentar uma característica clara que represente o processo de desgaste, a não ser o aumento do nível geral de amplitude do sinal que é melhor caracterizado pelo RMS do sinal.

Com relação à rugosidade, comprova-se aqui que houve até um certo decréscimo do R_a (fig. 5.24) nas três primeiras fotos, devido à não ocorrência do desgaste de entalhe. Já na foto 4, tanto o RMS do sinal da vibração (fig. 5.23) quanto o R_a , cresceram bastante, devido à completa deterioração da aresta de corte (foto 4 - fig. 5.22)

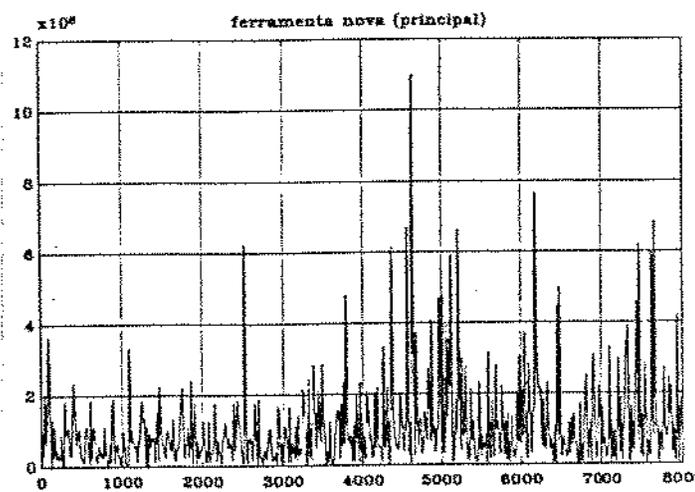
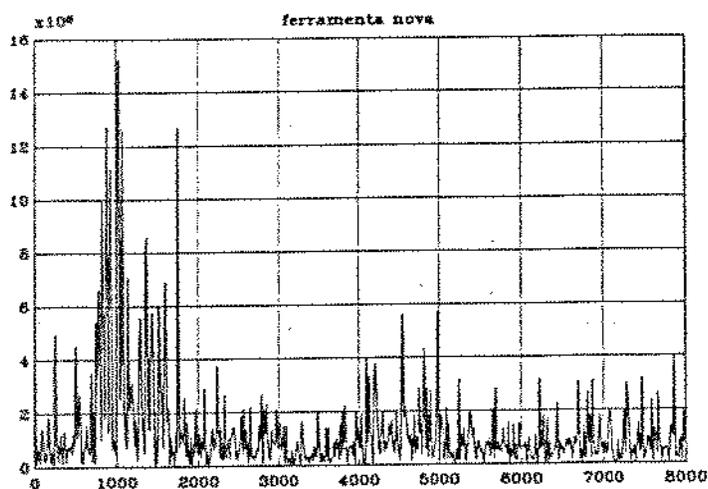
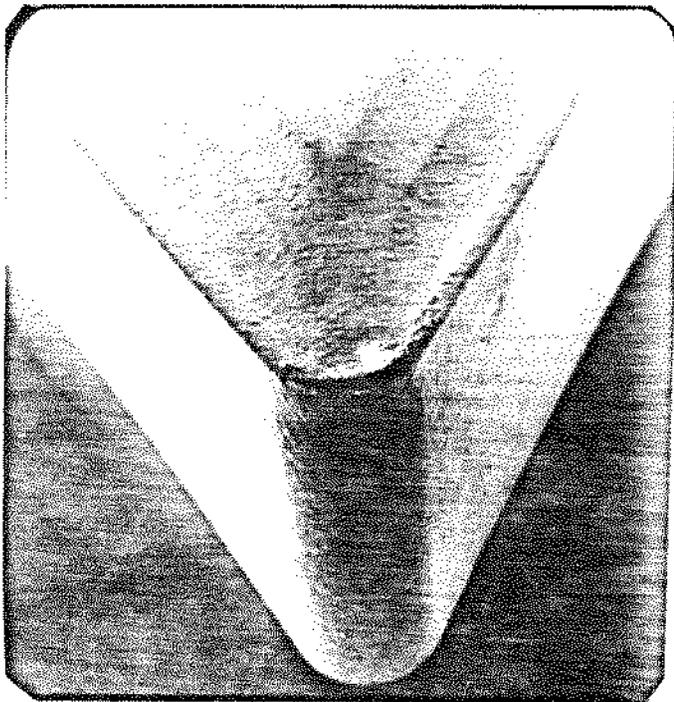
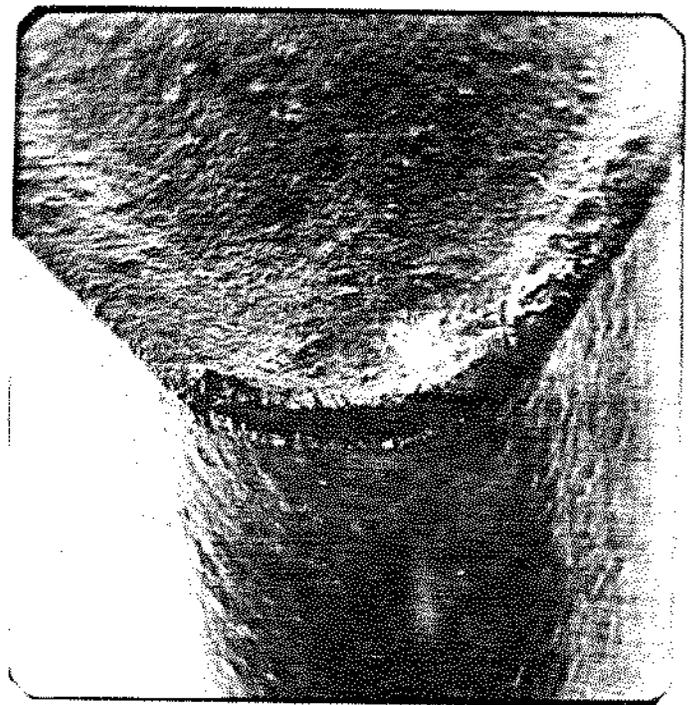


Figura 5.19 - gráficos de FFT de ferramenta em início de vida nas direções principal de corte e de avanço
($V_c=300\text{m/min}$ $f=0.2\text{mm}$ $a_p=1\text{mm}$)



Ampliação 22x



Ampliação 50x

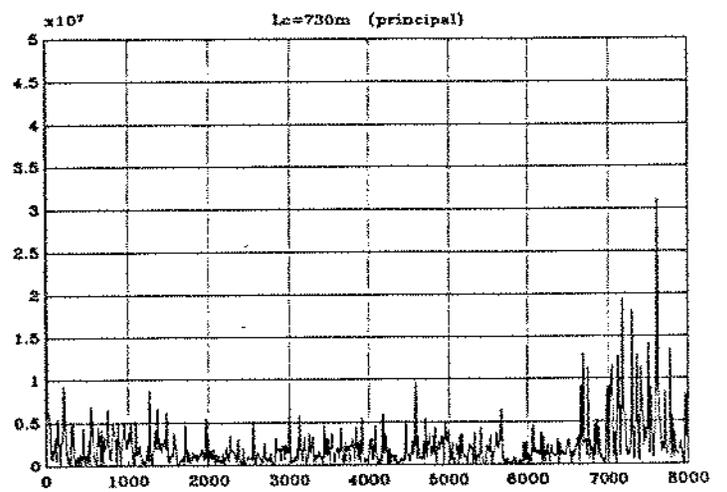
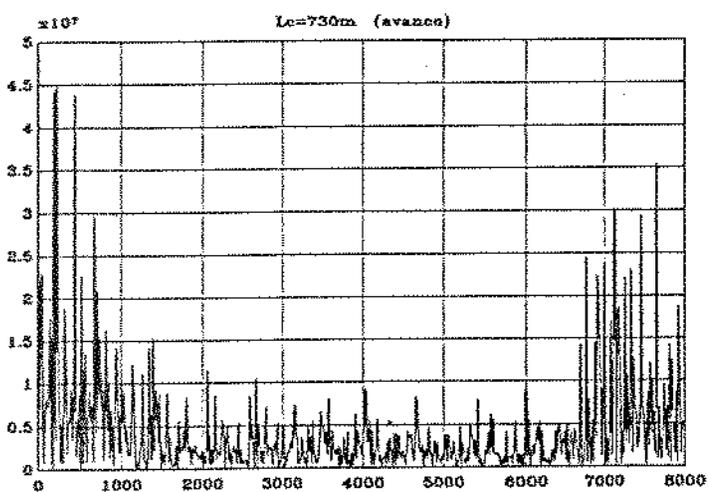
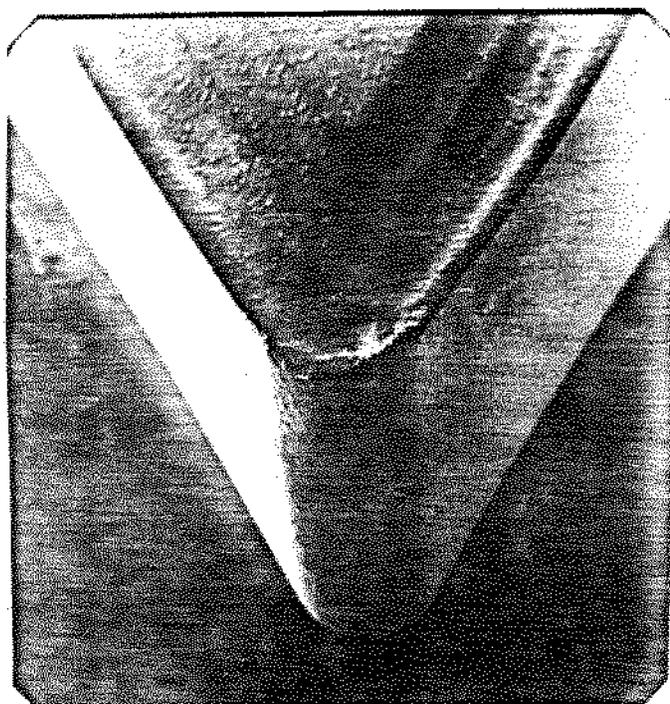
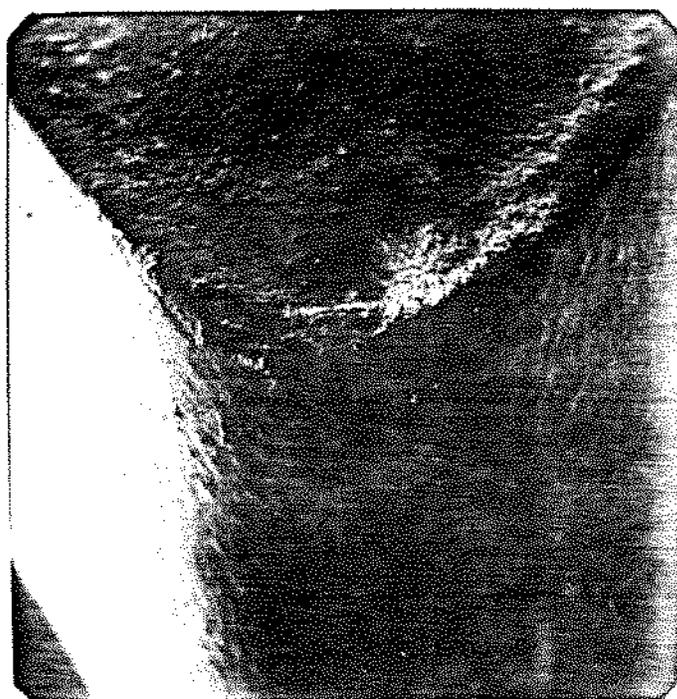


Figura 5.20 - fotografia com duas ampliações da região do desgaste com os seus respectivos gráficos de fft
($V_c=300m/min$ $f=0.2mm$ $a_p=1mm$)



Ampliação 22x



Ampliação 50x

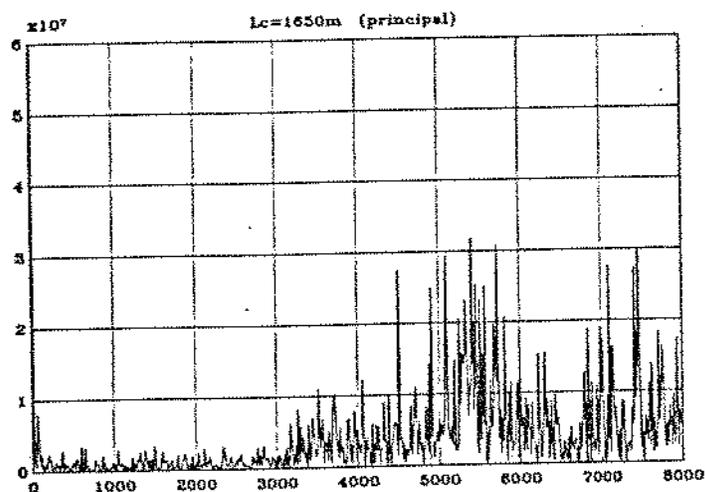
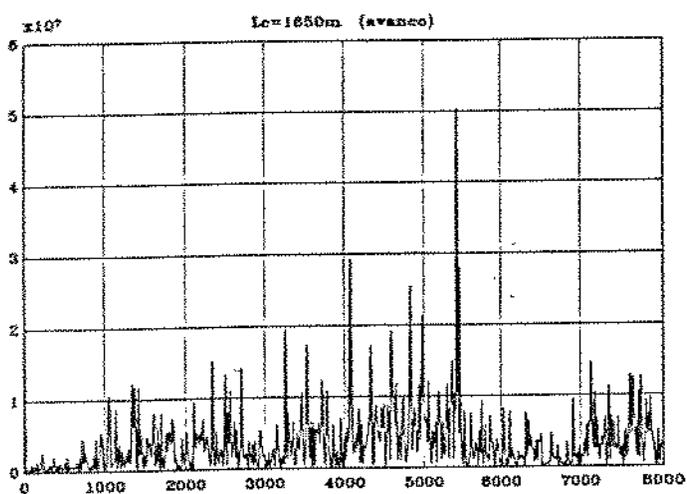
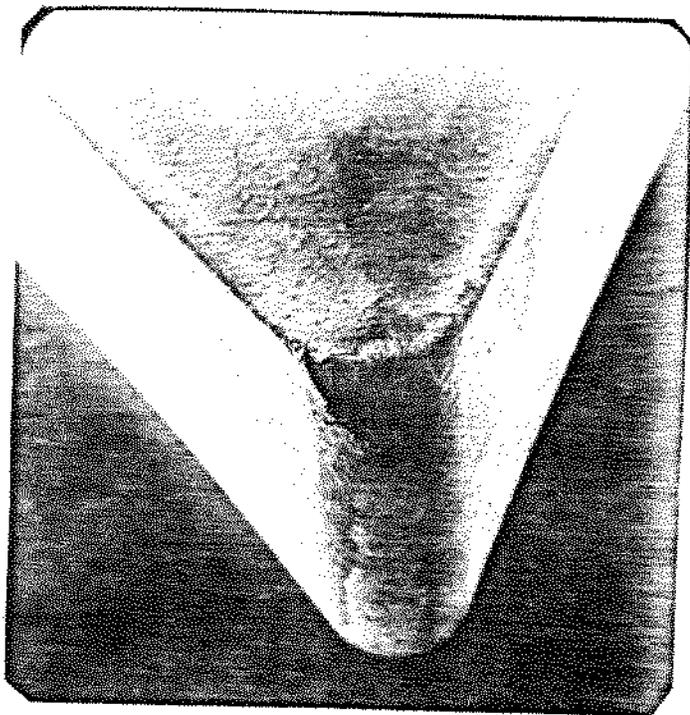
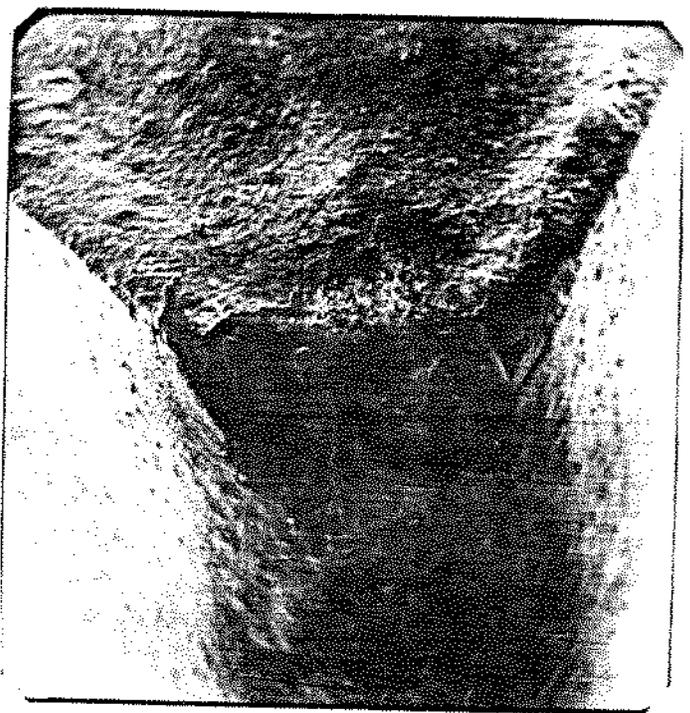


Figura 5.21 - fotografia com duas ampliações da região do desgaste com os seus respectivos gráficos de fft
($V_c=300m/min$ $f=0.2mm$ $a_p=1mm$)



Ampliação 22x



Ampliação 50x

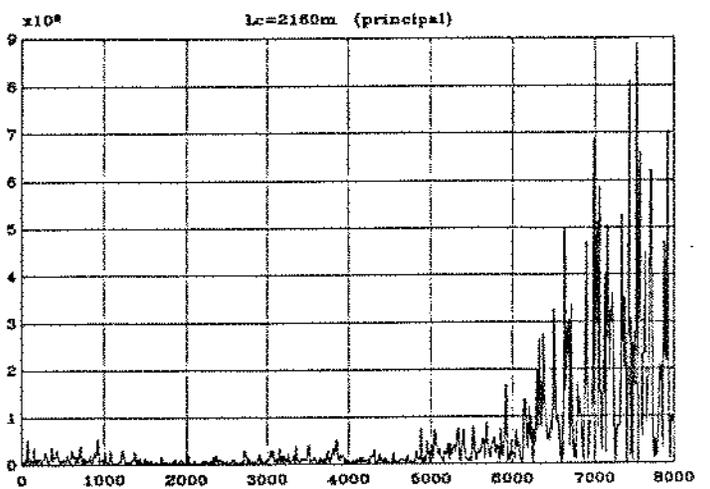
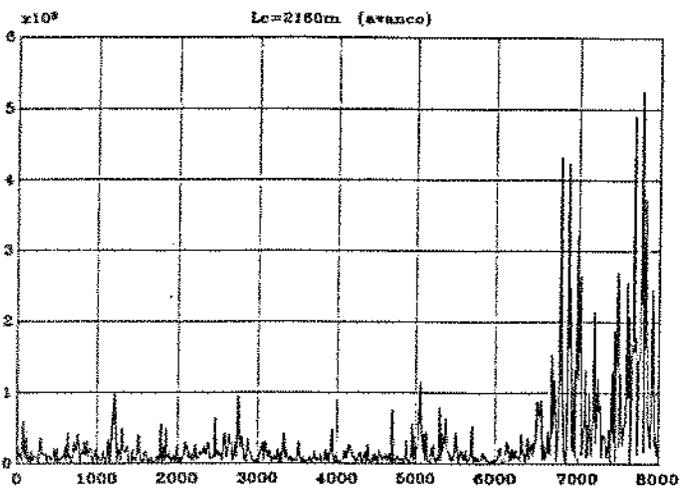


Figura 5.22 - fotografia com duas ampliações da região do desgaste com os seus respectivos gráficos de fft
($V_c=300m/min$ $f=0.2mm$ $ap=1mm$)

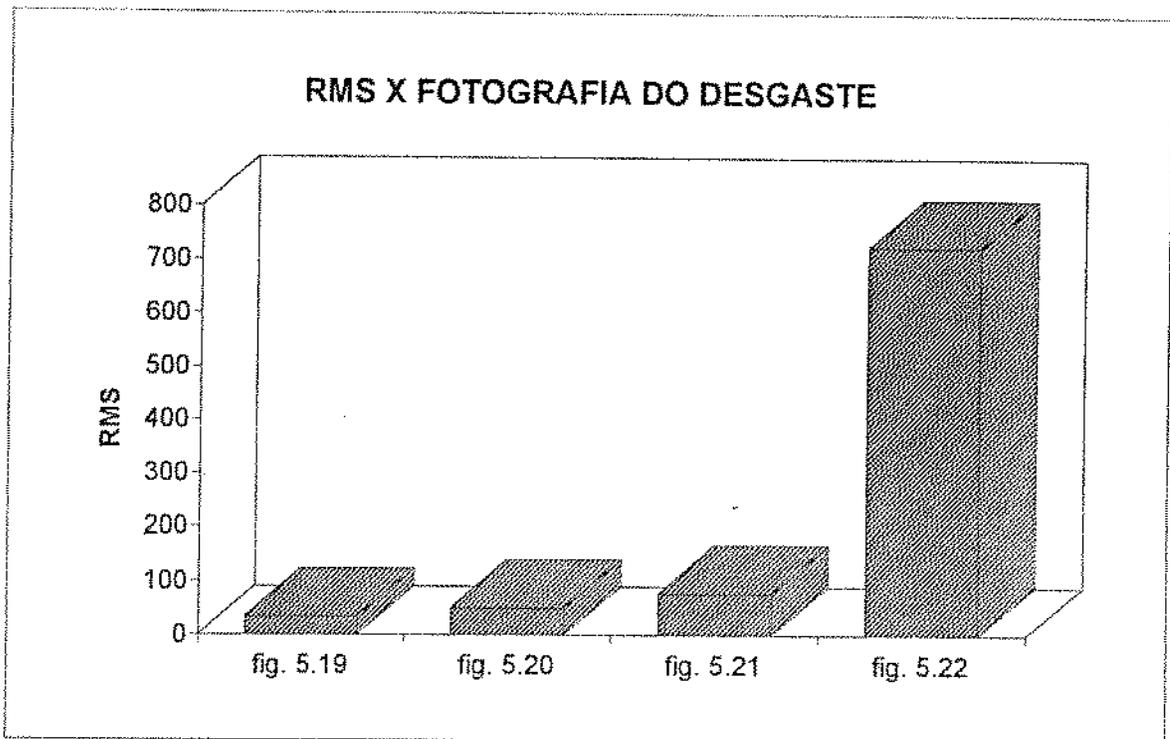


Figura 5.23 - gráfico do RMS do sinal de vibração correspondentes ao desgaste fotografado

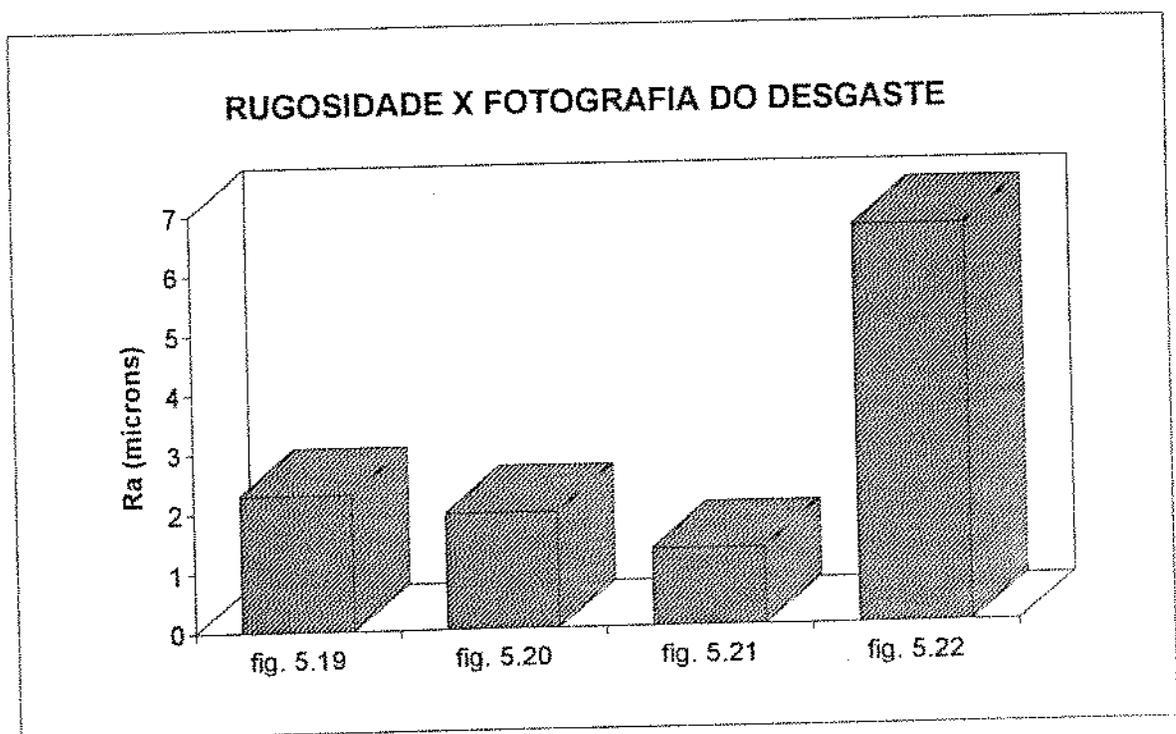


Figura 5.24 - Comportamento da rugosidade das peças usinadas no instante da fotografia

5.4- ENSAIO DE REPETIBILIDADE

O ensaio de repetibilidade foi realizado com $V_c=300\text{m/min}$, $a_p=1\text{mm}$ e $f=0.20\text{mm}$. Como podemos ver pelos gráficos 5.25 e 5.26 os ensaios apresentam boa repetibilidade. Os pontos dos três ensaios se dispersam apenas no fim de vida da ferramenta, o que era de se esperar, pois se assim não fosse, o monitoramento seria desnecessário, bastando-se a aplicação de técnicas estatísticas para se prever o fim de vida da ferramenta. Esses gráficos servem também para reforçar os resultados obtidos anteriormente. Este ensaio serviu porém para, ao se constatar que em uma determinada condição a dispersão dos valores é pequena, extrapolar-se esta conclusão para outras condições de usinagem e, assim, realizar-se somente um ensaio com os outros parâmetros de corte

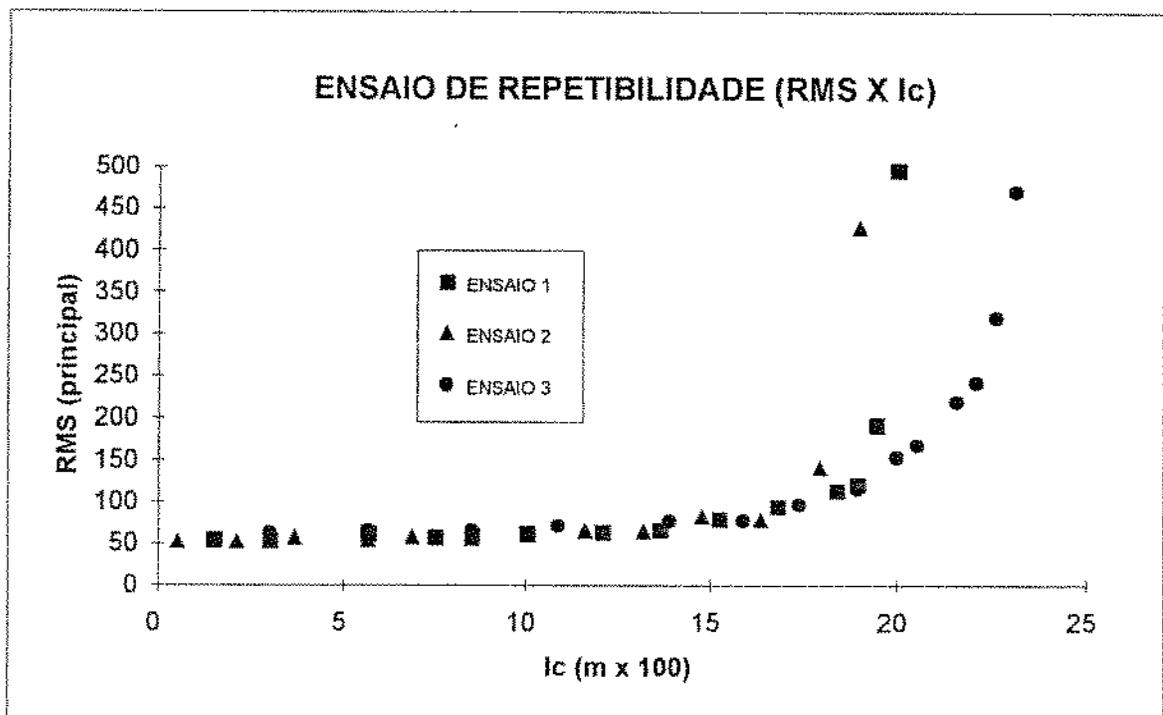
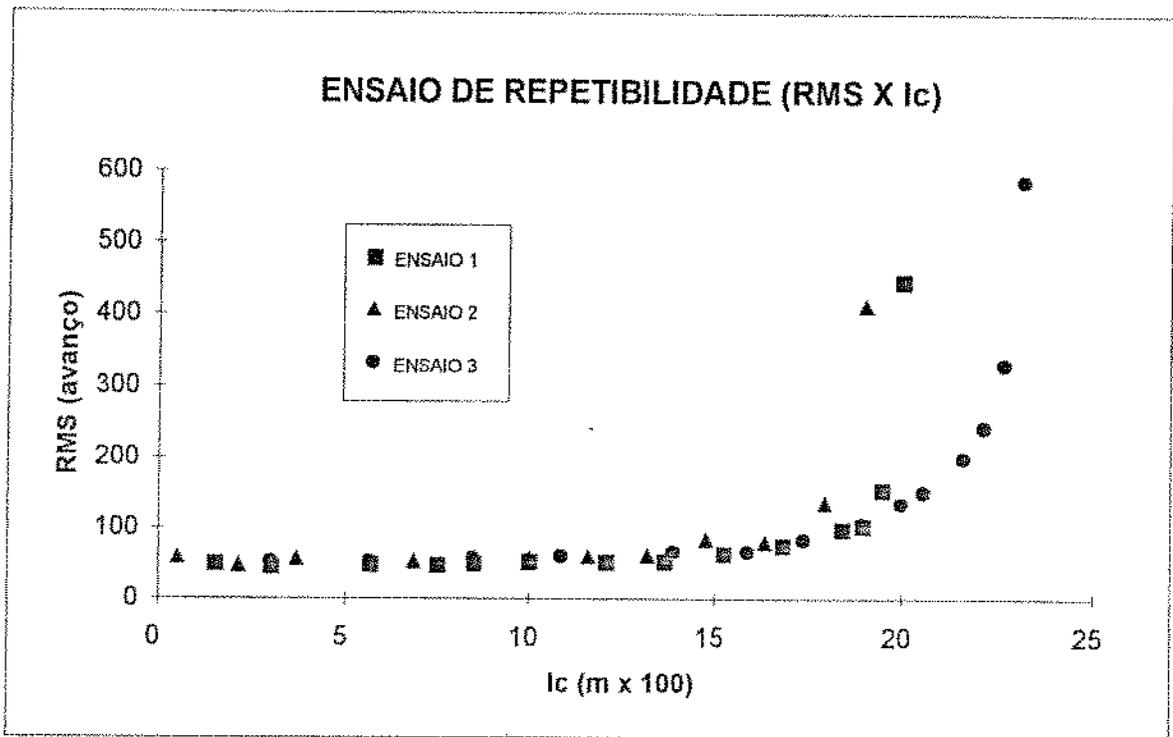


Figura 5.25 - ensaio de desgaste de ferramenta para se testar a repetibilidade (sinais de vibração) ($a_p=1\text{mm}$ $V_c=300\text{m/min}$ $f=0.2\text{mm}$)

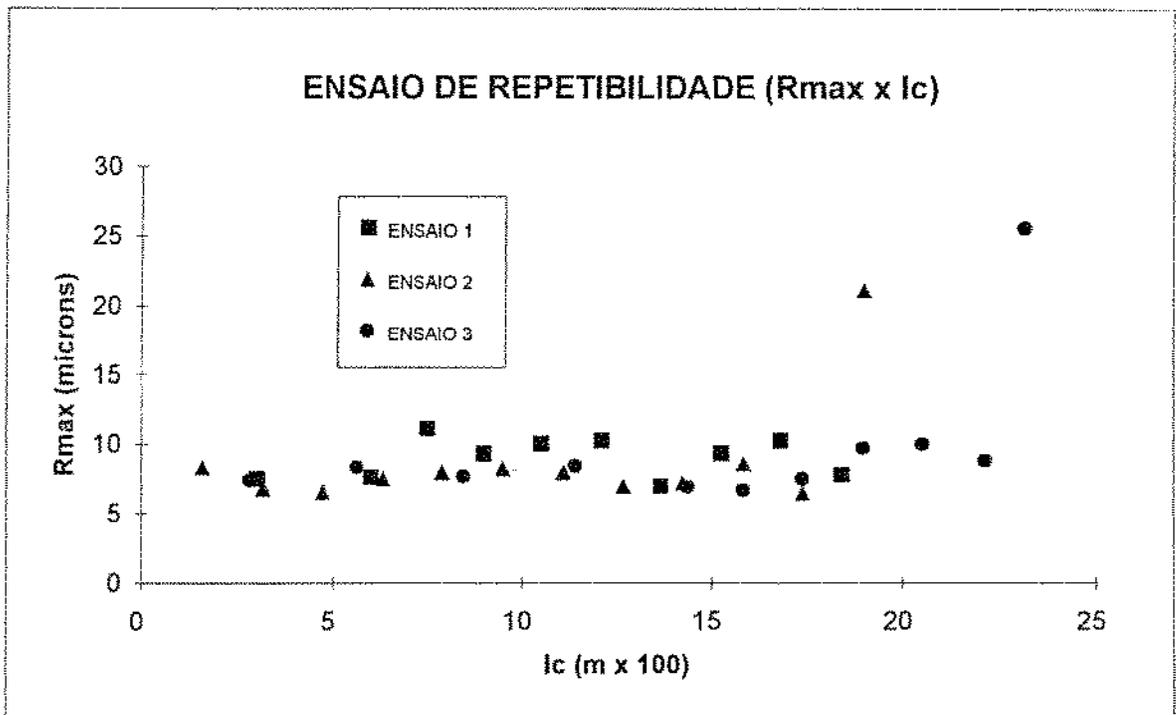
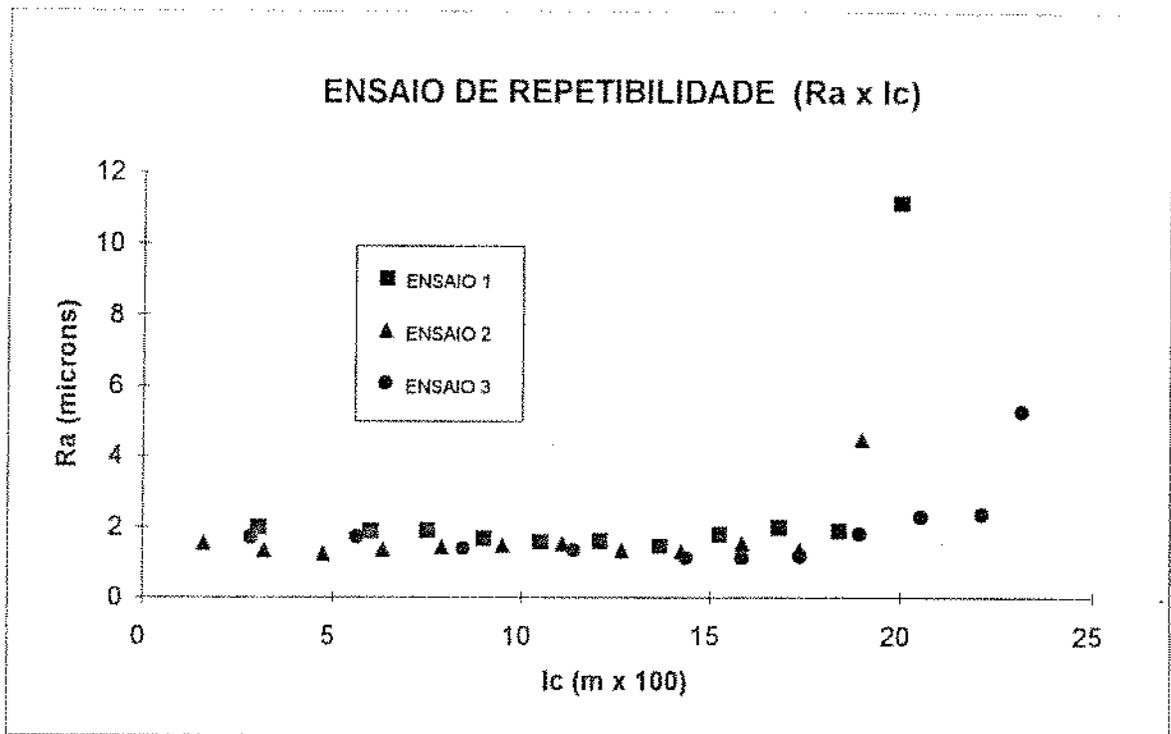


Figura 26 - ensaio de desgaste de ferramenta para se testar a repetibilidade (rugosidade) (ap=1mm Vc=300m/min f=0.2mm)

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com relação aos resultados obtidos por esse trabalho, pode-se tirar as seguintes conclusões para a usinagem do aço 4340 com pastilhas de metal duro com cobertura:

- O sinal de vibração é um bom parâmetro para o monitoramento do processo de torneamento em acabamento com o fim de se estabelecer automaticamente o fim de vida da ferramenta, dentro das condições estabelecidas por este trabalho, apresentando bons resultados e boa repetibilidade.

- A direção de coleta do sinal de vibração (principal ou de avanço) não interfere no resultado do monitoramento, isto é, qualquer uma das duas pode ser monitorada pois apresentam desempenho semelhante.

- O estabelecimento do fim da vida da ferramenta em torneamento de acabamento usando os sinais de vibração é independente das condições de usinagem, pois o que importa é o comportamento da curva RMS(vibração) x lc e não o valor absoluto do RMS.

- O RMS do sinal de vibração é um bom parâmetro para se monitorar o processo de vibração "ON-LINE".

- O gráfico da vibração no domínio da frequência (FFT), mostrou que o desgaste influencia em todas as faixas de frequência. O gráfico da FFT apresenta distribuição de frequência distinta quando medido na direção principal de corte e de avanço.

- A rugosidade e o RMS do sinal de vibração não se comportam de modo semelhante durante a usinagem (ao longo do desgaste da ferramenta). Somente a partir do processo de desgaste rápido da ferramenta o comportamento se torna semelhante (os dois crescem

rapidamente e a partir do mesmo instante).

A influência das condições de corte na rugosidade superficial da peça foi diferente da influência no sinal de vibração. Isto mostra que a vibração não é uma causa importante da variação da rugosidade com os parâmetros de usinagem.

Como sugestões para trabalhos futuros e continuação deste trabalho pode-se citar:

- Desenvolvimento de software para análise em tempo real do sinal de vibração com dispositivo de alarme e interrupção do processo de usinagem via computador.

- Monitorar-se o processo de torneamento de desbaste usando os sinais de vibração, pois como citado no capítulo anterior, houve uma indicação dessa possibilidade.

- Trabalhar o processo com outros tipos de ferramentas e condições de usinagem onde surjam outros tipos de desgaste como desgaste de entalhe, e verificar qual a relação destes desgastes com o sinal de vibração.

- Adaptar o sistema para utilização a nível de chão de fábrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] N. P. Suh.: NEW THEORIES OF WEAR AND THEIR IMPLICATIONS FOR TOOL MATERIALS, Wear vol. 62 pp. 1-20 (1980)
- [02] B. P. Sarmah, M. K. Khare.: SOME INVESTIGATION OF THE WEAR MECHANISMS OS WIDALON CARBIDE INSERTS IN MACHINING EN 24 (317 M 40) STEEL, Wear vol. 127 pp. 229-240 (1988)
- [03] J. P. Chubb, J. Billingham.: COATED CUTTING TOOLS- A STUDY OF WEAR MECHANISMS IN HIGH SPEED MACHINING, Wear vol. 61 pp. 283-293 (1980)
- [04] P. A. Dearnley.: RAKE AND FLANK WEAR MECHANISMS OF COATED AND UNCOATED CEMENTED CARBIDES, J. Eng. Mat. Technol. vol. 107 pp. 68-82 (1985)
- [05] R. Srinivasan.: DEVELOPMENT IN CUTTING TOOLS, Proc. 22th IMTDR pp. 14-25 (1986)
- [06] P. A. Dearnley., E. M. Trent.: WEAR MECHANISMS OF COATED CARBIDE TOOLS, Mat. Techn. vol 9 pp. 60-75 (1982)
- [07] A. Nordgren, A. Melander.: TOOL WEAR AND INCLUSION BEHAVIOR DURING TURNING OF A CALCIUM-TREATED QUENCHED AND TEMPERED STEEL USING COATED CEMENTED CARBIDE TOOLS, Wear vol. 139 pp. 209-223 (1990)
- [08] A. E. Diniz, A RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA EM PROCESSOS DE TORNEAMENTO : CRITÉRIO DE FIM DE VIDA DA FERRAMENTA E FATORES DE INFLUÊNCIA, Tese de Doutorado UNICAMP (1989)
- [09] M. C. Shaw.: METAL CUTTING PRINCIPLES, Clarendon Press-Oxford 1968
- [10] R. M. Sundaram, B. K. Lambert: SURFACE ROUGHNESS VARIABILITY OF AISI 4140 STEEL IN FINE TURNING USING CARBIDE TOOLS, Int. Journal for Production Research, vol. 17(3) pp. 249-258

- [11] P. G. Petropoulos : STATISTICAL BASIS FOR SURFACE ROUGHNESS ASSESMENT IN OBLIQUE FINISH TURNING OF STEEL COMPONENTS, Int. Journal for Production Research, vol. 12(3) pp. 345-360
- [12] D. X. Fang, Y Yao, G. Arndt.: MONITORING GROOVE WEAR DEVELOPMENT IN CUTTING TOOLS VIA STOCHASTIC MODELLING OF THREE DIMENSIONAL VIBRATION, Wear vol. 151 pp. 143-156 (1991)
- [13] L. Dan, J Mathew.: TOOL WEAR FAILURE MONITORING TECHNIQUES FOR TURNING, Int. J. Mach. Tools Manuf. vol. 30 pp. 579-598 (1990)
- [14] J. U. Jeon, W. Kim.: OPTICAL FLANK WEAR MONITORING OF CUTTING TOOLS BY IMAGE PROCESSING, Wear vol. 127 pg 207-217 (1988)
- [15] F. Giusti, M. Santochi.: DEVELOPMENT OF A FIBRE OPTIC SENSOR FOR IN PROCESS MEASUREMENT OF TOOL FLANK WEAR, Proc. of 20th IMTDR pp. 351-360 (1979)
- [16] G. Rutelli, D. Cuppini.: DEVELOPMENT OF WEAR SENSOR FOR TOOL MANAGEMENT SYSTEM, J. Eng. Mat. Tech. vol. 110 pp. 59-62 (1988)
- [17] F. Giusti, M. Santochi, G. Tantussi.: A FLEXIBLE TOOL WEAR SENSOR FOR NC LATHES, Annals of the CIRP vol. 33 pp. 229-232 (1984)
- [18] N. H. Cook.: TOOL WEAR SENSOR, Wear vol. 62 pp. 49-57 (1980)
- [19] S. Jetly.: MEASUREMENT CUTTING TOOL WEAR ON LINE: SOME PRATICAL CONSIDERATIONS, Man. Eng. pp. 55-60 (1984)
- [20] K. Uehara.: NEW ATTEMPTS FOT SHORT TIME TOOL-LIFE TESTING, Annals of the CIRP vol. 22 pp. 23-24 (1973)
- [21] G. F. Micheletti, W. Keonig, H.R. Victor.: IN PROCESS TOOL WEAR SENSORS FOR CUTTING OPERATIONS, Annals of th CIRP vol. 25 pp. 483-496 (1976)

- [22] B. Colding, A. Novak.: SENSING OF WORKPIECE DIAMETER, VIBRATION AND OUT-OFF-ROUNDNESS BY LASER WAY TO AUTOMATE QUALITY CONTROL, Annals of the CIRP vol. 30 pp. 473-476 (1981)
- [23] J. L. EL Gomayel, K.D. Bregger.: ON LINE TOOL WEAR SENSING FOR TURNING OPERATION, J. of Eng. for Industry vol. 108 pp. 44-47 (1986)
- [24] H. Takeyama, Y. Doi, T. Mitsoka, H. Sekiguchi.: SENSORS OF TOOL LIFE FOR OPTIMIZATION OF MACHINING, Proc of 18th IMTDR pp. 191-208 (1967)
- [25] P. M. Lister, G. Barrow.: TOOL CONDITION MONITORING SYSTEM, Proc. of 26th IMTDR pp. 271-288 (1986)
- [26] J. Tlustý, G. C. Andrews.: A CRITICAL REVIEW OF SENSORS FOR UNMANNED MACHINING, Annals of the CIRP vol. 33 pp. 563-572 (1983)
- [27] K. Uehara, F. Kiyosawa, H. Takeshita.: AUTOMATIC TOOL WEAR MONITORING IN NC TURNING, Annals of the CIRP vol. 32 pp. 563-572 (1983)
- [28] H. E. Soisson : INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL, Editora Hemus, São Paulo SP 1^aed. 1985.
- [29] E. Kanatley-Asibu, D. A. Dornfeld.: A STUDY OF TOOL WEAR USING STATISTICAL ANALYSIS OF METAL CUTTING ACOUSTIC EMISSION, Wear vol. 76 pp. 261-268 (1981)
- [30] I. Inasaki, S. Yonetsu.: IN PROCESS DETECTION OF CUTTING TOOL DAMEGE BY ACOUSTIC EMISSION MEASUREMENT, Proc. 22th IMTDR pp. 261-268 (1981)
- [31] A. B. Sadat, S. Raman.: DETECTION OF TOOL FLANK WEAR USING ACOUSTIC SIGNATURES ANALYSIS, Wear vol. 115 pp. 265-272 (1987)

[32] D. U. Braga .: MONITORAMENTO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO VIA PARÂMETROS ELÉTRICOS DO MOTOR DA MÁQUINA, Tese de Mestrado UNICAMP 1992

[33] S. L. Jacobsen, R. Ayre.: ENGINEERING VIBRATIONS WITH APLICATIONS TO STRUCTURES AND MACHINERY, Mcgraw-Hill, New York (1956)

[34] V. Arshinov, G. Alekseev.: METAL CUTTING THEORY AND CUTTING TOOL DESIGN, MIR Publishers Moscow (1970)

[35] CAD 12/36.: MANUAL DO USUÁRIO E DE REFERÊNCIA, Linx Tecnologia Eletrônica (1990)

[36] M. D. Cosidine, D. S. Ross.: HANDBOOK OF APPLIED INSTRUMENTATION, McGRAW-HILL New York 1964

[37] Y. C. Jiang, J. H. Xu.: IN PROCESS MONITORING OF TOOL WEAR STAGE BY THE FREQUENCY BAND ENERGY METHOD, Annals of the CIRP vol. 36 pp. 45-48 (1987)

[38] B. S. Rao.: TOOL WEAR MONITORING THROUGH THE DINAMICS OF STABLE TURNING, J. of Eng. for Industry vol. 108 pp. 184-189 (1986)

[39] N Akihiko, S. Fujita.: DEVELOPMENT OF A CUTTING TOOL FAILURE DETECTOR, Bull. Japan Soc. of Prec. Eng. vol. 23 pp. 134-139 (1989)

[40] M. S. Pandit, S. Kashou.: A DATA DEPENDENT SYSTEMS STRATEGY OF ON-LINE TOOL WEAR SENSING, J. of Eng. for Industry vol. 104 pp. 217-223 (1982)

[41] J. E. Weller, M. H. Schrier, B Weichbrodt.: WHAT SOUND CAN BE EXPECTED FROM A WORN TOOL?, J. of Eng. for Industry vol.13 pp. 525-534 (1969)

[42] A. Sokolowski, J. Kosmol.: UTILIZATION OF VIBRATION MEASUREMENTS OF MACHINE TOOL ELEMENTS IN THE MONITORING OF THE CUTTING TOOL CONDITION, Proc. of the 4th World Meeting on AE and 1st Int. Conference on AE in Manufacturing, pp. 327-333, 1991

[43] P. Martin, B. Mutel, J. D. Drapier.: INFLUENCE OF LATHE TOOL WEAR ON THE VIBRATIONS SUSTAINED IN CUTTING, Proc. of the 15th IMTDR, pp. 251-274, 1974

[44] Kistler Instrument Corporation.: OPERATING INSTRUCTIONS, New York USA (1985)

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

[01] T. Moriwaki.: SENSING AND PREDICTION OF CUTTING TOOL FAILURE, Bull. Japan Soc. of Prec. Eng. vol. 18 pp. 90-96 (1984)

[02] M. S. Pandit, S. Kashou.: VARIATION IN FRICTION COEFFICIENT WITH TOOL WEAR, Wear vol. 84 pp. 65-79 (1983)

[03] N. Ikawa, Y. Inami.: EFFECT OF TRANSIENT VIBRATION OF CUTTING SYSTEM ON TOOL WEAR IN INTERRUPT CUTTING, Annals of the CIRP vol. 23 pp. 17-19 (1974)

[04] M. Lee, C. E. Thomas, D. Wildes.: PROSPECTS FOR IN-PROCESS DIAGNOSIS OF METAL CUTTING BY MONITORING VIBRATION SIGNAL, J. of Mat. Science vol. 22 pp. 3821-3830 (1987)

[05] G. Barrow.: A REVIEW OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL TECHNIQUES FOR ASSESSING CUTTING TEMPERATURES, Annals of the CIRP vol. 22 pp. 203-211 (1973)

[06] G. Boothroyd, J. M. Eagle, W. J. Chisholm.: EFFECT OF TOOL FLANK WEAR ON THE TEMPERATURES GENERATED DURING METAL CUTTING, Proc. of 8th IMTDR pp. 667-680 (1967)

[07] J. W. Thomson.: THEORY OF VIBRATION WITH APPLICATION, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1972)

APÊNDICE A
LISTAGEM DO PROGRAMA DE AQUISIÇÃO E ARQUIVAMENTO
DO SINAL DE VIBRAÇÃO

A seguir está listado o programa completo de monitoramento de usinagem via vibração, que foi utilizado neste trabalho.

O programa está escrito em linguagem Pascal e foi compilado a partir do programa Turbo Pascal 5.0.

O programa em sua listagem é autoexplicativo, porém em caso de dúvidas, deve-se consultar o guia de programação da placa [3].

Program Tese_Marcos;

```
{ ===== }
{ =      Programacao basica da placa, uso do Timer e de DMA      }
{ =                                                                 }
{ =      Este programa esta' escrito na linguagem Turbo Pascal 5.0 }
{ =      utiliza a placa na sua CONFIGURACAO PADRAO (vide Manual do }
{ =      Usuario e de Referencia).                                }
{ =                                                                 }
{ =      Neste programa os dados sao transferidos diretamente para a }
{ =      memoria (em um vetor de 32KBytes alocado no Heap do Pascal. }
{ =      A leitura e' feita em modo burst, sendo este iniciado pelo }
{ =      timer 2.                                                }
{ =                                                                 }
{ ===== }
```

```
Uses Dos,
      Crt;
```

```
{ ===== }
{ =      Declaracoes Relacionadas ao DMA      = }
{ ===== }
```

```
Const
Tab64K   : array [0..3] of byte =
          ($80,$83,$81,$82); { registradores de pagina de 64 K }
B16KMax  =16383;           { maior posicao dentro do buffer }
DMAUsado = 1;             { canal de DMA usado }
Type
TpBf16K= array[0..B16KMax] of integer;

Var
Frag    : integer;      { fragmentacao do heap }
PFrag   : ^integer;    { fragmentacao do heap }
Buffer  : ^TpBf16K;    { buffer onde serao colocados os dados }
```

```

{ ===== }
{ =          Declaracao de Constantes          = }
{ ===== }

```

Const

```
EndBase      = $380; { Endereco base da placa CAD12/36 }
```

Const

```

SecLimite   = 0; { End. secund. da CAD12/36 - Reg. de Limite }
SecPonteiro = 1; { End. secund. da CAD12/36 - Ponteiro Memoria}
SecComAD    = 2; { End. secund. da CAD12/36 - Comando Conv. A/D}
SecRM       = 3; { End. secundario da CAD12/36 - Reg. de Modo }
SecMemoria  = 4; { End. secundario da CAD12/36 -Escrita Memoria}
SecAutoCal  = 6; { End. secundario da CAD12/36 -Auto Calibracao}
Nam=2048;    { Numero total de pontos lidos}

```

```

{ ===== }
{ =          Declaracao de Variaveis          = }
{ ===== }

```

```

Var CadCtr0  : word;          { Reg. Contador 0 da CAD12/36 }
CadCtrl1    : word;          { Reg. Contador 1 da CAD12/36 }
CadCtr2     : word;          { Reg. Contador 2 da CAD12/36 }
CadModo     : word;          { Reg. de Modo do Timer }
CadStatus   : word;          { Reg. Estado da CAD12/36 }
ByteA       : word;          { Reg. Byte A do conversor A/D }
ByteB       : word;          { Reg. Byte B do conversor A/D }
CadEnd      : word;          { Registrador de Endereco }
CadDado     : word;          { Reg. dado de escr. memoria }
CadESD0     : word;          { Reg. E/S digital 0 }
CadESD1     : word;          { Reg. E/S digital 1 }
NUM: string;          { Numero de arquivo }

```

```

{ ===== }
{ =          Rotina  IniciaEnderecoHardware          = }
{ ===== }

```

```

Procedure IniciaEnderecoHardware;

```

```

begin
  CadCtr0   := EndBase;
  CadCtr1   := EndBase + 1;
  CadCtr2   := EndBase + 2;
  CadModo   := EndBase + 3;
  CadStatus := EndBase + 3;
  ByteA     := EndBase + 4;
  ByteB     := EndBase + 5;
  CadEnd    := EndBase + 4;
  CadDado   := EndBase + 5;
  CadESD0   := EndBase + 6;
  CadESD1   := EndBase + 7;
end;

```

```

{ ===== }
{ =          Rotina  EscreveRegSecundario          = }
{ ===== }

```

```

Procedure EscreveRegSecundario (EndReg, Dado: byte);

```

```

begin
  Port [CadEnd] := EndReg;
  Port [CadDado] := Dado;
end;

```

```

{ ===== }
{ =          Rotina  EscreveMemCanais          = }
{ ===== }

```

```

Procedure EscreveMemCanais (Posicao, Dado: byte);

```

```

begin
  EscreveRegSecundario (SecPonteiro, Posicao); { End. Mem. Canais }
  EscreveRegSecundario (SecMemoria, Dado); { Canal e Ganho }
end;

```

```

{ ===== }
{ =          Rotina  AutoCalibracao          = }
{ ===== }

```

```

Procedure AutoCalibracao;

```

```

begin
  EscreveRegSecundario (SecAutoCal, 0);
  Delay (400);
end;

```

```

{ ===== }
{ =          Rotina  LimpaFIFO          = }
{ ===== }

```

```

Procedure LimpaFIFO;

```

```

  Var i, Dado: integer;

```

```

begin
  for i := 1 to 16 do
  begin
    Dado := Port [ByteB];
    Dado := Port [ByteA];
  end;
end;

```

```

{ ===== }
{ =          Rotina  ProgramaTimer          = }
{ ===== }

```

```

Procedure ProgramaTimer (Contador, Modo: byte; Valor: word);

```

```

  Var EndCtr: word;

```

```

begin
  EndCtr := EndBase + Contador;
  Port [CadModo] := Contador * 64 + 48 + Modo * 2;
  Port [EndCtr] := Lo (Valor);
  Port [EndCtr] := Hi (Valor);
end;

```

```

{ ===== }
{ =          Rotina ProgramaMemoriaCanais          = }
{ ===== }

```

```

Procedure ProgramaMemoriaCanais;

```

```

const

```

```

    G1    = 7*16;          { constantes para programar o ganho }
    G2    = 6*16;
    G5    = 5*16;
    G100  = 3*16;

```

```

    Bipolar = $80;

```

```

    Unipolar = $00;

```

```

begin

```

```

    EscreveRegSecundario (SecLimite, $f); {Carrega 15 no Reg. Limite}

```

```

    EscreveMemCanais (0, Bipolar + G1+ 0);

```

```

                    { mem. 0 com canal 0, Bip e ganho 1}

```

```

    EscreveMemCanais (1, Bipolar + G1+ 3);

```

```

                    { mem. 1 com canal 3, Bip e ganho 1}

```

```

end;

```

```

{ ===== }
{ =          Rotina AlocaBuffer          = }
{ ===== }

```

```

Procedure AlocaBuffer;

```

```

{ = Exemplo de Alocação Dinâmica de Memória:          = }

```

```

Var

```

```

    IntP          : ^integer;

```

```

    Resto         : word;

```

```

    Segm, Off,

```

```

    TamMax, InAt,

```

```

    TamAt, SegAt, I: integer;

```

```

    TamanhoBytes : real;

```

```

begin

```

```

{ = }
{ = calcula Fragmentacao: espaco livre entre o inicio }
{ = do Heap e o inicio do primeiro buffer dentro de um }
{ = segmento de 64 K enderecado pelo registrador }
{ = de extensao dos bits do controlador de DMA }
{ = }

```

```

new(IntP);
Resto:= 65536 - (Seg(IntP^ and $7fff)*16 - Ofs(IntP^));
dispose(IntP);
if (Resto<>0) or (Resto<> 65536)
then GetMem(PFrag,Resto);
GetMem (Buffer,MaxInt+1);
end;

```

```

{ ===== }
{ = Rotina HabilitaGateComDMA = }
{ ===== }

```

```

Procedure HabilitaGateComDMA;

```

```

begin
  EscreveRegSecundario (SecRM, $45);
  { habilita timer }
  { usa timer 0 }
  { modo burst ligado }
  { modo DMA =1 }
end;

```

```

{ ===== }
{ =          Rotina ProgDMA          = }
{ ===== }

```

Procedure ProgDMA;

begin

```

Port[$0A] := 4+DMAUsado;           { mascara DMA }
Port[Tab64K[DMAUsado]] := Seg(Buffer^) shr 12; { Pag. de 64 K }
Port[$0C] := $00;                 { Limpa FF do controlador de DMA }
Port[DMAUsado*2] := $00;          { Byte menos Signif. do Ender }
Port[DMAUsado*2] := (Seg(Buffer^) shr 4) and $ff;
                                { Byte Mais Sig. do End. }
Port[succ(DMAUsado*2)] := Lo(2*NAm-1);
                                { Byte menos Sig. da Contagem }
Port[succ(DMAUsado*2)] := (2*NAm-1) shr 8;
                                { Byte Mais Sig. da Contagem }

```

end;

```

{ ===== }
{ =          Rotina ColetaViaDMA      = }
{ ===== }

```

Procedure ColetaViaDMA;

Var

I: integer;

begin

```

Port[$0B] := $44+DMAUsado;       { Modo do DMA: nao autoiniciado }
Port[$0A] := DMAUsado;           { Desmascara DMA }
HabilitaGateComDMA;
repeat
  I := Port[8]
until (I and (1 shl DMAUsado)) <> 0; { Terminal Count }
Port[$0A] := 4+DMAUsado;         { Mascara DMA }
EscreveRegSecundario (SecRM, 0); { Zera RM da CAD12/36 }

```

end;

```

{ ===== }
{   Rotina para arquivar os dados   }
{ ===== }

```

```

Procedure Arquivo;

```

```

  VAR

```

```

    ARQT:TEXT;

```

```

    MATSTR:ARRAY[1..Nam] OF STRING[8];

```

```

    NOMEARQ:STRING[35];

```

```

    J:integer;

```

```

      BEGIN

```

```

        NOMEARQ:='A:DES' +NUM+'.DAT';

```

```

        ASSIGN(ARQT,NOMEARQ);

```

```

        REWRITE(ARQT);

```

```

        FOR J:=1 TO Nam DO

```

```

          BEGIN

```

```

            STR(Buffer^[J] DIV 16:5 ,MATSTR[J]);

```

```

            WRITE(ARQT,MATSTR[J]);

```

```

          END;

```

```

        WRITELN(ARQT);

```

```

        CLOSE(ARQT);

```

```

      END;

```

```

{ ===== }
{   ROTINA PARA DIGITAR O NUMERO DA PECA   }
{ ===== }

```

```

PROCEDURE NUM_PECA;

```

```

VAR  CRTL:STRING[1];

```

```

  BEGIN

```

```

    WINDOW (4,4,80,25);

```

```

    WRITELN(' AQUISICAO DE DADOS PARA MONITORAR');

```

```

    WRITELN('  VIBRACAO NO PORTA FERRAMENTA');

```

```

    writeln('canal 0 -----> direcao do avanco');

```

```

    writeln('canal 3 -----> direcao princ. de corte');

```

```

    WRITELN(' esta rotina tem por objetivo disparar a');

```

```

    writeln('leitura do dados via DMA, certifique-se ');

```

```

    writeln('de que o numero do teste esta correto,');

```

```

    writeln('pois pode acontecer a gravacao por cima ');

```

```

    writeln('e a perda dos dados de ensaios anteriores');

```

```

    write('DIGITE O NUMERO DO TESTE ');

```

```

    READ(NUM);

```

```

  END;

```

```

{ ===== }
{ =          Rotina MostraDados          = }
{ ===== }

```

```

Procedure MostraDados;

```

```

  Var
    J : integer;
begin
  Writeln;
  Writeln;
  Writeln(' Os dados lidos via DMA sao');
  Writeln;
  for J:= 1 to NAM do
    writeln(Buffer^[J] DIV 16:5);
    writeln;
    writeln('o numero de pontos lido e = ',J);
end;

```

```

{ ===== }
{ =          Rotina TelaApresentacao          = }
{ ===== }

```

```

Procedure TelaApresentacao;

```

```

  Var Ch: char;
begin
  Window (1, 1, 80, 25);
  TextBackGround (Black);
  ClrScr;
  Writeln;
  Writeln ('MONITORAMENTO DE USINAGEM VIA VIBRACAO');
  Writeln (' UTILIZACAO DA PLACA A/D CAD 12/36 ');
  Writeln (' Aquisicao de sinais por DMA');
  Writeln;
  Writeln (' Departamento de Engenharia de Fabricacao DEF/FEM');
  Writeln (' Tese de Mestrado 1993');
  Writeln ('Mestrando: Marcos Eduardo Reis Bonifacio');
  Writeln ('Orientador: Pr. Dr. Anselmo Eduardo Diniz');
  Write ('Digite uma tecla qualquer para continuar');
  repeat
  until KeyPressed;
  Ch := ReadKey;
end;

```

```

{ ===== }
{ =          Programa Principal          = }
{ ===== }

```

```
var
```

```
I,J: integer;
```

```
begin
```

```
TelaApresentacao;
```

```
ClrScr;
```

```
AlocaBuffer;
```

```
IniciaEnderecoHardware; { Determina os end. de I/O da CAD 12/36 }
```

```
ProgramaTimer (0, 2,125) { Programa Timer 0 no modo 2 a 16000 Hz }
```

```
EscreveRegSecundario (SecRM, 0); { Zera Reg. de Modo da CAD12/36 }
```

```
AutoCalibracao; { Comando de Auto-Calibracao do Conversor A/D }
```

```
ProgramaMemoriaCanais; { Programa a memoria de canais }
```

```
EscreveRegSecundario (SecLimite, 0);
```

```
    { Car. num. de canais menos 1 no reg. de limite }
```

```
EscreveRegSecundario (SecPonteiro, 0);
```

```
    { Zera Pont. da memoria de canais }
```

```
LimpaFIFO; { Limpa a memoria FIFO da CAD12/36 }
```

```
ProgDMA;
```

```
NUM_PECA;
```

```
DELAY(3300); { Espera o tempo necessario para a ferramenta  
              atingir o ponto medio do corpo de prova }
```

```
ColetaViaDMA;
```

```
Arquivo;
```

```
MostraDados;
```

```
end.
```