ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA POR Carlos Eduardo Costa E APROVADA PELA COMISSÃO JULGADORA EM 27/06/97.

Anselmo Eduardo Diniz
ORIENTADOR

MONITORAMENTO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DE DESBASTE VIA CORRENTE ELÉTRICA DO MOTOR PRINCIPAL DA MÁQUINA E VIA VIBRAÇÃO DA FERRAMENTA.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

C823m

Costa, Carlos Eduardo
Monitoramento do processo de torneamento de desbaste via corrente elétrica do motor principal da máquina e via vibração da ferramenta / Carlos Eduardo Costa. - - Campinas, SP: [s.n.], 1995.

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Usinagem. 2. Processos de fabricação. 3. Máquinas-ferramenta. 4. Tornearia. I. Diniz, Anselmo Eduardo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO.

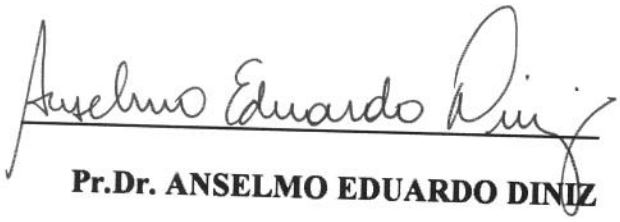
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO :

MONITORAMENTO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DE DESBASTE VIA CORRENTE ELÉTRICA DO MOTOR PRINCIPAL DA MÁQUINA E VIA VIBRAÇÃO DA FERRAMENTA.

AUTOR : **CARLOS EDUARDO COSTA.**

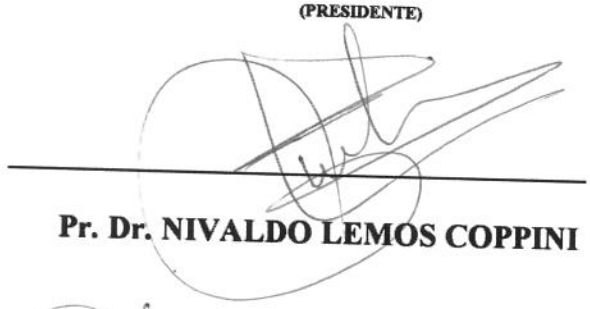
ORIENTADOR : **ANSELMO EDUARDO DINIZ.**

APROVADO POR :

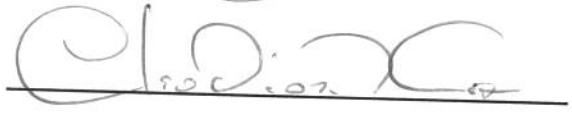


Pr.Dr. ANSELMO EDUARDO DINIZ

(PRESIDENTE)



Pr. Dr. NIVALDO LEMOS COPPINI



Pr. Dr. CLAUDIONOR CRUZ

CAMPINAS, 27 DE JUNHO DE 1.995.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

DEDICATÓRIA

Ao *Senhor Zezinho*

Sra. Benedita meus pais ainda que distantes responsáveis indiretos pelo trabalho através da vida e caminho indicados

A *Angela Helena*

e *Giovaninha*, esposa e filha pela abnegação dos momentos de comunhão em prol deste trabalho

Ao Deus que se Oculta por trazer à realidade um sonho impossível.

AGRADECIMENTOS

Em especial ao *SENHOR* que possibilitou encontrar muito mais que cooperadores técnicos nesta etapa acadêmica. Um capítulo extra sobre estes verdadeiros amigos-incentivadores que sempre se mostraram dispiníveis quando solicitados se achará para sempre em minha memória.

ONDE NÃO HÁ CONSELHOS FRACASSAM OS PROJETOS, MAS COM MUITOS CONSELHEIROS HÁ BOM EXITO - Pv 15:22

Aos citados abaixo muitos outros poderiam ser somados a estes também verdadeira estima,

Ao *Pr. Dr. Anselmo Eduardo Diniz*, muito além de um orientador, um verdadeiro exemplo de dedicação ao trabalho.

Aos *Pr. Dr. Nivaldo Lemos Coppini e Olivio Novaski* pela atenciosa participação por época do exame de qualificação.

Aos *Ms. Édimo e Bonifácio* (*Grupo de Monitoramento do Processo*) verdadeiros alavancadores para o cumprimento deste trabalho através das ferramentas computacionais.

Ao *Técnico Aristides (DEF - UNICAMP)*, muito mais que um profissinal um grande cooperador por época dos ensaios realizados.

Aos Técnicos e Professores amigos e incentivadores do CT - UNIMEP pela compreensão e apoio técnico.

Ao *CNPq* órgão financiador do trabalho.

SIMBOLOGIA EMPREGADA.

f ----------avanço (mm / volta).

a_p ----------profundidade de usinagem (mm).

v_c ----------velocidade de corte (m / min).

lc ----------comprimento de corte (m).

lf ----------comprimento de avanço (m)

VI ----------vibração.

Cp ----------corrente elétrica do motor principal da máquina.

PE ----------parâmetros elétricos.

A / D ----------analógico / digital.

RMS ----------raiz quadrada da média.

FFT ----------transformada rápida de Fourier.

I ----------corrente elétrica.

A ----------ampere.

V_B ----------desgaste de flanco.

KT ----------desgaste de cratera.

h ----------espessura do cavaco.

E.A. ----------emissão acústica.

W ----------potência mecânica útil.

Wc ----------potência de corte.

Wel ----------potência elétrica.

η ----------rendimento da máquina.

Pp ----------força passiva.

Pc ----------força de corte.

Pu ----------força de usinagem.

Pf ----------força de avanço.

Ks ----------pressão específica de corte.

m1 ... m6 ----------inclinação da curva.

C.V. ----------crescimento da vibração.

LISTA DE TABELAS :

2.1 - Principais resvestimentos de ferramentas isoladamente.

2.2 - Principais revestimentos multicamadas.

3.1 - Métodos de monitoramento.

3.2 - pesquisador e faixa de frequência pesquisada.

4.1 - Características do acelerômetro Kistler.

4.2 - Espessuras do recobrimento da pastilha empreagada.

4.3 - Composição química e propriedades mecânicas do material usinado.

4.4 - Condições de usinagem Parte 1 (v_c variável).

4.5 - Condições de usinagem Parte 2 (f variável).

4.6 - Condições de usinagem Parte 3 (repetibilidade).

5.1 - Variação da inclinação da curva para monitoramento via corrente elétrica do motor principal para três v_c e três f distintos.

5.2 - Valor da corrente quando $V_B = 0,8$ mm.

5.3 - Fator de crescimento da vibração (CV) nas diversas condições de usinagem.

LISTA DE FIGURAS :

2.1 - Ferramentas de metal duro com triplo revesvimento.

2.2 - Comparação de dureza dos tratamentos e materiais para ferramentas .

2.3 - Desgastes característicos de uma ferramenta de metal duro multirevestida em processo de torneamento.

2.4 - Representação da utilização de dois critérios diferentes para se determinar o fim da vida da ferramenta.

3.1 - Caminhos para instalação de um sistema de monitoramento.

3.2 - Sistema de minitoramento via vibração.

3.3 - Acelerômetro piezoelétrico.

3.5 - Variação das forças de usinagem e dos desgastes frontal e de cratera em função do tempo de corte em operação de torneamento.

3.6 - Sistema de monitoramento via parâmetros elétricos.

3.7 - Diferentes níveis de corrente para máquina em vazio, a ferramenta nova, o corte intermediário e a quebra da ferramenta.

3.8 - Características da corrente de armadura durante a penetração da ferramenta na peça.

3.9 - Variação do regime transitório da corrente para diferentes rotações da máquina.

4.1 - Sistema de monitoramento via corrente elétrica do motor principal da máquina e via vibração da ferramenta.

4.2 - Sensor de efeito Hall.

4.3 - Posição do acelerômetro no porta ferramenta.

4.4 - Corpo de prova usinado.

5.1 - Corrente elétrica X comprimento de corte, p/ três v_c (m/min) distintas e f = 0,30 mm/v.

5.2 - Corrente elétrica X comprimento de corte, p/ três f (mm/v.) distintos e v_c = 200 m/min.

5.3 - Desgaste frontal X comprimento de corte, p/ três v_c (m/min.) distintos e f = 0,30 mm/v.

5.4 - Desgaste frontal X comprimento de corte, p/ três f distintos e (mm/v.) e v_c = 200 m/min.

5.5 - Vibração X comprimento de corte, p/ três v_c (m/min.) distintas e f = 0,30 mm/v.

5.6 - Vibração X comprimento de corte, p/ três f (mm/v.) distintos e v_c = 200 m/min.

5.7 - Gráficos da FFT apresentando início e fim da vida da ferramenta. (condição 1)

5.8 - Gráfico da FFT apresentado início e fim da vida da ferramenta. (condição 2)

5.9 - Vibração x comprimento de corte, p/ três v_c (m/min.) distintas e f = 0,30 mm/v.. (após passar pelo filtro)

5.10 - Vibração X comprimento de corte, p/ três f (mm/v.) distintos e v_c = 200 m/min.. (após passar pelo filtro)

5.11 - Corrente elétrica X comprimento de corte, p/ três f = 0,30 mm/v. e v_c = 200 m/min constantes. (ensaio de repetibilidade)

5.12 - Vibração X comprimento de corte, p/ três f = 0,30 mm/v. e v_c = 200 m/min. constantes. (ensaio de repetibilidade)

SUMÁRIO.

MONITORAMENTO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DE DESBASTE VIA CORRENTE ELÉTRICA DO MOTOR PRINCIPAL DA MÁQUINA E VIA VIBRAÇÃO DA FERRAMENTA.

DEDICATÓRIA ---------- I.

AGRADECIMENTOS ---------- II

SIMBOLOGIA EMPREGADA ---------- III

LISTA DE TABELAS ---------- V

LISTA DE FIGURAS ---------- VI

SUMÁRIO ---------- VIII

RESUMO ---------- XII

CAPÍTULO 1.

INTRODUÇÃO. ---------- 1

CAPÍTULO 2.

DESGASTE E CRITÉRIO DE FIM DE VIDA DA FERRAMENTA.

2.1 - EVOLUÇÃO DAS FERRAMENTAS DE CORTE. ----------3

2.2 - DESENVOLVIMENTO DO DESGASTE. ----------8

2.3 - CRITÉRIO DE FIM DE VIDA DA FERRAMENTA DE USINAGEM. ----------9

2.3.1 - DESGASTE E VIDA DA FERRAMENTA. ----------9

CAPÍTULO 3.

MONITORAMENTO DA USINAGEM DOS MATERIAIS. ---------- 14
3.1 - INTRODUÇÃO. ---------- 14
3.2 -UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO.---------- 16
3.3 - TIPOS DE MONITORAMENTO. ---------- 19
3.4 - SISTEMAS DE MONITORAMENTO INDIRETO DA USINAGEM. ---------- 23
3.4.1 - MONITORAMENTO VIA EMISSÃO ACÚSTICA. ---------- 23
3.4.2 - MONITORAMENTO DO PROCESSO VIA FORÇA DA USINAGEM.---------- 24
3.5 - OUTROS SISTEMAS DE MONITORAMENTO DA USINAGEM. ---------- 26
3.5.1 - SISTEMA DE MONITORAMENTO VIA TOOL EYE,---------- 26
3.5.2 - SISTEMA ÓPTICO DE MONITORAMENTO. ---------- 26
3.5.3 - SISTEMA DA DISTÂNCIA DA FERRAMENTA - PEÇA. ---------- 27
3.5.4 - SISTEMA DA RADIOATIVIDADE. ---------- 28
3.5.5 - SISTEMA DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA.---------- 28
3.6 - SISTEMA DE MONITORAMENTO VIA VIBRAÇÃO. ---------- 29
3.6.1 - A ORIGEM DAS VIBRAÇÕES EM PROCESSOS DE USINAGEM E A ESTABILIDADE DO SISTEMA. ---------- 29
3.6.2 - ELEMENTOS COMPONENTES DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO VIA VIBRAÇÃO. ---------- 31
3.6.3 - PRINCIPIOS DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA. ---------- 33
3.6.4 - O CONVERSOR A / D. ---------- 33
3.6.5 - ACELERÔMETRO PIEZOELÉTRICO. ---------- 34
3.6.6 - ANÁLISE DO SINAL E ESTRATÉGIA DE MONITORAMENTO DO DESGASTE VIA VIBRAÇÃO. ---------- 36
3.7 - MONITORAMENTO DO PROCESSO DA USINAGEM VIA PARÂMETROS ELÉTRICOS. ---------- 40

3.7.1 - INTRODUÇÃO. ---------- 40
3.7.2 - FORÇAS DURANTE O PROCESSO DE TORNEAMENTO. ---------- 40
3.7.3 - MONITORAMENTO DO PROCESSO VIA PARÂMETROS ELÉTRICOS DO MOTOR.---------- 44
3.7.4 - ELEMENTOS COMPONENTES DO SISTEMA.---------- 47
3.7.5 - SENSOR DE EFEITO HALL.---------- 47
3.7.6 - CORRENTE ELÉTRICA DO MOTOR E DESGASTE DA FERRAMENTA-------- 48

CAPÍTULO 4.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL. ---------- 52
4.1 - SISTEMA DE MONITORAMENTO. ---------- 52
4.2 - AQUISIÇÃO DOS DADOS. ---------- 56
4.3 - MÁQUINA, FERRAMENTA E MATERIAL ENSAIADOS. ---------- 57
4.4 - METODOLOGIA APLICADA AOS ENSAIOS. ---------- 58

CAPÍTULO 5.

RESULTADOS E DISCUSSÕES. ---------- 61
5.1 - MONITORAMENTO DA CORRENTE ELÉTRICA DO MOTOR PRINCIPAL.----- 62
5.2 - MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO DA FERRAMENTA NA DIREÇÃO DE CORTE. ---------- 69
5.3 - ENSAIOS DE REPETIBILIDADE. ---------- 79

CAPÍTULO 6.

6.1 - CONCLUSÃO. ---------- 82
6.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS. ---------- 83

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS ---------- 84

APENDICES.----------90

APÊNDICE - A - VALORES NÚMERICO AQUISITADOS.---------- 91

APÊNDICE - B - PROGRAMA P/ AQUISIÇÃO DOS SINAIS.---------- 99

APÊNDICE - C- PROGRAMA PARA SEPARAR OS SINAIS.---------- 108

RESUMO

O objetivo deste trabalho é verificar a viabilidade de utilização do monitoramento da corrente elétrica do motor principal do torno e da vibração da ferramenta para o estabelecimento do fim da vida da ferramenta revestida de torneamento em desbaste. A principal conclusão do trabalho é que a corrente elétrica do motor da máquina é um parâmetro bastante confiável para o fim proposto. Já a vibração da ferramenta não se mostrou adequada para tal fim.

CAPÍTULO - 1

INTRODUÇÃO

Desde o princípio da utilização de ferramentas de corte, em especial ferramentas utilizadas na usinagem dos metais, tem-se observado uma incessante luta contra o desgaste prematuro das mesmas, suas causas e consequências ao processo.

A qualidade da usinagem em uma máquina-ferramenta convencional, assim como a vida da ferramenta utilizada para tal, são ítens de extrema responsabilidade e que estão diretamente sujeitos ao operador, sua habilidade pessoal, sua disposição física e outros fatores pessoais, fazendo com que ele influa de maneira direta no resultado final da operação

Considerando que os fatores negativos acima citados praticamente inexistem em máquinas CNC em seu atual estágio de desenvolvimento, o presente trabalho visa somar aos interessados do estudo do monitoramento de processos de usinagem.

Uma constante preocupação nos sistemas de manufatura que trabalham com a usinagem dos metais é o momento da troca da ferramenta de corte, o que implica na adoção de critérios físicos que determinem o fim de sua vida.

Os critérios de fim de vida da ferramenta mais utilizados são desgaste, tanto na superfície de saída como na superfície de folga da ferramenta, forças de usinagem, rugosidade superficial e/ou tolerância dimensional da peça, dentre outros.

Para que se atinja o estágio da manufatura completamente automatizada é importante que os parâmetros utilizados nestes critérios (desgaste, rugosidade, força de corte, vibração, parâmetros elétricos, etc.) possam ser monitorados em tempo real.

Alguns dos diversos Sistemas de Monitoramento em desenvolvimento e aplicação atual serão introduzidos no corpo do trabalho sendo tratado em especial o Monitoramento do desgaste da pastilha de metal duro revestida, Via Corrente Elétrica do Motor Principal e Via Vibração da Ferramenta.

O objetivo é estabelecer o momento exato da troca da ferramenta de torneamento em operações de desbaste, bem como comparar as potencialidades dos sistemas utilizados (Corrente Elétrica do Motor Principal e Vibração da Ferramenta). Com isto procurar-se-á levar a objetividade do laboratório para a produção manufatureira, verificando previamente o grau de confiabilidade do sistema desenvolvido, a fim de se determinar a vida da ferramenta, visando assim seu máximo rendimento segundo as especificações do processo. Assim, pode-se levar o operador ou sistema automatizado a substituir a ferramenta no momento exato, ou seja, antes que esta venha a falhar de maneira a prejudicar as operações posteriores.

O presente trabalho divide-se em seis capítulos, a saber :

Capítulo 01 - Introdução.

Um relato sobre as necessidades de aplicação de sistemas de monitoramento nas indústrias modernas onde cada vez mais tem se observado a aplicaão de processos e operações de usinagem em busca de maior produtividade e qualidade do produto final visto a corrente busca rumo a certificação a nível internacional.

Capítulo 02 - Desgaste e fim de vida da ferramenta.

Neste capítulo tratou-se das ferramentas própriamente dita utilizadas em processos de usinagem dos materiais. Um levantamento sobre os principais tipos usados atualmente suas características, campo de aplicação, desgaste mais comuns tornando assim possível o levantamento de sua vida de acordo com o processo e operação realizadas.

Capítulo 03 - Monitoramento da usinagem dos materiais.

Encontra-se neste capítulo relatados alguns dos muitos sistemas de monitoramento do processo da usinagem em aplicação a nível industrial assim como outros em desenvolvimento, sendo que de modo geral todos buscam a determinação do momento de troca da ferramenta.

Capítulo 04 - Metodologia experimental.

Neste capítulo encontra-se a metodologia aplicada para a realização dos ensaios com destaque também ao sistema de monitoramento empregado para o monitoramento.

Capítulo 05 - Resultados e Discussões.

Acha-se neste capítulo os resultados obtidos a través de graficos, tabelas e comentários sobre os mesmos.

Capítulo 06 - Conclusão e Sugestões para trabalhos futuros.

São comentadas as principais conclusões após a análise dos resultados seguido de sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO - 2

DESGASTE E CRITÉRIO DE FIM DE VIDA DA FERRAMENTA.

2.1 - EVOLUÇÃO DAS FERRAMENTAS DE CORTE.

A indústria da ferramenta de usinagem tem concentrado esforços em desenvolver novas ferramentas de metal duro, com revestimentos cada vez mais adequados às exigências do mercado, uma vez que grande volume do cavaco gerado na indústria e removido com ferramentas de metal duro (Tungaloy 1.989).A princípio, uma ferramenta de usinagem deve satisfazer três requisitos considerados básicos (Shu 1.980 e Novaski 1.990) :

A). Resistência ao desgaste e dureza a quente.
B). Resistência à deformação plástica
C). Tenacidade

Durante o processo de torneamento, principalmente em operações de desbaste como tratado neste trabalho, observa-se a geração de temperaturas extremamente altas, altas pressões de corte e também choques constantes da ferramenta com a peça usinada e cavacos gerados.

Pode-se então dizer, que o mais vantajoso, seria uma combinação de altos valores de cada uma das três propriedades (dureza, resistência ao desgaste e tenacidade). Porém, a experiência tem provado que ao se elevar qualquer das características acima, por consequência ocorre, a diminuição de outra. Como exemplo comprovado experimentalmente sabe-se que, uma ferramenta com alta dureza e resistência ao desgaste provavelmente terá seu fim de vida causado por choques e interrupções normais durante o corte. Também é sabido que ao se utilizar ferramentas com maior tenacidade, esta tem sua vida diminuída devido a seu desgaste rápido. Assim sendo, é de fundamental importância a determinação do volume ou porcentagem do elemento utilizado como revestimento do substrato da ferramenta, estando diretamente relacionado ao material a ser usinado.

Deste modo, pensando em se obter ferramentas de metal duro com características tais como dureza, resistência ao desgaste e tenacidade apropriadas ao processo, tem se desenvolvido diversos materiais de recobrimento para o substrato. Assim tem-se a dureza e resistência ao desgaste nas camadas periféricas, que vão ter contato com o cavaco e com a peça e tenacidade no núcleo, para evitar a quebra da ferramenta.

Na figura 2.1 observa-se esquematicamente uma ferramenta de metal duro em uma de suas composições mais utilizadas pela indústria, sendo que atualmente, visando atender as necessidades

do mercado, diversos tipos de substratos de metal duro vem recebendo cada vez um maior número de camadas de revestimentos.

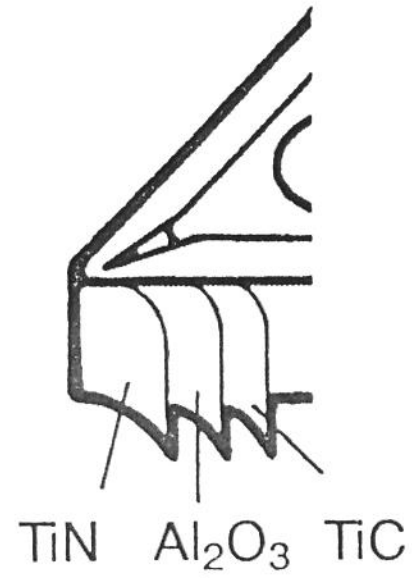


Figura 2.1 - Ferramenta de Metal Duro com Triplo Revestimento (Sandivik 1.991)

Entre as camadas de revestimento mais utilizadas atualmente pela indústria da ferramenta, encontram-se o Nitreto de Titânio (TiN), o Óxido de Alumínio (Al_2O_3), e o Carboneto de Titânio (TiC).

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

Como bom demonstrativo da evolução dos materiais utilizados como revestimentos do substrato de metal duro, tem-se o Widalon, pastilha de metal duro recoberta por 13 camadas de coberturas compostas de TiC, Ti(CN) e ALON. O ALON é obtido a partir do Al_2O_3, sendo que as 13 camadas apresentam espessuras inferiores a 0,2 microns cada e encontram-se intercaladas umas das outras de modo a aproximar as características da ferramenta das propriedades dureza, resistência ao desgaste e tenacidade já comentados neste ítem (Sarmah 1.988).

Vários outros materiais foram desenvolvidos, com destaque ainda para o Balenit B TiCN, desenvolvido pela empresa Balzers, com revestimento de cor dourada, tendo como característica a

combinação da extrema dureza do carboneto de TiC com o baixo coeficiente de atrito proporcionado pelo nitreto de TiN. Segundo o fabricante, o Balenit, a uma espessura de 2 a 3 mícrons, apresenta dureza da ordem de 3.000 HV, além de um baixo coeficiente de dilatação térmica durante a usinagem, o que a torna indicada para a usinagem do alumínio de alto teor de sílicio. Outras características interessantes deste material, são suas características de alta resistência à abrasão e resistência à adesão de partículas provenientes do material usinado (Gabor 1.989).

Outro material também bastante interessante utilizado como revestimento foi desenvolvido pela empresa Carolina Coating Technologies Inc. O Ovonic foi desenvolvido especialmente para utilização na usinagem de materiais não ferrosos tais como o alumínio e o titânio além de outros materiais resistentes ao calor.. Sua composição consiste de uma espécie de grafite diamantada ultramacia e amorfa, não apresentando nenhuma estrutura cristalina ou contornos de grãos, o que proporciona uma fácil adesão em todos os ângulos da ferramenta. Características interessantes são observadas quando do emprego do Ovonic, tais como a dureza e alta resistência ao desgaste, sendo que o revestimento permanece com suas propriedades inalteradas mesmo quando do rompimento do cavaco, o que se dá a pressões extremamente altas (Gabor 1.989).

De forma geral, o metal duro por si só já possui características importantes quando empregado como material para ferramentas de usinagem, sendo que o revestimento melhora ainda mais suas propriedades quanto à sua vida durante o processo, contribuindo assim para um maior rendimento da produtividade através da redução de paradas para troca da ferramenta, emprego de melhores condições de corte, contribuindo ainda para uma melhor qualidade superficial da peça.

Na tabela 2.1 estão mostrados os elementos de revestimento, sua dureza, espessura, natureza e, campo de aplicação isoladamente. A tabela 2.2 mostra os mesmos elementos, porém conjugados, formando assim as ferramentas multirevestidas (Piere 1.994).

É importante aqui salientar que os valores mostrados são referênciais e podem variar de acordo com o fabricante da ferramenta.

Tabela 2.1 Principais revestimentos de ferramentas isoladamente (Piere 1.994).

Revestimento	Dureza (HV)	Espessura (micron)	Substrato	Aplicação
TiN	2000 a 5000	3	WC/HSS	Aços semi-duros
TiC	3000 a 3500	2 a 3	WC/HSS	Aços semi-duros
Al_2O_3	2500 a 3100	3	WC	Aços

Tabela 2.2 - Principais revestimentos multicamadas (Piere 1.994).

Multicamadas	Espessura (micron)	Substrato	Aplicação
TiN + TiC	5	WC/HSS	Aços
TiC + TiN	8	WC/HSS	Aços
TiN + TiC + Al O	8	WC	Aços e fundidos
TiN + Al_2O_3	6	WC	Aços e fundidos

Atualmente dois são os métodos utilizados a nível industrial para se revestir ferramentas de usinagem, sendo eles (Hanasaki 1.990) :

A). CVD - Deposição química de vapor - este é o método comumente usado para a deposição do revestimento em substrato de metal duro, sendo necessário ligeiro arredondamento das arestas de corte a fim de se evitar a fragilização da ponta da ferramenta após o tratamento em altas temperaturas. Este processo não pode ser utilizado para o recobrimento do aço rápido devido às altas temperaturas envolvidas, (entre 900 e 1050 ^{0}C) o que causaria a perda de seu tratamento térmico. A deposição é feita a partir de uma atmosfera reativa que se decompõe na superficie da ferramenta, formando assim o composto que serve de revestimento.

B). PVD - Deposição física de vapor - As pressões e temperaturas envolvidas são menores (entre 450 e 500 ^{0}C) o que facilita sobremaneira sua utilização como revestimento em ferramentas de aço rápido podendo também ser utilizado para o metal duro.

A ferramenta utilizada para a realização dos ensaios neste trabalho é vista na figura 2.1, sendo a seguir comentado sobre as principais características das suas camadas de revestimento (Coll 1.989).

A). Carboneto de Titânio - é o responsável pela alta resistência ao desgaste, funcionando ainda como elemento de liga com o metal duro. Em muitas ferramentas é a única camada de revestimento, sendo isto possível devido à sua alta dureza.

B). Óxido de Alumínio - pode ser o elemento intermediário numa ferramenta multirevestida ou a camada superior numa ferramenta com duas camadas, tendo por objetivo garantir a estabilidade a elevadas temperaturas, além de melhorar a resistência ao desgaste por abrasão.

C). Nitreto de Titânio - sua característica principal é a redução do coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco e peça, além de aumentar a resistência à oxidação, uma vez que no

torneamento, por exemplo, atinge-se facilmente temperaturas na zona de contato ferramenta / peça entre 800 e 1000 graus Celsius.

Na figura 2.2 observa-se a comparação de dureza de alguns dos diversos tratamentos e materiais utilizados como ferramentas de usinagem dos materiais, onde se vê o metal duro como elemento intermediário sendo, que suas características e possibilidade de associação com outros elementos fazem com que ele se destaque uma vez comparado aos demais.

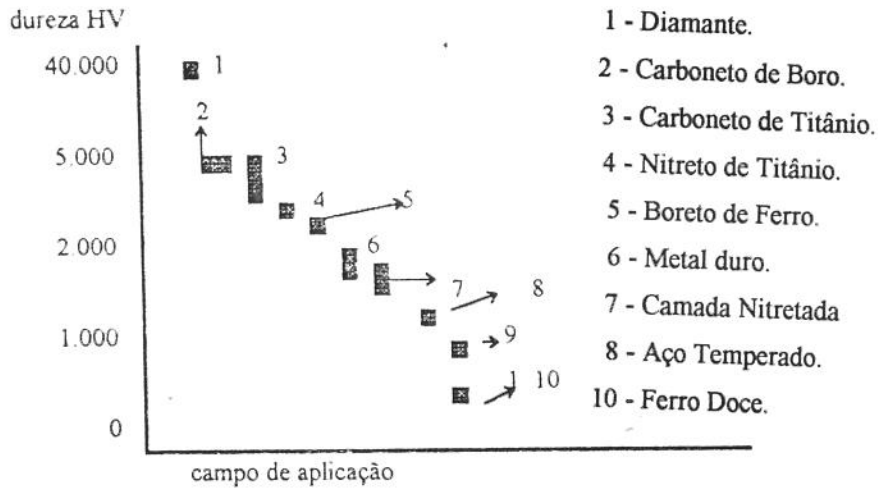


Figura 2.2 - Comparação de Dureza dos Tratamentos e Materiais para Ferramentas (Gabor 1.989).

Detalhe importante ao se escolher a ferramenta e seu revestimento, refere-se à formação do cavaco, uma vez que este, ao ser gerado, desliza por sobre a ferramenta desgastando-a por atrito, principalmente em casos de cavacos longos onde se recomenda a utilização de pastilhas com revestimento de Carboneto de Titânio, ou Tântalo uma vez que são mais resistentes ao desgaste por abrasão resistindo também a elevadas temperaturas e protegendo bastante a ferramenta contra o desgaste de cratera.

De forma geral, o metal duro revestido é suficiente para usinagem dos mais diversos metais abrangendo desde o latão e alumínio até o ferro fundido de dureza aproximada a 60 HRC, assim como ligas resistentes ao calor.

Uma vez iniciado o processo de usinagem, inicia-se por consequência o desgaste da ferramenta, sendo que a intensidade deste está diretamente ligado às propriedades do revestimento empregado sobre o metal duro, uma vez que cada revestimento possui características peculiares e consequentemente reagirá também de maneira diferente, segundo as características do material usinado e condições de usinagem empregadas.

2.2 - O DESENVOLVIMENTO DO DESGASTE.

Ao estudar os mecanismos de desgaste em ferramentas de metal duro revestidas, quatro fenômenos se destacam :

A) Adesão

B) Abrasão

C) Oxidação associada com o desagaste adesivo

D) Difusão.

De forma geral, estes fenômenos não são exclusivos, ou seja, na maioria dos casos mais de um deles ocorrem simultaneamente, sendo que o mecanismo de desgaste predominante depende do processo, do material da ferramenta, do material da peça usinada e das condições de usinagem empregadas.

Dos mecanismos de desgaste de corte acima citados, três são considerados básicos e de maior ocorrência quando ferramentas recobertas estão sendo utilizadas quais sejam :

A). Desgaste por aderência, ou adesão - neste caso, a ferramenta e o cavaco se soldam em asperezas locais e o desgaste ocorre pela fratura da junta soldada. A aderência está presente também quando da formação da aresta postiça de corte, em baixas temperaturas e velocidades de corte.

B). Desgaste por abrasão - ocorre como resultado da presença de partículas duras nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, devido ao atrito que acontece a medida que o cavaco se move sobre a superfície de saída da ferramenta e a peça se move em relação à superfície de folga da ferramenta, desgastando-a por ação mecânica. As partículas duras podem se originar de constituintes duros, imperfeições no material da peça usinada e de partículas da prórpia ferramenta.

C). Difusão intermetálica - encontra-se presente em condições de temperatura elevada, normalmente em operações de desbaste, quando do contato existente na interface cavaco / superfície de saída da ferramenta e peça / superfície de folga. Este contato a alta temperatura pode provocar perda de certos elementos constituintes da ferramenta (difusão), diminuindo assim sua vida. Para haver difusão intermetálica é necessário que além da alta temperatura de corte, haja também afinidade fisico-química dos materiais da peça e da ferramenta. O principal exemplo deste tipo de fenômeno ocorre na usinagem de ligas ferrosas com ferramentas de diamante policristalino, onde o carbono do diamante difunde para a peça formando assim o carboneto de ferro em temperaturas não muito altas (em torno de 600 gráus Celsius). A temperatura de corte, que é fortemente dependente da velocidade de corte, é o principal fator de definição da importância de cada um dos fenômenos

acima em uma determinada operação. Assim, em baixas velocidades de corte, a aderência se faz bastante presente, gerando a formação da aresta postiça (APC) de corte, fenômeno que somente se realiza em temperaturas menores que a temperatura de recristalização do material da peça. Em cortes com ferramentas recobertas com TiN este tipo de fenômeno de desgaste (aderência com ou sem formação da aresta postiça de corte) é dificultado, já que este material diminui o coeficiente de atrito entre cavaco / ferramenta (Novaski 198).

Há uma tendência natural em se trabalhar cada vez mais a maiores velocidades de corte (Vc), visto o estágio atual de desenvolvimento das máquinas e ferramentas empregadas. Em assim sendo e sabido que altas velocidades de corte implicam em crescimento da temperatura de corte os desgastes por abrasão da ferramenta desenvolvem-se com facilidade, estando também aberto caminho para a difusão intermetálica entre a peça usinada e a ferramenta.

Além dos desgastes da aresta de corte citados até aqui, alguns outros fenômenos podem ocorrer, devendo estes serem cuidadosamente observados, uma vez que também influenciam diretamente a vida da ferramenta (Novaski 1.98) :

A). Deformação da ponta da ferramenta - normalmente este fenômeno é observado quando condições severas de usinagem são empregadas (altas forças de usinagem) podendo ocorrer pouco tempo após o início da operação.

B). Falha prematura - definida como aquela que acontece inesperadamente, encerrando a vida da ferramenta, tendo como causas prováveis de acontecimento : incrustações do material usinado, corte interrompido, choque ferramenta / peça. As falhas prematuras mais comuns são : quebra da ferramenta, forte lascamento, deformação acentuada da ferramenta. Normalmente a falha prematura está associada à usinagem de peças, fundidas uma vez que estas estão sujeitas a incrustações, vazios e imperfeições mesmo superficiais.

2.3 - CRITÉRIO DE FIM DE VIDA DE FERRAMENTA DE USINAGEM

2.3.1 - DESGASTE E VIDA DA FERRAMENTA

Vida de uma ferramenta de usinagem é o tempo que a mesma trabalha efetivamente, deduzidos os tempos passivos, até perder sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingindo-se este tempo, a ferramenta deve ser afiada ou substituída. Logo, vida da ferrmaneta é o tempo entre duas afiações ou trocas sucessivas necessárias, no qual ela trabalha efetivamente (Ferraresi 1.970).

Além de ser definida em termos de tempo de corte, a vida de uma ferramenta também pode ser definida em termos de comprimento de avanço, caso típico do processo de furação, onde a vida da broca pode ser avaliada segundo a somatória dos comprimentos dos furos executados.

Neste trabalho, a vida das ferramentas utilizadas nos ensaios foi definida em termos do comprimento de corte usinado, pois entende-se que este parâmetro representa melhor o volume de cavaco removido do que o tempo de corte ou comprimento de avanço. O comprimento de corte de uma peça que sofreu torneamento cilindrico é dado por :

$$lc = \pi * d * Z \Rightarrow lc = \pi * d * lf / f$$

onde Z é o número de voltas que a peça dá do início ao fim do corte.

Os fatores que determinam a fixação de um de determinado valor limite de desgaste para o fim de vida da ferramenta em usinagem são vários, sendo que determinada ferramenta deve ser retirada de uso quando :

A). Os desgastes atingirem proporções tão elevadas que se receia a quebra da aresta de corte. Este acontecimento é crítico em operações de desbaste onde, por não ser necessária a obtenção de tolerâncias apertadas e bons acabamentos superficiais, permite-se que os desgastes atinjam valores altos e, por consequência, também se desenvolvam altas pressões e temperatura de corte.

B). Devido ao desgaste de flanco, não é mais possível a obtenção de tolerâncias apertadas e / ou de bons acabamentos superficiais da peça. Este acontecimento é crítico em operações de acabamento, onde normalmente se deseja tanto baixa rugosidade superficial da peça usinada, quanto tolerâncias apertadas.

C). Os desgastes crescem muito, fazendo com que a temperatura da aresta de corte ultrapasse a temperatura na qual a ferramenta perde o fio de corte. Este acontecimento é crítico em ferramentas de aço rápido, que suportam temperaturas menores que outros materiais para ferramentas.

D) O aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interfere no funcionamento da máquina.

Como este trabalho trata do torneamento em operação de desbaste com ferramentas de metal duro revestidas, em máquina com bastante potência (30 HP) os ítens B, C e D acima não se aplicam. Assim, procurar-se-á detectar, através do monitoramento da corrente elérica do motor

principal da máquina e da vibração da ferramenta, o momento em que os desgastes da ferramenta são tais que se receia a quebra da aresta de corte.

Como já comentado neste trabalho, a vida da ferramenta está diretamente relacionada às características de cada processo, às condições de usinagem empregadas e à variação das características do material usinado. Conhecidas algumas das variantes possíveis, a prática tem comprovado que uma infinidade de fenômenos podem ocorrer durante o processo da usinagem, provocando assim desgastes diversos ou isolados, encerrando a vida da ferramenta.

Quando dois ou mais desgastes se apresentam na ferramenta, normalmente um destes se destaca, devendo ser o utilizado a fim de se determinar o fim de vida da ferramenta.

Na figura 2.3 acha-se esquematizado os desgastes que normalmente ocorrem quando utilizadas as pastilhas de metal duro revestidas em processo de torneamento, sendo após a mesma feito um rápido comentário sobre estes.

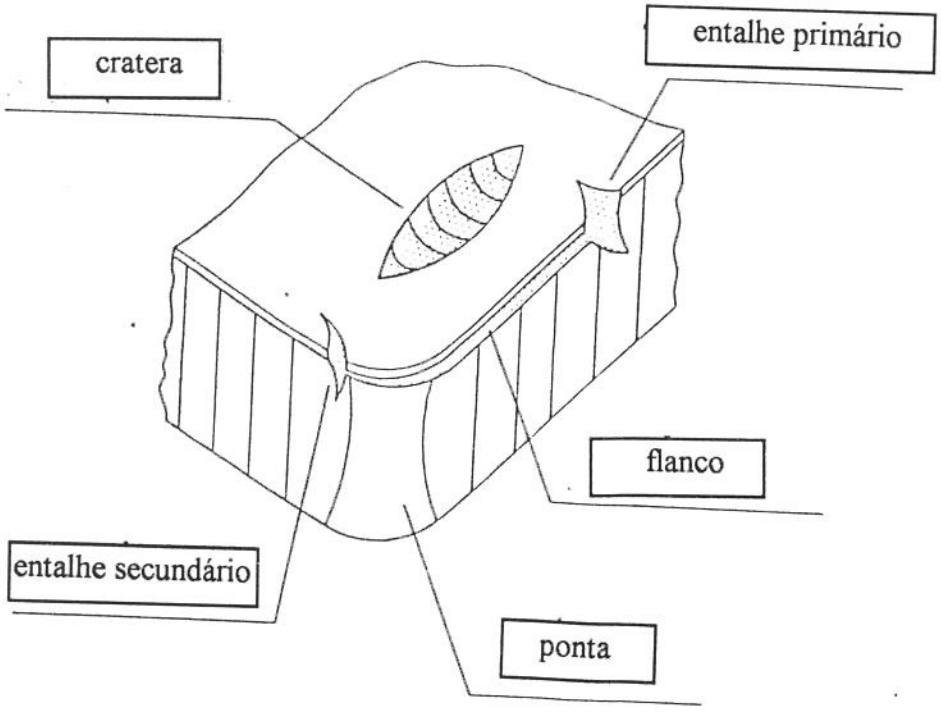


Figura 2.3 - Desgastes característicos de uma ferramenta de metal duro multirevestida em processo de torneamento (Sandivik 1.991)

Nesta figura pode-se ver os seguintes desgastes :

A). Desgaste de flanco ou frontal - é o tipo de desgaste que acontece em todas as operações de usinagem, causado pelo atrito da peça com a superfície de folga da ferramenta. É o tipo de desgaste comumente utilizado quando se deseja monitorar diretamente a vida de uma ferramenta, visto a facilidade de verificação e medição da largura da região do desgaste.

B). Desgaste tipo entalhe - o perfil e o comprimento do entalhe dependem em grande parte da precisão de posicionamento da ferramenta. Quando o desgaste da ferramenta progride, uma ranhura desenvolve-se na superfície principal de folga, onde o diâmetro externo da peça está sendo usinado. O volume desgastado desta ranhura pode facilmente exceder o volume de desgaste de cratera e de desgaste frontal. O desgaste de entalhe secundário prejudica em muito o acabamento superficial da peça.

C). Desgaste de cratera da superfície de saída - este tipo de desgaste está diretamente relacionado às altas tensões de contato e altas temperaturas na interface cavaco/ ferramenta. A profundidade da cratera (KT) pode ser utilizada como medida do desgaste da ferramenta e um valor pré-determinado pode ser utilizado como critério de vida da ferramenta. Sua posição em relação à aresta de corte é também de grande importância, sendo que o crescimento da cratera pode fazer com que esta intercepte o desgaste frontal, vindo então a quebrar a aresta de corte. Sabido o acima, observa-se que uma cratera profunda e larga distante da aresta de corte pode ser menos prejudicial que uma cratera estreita porém profunda próxima a aresta de corte. Este desgaste acontece principalmente em ferramentas não revestidas.

Estes desgastes da ponta da ferramenta afetam a superfície usinada bem como aumentam a vibração do sistema e a força e a potência consumidas pelo processo. Assim, é possível se monitorar estes parâmetros e, consequentemente se acompanhar indiretamente o crescimento dos desgastes da ferramenta.

Sabido que os desgastes ocorrem simultaneamente, dois ou mais podem ser utilizados a fim de se determinar o fim de vida da ferramenta. A figura 2.4 apresenta uma curva de vida com dois critérios diferentes para estabelecimento do fim da vida. Verifica-se que a medida que a velocidade de corte cresce, tende a se destacar o desgaste de cratera. A região que delimita a vida da ferramenta encontra-se abaixo das linhas KT e V_B. A relação linear log (T) log (Vc) foi verificada para valores de profundidade de corte (ap) entre 2 e 4 mm e velocidade de corte que correspondem à vida da ferramenta entre 10 e 15 minutos. Quando a ferramenta é revestida, o desgaste de cratera é usualmente desprezível e o desgaste frontal passa a ser o principal desgaste na determinação do fim da vida da ferramenta.

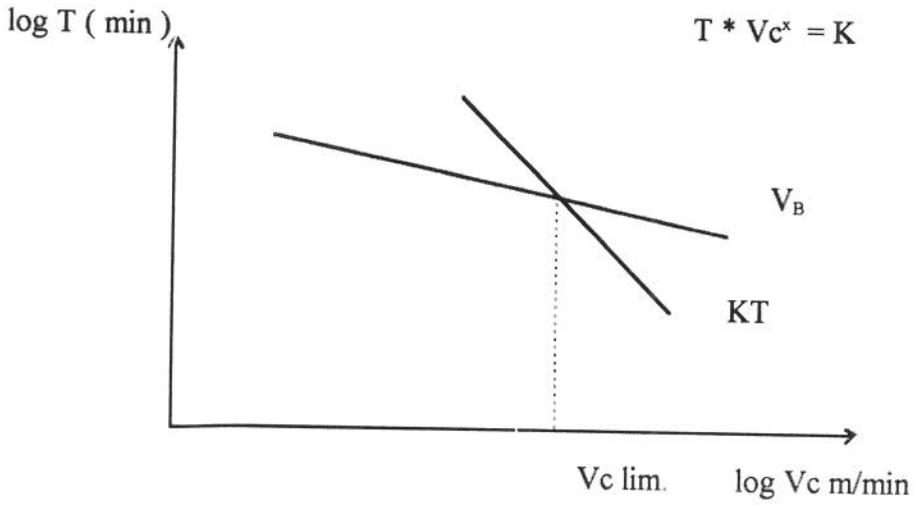


Figura 2.4 - Representação da utilização de dois critérios diferentes para se determinar o fim de vida da ferramenta (Nakovaski 1.989).

CAPÍTULO 3
MONITORAMENTO DA USINAGEM DOS MATERIAIS.

3.1 - INTRODUÇÃO.

O processo de fabricação por usinagem a cada dia vem sendo analisado com maior profundidade, estando-se assim atento às necessidades do mercado, para se responder com produtos de melhor qualidade em menor tempo, através da otimização do processo, ferramental e sistemas que possibilitem o acompanhamento em tempo real (on-line).

De forma geral, um dos grandes obstáculos enfrentados para se atingir a completa automatização do processo da usinagem em sistemas integrados e flexíveis de manufatura, é o desenvolvimento do que pode ser chamado usinagem não assistida pelo homem, isto é, um processo de fabricação onde por exemplo, o estabelecimento do momento exato da troca da ferramenta venha a ser realizado sem a intervenção humana. Para que isto seja possível é necessário qu se tenha acoplado à máquina e/ou a ferramenta, um sistema de monitoramento e controle que seja capaz de detectar este monitoramento através de sensores e informar o comando cnc da máquina a fim de que este possa interromper a utilização da ferramenta.

Os dois tópicos desenvolvidos neste capítulo, quais sejam, monitoramento do processo via vibração do sistema e monitoramento do processo via parâmetros elétricos da máquina, seriam praticamente impossíveis de se concretizar sem a presença da informática (computadores), sendo que estes a cada dia vem assumindo lugar de destaque junto ao meio industrial, com grande sucesso mesmo no chão de fábrica, onde pode por exemplo, ser utilizado no monitoramento do processo.

Várias de suas características fazem com que o computador hoje seja um elemento imprescindível na nova tecnologia da manufatura, a saber (Pal 1.992) :

A). Confiabilidade dos equipamentos digitais.

B). Flexibilidade dos softwares.

C). Rapidez na manutenção, facilidade da troca de placas.

D). Interação homem-máquina, via vídeo, via teclado, etc.

Em sistemas de monitoramento baseados em computadores como no caso deste trabalho, os dados adiquiridos podem e/ou devem ser tratados para eliminação de sinais indesejados ao monitoramento (ruídos).

Vários fatores influenciam de modo a dificultar o monitoramento do processo da usinagem, sendo que um dos principais pontos observado segundo a literatura, é a inexistência de um consenso quanto ao sistema de monitoramento e aos parâmetros a serem monitorados que possam ser usados para uma ampla variedade de processos de usinagem e para todo o campo de aplicação na usinagem. Assim sendo, os diversos tipos de materiais de ferramentas, diferentes condições de usinagem (velocidade de corte, profundidade da usinagem, avanço, etc.), diferentes materiais a serem usinados, máquinas ferramentas com diversas condições de uso dentre outros, contribuem para que os sistemas de monitoramento se tornem específicos a cada situação.

Considerando as novas técnicas de fabricação e a busca de uma maior eficiência dos sistemas produtivos, com consequente redução de custos, não se pode correr riscos quanto à subutilização dos recursos destinados ao processo de usinagem (como por exemplo, a troca da ferramenta antes do momento devido) e deve-se reduzir ao máximo possível o julgamento do operador quanto às condições de usinagem, uma vez que isto pode tornar imprevisível as consequências da má utilização dos recursos disponíveis (Tanguy 1.993).

Almejando atingir o acima citado, tem-se pesquisado, desenvolvido e encontra-se já em utilização, diversos sistemas de monitoramento do processo em tempo real.

Muitos destes sistemas visam estabelecer automaticamente o fim da vida da ferramenta de corte. Um sistema com este propósito precisa ter a capacidade de distinguir uma ferramenta nova de uma ferramenta usada. Como visto em ítens anteriores, o critério para se definir "ferramenta em fim de vida" depende do tipo de operação realizada.

No caso do processo de torneamento em operação de desbaste por exemplo, a ferramenta é considerada em fim de vida quando está na eminência da quebra. Assim, o sistema deve ser capaz de

reconhecer este momento, relacionando alguma característica do sinal que está sendo monitorado com este momento, como por exemplo, a obtenção de um valor limite da amplitude do sinal, a mudança brusca dos valores monitorados, etc..

3.2 -UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO.

Com o desenvolvimento cada vez mais acelerado do conjunto máquina-ferrramenta-dispositivo e materiais, tornam-se mais claras as necessidades e razões do monitoramento do processo, em busca. Além disso tem-se buscado intensamente situações que venham a propiciar melhores condições econômicas, bem como qualidade assegurada do produto final. Um sistema de monitoramento do processo que seja capaz de definir com objetitividade o momento de fim de vida da ferramenta, evita desperdícios devido à troca antecipada da ferramenta e também evita danos à peça, à ferramenta e à máquina e ssegura a qualidade da peça, quando garante que a ferramenta não vai se quebrar durante o processo (Shiarishi 1.988).

Muitos dos sistemas de monitoramento hoje utilizados em produção operam segundo o sistema "teach in ", isto é os valores limites dos parâmetros monitorados são estabelecidos com base no valor destes parâmetros quando da usinagem da primeira peça do lote. Assim, estabelece-se um valor do parâmetro (que é um determinado percentual acima do valor inicial) que atingido estabelece o fim da vida da ferramenta, devido ao desgaste gradual da ferramenta. Passado este nível, o processo pode esperar alguns segundos até ser interrompido. Um outro valor do parâmetro (maior que o primeiro) é estabelecido para evitar a quebra da ferramenta. Ultrapassado este nível, o processo deve ser interrompido imediatamente. Outros valores podem ser estabelecidos para outros propósitos, como por exemplo, evitar choque da peça com a ferramenta em avanço rápido (Ashov 1.994).

As funções de um sistema de monitoramento até aqui citadas, também podem ser realizadas em uma fábrica não automatizada porém, quando se tem uma produção sem a presença do homem, a presença de tais sistemas se torna ainda mais importante.

Em relação ao processo empregado, um sistema de monitoramento automático deve ser sufucientemente capaz de prever quaisquer possíveis riscos à máquina, à peça à ferramenta, a fim de nestes casos bloquear a usinagem.

Segundo Tanguy (1.993) entre os primeiros usuários de sistemas de monitoramento da usinagem, alguns resolveram adotá-los depois de graves acidentes ocorridos no curso da fabricação que afetaram peças unitárias de custo elevado, ou elementos sensíveis (ferramentas) de uma máquina-ferramenta.

Muitos dos sistemas de monitoramento tem por objetivo a determinação do limite de utilização da ferramenta (vida da ferramenta), sugerindo então sua substituição, antes que esta venha a falhar catastroficamente, colocando em risco elementos da máquina, ou a própria integridade do operador, ou como já tratado neste trabalho, devido ao alto grau do desgaste, não se consiga mais obter a qualidade desejada na peça segundo especificações do processo.

Observada a necessidade de instalação de um sistema de monitoramento, vários são os pontos a serem investigados, sendo que duas questões se destacam :

A) Quais são os ganhos possíveis de se obter e quais são os custos de instalação de um sistema de monitoramento da usinagem ?

B) Como proceder para escolher um destes sistemas ?

Na figura 3.1, (Tanguy 1.993) observa-se o caminho pelo qual deverá trilhar o estudo, uma vez cogitada a utilização de um sistema de monitoramento do processo.

Passo a passo verificam-se as carências do processo de usinagem e define-se a equipe de trabalho, cabendo a esta a escolha do melhor sistema para o caso, a instalação do mesmo e a realização de ensaios preliminares necessários à sua efetivação.

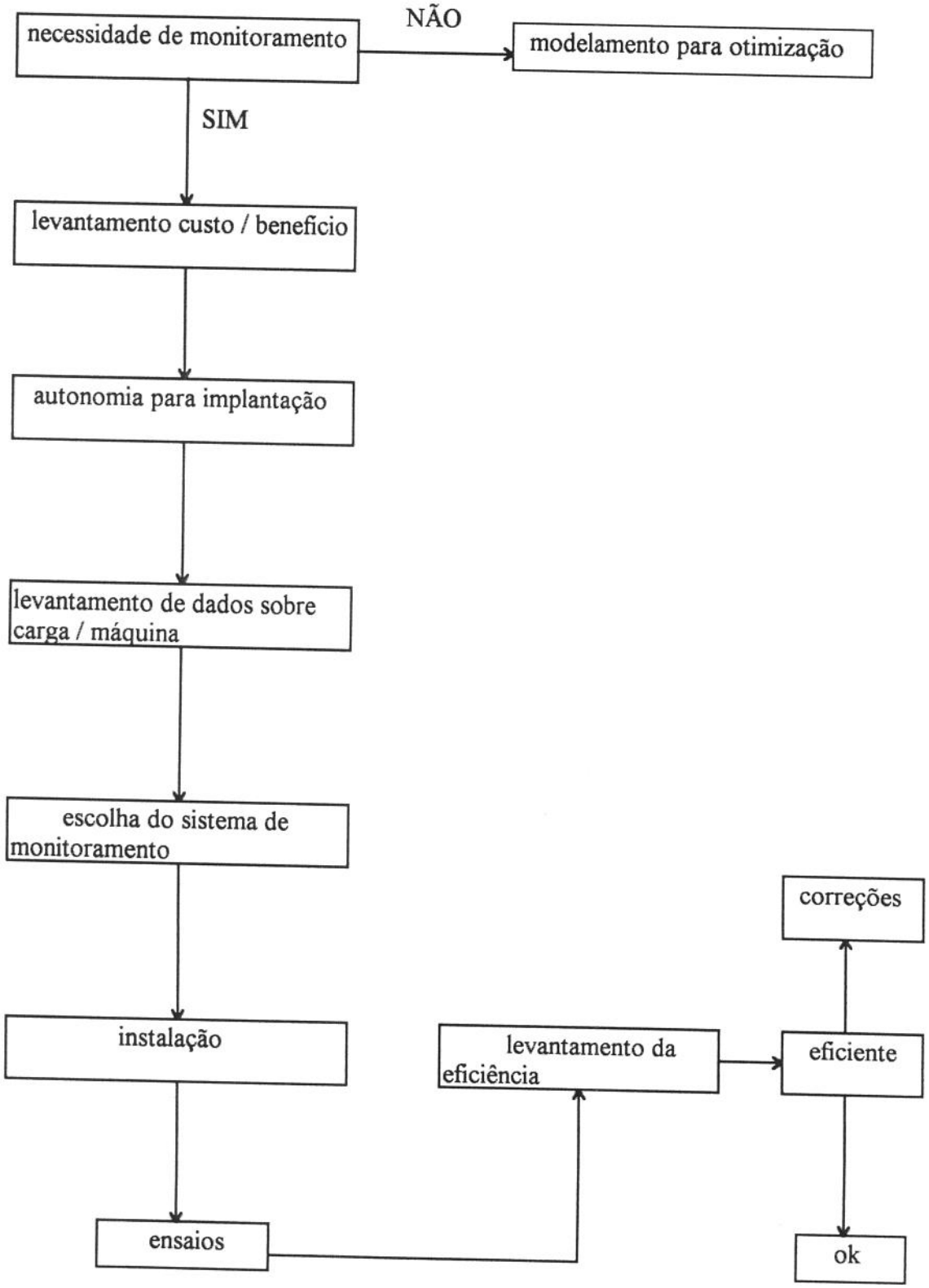


Figura 3.1 - Caminhos Para Instalação de Um Sistema de Monitoramento (Tanguy 1.993).

3.3 - TIPOS DE MONITORAMENTO.

Genericamente, os sistemas de monitoramento automático do processo, classificam-se em duas grandes categorias, a saber (Micheletti 1.976) :

A). Sistemas de Monitoramento Direto.

B). Sistemas de Monitoramento Indireto.

O monitoramento direto, como o próprio nome sugere, é aquele em que a medição do parâmetro desejado é executado diretamente sobre a peça ou ferramenta de corte. Neste tipo de sistema de monitoramento, o processo de usinagem necessita ser interrompido para se processar o sensoreamento, com consequente tempo adicional e ocioso ao processo.

Por outro lado, uma vez que a medição é executada diretamente sobre a variável a ser monitorada, não sofre a interferência de outros parâmetros.

Os principais métodos adotados por este sistema de monitoramento são (Dan 1.990) :

A). Medição do desgaste da ferramenta via microscópio óptico ou sistemas computadorizados de vídeo.

B). Medição da rugosidade da superfície da peça usinada.

Já nos sistemas de monitoramento indireto, a medição do parâmetro que se deseja monitorar é executado por meio de um outro parâmetro que possa ser medido em tempo real (enquanto o processo está acontecendo) e que possa ser relacionado com o primeiro.

Atualmente este é o sistema que vem merecendo maior atenção acadêmica e industrial, uma vez que em oposição ao anterior, neste caso o processo de usinagem não necessita de interrupção, com relativo ganho na produtividade.

No decorrer do trabalho serão tratados vários sistemas de monitoramento direto e indireto, com destaque ao último através do monitoramento via corrente elétrica do motor principal da máquina e o monitoramento da vibração da ferramenta.

Quando se monitora indiretamente o desgaste da ferramenta visando o estabelecimento do fim de sua vida, tem-se o problema que, em geral, não somente o desgaste influencia o parâmetro monitorado, mas diversos outros fatores, como :

A). Velocidade de corte.

B). Profundidade de usinagem

C). Avanço.

D). Materiais da ferramenta e, da peça, etc.

Observa-se então que, devido aos inconvenientes acima citados, existe a impossibilidade do emprego de um sistema de monitoramento universal, como já citado, ou seja para cada sistema monitorado, tem-se um sistema de monitoramento específico, adequado para tal processo, o que eleva o investimento inicial necessário através do estudo detalhado do projeto.

Encontra-se na tabela 3.1, (Dan 1.990) a classificação característica de alguns dos principais sistemas de monitoramento em desenvolvimento acadêmico, bem como em estágio de aplicação industrial.

Tabela 3.1 - Métodos de Monitoramento (Dan 1.990).

MÉTODOS	PROCESSO	MEDIDA	SENSOR
DIRETO	Óptico	Forma ou posição da ponta da ferramenta	câmara de tv
	Radioatividade	Radioatividade	Medidores de radioatividade
	Dimensão da peça	Dimensão da peça	Micrômetros e transdutores eletromagnéticos
INDIRETO	Força de usinagem	Variação da força	Dinamômetros
	Emissão acústica	Pressão da onda de energia	Transdutores piezoelétricos
	Rugosidade	Variação da rugosidade superficial	Transdutor óptico, rugosímetros
	Vibração	Vibração do sistema peça-ferramenta	Acelerômetro
	Parâmetros elétricos	Potência, tencsão ou corrente elétrica	amprerímetros ou voltimetros.

Além da classificação do monitormaneto do processo da usinagem em direto e indireto, um sistema de monitoramento também pode ser classificado como abaixo :

A). Contínuo ou interminente - muitos sistemas conseguem monitorar o processo durante todo o tempo. Porém, quando é necessária a digitalização dos dados para armazenagem em memória de computador, o tempo que se passa amostrando o sinal é dependente da frequência de amostragem e da capacidade de memória e, portanto, somente parte do processo pode ser amostrado.

B). Em processo ou pós-processo - dependendo se a grandeza é monitorada durante o decorrer do processo ou depois de terminado o processo.

C). Sistemas com multi-sensores - quanto maior a quantidade de sensores presentes em um processo, maior a confiabilidade do resulatado, mas tabém mais caro e complexo é o sistema. Além disto, de um mesmo sinal proveniente de um sensor, podem ser extraidos mais de um parâmetro que sirva para o monitoramento da grandeza, o que também auxilia na confiabilidade do sistema.

Dentre as muitas características necessárias a um sistema de monitoramento automático do processo, a fim de suprir as necessidades para o qual foi projetado, algumas se destacam e são comentadas a seguir (Kakino 1.984) :

A). Confiabilidade - ou seja deve existir uma grande correlação entre o parâmetro medido com o parâmetro que se está monitorando, sendo neste ítem também observado o grau de confiabilidade do sistema quanto à sua repetibilidade em ambientes reais de trabalho.

B). Que o parâmetro medido seja somente influenciado pelo que se deseja medir - ou seja, no caso do monitoramento do desgaste da ferramenta durante o processo de torneamento em desbaste por exemplo, nenhum outro fator tal como condições de corte ou geometria da ferramenta, além do desgaste propriamente dito, deve influenciar o parâmetro medido.

C). Que o sistema não seja intrusivo - ou seja, ao se projetar o sistema, deve-se levar em consideração a simplicidade do mesmo, facilitando sua instalação , manutenção e que não venha a influenciar no funcionamento normal da máquina.

D) Custo - é outro dado de extrema responsabilidade ao se projetar o sistema, tornando-o acessível ao mercado ao qual se destina, sem influenciar suas características técnicas.

3.4 - SISTEMAS DE MONITORAMENTO INDIRETO DA USINAGEM.

3.4.1 - MONITORAMENTO VIA EMISSÃO ACUSTICA.

Dentre os muitos sistemas de monitoramento indireto em estudo e franco desenvolvimento, o monitoramento da vida da ferramenta via emissão acústica tem alcançado lugar de destaque, visto algumas caracteristiacas importantes citadas a seguir :

A). Custo relativamente baixo.

B). Dimensões reduzidas do sensor, o que o torna de fácil instalação e pouco intrusivo.

C). Permite-se trabalhar com faixas de frequência acima de outras frequências, como por exemplo da vibração normal de elementos da máquina como motores e rolamentos, evitando-se assim que tais vibrações comprometam a frequência monitorada (ruido). Estes ruídos normalmente tem frequência bem mais baixa que a emissão acústica, não se constituindo em problemas quando do monitoramento da E.A..

Define-se Emissão Acústica como sendo ondas de tensão elástica geradas como resultante da liberação rápida de energia de deformação dentro de um material submetido a um estímulo exterior, provocado pelo rearranjo de sua estrutura. Estas ondas de tensão produzem deslocamentos na superficie do material, podendo então ser detectados por sensores piezoelétricos, que possuem a característica de transformar estes deslocamentos em sinais elétricos. As principais fontes de E.A. no processo de usinagem são atrito cavaco - ferramenta, o atrito ferramenta - peça, a deformação e a quebra do cavaco. Como o desgaste da ferramenta influencia todas estas fontes, seu crescimento pode ser medido indiretamente pela medição da E.A..

Cada um destes apresentam características distintas auxiliando assim seu estudo. Por exemplo, classificam-se os sinais de EA em dois tipos : sinal contínuo e sinal de pico. O sinal de pico é

caracterizado por um pico de alta amplitude e pequena duração, (sinal típico de trincas em materiais frágeis). Já o sinal tipo contínuo está mais associado à deformação plástica de materiais dúteis.

Exemplos típicos de ocorrência do sinal de pico em torneamento são observados quando da quebra do cavaco, do lascamento e quebra da ferramenta, enquanto que a deformação plástica do material da peça e do cavaco geram sinais do tipo contínuo.

Segundo ensaios realizados por (Inasaki e Yonetsu 1.981), em operação de torneamento a amplitude do sinal de Emissão Acústica aumenta proporcionalmente com o desgaste de flanco, principalmente em algumas faixas de frequência, concluindo portanto ser a Emissão Acústica um bom meio para se monitorar a vida de uma ferramenta em processos de usinagem dos metais.

3.4.2 - MONITORAMENTO DO PROCESSO VIA FORÇA DA USINAGEM.

O sistema abaixo descrito, trata de um dos primeiros desenvolvidos e ainda hoje em aplicação, visando o estabelecimento do fim da vida da ferremanta.

O relacionamento entre o desgaste da ferramenta e as forças de usinagem é de fácil observação e análise. Outro fator que eleva a eficiência de tal sistema é a facilidade de se medir as forças presentes durante o processo, devendo-se ainda observar a grande importância que as forças de corte exercem sobre a estrutura e mecanismos de acionamento das máquinas, podendo mesmo, se aplicadas exageradamente por longo período, reduzir a vida útil do equipamento.

Dentre os vários sistemas utilizados na medição das forças da usinagem, o dinamômetro piezoelétrico se destaca. Este tipo de equipamento se baseia no fato de que alguns cristais, uma vez comprimidos dinamicamente, produzem um sinal elétrico proporcional às forças dinâmicas transmitidas através deles.

Ao se realizar a medição de forças da usinagem via dinamometria deve-se a observar algumas condiões básicas que um dinamômetro deve satisfazer, como (Lister e Barrow 1.986) :

A). Sensibilidade.

B). Rigidez.

C). Exatidão de reprodução de forças variáveis com o tempo.

D). Insensibilidade quanto à variação da temperatura e umidade.

Um grande inconveniente deste sistema é sua intrusividade no processo de usinagem (provocado principalmente por sua grande dimensão, cabos de conexão, etc.), além do custo superior se comparado a outros sensores.

Como em todos os sistemas de monitoramento, neste caso também deve-se estabelecer um valor de referência com o qual deve-se comparar o valor corrente no processo. Este valor de referência pode ser estabelecido arbitrariamente ou baseado em experiência tomando por consideração por exemplo o acabamento superficial das peças usinadas.

Atualmente são muitos os sistemas que possibilitam o monitoramento do processo via força necessária à usinagem dos metais, assim como também são muitos os trabalhos desenvolvidos sobre o assunto e suas divergências. Por exemplo, (Lister e Barrow 1.986) em seus ensaios, conclui que a força de corte é a componente da força de usinagem a ser utilizada no monitoramento do crescimento do desgaste. Por outro lado, (Tlusty e Andrews 1.983) defende que a força principal de corte não mantém relação alguma com o desgaste e quebra da ferramenta.

Outra grande contradição existente no monitoramento da força está na relação existente entre a força e o desgaste.

Alguns resultados mostram que , em alguns casos, existe uma relação linear entre as forças e o desgaste da ferramenta e, em outros casos, o comportamento não é linear. Existem ainda alguns resultados que mostram que a força não é um bom parâmetro para se medir o desgaste, pois os esforços de usinagem apenas apresentam um razoável crescimento no instante pouco anterior à quebra da ferramenta, sendo então eficiente apenas como meio de se evitar a falha da ferramenta. Assim sendo, a viabilização de tal sistema somente seria interessante em processos de desbaste, onde se permite que os valores dos desgastes cresçam até próximos dos valores que causam a quebra da ferramenta.

3.5 - OUTROS SISTEMAS DE MONITORAMENTO DA USINAGEM.

3.5.1 - SISTEMA DE MONITORAMENTO VIA " TOOL EYE ".

Dentre os muitos sistemas de monitoramento direto da usinagem este ocupa lugar de destaque quanto à aplicação pelos fabricantes de máquinas-ferramenta, visto a sua simplicidade de instalação. Atualmente o sistema tem encontrado aplicação em máquinas tanto de pequeno, médio e grande porte, tais como tornos e centros de usinagem.

Seu princípio consta de uma haste na extremidade da qual localiza-se o "sensor "(na maioria das vezes, cilíndrico). Esta haste pode ser rígida, fixada em ponto fora da zona de trabalho, ou mesmo móvel em forma de braço articulado, sendo que ambos os casos, uma vez iniciado o processo de usinagem, de tempo em tempo pré-determinado pelo processista, a usinagem é interrompida e a ferramenta se desloca até tocar o sensor que consegue detectar a posição real da ponta da ferramenta. Este por sua vez capta o sinal enviando-o ao CNC que realiza o reconhecimento do estágio atual do desgaste da ferramenta realizando, se necessário, a compensação através do reposicionamento da ferramenta, assegurando assim as dimensões da peça em processo. Atingido estágio elevado de desgaste (momento de troca da ferramenta), um sinal sonoro ou visual, pode ser acionado (Romi S. A. 1.992).

3.5.2 - SISTEMA ÓPTICO DE MONITORAMENTO

Sabido que uma ferramenta gasta (em fase de utilização e fim-de-vida) reflete mais luz que uma ferramenta nova, muitos pesquisadores (Micheletti 1.976, Giust e Santochi 1.979), direcionaram seus estudos a este sistema de monitoramento da usinagem, sendo sua constituição e princípio de funcionamento descrito a seguir.

Cada vez mais o " laser " vem se difundindo no meio industrial, sendo que neste caso, um feixe de laser é direcionado à superficie desgastada da ferramenta, sendo que a reflexão desta é captada por

uma camâra, sendo então digitalizada e processada, obtendo por este meio a amplitude do desgaste da ferramenta.

Por meio deste sistema pode-se levantar a forma ou posição da ponta da ferramenta, sendo que a princípio o sistema óptico foi desenvolvido com o intuito de avaliar o grau de desgaste de flanco, porém experimentos foram e tem sido realizados buscando a utilização do método para a determinação de outros tipos de desgastes.

3.5.3 - SISTEMA DE MEDIÇÃO DA DISTÂNCIA FERRAMENTA - PEÇA

Incovenientes como a expansão térmica da ferramenta, irregularidades da superfície do material usinado, a vibração entre a peça e ferramenta, entre outros fenômenos afetam diretamente este sistema de monitoramento, dificultando sobremaneira a sua eficácia.

O sistema parte do princípio que , durante o processo de usinagem, a ferramenta de corte se desgasta, gerando assim um determinado recuo de sua ponta, alterando assim a dimensão da peça usinada. Assim sendo, ao se medir a distância entre a peça e um ponto fixo da ferramenta, obtem-se diretamente o quanto a ferramenta se desgastou, sugerindo a compensação através do avanço da mesma, ou se for o caso, sua substituição.

Esta medição como sugere (Takeyama 1.967), pode ser realizada utilizando-se de um micrômetro elétrico apalpador fixado no porta - ferramenta, que mede diretamente a distância entre a peça e o porta-ferramenta.

3.5.4 - SISTEMA DA RADIOATIVIDADE

A aplicação deste sistema exige um alto investimento, além de oferecer ao operador e ambiente próximo, grande risco de contaminação. Por estes incovenientes, trata-se um sistema com restrita aplicabilidade. Seu princípio é que a ferramenta é ativada com neutros ou outras partículas radioativa qualquer. Assim sendo parte desse material radioativo é conduzido com o cavaco sendo então feita uma análise de perda volumétrica da ferramenta verificando então o seu desgaste (Uehara 1.993).

3.5.5 - SISTEMA DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA NA JUNÇÃO PEÇA-FERRAMENTA.

Este método de monitoramento é comumente utilizado para a verificação do desgaste da superficie de folga da ferramenta em processos de torneamento em operações de acabamento.

Cuidados especiais devem ser tomados quando da escolha do modelo que relaciona a variação da resistência elétrica com o desgaste da ferramenta uma vez que o desgaste da ferramenta está diretamente ligado aos parâmetros de corte utilizados a saber a velocidade de corte, o avanço e as forças envolvidas no processo.

O sistema parte do princípio de que com o aumento do desgaste da ferramenta ocorre também o aumento da área de contato entre peça e ferramenta diminuindo assim a resistência elétrica da seção em contato (Uehara 1.993).

3.6 - MONITORAMENTO DO PROCESSO DA USINAGEM VIA VIBRAÇÃO DA FERRAMENTA.

3.6.1 - A ORIGEM DA VIBRAÇÃO EM PROCESSOS DE USINAGEM.

O estudo da vibração diz respeito aos movimentos oscilatórios de corpos e as forças que lhe são associadas assim todos os corpos dotados de massa e elasticidade são capazes de vibração. Deste modo a maior parte da máquinas e estruturas está sujeito a certo grau de vibração e seu projeto requer geralmente o exame do seu comportamento oscilatório (Thonsom 1.978).

A rigidez de um sistema mecânico qualquer (neste caso : máquina, ferramenta, dispositivo, peça) pode ser definida como sendo a capacidade deste em resistir a ocorrência de deflexão elástica (Agostinho et al 1.981).

Como não existe nenhum sistema perfeitamente rígido, todo corpo submetido a esforços dinâmicos vibra. Esta vibração, que também ocorre em processos de usinagem, pode fornecer informações importantes para o conhecimento do " status" do processo.

Define-se vibração em processos de usinagem como sendo o movimento ciclíco relativo entre peça e ferramenta, sendo que a vibração acha-se presente em todos os processos de torneamento por mais simples que ele seja. Uma das grandes dificuldades ao lidar com o assunto vibração em usinagem, refere-se à determinação da faixa de amplitude da mesma, uma vez que fatores diversos contribuem para sua formação.

Além da própria formação do cavaco, influenciam na vibração do sistema, fatores como o estágio de conservação da máquina, instalação inadequada, operação além de suas especificações técnicas, ferramentas em diferentes estágios de vida, etc.

Segundo (Shaw 1.968) , as fontes geradoras de vibração em processos de usinagem podem ser classificadas em dois grandes grupos quais sejam :

A). Vibração forçada.

B). Vibração auto-excitada.

A vibração forçada ocorre sob a ação de forças externas cíclicas sendo que o sistema é forçado a vibrar na frequência da excitação. Quando a frequência de vibração se aproxima da frequência natural do sistema ferramenta-peça-máquina-dispositivo de fixação, o sistema tende a absorver ligeiramente mais energia por ciclo vibracional do que devolve ao meio através do amortecimento gerando a ressonância.

Dentre os muitos fatores causadores da vibração forçada cabe aqui citar :

A). Desbalanceamento de eixos.

B). Folga de mancais e rolamentos.

C). Utilização da máquina acima de sua capacidade.

Uma vez conhecidos os fatores causadores da vibração forçada e seus inconvenientes ao processo de usinagem, (Jacobsen e Ayre 1.956)sugere para sua minimização as providências abaixo :

A) . Eliminação das forças excitantes cíclicas.

B). Evitar coincidência da frequência da força excitante e a frequência natural do sistema.

C). Aumentar a rigidez do sistema.

A vibração auto-excitada ocorre quando mais energia é absorvida do que desprendida durante o ciclo simples. Para induzir uma vibração auto-excitada em processos de usinagem, a ferramenta necessita apenas sofrer algum tipo de choque ou encontrar uma incrustação mais dura no material da peça. (Shaw 1.968).

No mais, a vibração auto-excitada pode ter origem em usinagem descontínua, espessura do cavaco variável e atrito peça-ferramenta.

Qualquer dos incovenientes acima induzem vibração por deformarem elasticamente a peça, a ferramenta e/ou a própria máquina.

Como pode ser deduzido das definições acima, o tipo de vibração que interessa ao monitoramento do processo de desgaste e quebra da ferramenta é a vibração auto-excitada, uma vez que nesta está contida toda a vibração originária do contato ferramenta-peça e cavaco-ferramenta.

Uma vez presente a vibração em processos de torneamento, pode-se afirmar que os micro movimentos responsáveis pela oscilação do sistema são de caráter aleatório, provocando uma dispersão aleatória da dimensão real da peça em torno da dimensão nominal.

3.6.2- ELEMENTOS COMPONENTES DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO VIA VIBRAÇÃO.

A figura 3.2 mostra um exemplo de uma montagem típica para monitoramento da vibração em usinagem.

Cada um dos elementos mostrados na figura passarão a ser detalhados seguir.

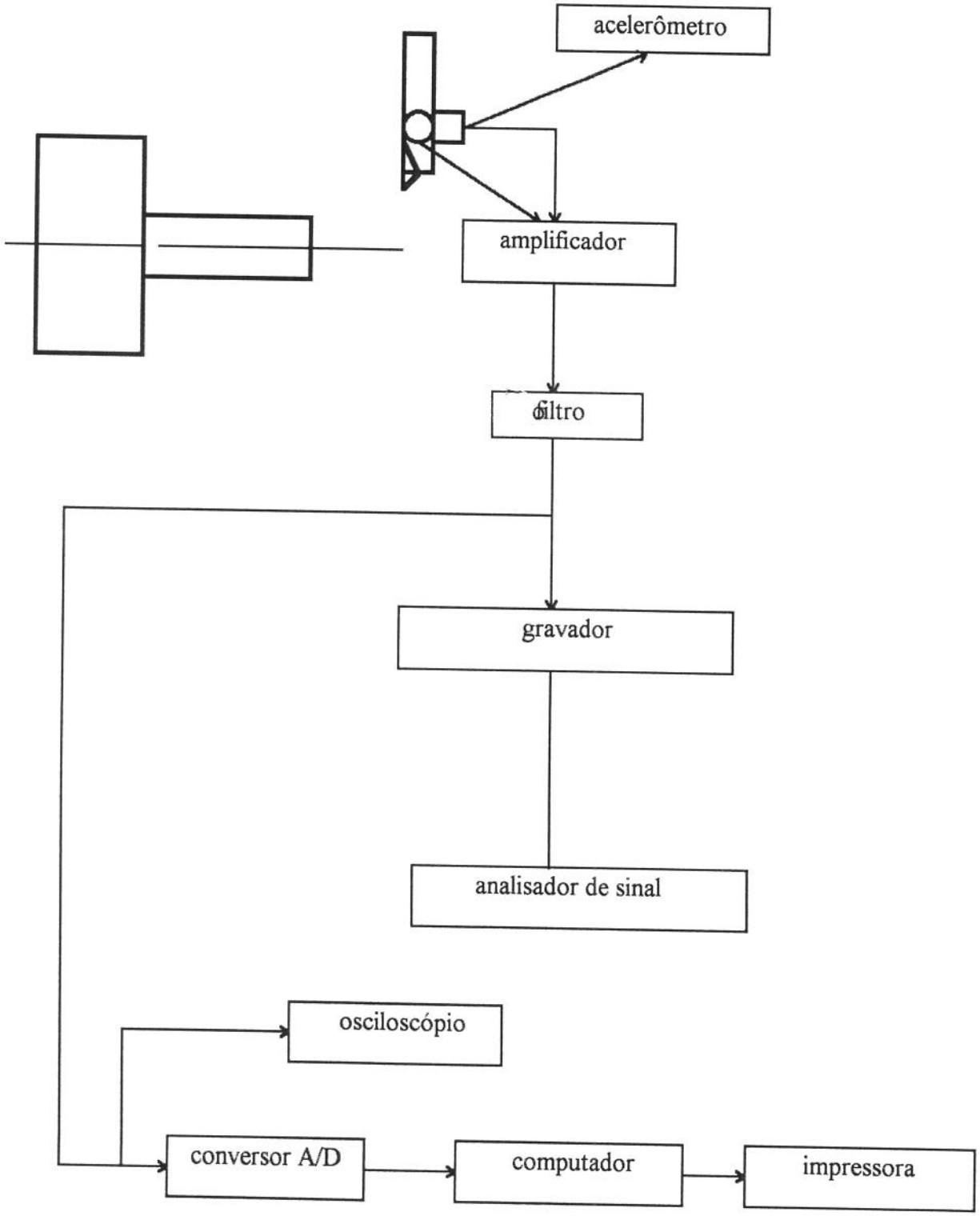


Figura 3.2 - Sistema de Monitoramento Via Vibração.

3.6.3. - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA.

Os sinais de vibração são captados pelos acelerômetros que, como o nome indica, transformam a aceleração instantânea do ponto onde estão localizados, em sinal elétrico. A aceleração é uma indicação da vibração do corpo. A seguir, os sinais podem ser filtrados, ou seja, retira-se do sinal as faixas de frequência indesejáveis, que não estejam relacionadas com o fenômeno que se quer monitorar. Com relacão à sua faixa de frequência os filtros classificam-se em:

A). Filtros passa baixa - caracteriza-se por filtrar sinais com frequência superior a um determinado valor especificado no equipamento.
B). Filtro passa alta - caracteriza-se por filtrar sinais com frequência inferior a um valor pré-determinado.
C). Filtro passa banda - somente deixa passar os sinais cuja frequência encontra-se em um determinada faixa.

Uma vez filtrados, os sinais podem ser gravados (gravador), possibilitando assim posterior análise e um estudo detalhado do processo, já que com a gravacão pode-se armazenar os sinais gerados durante todo o processo.

Cabe ao analisador de sinais, a construcão de espectros de frequência do sinal via "hardware".

O osciloscópio possibilita o acompanhamento visual da variação do sinal, sendo este de grande validade principalmente na fase inicial de análise do processo, possibilitando assim um melhor controle na aferição do sistema, bem como dos parâmetros que se deseja monitorar.

O conversor A/D, será pormenorizado adiante, sendo este, uma placa de expansão que permite integrar o uso de um computador ao meio ambiente.

O computador, elemento cada vez mais utilizado a nível industrial e acadêmico, tem a função de coletar dados, armazenar os valores e realizar a análise dos dados simultânea ou posteriormente ao processo.

3.6.4 - O CONVERSOR A/D.

O conversor A/D (Tet 1.989) é uma placa de expansão que tem por objetivo a integracão do micro-computador ao meio ambiente externo, sendo que estas placas interfaceiam os computadores aos diversos sinais existentes, sejam eles analógicos ou digitais, podendo o conjunto computador-placa A/D ser utilizado nos mais variados campos de aplicacão, tais como:

A). Aquisicão de sinais mecânicos, elétricos, etc.
B). Monitoramento de sinais em tempo real.
C). Supervisão e controle do processo.
D). Controle de qualidade, etc.

Normalmente estas placas de expansão são dotadas de grande flexibilidade, característica esta que direciona sua aplicação a processos singulares, segundo as necessidades do usuário. Geralmente podem receber vários sinais simultaneamente, pois a placa possui mais de um canal de entrada.

Dentre as necessidades mais comuns do usuário do sistema de aquisicão, estão:

A). Coleta e armazenamento do sinal.
B). Monitoramento dos sinais para tomada de decisão durante o ensaio.
C). Acionar um dispositivo em uma determinada condição.

Além destas características primárias, ainda as placas permitem, por exemplo, realizar coletas de dados em tempo real, com várias atividades simultâneas:

A). Armazenamento em disco.
B). Visualização dos dados em paralelo com a aquisição.
C). Geração de sinais de excitação de um sinal gravado anteriomente.

Estas placas são acessadas por um "software" que utiliza linguagem largamente difundida como Basic, Pascal, C, e utiliza também entrada e saída (input, output) específicas de cada software utilizado, de acordo com a disponibilidade e conveniência do usuário.

3.6.5 - ACELERÔMETRO PIEZOELÉTRICO.

A piezoeletricidade é a característica que certos materiais (cristais principalmente) possuem que permite a estes gerarem uma força eletromotriz (fem), quando sujeitos a movimentos mecânicos cíclicos, permanecendo estável quando em condições de força estática. A fem gerada é proporcional ao esforco mecânico aplicado, razão esta que justifica aplicação deste princípio em sensores de vibração por exemplo (Cosidine, Ross 1.964). A figura 3.3 (Soisson 1.985) mostra um esquema das partes de um acelerômetro.

Um acelerômetro de compressão consiste basicamente em um disco de material piezoelétrico e uma massa colocada num quadro conforme figura 3.3. o movimento na direção indicada provoca forças compressivas que agem no elemento piezoelétrico, produzindo assim uma saida elétrica proporcional à aceleração o que caracteriza o elemento como acelerômetro.

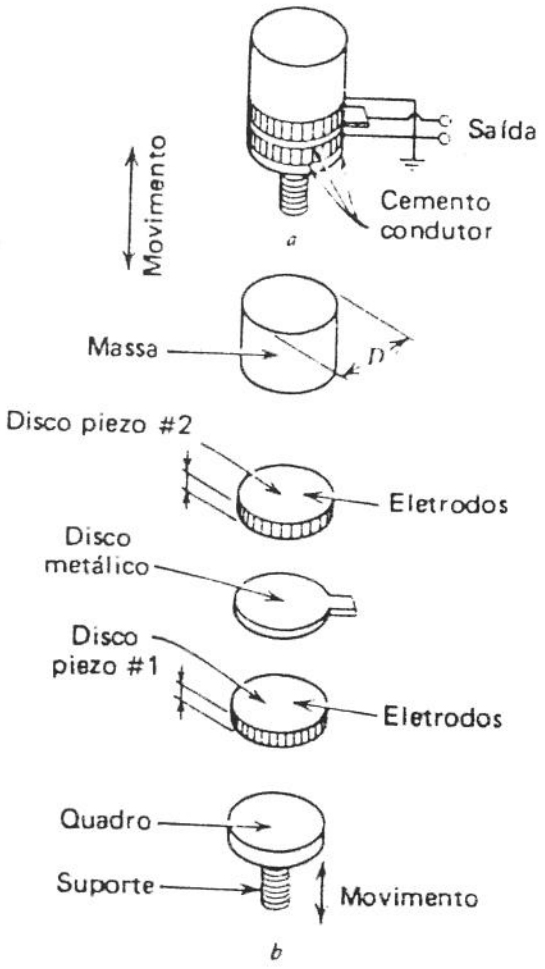


Figura 3.3 - Acelerômetro Piezoelétrico (Soisson 1.985).

As forças agem no elemento piezoelétrico produzindo uma saída elétrica proporcional a acelaração instantânea que é uma medição da vibração do corpo.

Cuidados especiais devem ser tomados quando da utilização dos acelerômetros, uma vez que estes possuem uma temperatura característica conhecida como Cúrie, que uma vez ultrapassada, faz com que o equipamento fique permanentemente danificado, perdendo completamente sua ação piezoelétrica (Soisson 1.985).

Objetivando atingir medições corretas, os acelerômetros devem estar adequadamente acoplado ao corpo de prova (o acelerômetro deve estar com sua base totalmente em contato com a peça em teste). A escolha do tipo de fixação que permita isto depende do sistema onde o acelerômetro será empregado.

3.6.6 -ANÁLISE DO SINAL E ESTRATÉGIA DE MONITORAMENTO DO DESGASTE VIA VIBRAÇÃO

Durante o processo da usinagem, em especial no torneamento em desbaste, o conjunto máquina-peça-ferramenta-dispositivo de fixação pode ser mais ou menos estável (mais ou menos vibração),dependendo de vários parâmetros a saber :

A). Velocidade de corte.
B). Avanço.
C). Condições da aresta de corte.
D). Geometria da usinagem.
E). Rigidez do sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça.

Com o desgaste da ferramenta, as forças de usinagem aumentam, provocando maior vibração da mesma. Como porém a vibração da ferramenta não depende somente de seu desgaste, mas também dos fatores citados acima, é muito importante que se conheça a influência de cada um deles a fim de que se possa filtrar tais influências quando se quer monitorar o desgaste via vibração.

Algumas influências deste ítens citados no sinal de vibração, são :

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

B). Em velocidades de corte baixas, a vibração do sistema aumenta com o crescimento da velocidade de corte. A partir de um determinado valor de velocidade de corte (dependente da rigidez do sistema e da

velocidade acima da qual não acontece mais a formação da aresta postiça de corte), as vibrações tendem a decrescer.

C). As vibrações do sistema tendem a aumentar com o aumento da profundidade de usinagem .

D). Quanto maior o raio de ponta da ferramenta, 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 consequentemente os esforços de corte.

A análise do sinal de vibração , como qualquer outro tipo de sinal, pode ser feito 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 nas diversas frequência que constituem o sinal. Quando um corpo vibra, em geral ele o faz em infinitas e diferentes frequências, cada uma com sua amplitude de vibração. Através do PSD, pode-se ter uma idéia do valor desta amplitude para cada faixa de frequência.

Normalmente a faixa de frequência para o estudo do monitoramento da vibração está entre 0 e 20.000 Hz, porém a maioria dos pesquisadores limitam a faixa de interesse até no máximo 8.000 Hz. Apenas algumas faixas 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 e 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 a literatura consultada, não ultrapassa a barreira dos 800 Hz.

Na tabela 3.2 relaciona-se alguns trabalhos de pesquisadores e suas respectivas faixas de frequências sensíveis ao desgaste.

Tabela 3.2 - Pesquisador e Faixa de Frequência Pesquisada.

PESQUISADOR	FAIXA DE FREQUÊNCIA
Xu -Jiang (1.987)	0 - 117 Hz 510 Hz
Akihito-Fujita (1.989)	500 - 800 Hz
Pandit (1.983)	4300 - 4700 Hz
Martin-Drapier-Mutel (1.974)	2000 - 2500 Hz
Bonifácio (1.993)	1 - 16000 Hz

Sabido que vários são os fatores causadores de vibração no sistema durante o processo de usinagem, encontrar a faixa de frequências sensível ao desgaste da ferramenta é considerado como o principal aspecto do monitoramento da vibração. Portanto cuidados especiais devem ser dados a este ítem.

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

A análise do sinal no domínio do tempo pode ser feita usando-se diversos parâmetros como média , desvio padrão e raiz quadrada média (RMS) do sinal.

Dos trabalhos relacionados na tabela 3.2 alguns se destacam quais sejam :

A). Jiang e Xu (1.987) concluíram que o fenômeno do desgaste da ferramenta pode ser dividido em cinco etapas ou estágios sendo:

1. - desgaste inicial; 2. - desgaste normal; 3. - inicio de micro-trincas; 4. - desgaste rápido; 5. - quebra da ferramenta (fim de vida). Desta forma concluiram que o sinal de vibraçào da ferramenta reage a estas cinco fases de desgastes acima citadas de acordo com as diversas faixas de frequências empregadas.

Concluiram ainda ser possivel a determinação do momento de parada e troca da ferramenta usando os sinais de vibração, uma vez que o sinal muda seu padrão de comportamento a medida que a ferramenta se desgasta passando de um para outro estágio. Assim verifica-se haver uma grande relação entre o desgaste da ferramenta e a vibração da mesma durante a usinagem, sabe-se porém que as vibrações não são causadas somente pelo desgaste e sim muitas são as origens dessas vibrações. Por assimser é de fundamental importância para o monitoramento filtrar as vibrações que efetivamente estão relacionadas ao processo de desgaste da ferramenta.

Qaulquer que seja o sistema de monitoramento do desgaste da ferramenta este tem por objetivo principal estabelecer um padrão para o que seja uma ferramenta nova e uma ferramenta em fim de vida. Assim é de fundamental importância saber que o padrão que o padrão de ferramenta gasta ou em fim de vida etá diretamente relacionado aos diferentes processos podendo variar desde acabamento superficial até a eminência de macro-quebra da ferramenta o que é evidenciado por (Jiang e Xu 1.987) quando dividiram o desgaste da ferramenta em estágios já comentados.

Também como já comentado o sinal de vibração da ferramenta não é um fenômeno isolado e acidental mas está diretamente relacionado ao processo de usinagem, em assim sendo a distribuição de energia do sinal no dominio da frequência depende de vários fatores.

B). Martin et al (1.974) e Akihiko (1.989) desenvolveram pesquisas semelhantes, porém Martin estabeleceu numericamente o valor referência para substituição da ferramenta, admitindo para tal a relação 1:10 entre o nível de sinal emitido pela ferramenta em fase de fim de vida e pela ferramenta em princípio de trabalho. Já Akihiko não determina o valor numérico, deixando claro apenas a existência da relação entre vibração no inicio e no fim da vida da ferramenta. Observados os trabalhos dos pesquisadores acima, surgem as questões: Qual seria a reação do sistema em caso de quebra súbita da ferramenta em início de usinagem já que imediatamente antes da quebra da ferramenta o sinal estaria bem longe da relaçào pré-definida ? Qual é a influência das condições de usinagem no valor desta relação ?

C). Bonifácio (1.993) constatou que, dentro das condições de torneamento em acabamento, o parâmetro que aparentemente mais influenciou na amplitude do sinal foi a velocidade de corte.

Por outro lado concluiu que 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 Rmax) enquanto a velocidade cresce. 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 de corte.

Bonifácio também concluiu que todas as faixas de frequência de 0 a 8.000 Hz são sensíveis ao crescimento do desgaste da ferramenta, ao contrário do que afirmam outros autores. Assim é interessante realizar o monitoramento com frequências mais baixas, pois ele se torna mais simples a nível de equipamento e de amostragem do sinal.

Ainda segundo Bonifácio, o sinal de vibração fica quase constante até próximo o fim da vida da ferramenta. Em um dado momento, quando o desgaste da ferramenta já consumiu toda sua camada de cobertura e começa a haver contato entre a peça-substrato e cavaco-substrato da ferramenta, a taxa de desgaste, a rugosidade superficial da peça e o sinal de vibração crescem rapidamente, mostrando que o monitoramento da vibração é um bom meio de se monitorar o fim de vida da ferramenta em operações de acabamento.

3.7 - MONITORAMENTO DO PROCESSO DA USINAGEM VIA CORRENTE ELÉTRICA DA MÁQUINA-FERRAMENTA.

3.7.1 - INTRODUÇÃO.

Como já comentado neste trabalho, vários são os meios de monitoramento em desenvolvimento e aplicação a nível industrial. Nas máquinas de grande porte e/ou centros de usinagem, vários sistemas podem ser aplicados conjuntamente, sendo que isto depende da necessidade do usuário baseada em estudos custo/benefício. Na maioria dos casos os sistemas visam o estabelecimento do momento da troca da ferramenta. Dentre os métodos existentes além da vibração, optou-se para o desenvolvimento neste trabalho da verificação dos parâmetros elétricos da máquina, uma vez que como desenvolvido adiante, estes estão diretamente relacionados aos desgastes da ferramenta ou seja quão maior o desgaste maior o esforço de corte e consequentemente maior a corrente necessária ao processo, além de serem nada intrusivos, de fácil instalação, simples e baratos.

3.7.2. - FORÇAS DURANTE O PROCESSO DE TORNEAMENTO.

As forças presentes durante o processo de torneamento estão diretamente ligadas a uma série de fatores, a saber, material da peça usinada, material da ferramenta empregada, seção de corte, estado de afiação da ferramenta, além de outros.

A soma de todas as potências de usinagem fornece a potência mecânica útil (W) consumida e necessária ao processo de usinagem. Uma vez que a velocidade de corte é muito maior que a velocidade de avanço da ferramenta, pode-se considerar a potência mecânica útil consumida pelo processo como sendo igual a potência de corte, assim :

$Wc = Pc * Vc$

$Wc = Ks * f * ap * Vc$

Sabe-se que a potência consumida pelo corte é diretamente proporcional a potência elétrica consumida pelo motor da máquina. Assim sendo, medir parâmetros elétricos como tensão e corrente significa medir indiretamente os esforços de corte presentes na usinagem.

Dentre os muitos pesquisadores que desenvolveram estudos sobre o modelamento matemático sobre as forças ocorridas durante o processo da usinagem, o modelo de Kienzle (Santa 1.989) é o mais utilizado a fim de quantificar a força principal de corte. Assim :

$Pc = Ks * A$

como :

$A = b * h$

$Ks = Ks_1 * h^{-z}$

$b = ap / \text{sen}\ \chi_r$ e $h = f * \text{sen}\ \chi_r$

$Pc = Ks_1 (ap / \text{sen} (\chi r) * (f * \text{sen} * \chi r)^{1-z})$

Para o referido modelo, os valores estabelecidos por Kienzle para Ks_1 e z, relacionam-se ao ângulo de saída da ferramenta $\gamma_0 = 6^0$, sendo que Kienzle recomenda um aumento de 1,5 % na força (Pc) para cada redução de 1^0 no ângulo de saída. Assim sendo, o modelo se torna :

$Pc = [1 + (6 - \partial_0) * 0{,}015] * [Ks1 * (ap / \text{sen} (\chi_r)) * (f * \text{sen} (\chi)^{1-z})$

Durante o processo da usinagem em torneamento é possível observar a necessidade de uma maior força de corte (Pc) uma vez notado o aumento do desgaste frontal, sendo que o mesmo se explica pelo desenvolvimento de maior área de contato ferramenta-peça e consequentemente maior atrito entre a ferramenta e a peça em processo. Por outro lado, o desgaste de cratera aumenta o ângulo

de saída efetivo da ferramenta, fazendo com que os esforços de corte decresçam (Mayer, apud Ferraresi 1.970).

O citado acima pode ser observado na figura 3.5 , onde vê-se o crescimento das forças de usinagem Pc / ap, Pf e Pp provocado pelo aumento do desgaste frontal (V_B) e do desgaste de cratera (KT) em função do tempo de usinagem. Pode-se ainda observar a variação dos esforços de corte dividido em três regiões.

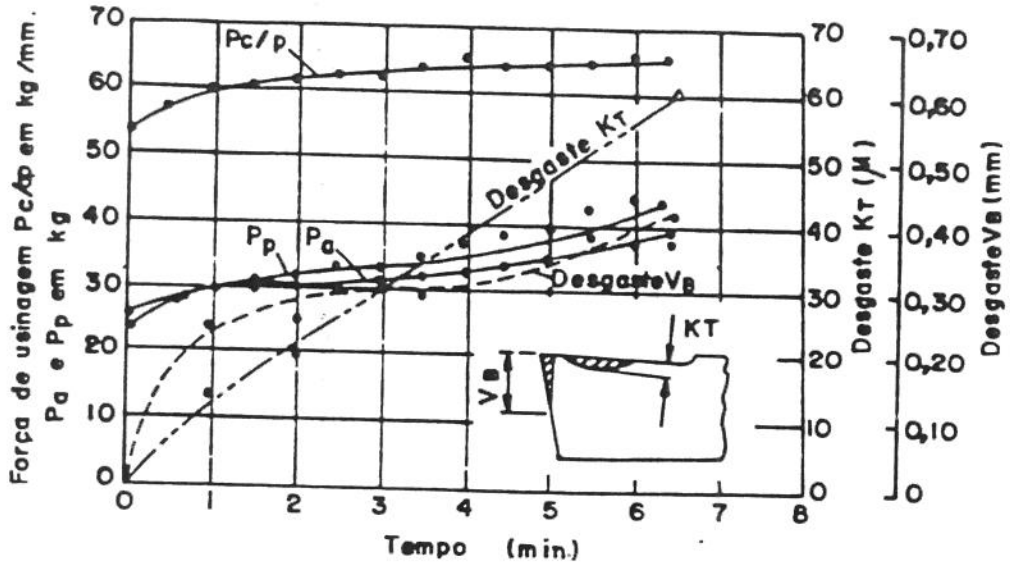


Figura 3.5 - Variação das Forças de Usinagem e dos Desgastes Frontal e de Cratera em Função do Tempo de Corte, em Operação de torneamento (Meyer, apud Ferraresi 1.970).

Diversos outros pesquisadores trabalharam materiais e ferramentas variadas rumo a observação da variação das forças de usinagem com a variação dos parâmetros de usinagem. Dentre eles cabe

aqui citar Ferraresi (1.970), Archinov (1.972) e Kovan (1.973) sendo suas principais conclusões listadas abaixo :

A). Quanto ao material da peça - as forças de usinagem aumentam com o aumento da dureza da peça. A variação da composição química varia o valor da pressão específica de corte (Ks). Assim, para aços carbono e aços de fácil usinagem, o aumento da porcentagem de carbono acarreta um aumento da pressão específica de corte e por consequência da força Pc.

B). Área da secção de corte as forças de corte Pc, Pf e Pp aumentam com o aumento da área da secção de corte, mas não de uma maneira direta. Isto se explica pela diminuição da pressão específica de corte (Ks) quando a àrea da secção de corte cresce. Como Pc = Ks * A, quando A aumenta o acréscimo de Pc não é tão substancial, devido ao decréscimo de Ks. Esta influência da àrea da secção de corte no Ks é substâncial quando a variação se dá no avanço (ou no h) e não na profundidade de usinagem (ou no b), lembrando que A = f * ap = b * h. Assim, quando o avanço cresce, Ks decresce (principalmente para valores pequenos de f) fazendo com que o crescimento de Pc não seja muito grande. Quando a profundidade de usinagem (ap) cresce, Ks praticamente não varia e, assim, a força de corte cresce na mesma proporção do crescimento de ap.

C). O crescimento da velocidade de corte tende a fazer a pressão específica de corte decrescer, o que causa a queda da força de corte (não da potência). Porém, nas velocidades utilizadas no torneamento com ferramentas de metal duro, a influência da velocidade no Ks é desprezível (Ks já se estabilizou) e, portanto, sua influência na força de corte é muito pequena. Aí a velocidade de corte torna-se diretamente proporcional à potência de corte, já que Wc = Pc * Vc.

3.7.3 - MONITORAMENTO DO PROCESSO VIA CORRENTE ELÉTRICA DO MOTOR.

Existem métodos indiretos de medição dos esforços de corte. Um deles é a medição do torque necessário no eixo-árvore. Outro é a medição de parâmetros elétricos do motor da máquina, já que a potência elétrica consumida pelo motor (Wel) é diretamente proporcional à potência de corte (Wc) :

$Wc \Rightarrow Wel = Wc / n$

onde n = rendimento da máquina.

Este sistema de monitoramento tem despertado interesse entre pesquisadores, encontrando já aplicação a nível industrial por possuir algumas características importantes para este fim, tais como (Micheletti 1.976):

A). É um dos métodos que menor intrusividade apresenta ao processo de usinagem, uma vez que os sensores responsáveis por captar os sinais são instalados longe da zona de usinagem, junto aos motores de acionamento da máquina.

B). Os sensores utilizados são de tecnologia simples, o que os tornam de menor custo se comparado a outros sistemas.

C). O Sistema permite que o monitoramento seja realizado em tempo real, sem que para tanto seja necessário a interrupção do processo, com consequente ganho na produtividade.

Como em qualquer sistema de monitoramento da usinagem, este também apresenta alguns inconvenientes.

O maior deles é que os Parâmetros Elétricos do Motor são pouco sensíveis ao fenômeno de desgaste da ferramenta e, que o gradiente de potência elétrica entre uma ferramenta nova e uma ferramenta gasta não afeta de forma explícita o total da potência requerida pelo sistema de usinagem,

pelo menos até que a ferramenta apresente um alto grau de desgaste ou, seja estando esta próximo ao limite de sua quebra (Braga 1.992).

Uma das formas de monitoramento atualmente em utilização pelos fabricantes de máquinas ferramentas é descrito a seguir.

Toma-se por base uma medição de corrente quando a ferramenta ainda é nova e para uma determinada operação e determina-se um valor maior do que este como limite de corrente para o fim da vida da ferramenta (30% ou 40% do valor). Este valor é memorizado pelo comando ou por um sistema de diagnose adicional. A medida em que a ferramenta se desgasta observa-se um aumento do valor da corrente com consequente necessidade de maior torque no cabeçote. Desta forma acompanha-se a ascendência da corrente, sendo esta a cada instante comparada ao valor de corrente inicialmente memorizado, sendo que uma vez observado a ultrapassagem deste limite pré-determinado, o sistema pode paralisar o processo ou dependendo da intensidade do desgaste e nível de automação da máquina, realizar a substituição da ferramenta por outra idêntica a disposição em reserva no magazine. O problema desta estratégia de troca da ferramenta é que nem sempre a relação dos valores de corrente no início e no fim da vida da ferramenta permanece constante com a variação das condições de usinagem.

De forma geral, os esforços de corte durante a usinagem estão diretamente relacionados à vida da ferramenta, seu desgaste e/ou quebra, provocando assim um maior consumo de potência elétrica necessário ao processo.

Estudos realizados por Micheletti (1.976), concluíram que as componentes da força de usinagem, são uma boa maneira de se avaliar a evolução do desgaste das ferramentas de usinagem apesar dos problemas já citados no ítem 3.4.2 deste trabalho.

Porém, monitorar os Parâmetros Elétricos com o fim de acompanhar o desgastes como já visto neste trabalho, não é um procedimento tão preciso quanto por exemplo, a medição das forças, devido à diferença entre a potência realmente consumida pelo processo e a potência consumida pelo motor da máquina, devido à eficiência do motor e do sistema de transmissão de rotações e devido ao fato de que a

medição elétrica filtra componentes dinâmicos dos esforços de corte, possibilitando então somente o trabalho sobre suas médias.

Como em todos os sistemas de monitoramento, o tempo de resposta é muito importante, pois pode-se evitar choques entre elementos com movimento relativo, corrigindo desvios ocorridos tanto na máquina, como na ferramenta e na peça devido aos fenômenos de quebra, desgastes, vibração e outros fenômenos ocorridos durante o processo.

Sabido que os Parâmetros Elétricos da máquina se alteram significativamente quando se torna grande o esforço no processo, tal sistema se mostra viável principalmente em operações de desbaste onde por natureza do processo, as forças de usinagem já são significativas, evidenciando-se ainda mais quando presente os desgastes da ferramenta (Braga 1.992).

Como em diversos sistemas de monitoramento, também no caso de parâmetros elétricos da máquina, os sinais provenientes dos sensores devem ser condicionados.

Um exemplo interessante de condicionamento dos sinais é o aplicado por Braga (1.992), sendo o mesmo visualizado na figura 3.5 e comentado a seguir .

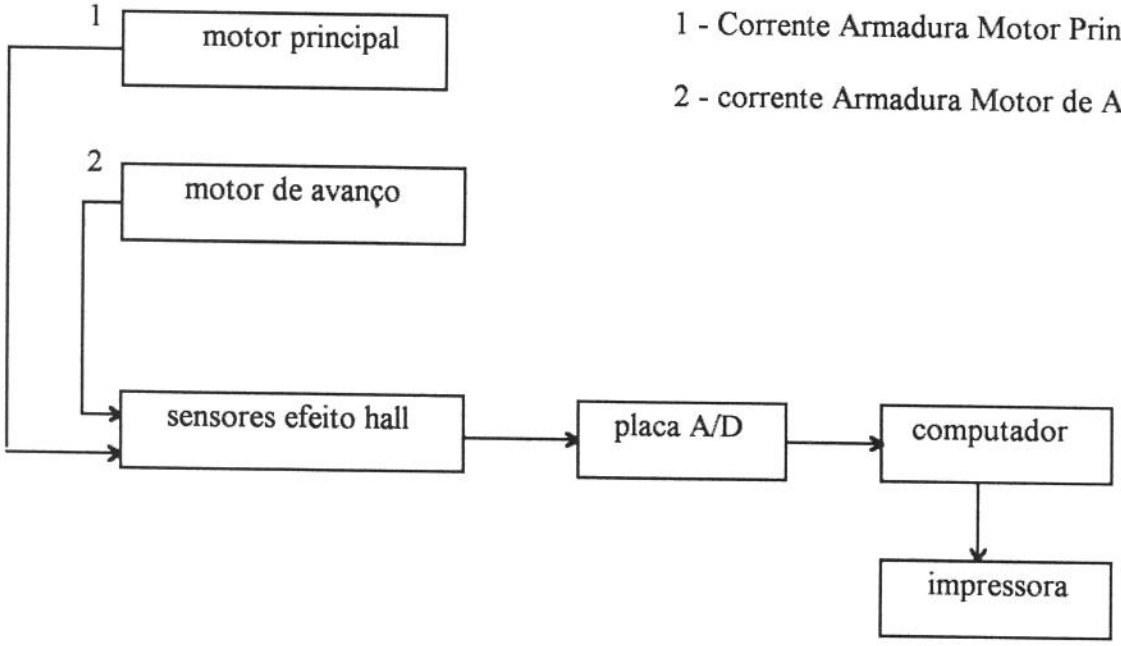


Figura 3.5 - Sistema de Monitoramento Via Parâmetros Elétricos (Braga 1.992).

3.7.4 - ELEMENTOS COMPONENTES DO SISTEMA DE MONITORAMENTO VIA PARÂMETROS ELÉTRICOS DA MÁQUINA.

Como já comentado no trabalho, uma das grandes vantagens deste sistema é a não intrusividade deste junto ao processo de usinagem, uma vez que os sensores responsáveis por captar os sinais são instalados junto aos motores principal e de avanço, estando portanto distantes da zona de trabalho. Estes sensores são pequenos, não interferindo de modo algum no rendimento normal do motor da máquina.

Uma vez captados os sinais da corrente elétrica dos motores, são estes dirigidos ao sensor de efeito Hall, cabendo a este transformar a corrente em tensão elétrica proporcional a ela para a entrada na placa A/D.

A placa de transformação A/D e o micro computador já tiveram suas funções detalhadas nos ítens 3.6.3 e 3.6.4. Assim adiante será discutido apenas o sensor de efeito Hall.

3.7.5 - SENSOR DE EFEITO HALL.

O sensor de efeito Hall normalmente é colocado circundando um fio condutor de corrente elétrica. A saída do sensor Hall é uma outra corrente elétrica cuja tensão é proporcional à intensidade da corrente que passa pelo fio circundado pelo sensor. Isso é necessário quando se quer medir corrente elétrica em computador, já que este só mede tensão. Assim ao medir a tensão da corrente de saída do sensor, o computador está medindo algo que é proporcional à corrente elétrica que se deseja medir (no caso, a corrente que passa pelo fio circundado pelo sensor Hall).

Durante muitos anos o efeito Hall permaneceu com restrita aplicação em laboratórios, porém com o desenvolvimento tecnológico, com o surgimento dos elementos semicondutores, veio a expandir tal utilização nos mais variados campos.

Dentre as muitas aplicações, os aparelhos com efeito Hall são grandemente usados em medidas de corrente. Um exemplo é o sistema de monitoramento via parâmetros elétricos da máquina empregado no desenvolvimento deste trabalho.

Fatores como precisão, eficiência e custo devem ser observados quando da escolha de um sensor Hall, uma vez que tais características estão diretamente ligadas à corrente de controle e os modelos de baixa corrente são encontrados sem maiores dificuldades.

Uma vez desejado o monitoramento da corrente o sensor é projetado, considerando em primeiro plano o nível de corrente a ser medido e a voltagem de saída desejada ou necessária, caso exista outros elementos no sistema para posterior tratamento do sinal.

O sensor Hall deve ser instalado o mais próximo possível do condutor portador de corrente. Assim a tensão Hall desenvolvida é proporcional à magnitude do campo condutor. Assim sendo a magnitude de campo em um ponto particular é proporcional ao nível de corrente bem como a tensão Hall também será proporcional a esse nível de corrente (Mann 1.989).

3.7.6 - CORRENTE ELÉTRICA DO MOTOR E DESGASTE DA FERRAMENTA.

Diversos autores concordam que a sensibilidade da corrente elétrica do motor da máquina ao desgaste da ferramenta é inferior quando comparado à outros tipos de sensoreamento como força e vibração por exemplo. Devido ao fato acima, este sistema é recomendado para processos onde é grande o esforço de corte ou seja casos de usinagem pesada. Porém a sensibilidade se mostrou eficiente e possível de monitoramento em processo de torneamento, em operação de desbaste leve. Braga (1.992) no torneamento em desbaste do aço 1045 com ferramentas de metal duro não revestida confirma o acima citado sendo suas principais conclusões listadas abaixo :

A). Os Parâmetros elétricos durante o processo de corte apresentam-se instáveis tanto no início como no fim do passe da ferramenta, mantendo-se praticamente constante durante o estágio normal de corte.

B). A corrente de armadura do motor principal da máquina cresce com o comprimento de corte, mas seu crescimento é muito pequeno, pelo menos até que se atinja valores de desgaste frontal superior a 0,8 mm, o que faz com que sua utilização se torne inviável no monitoramento de desgaste da ferramenta em operação de acabamento.

C). O desgaste de cratera é o responsável pela estabilização dos valores da corrente após um curto espaço de tempo ou comprimento de corte.

Na figura 3.7 (Mann 1.989) observa-se os diversos níveis de corrente para um conjunto máquina-ferramenta- peça a medida em que a ferramenta se desgasta. Nota-se que existe uma faixa razoavelmente grande entre as condições da ferramenta nova e quando ocorre a sua quebra, podendo assim admitir-se um valor intermediário da corrente que limita a ocorrência da quebra da ferramenta, com o consequente ganho de custo e tempo de manufatura.

1 - Máquina em vazio.

2 - Ferramenta nova.

3 - Corte intermediário.

4 - Quebra da ferramenta.

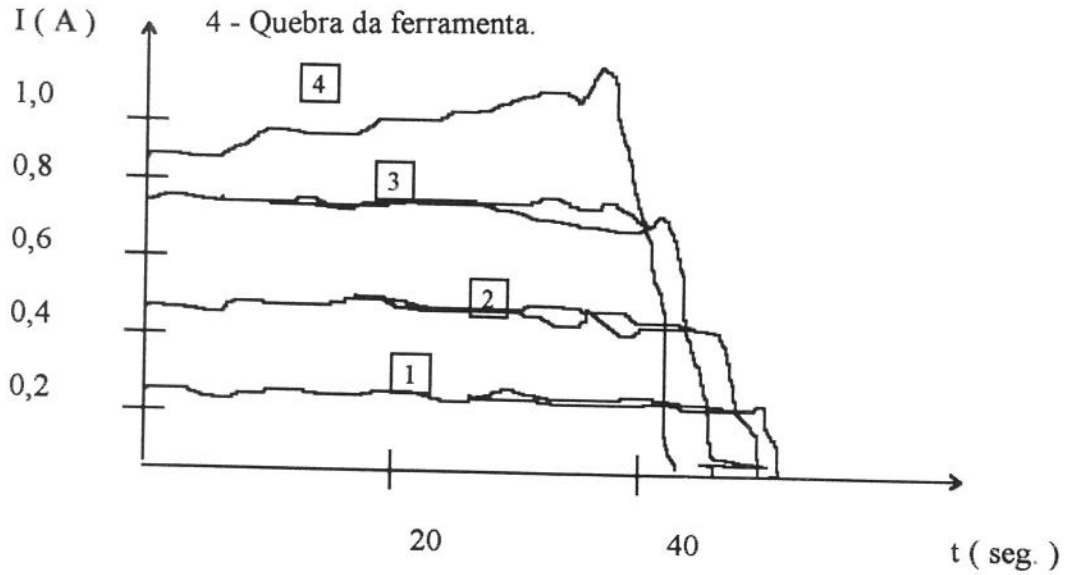


Figura 3.7 - Diferentes níveis de corrente para máquina em vazio, a ferramenta nova, o corte intermediário e a quebra da feramenta (Mann 1.989).

Máquinas com motores de corrente contínua com excitação independente de campo e de armadura, (como é o caso da máquina que vai ser utilizada nos ensaios deste trabalho) possuem duas faixas distintas de rotação. O controle de velocidade de rotação de seus eixos é feito pela variação linear da tensão de armadura, mantendo a corrente de campo em seu valor nominal, até que se atinja uma rotação de base. Nessa faixa de rotação, o motor fornece potência linearmente proporcional à rotação do eixo árvore da máquina-ferramenta. Para rotações acima da rotação de base, o controle de rotação é feito pela variação da corrente de campo, mantendo constante a tensão nominal da armadura e, consequentemente, a potência elétrica até o limite da rotação da máquina-ferramenta.

Nestas máquinas, para que se evite que os resultados do monitoramento Via Parâmetros Elétricos sejam mascarados por uma variação destinada a variar a rotação da máquina, torna-se necessário a priori, saber quais são os valores destes parâmetros para cada rotação utilizada quando a máquina roda em vazio sem corte, a fim de que, descontados estes, tenta-se os valores de corrente e tensão realmente destinados ao corte.

Ensaios realizados por Stein e Shin (1.986), verificaram que a variação da corrente de armadura do motor é proporcional à variação do torque do eixo-árvore e, consequentemente, da força de usinagem durante o torneamento.

Na figura 3.8 e 3.9 (Stein, Shin 1.986) observa-se a resposta transitória da corrente de armadura quando ocorre a penetração da ferramenta na peça, até o regime constante de corte. O tempo de resposta em regime transitório foi maior para rotações maiores, como mostra a figura 3.9. Esta variação é importante e deve ser levada em consideração a medida em que se espera uma atuação no processo antes que ocorra um número significativo de rotações da peça em casos em que a continuidade do processo devido à colisão entre peça e ferramenta ou quebra da ferrmenta possa comprometer a máquina, a ferramenta e/ou a peça.

Pode-se ver na figura 3.8 que para a força de corte este período transitório é praticamente igual a zero, enquanto que cresce vagarosamente quando se monitora a corrente.

força (Pc)

corrente elétrica (I)

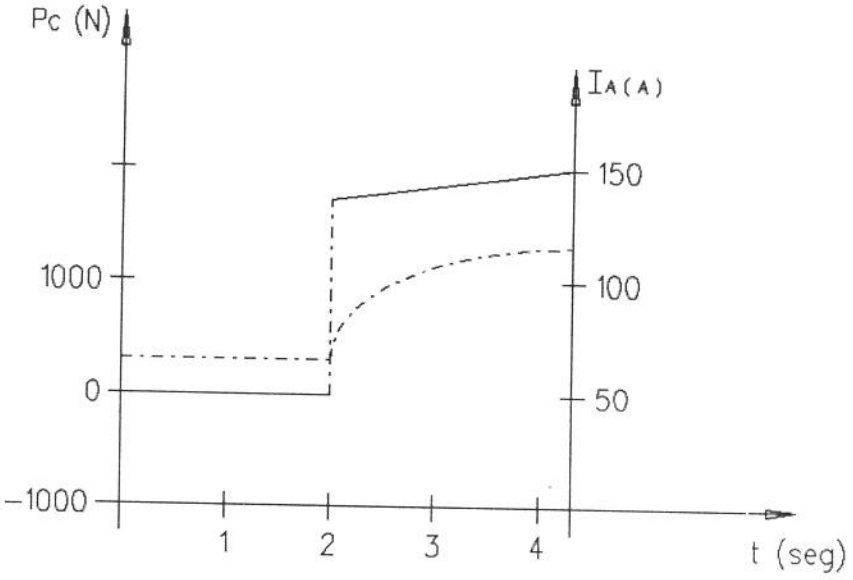


Figura 3.8 - Características da Corrente de armadura durante a Penetração da Ferramenta/Peça (Stein 1.986).

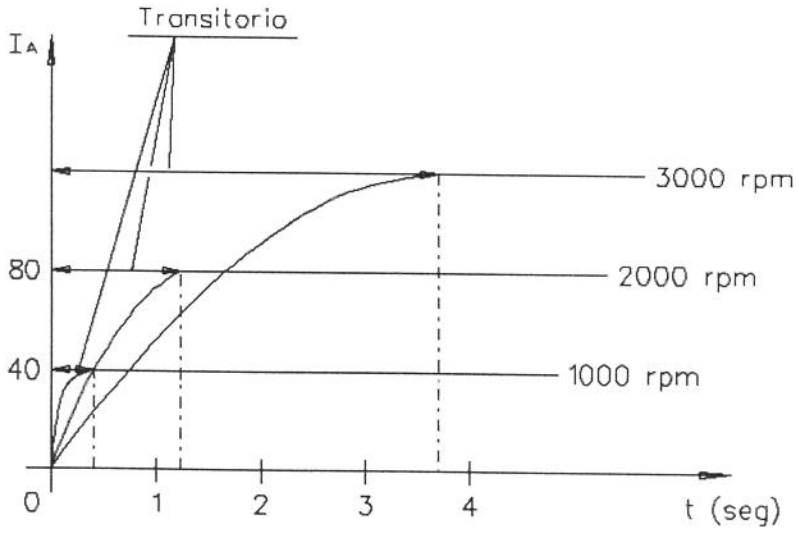


Figura 3.9 - Variação do Regime Transitório da Corrente Para Diferentes Rotações (Stein 1.986).

CAPÍTULO - 4.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL.

4.1 - SISTEMA DE MONITORAMENTO.

A montagem experimental utilizada está esquematizada na figura 4.1, sendo que suas particularidades e funções já foram discutidas anteriormente neste trabalho.

Elementos componentes do sistema de monitoramento.

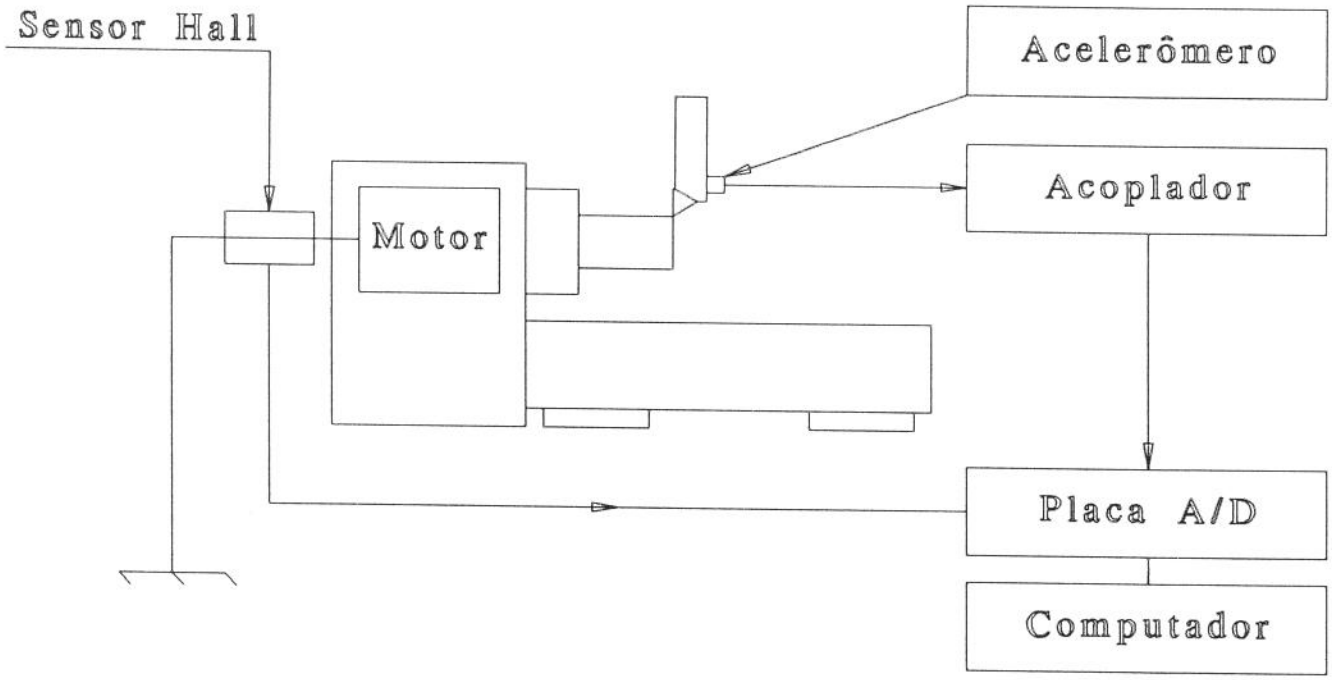


Figura 4.1 - Sistema de Monitoramento Via Corrente Elétrica do Motor Principal da Máquina e Via Vibração da Ferramenta.

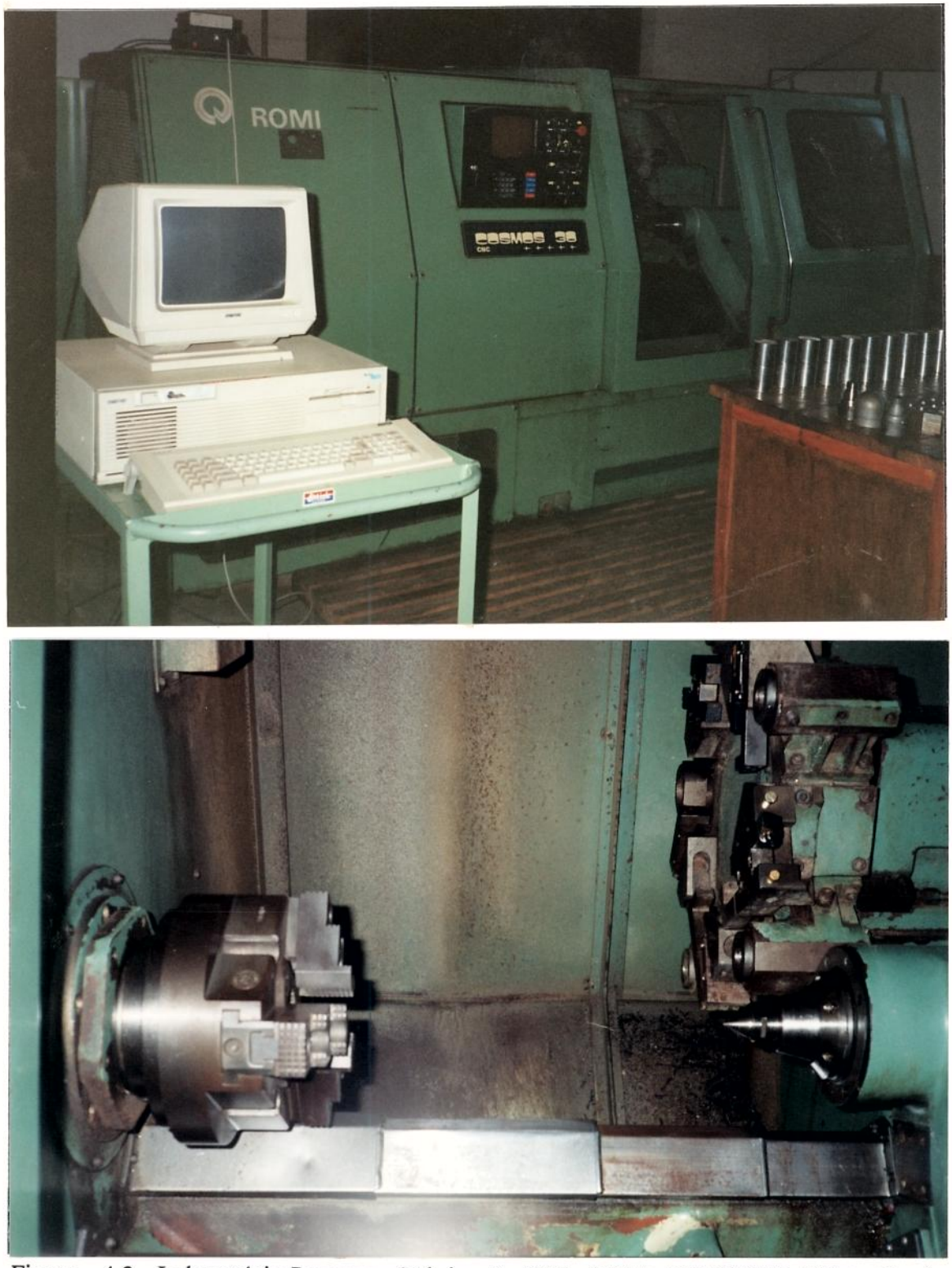


Figura - 4.2 - Laboratório Processos Fabricação DEF - FEM - UNICAMP / Vista Geral e Parcial do Sistema de Monitoramento.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Uma vez que tanto os sinais de corrente elétrica responsável pelo acionamento do eixo árvore como da vibração da ferramenta são analógicos e sabido que o computador somente armazena sinais digitais, tais sinais sofreram conversão analógica-digital, tarefa esta realizada pelo conversor A/D (Placa CAD 12/36 de procedência da LYNX).

A principal característica desta placa é sua capacidade de leitura de canais, que é de 16 canais distintos, com frequência máxima de amostragem de 60.000 Hz.

Para a realização do trabalho utilizou-se apenas dois dos dezesseis canais disponíveis na Placa CAD 12/36.

Na figura 4.2 observa-se um esquema do Sensor de Efeito Hall utilizado nos experimentos, para a medição da corrente de armadura do motor principal.

Sua precisão é de 0,1 v / A ou seja, cada ampere que passa pelo fio circundado pelo sensor, provoca uma variação de 0,1 Volt na saída do sensor. Por este meio obtém-se então uma voltagem proporcional à corrente que se deseja monitorar, de maneira que se possa, após passar pela conversão A/D, ser armazenada na memória do computador.

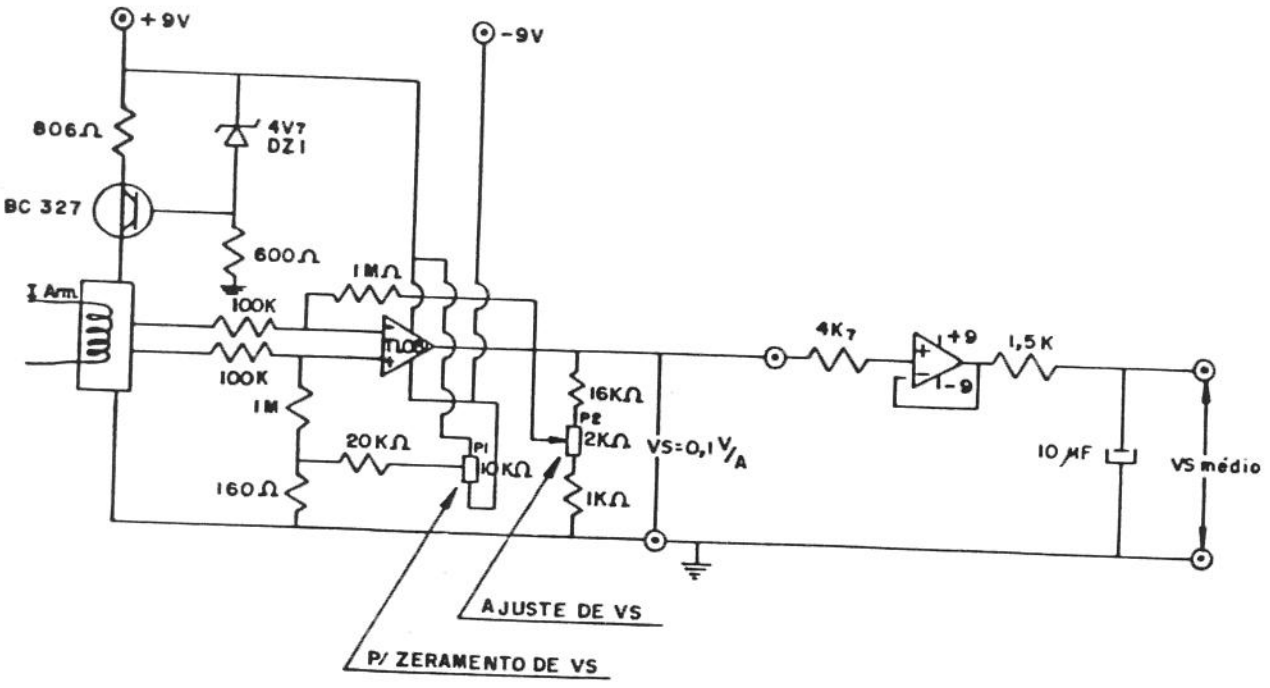


Figura 4.3 - Sensor de efeito Hall (Manual LINX 1.990).

No Sistema de Monitoramento da Vibração, além do acelerômetro é necessário que se tenha no circuito um elemento chamado acoplador ou "Coupler", que supre o acelerômetro com uma corrente de excitação constante e também é o responsável pela conexão entre o acelerômetro e o computador.

A tabela 4.1 relaciona algumas das principais características do Acelerômetro Kistler empregado durante os experimentos.

Tabela 4.1 Características do Acelerômetro Kistler (Kistler 1.985)

Faixa sensivel	+/- 500 g
Sensibilidade a 1000 Hz	11.0 mV/g
Faixa de frequência	1 a 8000 Hz
Faixa de Temp. de operação	50 a 120 celsius
Frequência de ressonância	50 KHz

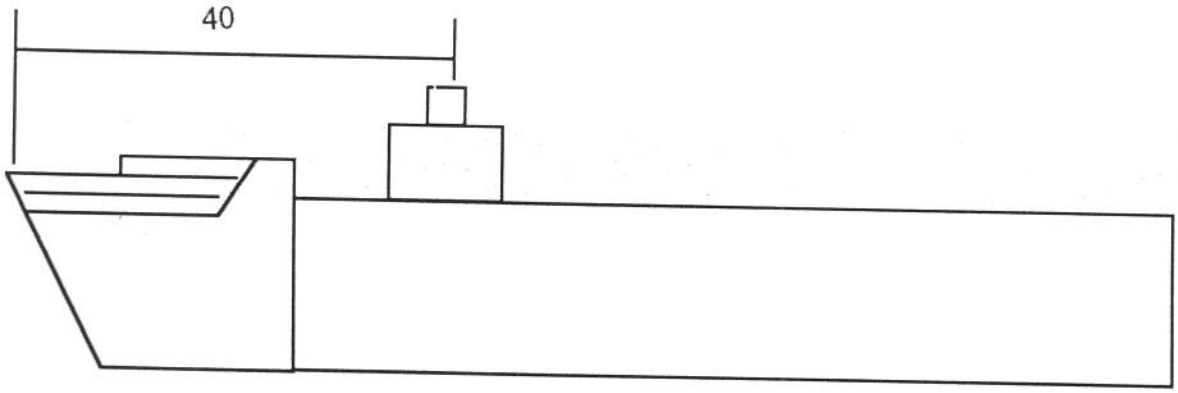


Figura 4.3 - Posição do Acelerômetro no Porta-ferramenta.

Conhecidas as características do acelerômetro e que estas supriam as expectativas do trabalho, buscou-se o posicionamento conveniente à sua instalação. A figura 4.3 mostra o posicionamento do sensor no porta-ferramentas.

A princípio sabe-se que tanto a direção de avanço da ferramenta como a direção principal de corte pode ser utilizado para tal finalidade porém, utilizou-se a direção principal de corte uma vez que

vários pesquisadores apontam para esta Pandit (1.983) e Bonifácio (1.993) acreditando que é a que melhor representa o desgaste da ferramenta via Vibração.

4.2 -AQUISIÇÃO DOS DADOS.

Como já comentado no capítulo 3 deste trabalho, a cada dia o computador vem se situando nas várias áreas industriais, mesmo no chão de fábrica, possibilitando ganho real na produtividade, na qualidade e, consequentemente, na redução de custos e tempos passivos do processo.

Em todas as etapas realizadas, a fim de se concretizar a aquisição dos sinais tanto das corrente elétrica como da vibração, utilizou-se o computador, assim como para o tratamento dos sinais, utilizando-se de "softwares" diversos direcionados ao evento.

Os sinais foram adquiridos, como já visto no trabalho, por meio de sensores estrategicamente instalados, sendo em seguida direcionados a dispositivos de condicionamento de sinais específicos e então ao conversor A/D.

Para a aquisição dos sinais, utilizou-se o micro computador PC-AT 286, e nas etapas posteriores de análise foram utilizados micro computadores 386 e 486, a fim de se ganhar tempo e qualidade no processamento dos dados adquiridos.

Para aquisição dos dados iniciais utilizou-se o programa listado no Apêndice B sendo a placa de aquisição responsável pela conversão analógico / digital dirigida por um "software" específico ao evento. De forma geral a aquisição pode se dar utilizando-se de diversas linguagens de computação como Pascal, C, C++, Basic entre outros, sendo que no caso desenvolvido utilizou-se a linguagem Pascal.

Em cada passada da ferramenta no corpo de prova eram amostrados 1024 pontos por canal utilizado.

A corrente elétrica do motor principal era armazenada através do canal 1 da Placa A/D e a vibração da ferramenta através do canal 2.

A fim de se amostrar todos os sinais desejados, optou-se por uma frequência de amostragem de 16.000 Hz, uma vez que o sinal de vibração pode atingir frequências de até 8000Hz, que é a máxima frequência que o acelerômetro utilizado consegue captar.

A aquisição propriamente dita se dava ao disparar o sistema, o que era feito poucos segundos após a ferramenta tocar a peça, de tal maneira que nem o início e nem o fim do corte tinham seus dados coletados. Somente a região intermediária de cada corte, de cada passada da ferramenta na peça era amostrado.

4.3 - MÁQUINA, FERRAMENTA E MATERIAL ENSAIADO.

MÁQUINA-FERRAMENTA.

A máquina -ferramenta utilizado para a usinagem durante os experimentos foi um torno CNC COSMOS-30 de fabricação nacional.

Suas características principais acham-se listadas abaixo :

A). Potência do motor principal de corrente contínua - 30 HP.
B). Servo motores de avanço da ferramenta movidos por corrente contínua.

FERRAMENTA

Utilizou-se pastilhas metal de duro multirevestidas, recomendadas para operações de desbaste com três camadas da cobertura TiC, Al_2O_3 e TiN, de procedência nacional, segundo a classificação ISO TNMG 160408 - QM, GC 435 (Sandivik 1.991).

As respectivas espessuras das camadas de recobrimento da pastilha utilizada acham-se listadas na sequência :

Tabela 4.2 Espessuras do recobrimento da pastilha empregada.

Recobrimento	Espessura (mícron)
TiC	2
Al_2O_3	3
TiN	3

MATERIAL.

Usinou-se durante os experimentos corpos de prova de aço laminado 4340 com diâmetro inicial de 62 mm como o esquematizado na figura 4.4. As características deste material estão citadas nas tabelas 4.2 e 4.3. Tais corpos de prova foram retirados de uma mesma barra, portanto da mesma corrida de fabricação, a fim de se assegurar ao máximo possível a homogeneidade das propriedades do mesmo.

Tabela 4.2 - Composição química e propriedades mecânica do material.

Composição Quimica (%)	
Cr	0,8
C	0,4
Mn	0,7
Mo	0,25

Propriedades Mecânicas	Kgf/mm
Limite de escoamento a 0,2 %	67,70
Limite de resistência	96,86
Alongamento	13,8 %
Estricção	40,17 %

Os corpos de prova eram torneados em diversas passadas, até atingirem diâmetro pouco maior que 50 mm, que é o diâmetro do rebaixo mostrado na figura 4.4. Após ter um lado torneado, este mesmo lado servia como superfície de fixação para o torneamento do outro lado do corpo de prova.

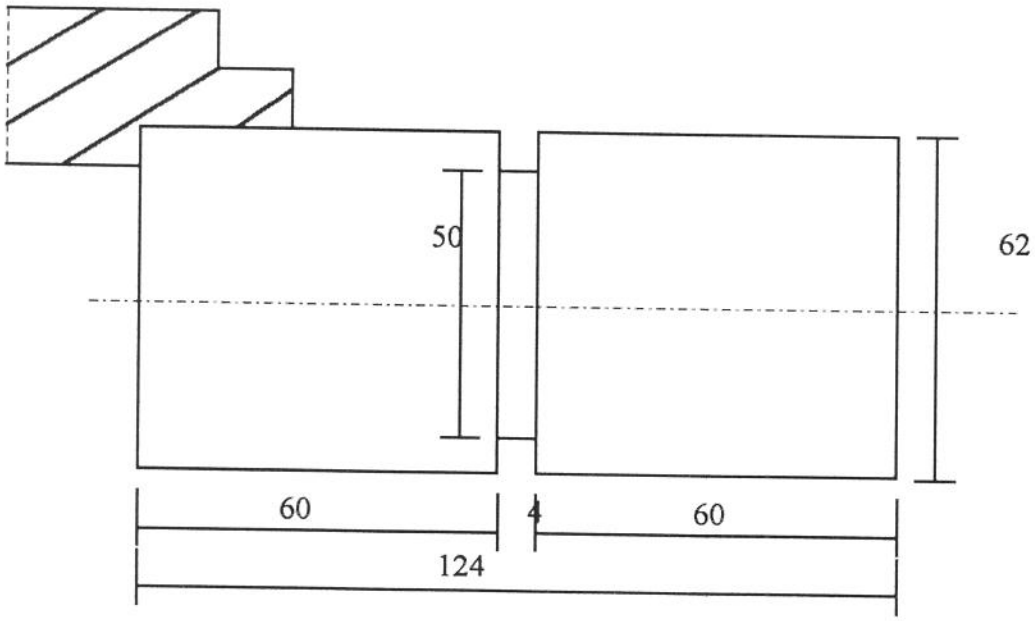


Figura 4.4 - Corpo de Prova Ensaiado.

4.4 - METODOLOGIA APLICADA AOS ENSAIOS.

Uma vez montado o sistema de monitoramento, iniciou-se os experimentos que foram divididos em três partes, quais sejam :

A). Parte 1 - Ensaio com variação da velocidade de corte.

B). Parte 2 - Ensaio com a variação do avanço.

C). Parte 3 - Ensaios de repetibilidade.

As condições de usinagem utilizadas nos ensaios foram típicas de operações de desbaste, conforme recomendação de fabricantes de ferramentas (Tungaloy 1.989, Sandivik 1.991).

Inicialmente, realizou-se ensaio com a condição mínima de desbaste a fim de se verificar o funcionamento do sistema, assim como se conseguir a familiarização com o mesmo e proceder correções, caso necessário.

Em paralelo à aquisição dos dados, de tempo em tempo, o processo era interrompido para se medir o desgaste frontal da ferramenta. As medições do desgaste foram realizadas utilizando-se uma lupa com ampliação de 8 vezes. Portanto, a precisão destas medições é de 0,1 mm. Tal valor foi posteriormente comparado com os sinais adquiridos em função do comprimento de corte.

Realizado este ensaio prévio com resultados satisfatórios, partiu-se para os ensaios posteriores relatados a seguir.

Cada novo ensaio era iniciado com uma aresta nova da ferramenta sendo esta, como já citado, analisada de tempo em tempo, para se medir o valor do desgaste frontal da ferramenta, assim como se registrar qualquer outro fenômeno ocorrido durante o processo.

Cada ensaio terminava quando a ferramenta realmente não apresentava mais condições de utilização, isto é, quando seus valores de desgaste frontal eram bem altos ($V_B > 1,0$ mm) e, portanto o risco de quebra da aresta de corte era iminente, já que este critério de fim de vida da ferramenta deve ser utilizado em operações de torneamento em desbaste, como já citado no capítulo 2 deste trabalho.

PARTE 1 - Buscou-se a correlação entre a corrente elétrica de armadura do motor principal e a vibração da ferramenta na direção de corte com o comprimento de corte, tendo constantes a profundidade de usinagem e o avanço e variando-se a velocidade de corte. A tabela 4.4 mostra os parâmetros utilizados nestes ensaios.

PARTE 2 - O princípio acima citado foi aqui também adotado, porém a variável foi o avanço. A tabela 4.5 mostra os parâmetros utilizados durante os ensaios.

PARTE 3 - Nesta etapa realizou-se o ensaio de repetibilidade ou seja, por três vezes realizou-se a usinagem com os mesmos parâmetros vistos na tabela 4.6. Tal ensaio teve por objetivo comprovar a eficiência do sistema empregado ou seja, seu grau de confiabilidade ou repetibilidade, uma vez empregadas condições constantes de usinagem.

Todos os ensaios destas 3 partes foram misturados e aleatorizados, isto é, a sequência de elaboração dos ensaios não seguiu nenhum padrão. Portanto um ensaio da parte 1 podia ser seguido por outro da parte 3 e logo após podia se realizar outro ensaio da parte 1, etc..

Os resultados obtidos nesta etapa encontram-se comentados no capítulo 5, onde se apresentam os gráficos referentes aos mesmos, o que muito auxilia e complementa a interpretação dos objetivos propostos e resultados dos sinais adquiridos.

Tabela 4.4 - Condições de Usinagem Parte 1 (v_C Variável).

v_c (m / min)	f (mm / volta)	a_p (mm)
150	0,30	2
200	0,30	2
250	0,30	2

Tabela 4.5 - Condições de Usinagem Parte 2 (f Variável).

v_C (m /min)	f (mm / volta)	a_p (mm)
200	0,25	2
200	0,30	2
200	0,35	2

Tabela 4.6 - Condições de Usinagem Parte 3 (Repetibilidade).

v_C (m / min)	f (mm / volta)	a_p (mm)
200	0,30	2
200	0,30	2
200	0,30	2

CAPÍTULO -5.

RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Como foi visto no capítulo anterior, foram monitorados os valores da corrente elétrica de armadura do motor principal do torno e a vibração da ferramenta na direção de corte, enquanto cada corte era realizado (monitoramento em tempo real), em condições de usinagem típicas de desbaste.

Após alguns cortes, a ferramenta era retirada da máquina e seu desgaste frontal (V_B) era medido.

Com estes dados, pôde-se levantar as curvas dos parâmetros citados contra o comprimento de corte para se ter uma idéia do progresso destes valores com o tempo de corte, a fim de se verficar a viabilidade de utilização de cada parâmetro medido em tempo real para o acompanhamento indireto do crescimento do desgaste da ferramenta e, assim, estabelecer qual é o melhor parâmetro para se estabelecer automaticamente o fim da vida da ferramenta. Relembrando o que já foi citado no capítulo 2, em operações de desbaste, o que se deseja evitar é a quebra da ferramenta e não se está muito preocupado com a qualidade da peça. Devido a isto é que se decidiu somente correlacionar os parâmetros medidos com o desgaste da ferramenta que, quando com valores altos, pode levar a mesma à quebra, não se preocupando com fatores como a rugosidade ou a tolerância dimensional e de forma da peça usinada.

A seguir passar-se-á a analisar os diversos resultados obtidos, através de uma análise das curvas citadas acima.

5.1 - MONITORAMENTO VIA CORRENTE ELÉTRICA DO MOTOR PRINCIPAL DA MÁQUINA.

As figuras 5.1 e 5.2 mostram os valores da corrente de armadura do motor principal (Cp) contra o comprimento de corte (lc) para diferentes velocidades de corte (figura 5.1) e diferentes avanços (figura 5.2).

As figuras 5.3 e 5.4 mostram a progressão do desgaste frontal (V_B) com o comprimento de corte para diferentes velocidades de corte (figura 5.3) e para diferentes avanços (figura 5.4).

Destas figuras pode-se destacar os seguintes pontos :

A).Existe sempre uma tendência de crescimento da corrente do motor principal com o comprimento de corte, tanto quando se variou a velocidade de corte, como quando se variou o avanço (inclinação positiva das curvas das figuras 5.1 e 5.2). Inicialmente esta inclinação é pequena, mas com o decorrer da vida da ferramenta, a inclinação cresce, chegando a valores bem altos no fim de sua vida. Este fato mostra que a inclinação da curva Cp x lc pode ser um bom parâmetro para a determinação do fim da vida da ferramenta. Para se comprovar esta afirmação, dividiu-se cada uma da 3 curvas de cada figura em vários trechos, conforme está mostrado nas próprias figuras, onde se aproximou os pontos de cada trecho via regressão por uma reta e, com isto, se obteve a inclinação da curva em cada trecho.

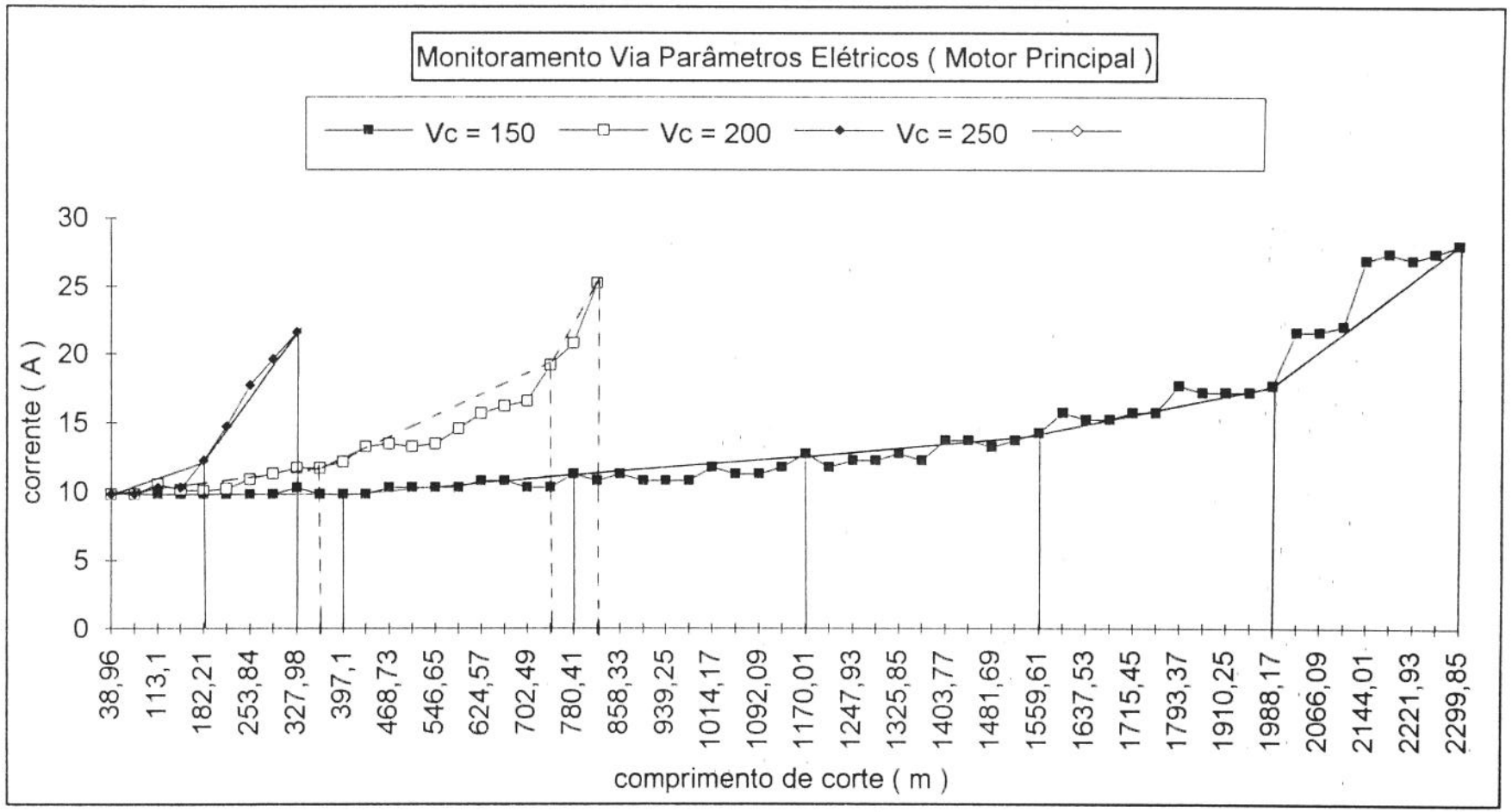


Figura 5.1 - Corrente Elétrica x Comprimento de Corte, p/ Três Vc (m/min.) distintas e f = 0,30 mm/v.

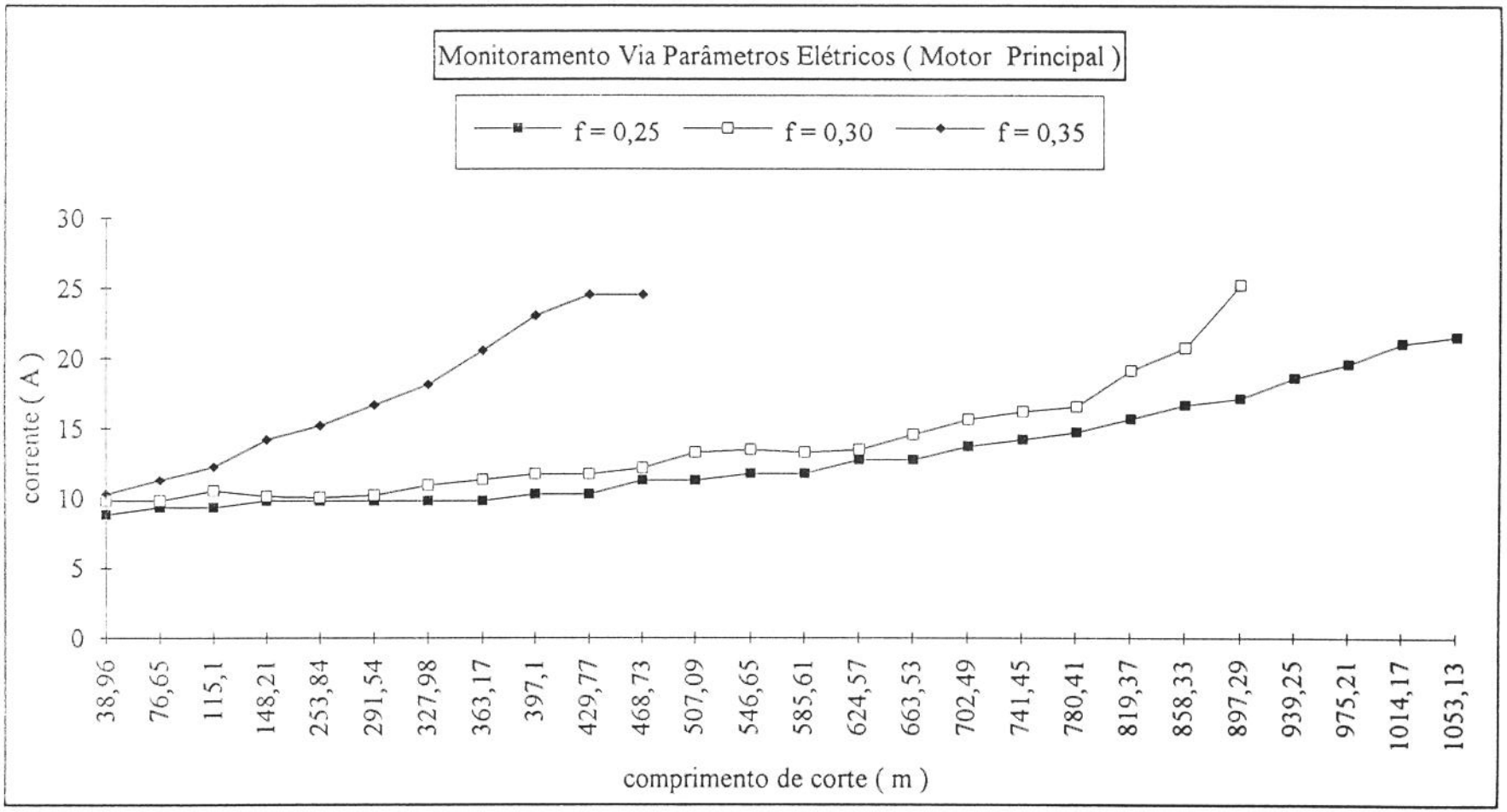


Figura 5.2 - Corrente Elétrica x Comprimento de corte, p/ três f (mm/v) distintos e Vc = 200 m/min.

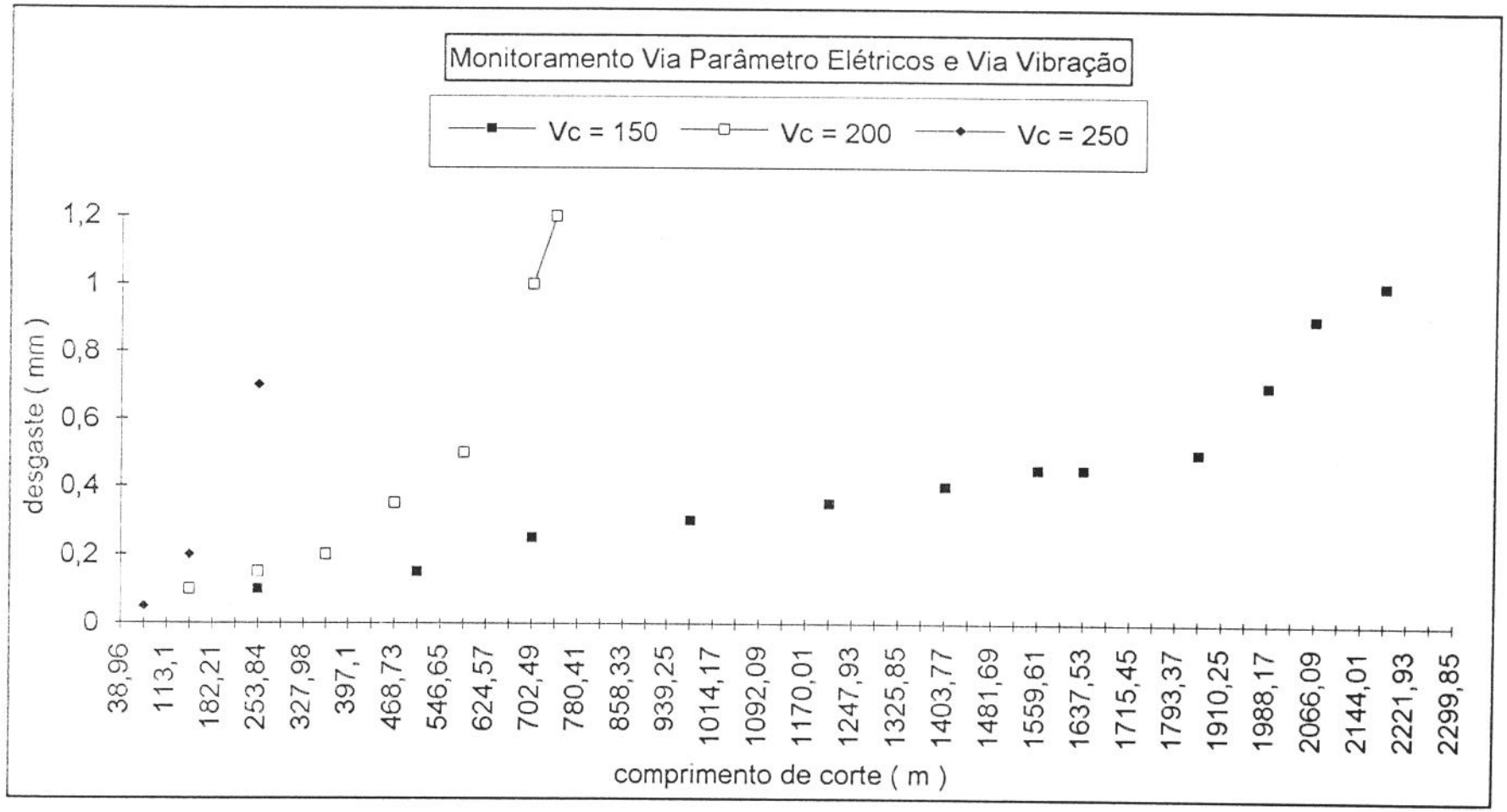


Figura 5.3 - Desgaste Frontal x Comprimento de Corte, p/ Três VC (m/min.) Distintos e f = 0,30 mm/v.

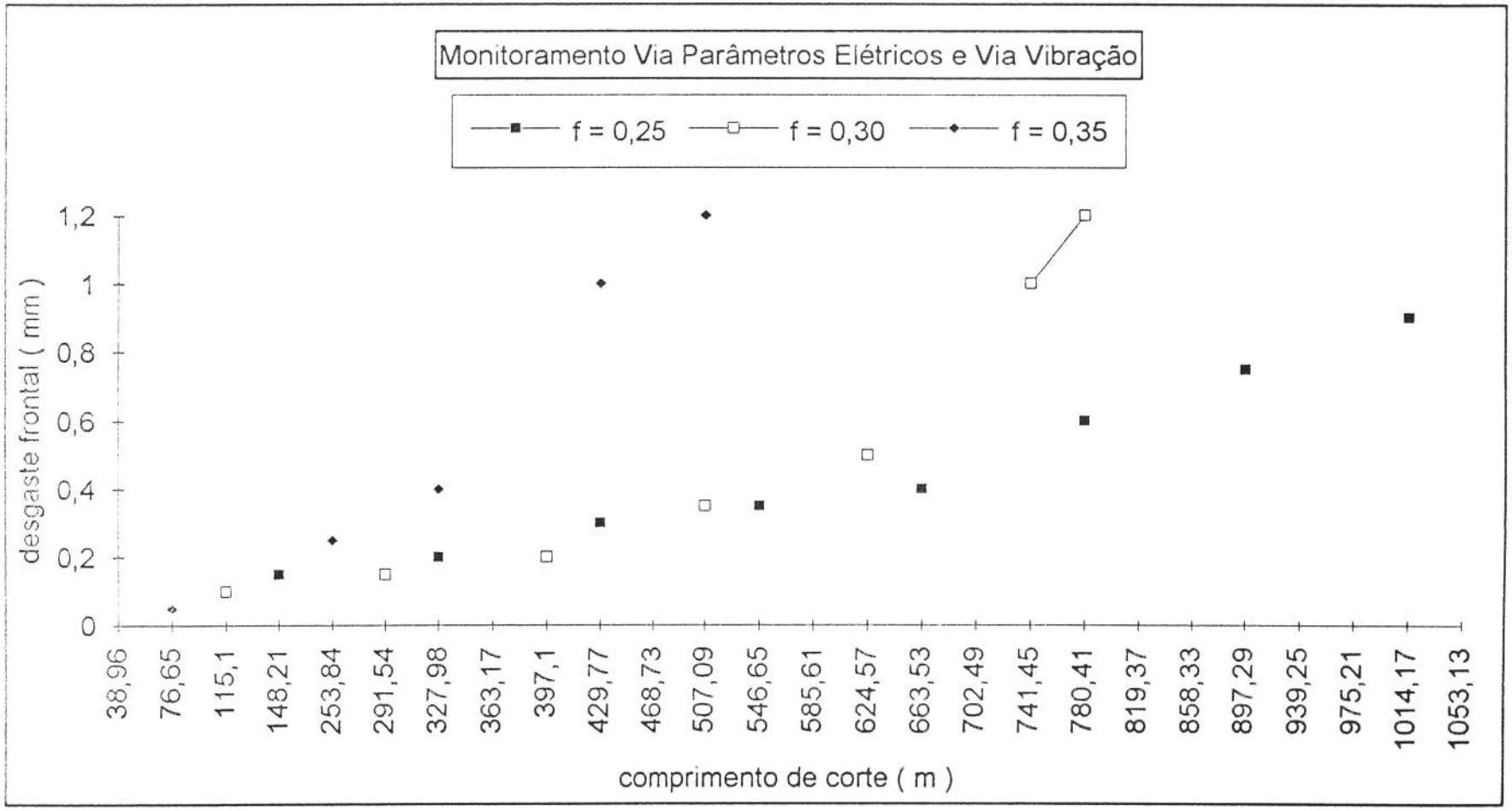


Fig. 5.4-Desgaste Frontal X Comp. de Corte P/ Três f(mm/v.)Distintos e v_c=200m/min.

A tabela 5.1 mostra os valores das inclinações das curvas. Pode-se notar nesta tabela, o repentino crescimento da inclinação a medida que se aproxima o fim da vida da ferramenta.

Portanto, uma boa estratégia de determinação do fim da vida da ferramenta seria limitar-se a variação da curva em um dado valor que, uma vez ultrapassado, determinaria a interrupção do processo e substituição da ferramenta.

Tabela 5.1 - Variação da inclinação da Curva Para o Monitoramento Via Corrente Elétrica do motor Principal para três velocidades de corte e três favanços distintos.

Incl./v_c-f	150 m/min.	200 m/min.	250 m/min.	-	0,25 mm/v.	0,30 mm/v.	0,35 mm/v.
m1	0	0	4,52		3,70	0	33,39
m2	1,29	14,70	63,78		10,48	14,70	43,80
m3	3,43	9,80			22,60	9,80	
m4	3,80	43,0				43,00	
m5	5,77						
m6	23,79						

B). Comparando a figura 5.1 com a figura 5.3 e a figura 5.2 com a figura 5.4, vê-se que o comportamento da corrente elétrica do motor principal com o comprimento de corte é muito semelhante ao comportamento do desgaste frontal, isto é, ambos crescem com lc, inicialmente com uma inclinação pequena, até um valor bem alto da inclinação.

Este fato mostra que a corrente elétrica do motor principal é bastante influenciada pelo crescimento do desgaste de folga. Há de se notar aqui que não houve a formação de desgaste de cratera de dimensões substanciais em nenhum momento.

C). O comportamento das curvas das figuras 5.3 e 5.4 mostram que a taxa de desgaste frontal (desgaste por unidade de tempo) aumenta com o comprimento de corte (ou com o tempo de corte), isto é, quanto maior o desgaste, mais rápido ele acontece. O fato da inclinação de a curva V_B x lc ser bem maior depois de ultrapassado um certo valor do desgaste, se explica pelo fato de que, neste ponto, o desgaste é tal que já não existe mais camada de cobertura na ferramenta e a usinagem passa a ser realizada pelo substrato da ferramenta, que é muito menos resistente ao desgaste se comparado ao seu recobrimento. Como já foi citado anteriormente, esta variação da taxa de desgaste é detectada prontamente pela corrente elétrica do motor principal.

D). Como pode ser visto nas figuras 5.1 e 5.3, a velocidade de corte tem uma influência bastante grande na vida da ferramenta, isto é, o aumento da velocidade causa um decréscimo substancial da vida da ferramenta, concordando com o que a literatura afirma sobre este assunto.

E). Já a influência do avanço na vida da ferramenta, mostrada nas figuras 5.2 e 5.4, não é tão forte quanto a influência da velocidade de corte. A medida que o avanço cresce a vida da ferramenta diminui, mas numa proporção menor. Pode-se ver nestas figuras que, quando o avanço cresce de 0,25 para 0,30 mm/v., a vida diminui bem pouco e somente quando o avanço passa para 0,35 mm/v. é que acontece uma maior diminuição da vida da ferramenta.

F). Uma outra tentativa realizada para se encontrar um bom parâmetro para estabelecimento da vida da ferramenta utilizando-se a corrente elétrica do motor principal foi a verificação do valor da corrente para um determinado valor de desgaste frontal nas diversas condições de usinagem testadas. Assim, verificou-se para V_B = 0,8 mm (valor no qual a ferramenta já está cortando com seu substrato e já é chegada a hora de sua substituição) qual era o valor da corrente nas diversas condições de usinagem.

Concluiu-se que não se pode utilizar um valor fixo da corrente para se estabelecer o fim da vida da ferramenta, pois, no ensaio com a variação de velocidade de corte os valores da corrente quando V_B

era 0,8 mm, variaram de um valor mínimo igual a 15,6 A quando a velocidade era de 200 m/min e f = 0,30 mm/v., até um valor próximo de 21,6 A quando a velocidade era de 150 m/min.. O mesmo aconteceu quando se variou o avanço, onde a corrente variou de 15,6 A a 23 A. A tabela 5.2 mostra estes valores.

Tabela 5.2 - Valor da Corrente Quando V_B = 0,8 mm.

f (mm/v.)	v_c (m/min.)	Cp (A)		v_c (m/min.)	f (mm/v.)	Cp (A)
0,30	150	21,56		200	0,25	19,6
0,30	200	15,63		200	0,30	15,63
0,30	250	19,6		200	0,35	23,03

5.2 - MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO DA FERRAMENTA NA DIREÇÃO DE CORTE.

As figuras 5.5 e 5.6 mostram os valores da vibração da ferramenta (RMS do sinal extraído do acelerômetro) contra o comprimento de corte (lc) para diferentes velocidades de corte (figura 5.5) e diferentes avanços (figura 5.6), medidos nos mesmos ensaios em que foram medidas a corrente elétrica do motor principal (analisada no ítem 5.1).

Analisando-se os resultados mostrados nestas figuras conjuntamente com aqueles das figuras 5.3 e 5.4 que dizem respeito ao desgaste frontal da ferramenta, pode-se verificar o seguinte :

A). A vibração da ferramenta aumenta a medida que o comprimento de corte cresce, mas a taxa de cresimento é dependente das condições de usinagem, isto é, quanto maior o avanço ou a velocidade de corte, maior o crescimento da vibração.

B). Comparando-se os resultados da figura 5.5 com os da figura 5.3 e os resultados da figura 5.6 com os da figura 5.4, vê-se que o crescimento do desgaste é muito mais acentuado que o crescimento da vibração e também tem um comportamento diferente, isto é, enquanto a inclinação das curvas de desgaste frontal x comprimento de corte cresce com o comprimento de corte, sendo bastante grande no fim da vida da ferramenta, as curvas de vibração X comprimento de corte tem uma inclinação praticamente constante. Portanto a estratégia usada para a corrente elétrica do motor principal na determinação do fim da vida da ferramenta a partir da variação da inclinação da curva Cp X lc, não pode ser utilizada quando o parâmetro monitorado é a vibração da ferramenta.
Isto também demonstra que a vibração não é sensível à perda da camada de cobertura e ao consequente aumento da taxa de desgaste, que causou o rápido crescimento da corrente elétrica no fim da vida da ferramenta.

C). Também o estabelecimento de um valor fixo de vibração para a determinação do fim da vida da ferramenta não pode ser utilizado aqui, pois as condições de usinagem tem bastante influência nos valores de vibração, fazendo com que cada curva de vibração X comprimento de corte esteja num patamar bem diferente das outras curvas com outros valores de f e v_c.

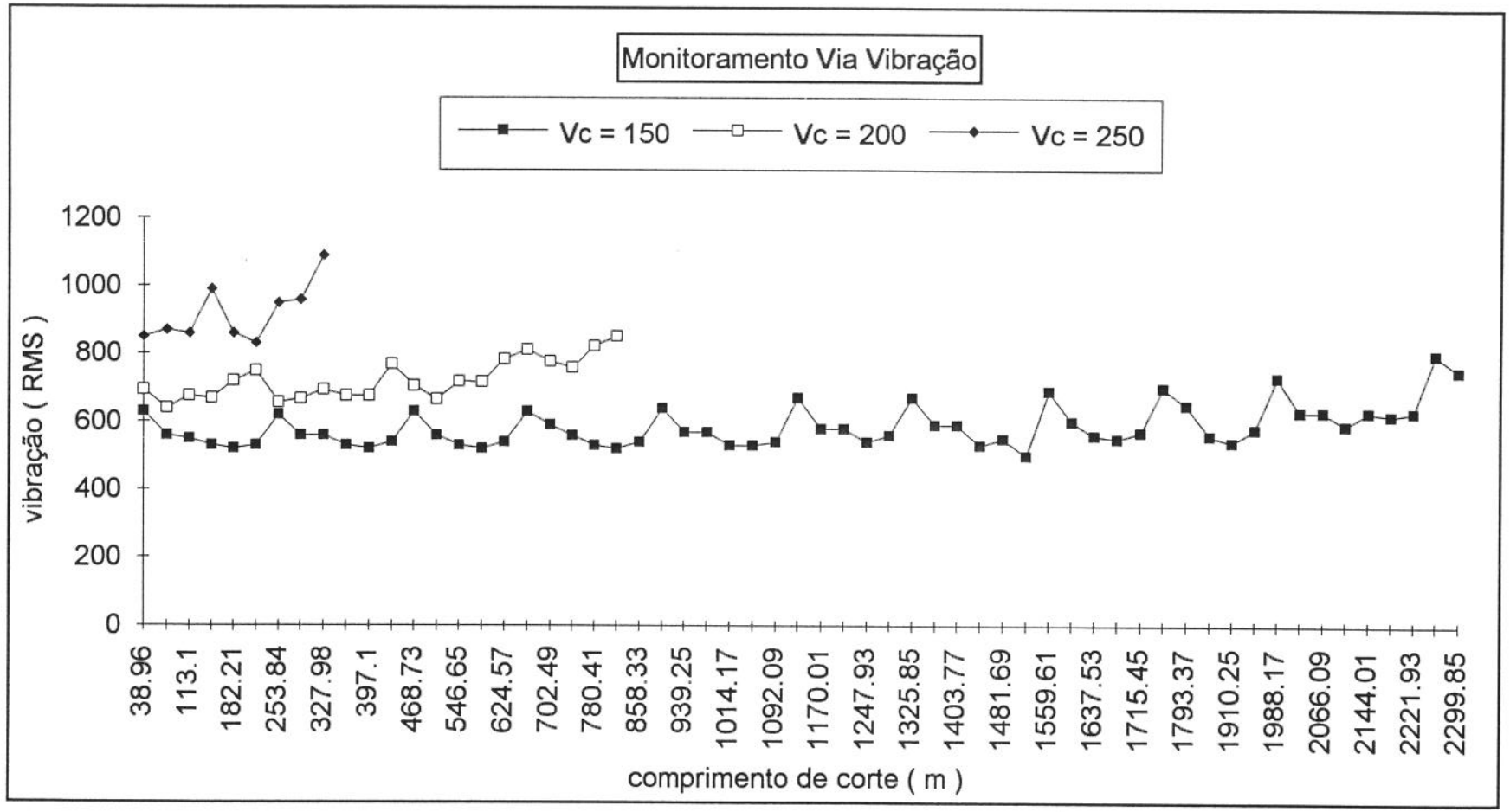


Figura 5.5 - Vibração x Comprimento de corte, p/ Três Vc (m/min.) Distintas e f = = 0,30 mm/v.

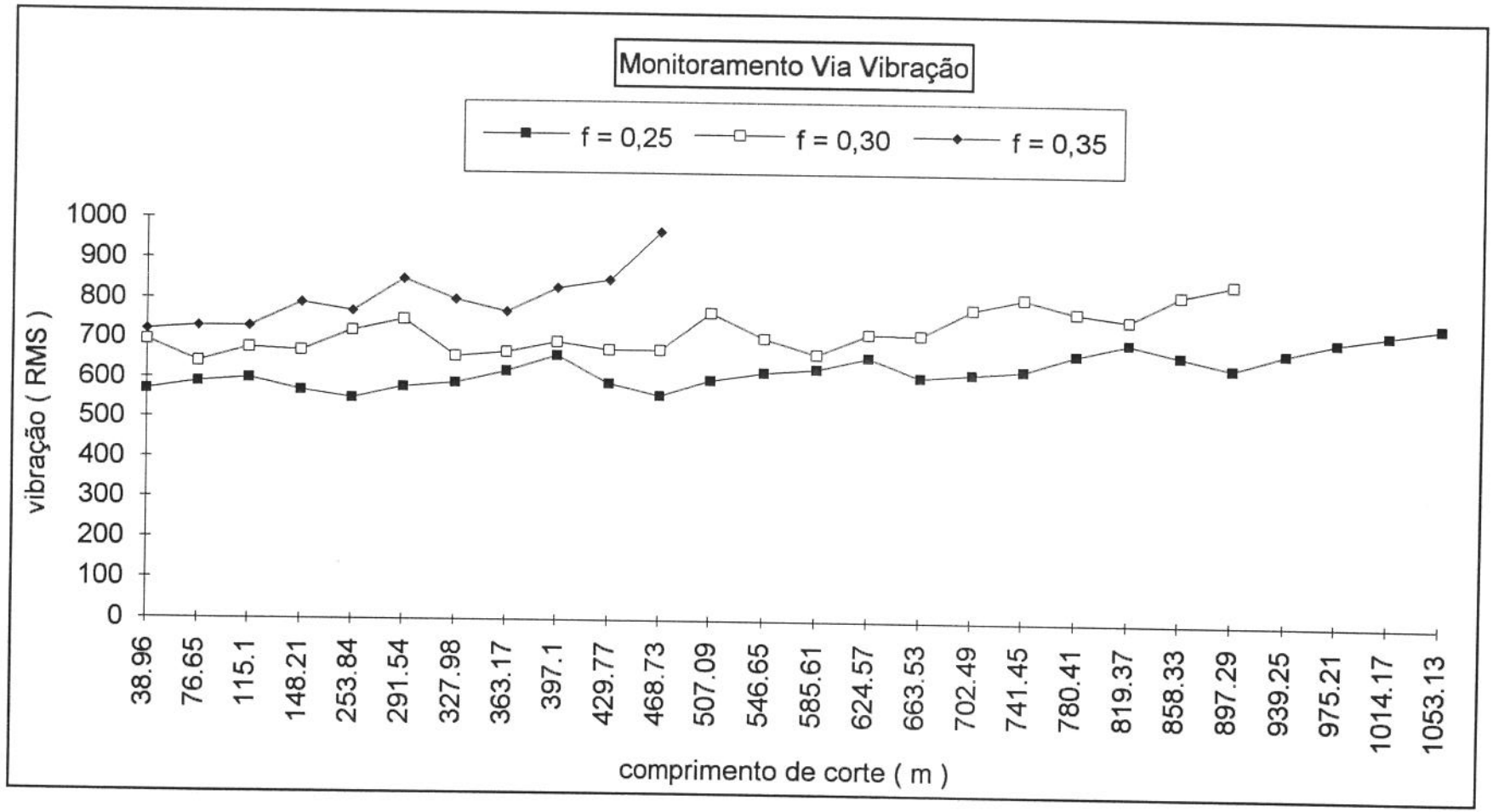


Figura 5.6 - Vibração x Comprimento de Corte, p/ Três f (mm/v) distintos e Vc = 200 m/min.

Foi feita uma outra tentativa para se utilizar a vibração para o estabelecimento do fim da vida da ferramenta. Tentou-se comparar a relação entre os valores do RMS da vibração quando V_B era 0,8 mm e o valor do RMS da vibração no início da vida da ferramenta (valor médio entre os valores das três primeiras peças torneadas), que dá uma idéia do crescimento da vibração ao longo da vida da ferramenta (este parâmetro foi chamado CV - Crescimento da Vibração). A tabela 5.3 mostra o resultado desta avaliação. Pode-se constatar daí que também este parâmetro não pode ser utilizado para a determinação do fim da vida, já que ele varia de um mínimo de 1,086 (crescimento de 8,6 % do sinal de vibração) a um máximo de 1,4 (crescimento de 40 % do sinal).

Tabela 5.3 - Fator de Crescimento da vibração (CV) nas Diversas Condições de Usinagem Ensaiadas.

v_c (m/min.)	f (mm/v.)	RMS (V_B = 0,8 mm)	RMS (início de vida)	CV
150	0,30	630	580	1,086
200	0,30	780	670	1,16
250	0,30	1.200	860	1,40
200	0,25	710	590	1,20
200	0,35	830	727	1,14

Com o intuito de se utilizar a vibração para o estabelecimento do fim da vida da ferramenta, uma última tentativa foi realizada. Pensou-se que algum sinal de ruído com alta energia estivesse escondendo os sinais de vibração da ferramenta. Para se verificar isto, construiu-se vários espectros de frequências (utilizando-se a transformada rápida de Fourier - FFT) dos sinais dos diversos ensaios em três estágios da vida da ferramenta (início de vida, vida intermediária e fim de vida da ferramenta). As figuras 5.7 e 5.8 mostram alguns destes espectros.

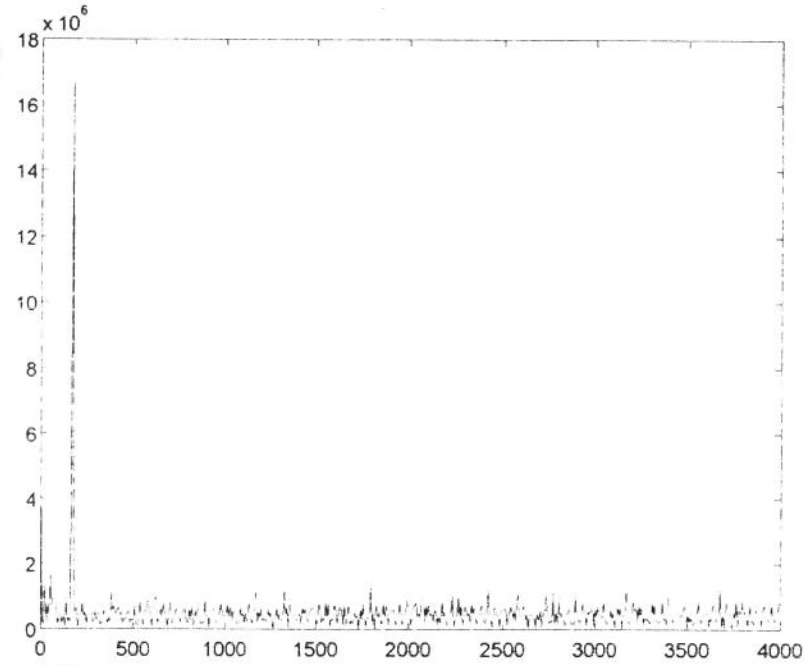
Pode-se ver nestas figuras (e em todos os outros espectros de frequências construídos, mas não mostrados), que existe um sinal de alta amplitude abaixo de 500 Hz, que não tem nada a ver com o processo (provavelmente é um ruído proveniente da instrumentação) e que poderia, por sua alta energia, ter mascarado os resultados realmente provenientes do processo. Assim, todos os sinais de vibração de todos os ensaios passaram por um filtro passa-alta, com frequência de corte de 500 Hz e depois tiveram seus valores de RMS calculados. Com isso, pôde-se construir os gráficos de RMS da vibração X comprimento de corte para os sinais filtrados. Estes resultados estão mostrados nas figuras 5.9 (com valores diferentes de velocidade de corte) e 5.10 (com valores diferentes de avanço).

Mesmo nestas figuras pode-se ver que a vibração continua não sendo muito influenciada pelo desgaste da ferramenta (seu comportamento é muito semelhante à vibração sem nenhum filtro). Além disto, a vibração não é capaz de perceber o momento em que a taxa de desgaste muda abruptamente estabelecendo o momento que a ferramenta deve ser substituída. Assim, depois de mais esta tentativa, concluiu-se que a vibração da ferramenta não é um bom parâmetro para se estabelecer indiretamente o fim da vida da ferramenta em operações de torneamento em desbaste com ferramentas de metal duro recobertas.

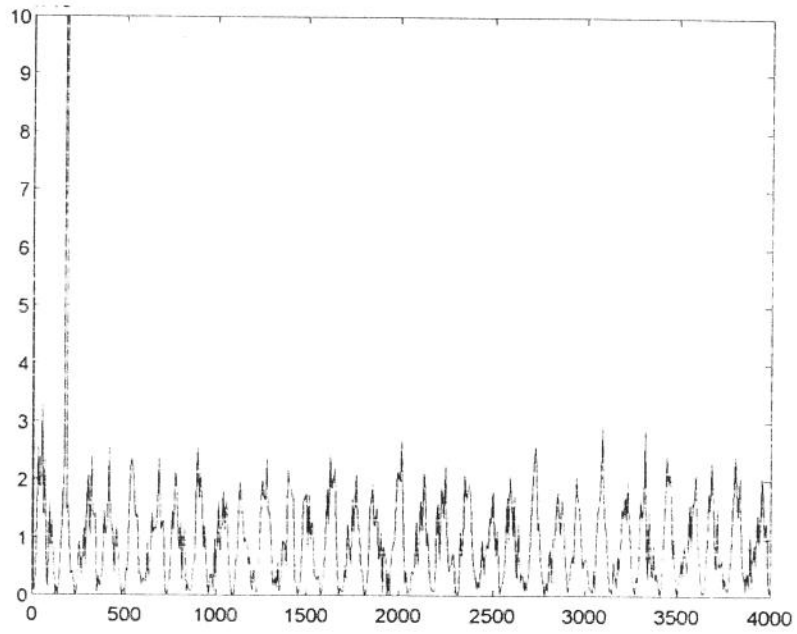
É interessante se comparar estes resultados com aqueles conseguidos por (Bonifácio 1.993) quando da usinagem do aço 4340 em operações de torneamento em acabamento, com ferramentas recobertas. Este autor utilizou a mesma máquina, o mesmo sensor de vibração, o mesmo material de ferramenta recoberta, mudando somente as condições de usinagem (típicas de acabamento) e a ferramenta (também recomendada para operaçòes de acabmento). Contudo, como já citado anteriormente neste trabalho, ele verificou que o sinal de vibração não é muito sensível ao crescimento do desgaste da ferramenta em seus estágios iniciais, mas é bastante sensível na percepção do momento em que a ferramenta perde sua camada de cobertura e, com isso, tem sua taxa de desgaste aumentada bruscamente. Assim, Bonifácio concluiu que, para torneamento em acabamento com ferramentas recobertas, a vibração é um bom meio de se estabelecer o fim da vida da ferramenta.

Dado o exposto acima, fica a pergunta : por que em operações de desbaste o mesmo não aconteceu ?

Não se conseguiu detectar claramente a resposta a esta pergunta, mas o que se suspeita é que devido ao aumento das condições de usinagem, tornando o corte mais pesado, as forças de corte cersceram absolutamente, crescendo também absolutamente a vibração da ferramenta. Assim, um aumento absoluto da vibração no fim da vida da ferramenta se torna relativamente pequeno, não podendo ser detectado.



Início de corte.

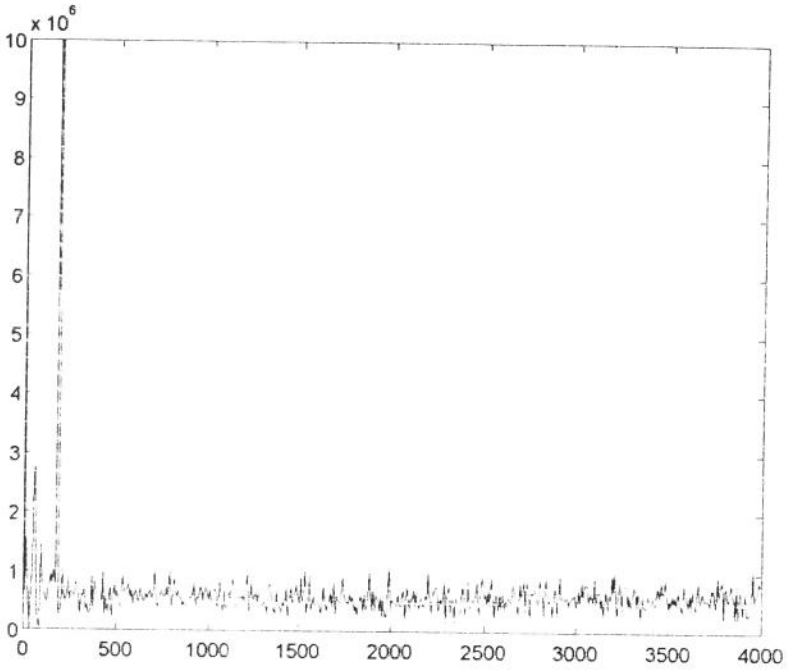


Fim de Vida

Figura 5.7 - Gráficos da FFT apresentando inicio e fim da vida da ferramenta.

v_c = 200 m/min.	f = 0,30 mm/v.	ap = 2 mm.

Início de Vida.



Fim de Vida.

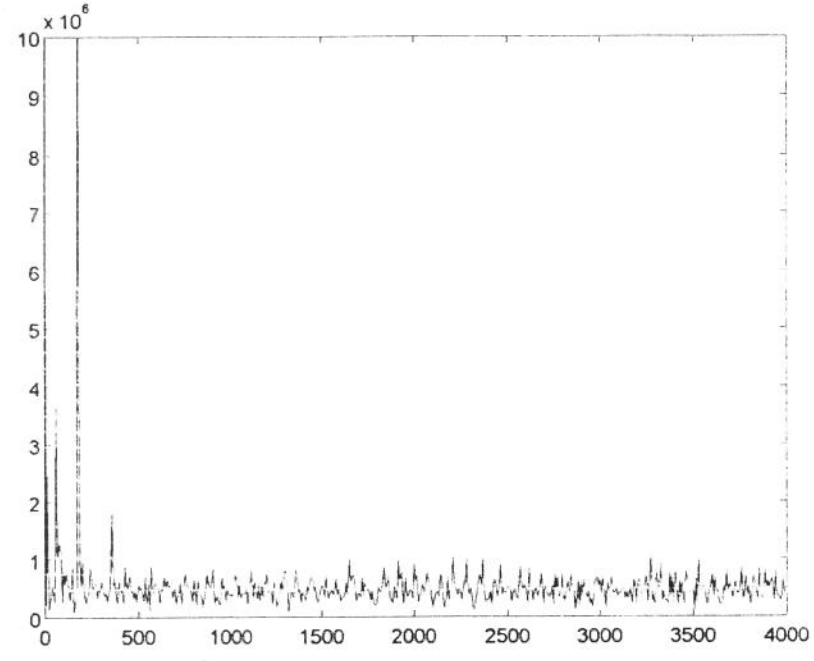


Figura 5.8 - Gráficos da FFT apresentando início e fim da vida da ferramenta.

Vc = 200 m/min.	f = 0,25 mm/v.	ap = 2 mm.

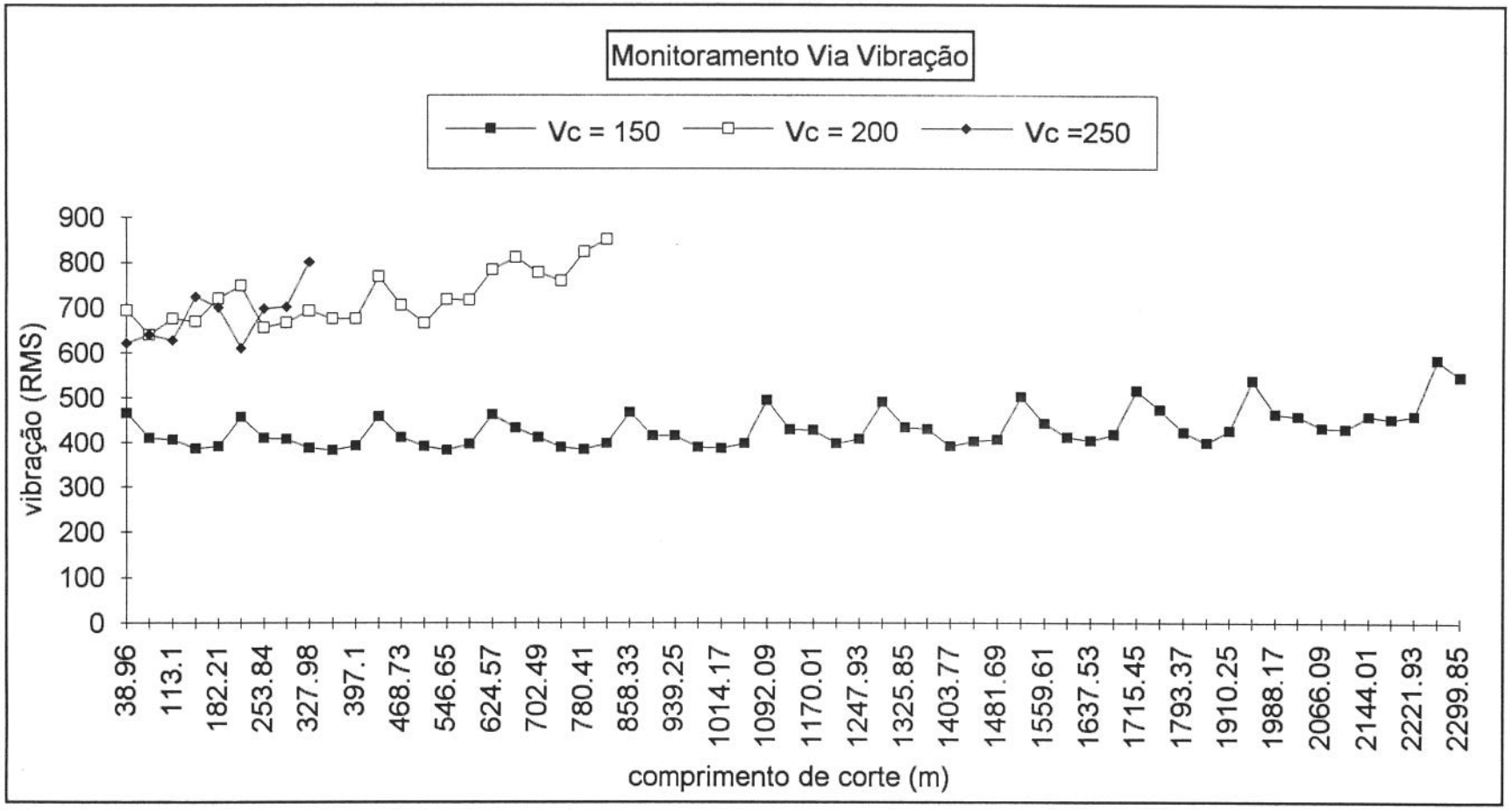


Figura 5.9 - Vibração x Comprimento de Corte, P/ Três Vc (m/min.) Distintas e f = 0,30 mm/v.

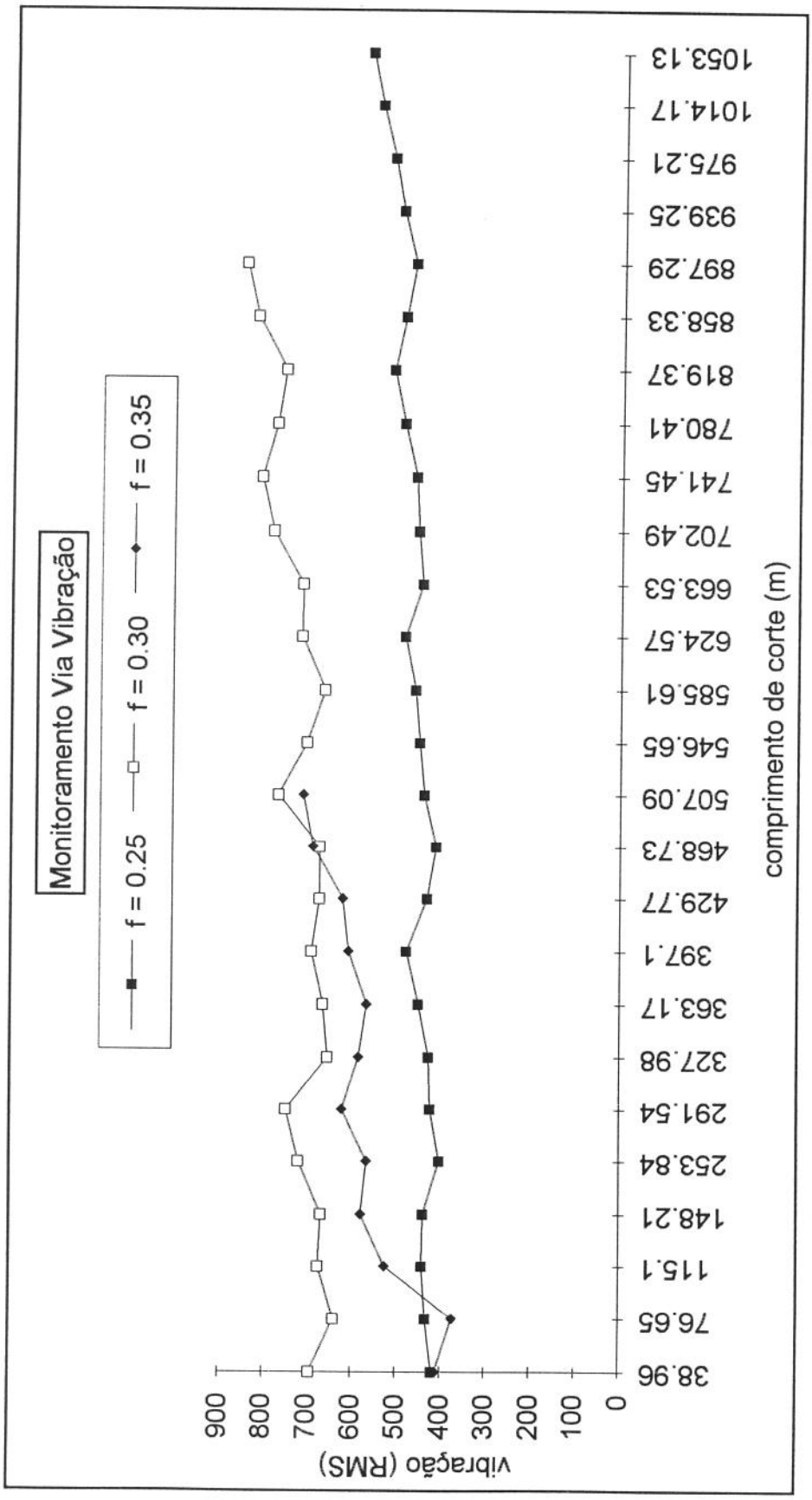


Figura 5.10 - Vibração x Comprimento de Corte, P/ Três f (mm/v.) Distintos e Vc = 200 m/min.

5.3 - ENSAIOS DE REPETIBILIDADE.

Como já citado no capítulo 4, o ensaio com v_c = 200 m/min. e f = 0,30 mm/v foi repetido três vezes (intercaladas aos ensaios regulares) a fim de se testar a repetibilidade do monitoramento dos parâmetros medidos.

Assim, a figura 5.11 mostra os valores da corrente elétrica do motor principal X comprimento de corte e a figura 5.12 mostra os valores da vibração da ferramenta X comprimento de corte para os três ensaios citados acima.

Pode-se ver nestas figuras que cada uma de suas curvas progridem bastante juntas e se dispersam no fim da vida da ferramenta.

Isto mostra que o monitoramento destes parâmetros é confiável, já que eles se repetiram nas três replicações do ensaio e que a vida da ferramenta apresenta uma dispersão acentuada o que demonstra a necessidade do uso de algum tipo de monitoramento para o estabelecimento de seu término.

Se a dispersão da vida da ferramenta fosse pequena, não seria necessário o monitoramento de nenhum parâmetro para a determinação de seu término, bastando para isto estabelecer-se um valor médio de vida da ferramenta baseado nos valores de alguns ensaios prévios.

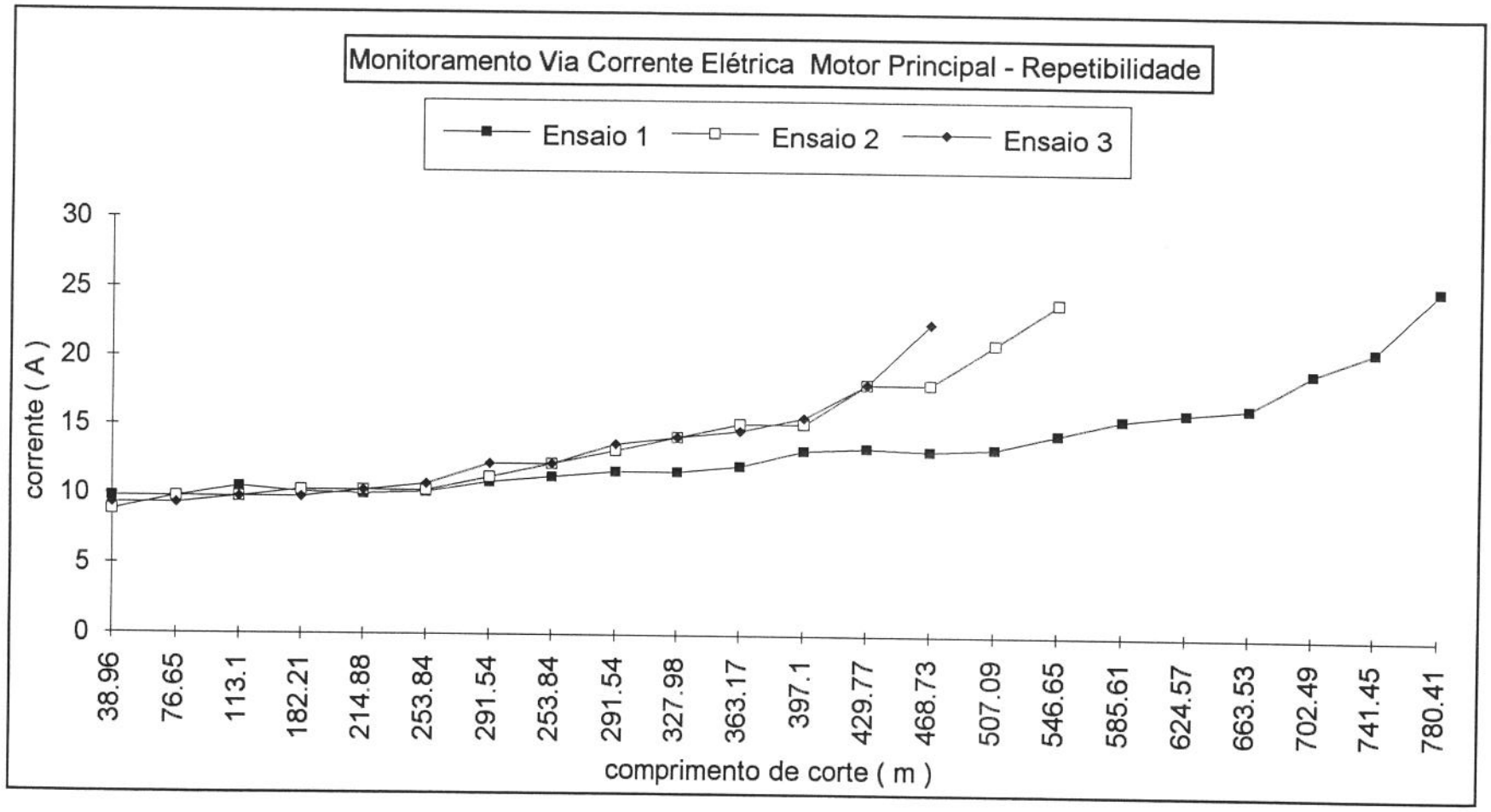


Figura 5.11 - Corrente Elétrica x Comprimento de Corte, p/ Três f = 0,30 mm/v. e Vc = 200 m/min. constantes

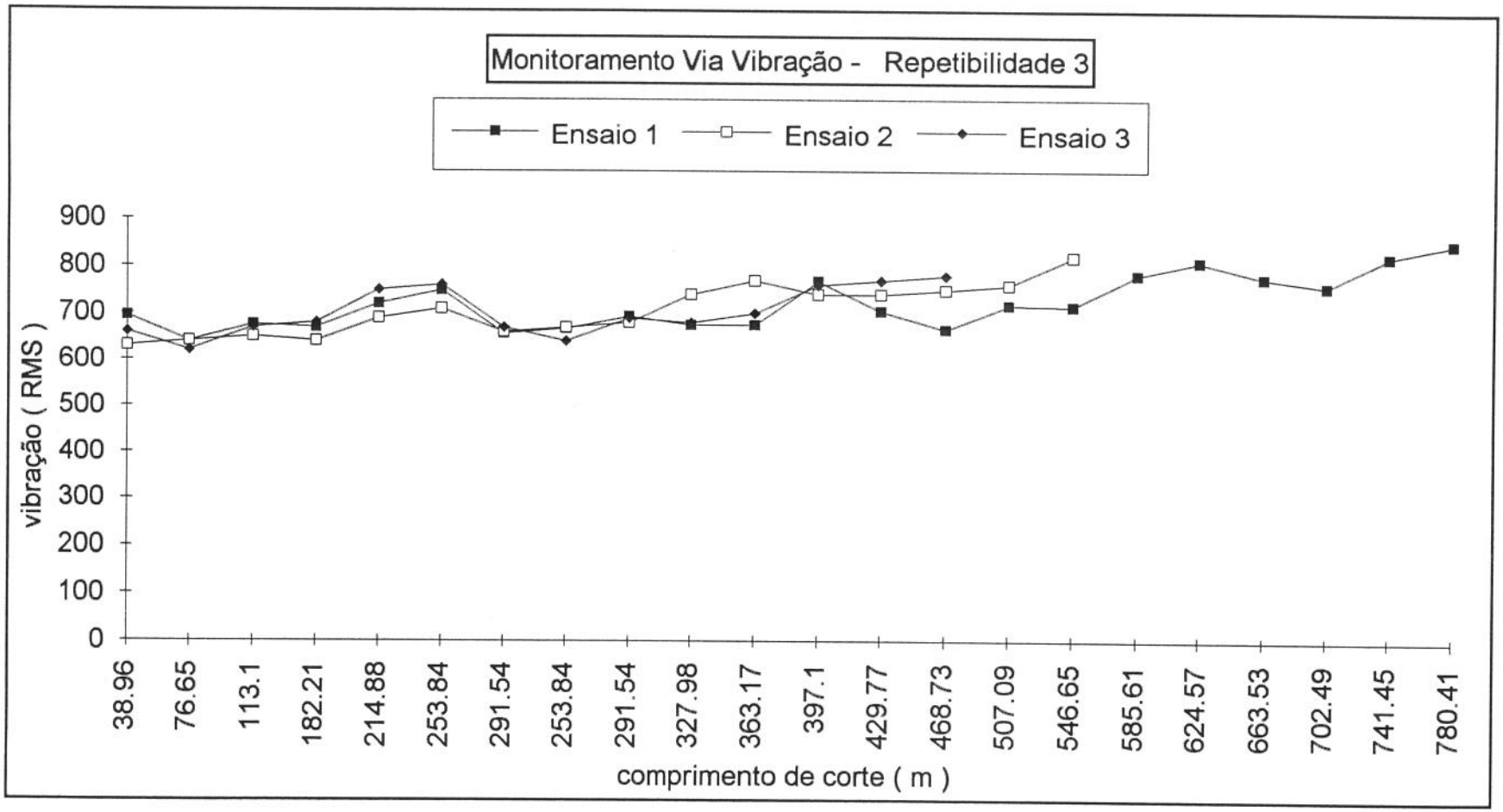


Figura 5.12 - Vibração x Comprimento de Corte, p/ Três f = 0,30 mm/v. e vc = 200 m/min. Constantes

CAPÍTULO - 6
CONCLUSÕES E SUGESTÕES.

6.1 - CONCLUSÕES.

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir, para operações de torneamento em desbaste de aço ABNT 4340 com ferramentas de metal duro recobertas, que :

A). A variação da inclinação da curva de corrente elétrica de armadura do motor principal da máquina x comprimento de corte consegue acompanhar o crescimento do desgaste da ferramenta e também perceber o momento em que a taxa de desgaste da ferramenta aumenta abruptamente, sendo então um bom parâmetro para o estabelecimento do fim da vida da ferramenta;

B). Utilizar-se de um valor fixo de corrente elétrica para o estabelecimento do fim da vida da ferramenta em quaisquer condições de usinagem não se mostrou ser um bom procedimento para o estabelecimento do fim da vida da ferramenta;

C). O monitoramento da vibração da ferramenta não é um bom método para o estabelecimento do fim de sua vida. Vários procedimentos foram testados usando os sinais de vibração, como a variação da inclinação da curva RMS da vibração X comprimento de corte (sem filtragem), comparação entre os valores do RMS da vibração no início e no fim da vida da ferramenta (sem filtro) e também a filtragem do sinal excluindo os ruídos provenientes da instrumentação, mas nenhum deles se mostrou eficiente para o estabelecimento do fim da vida da ferramenta.

6.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

Muito ainda deixou de ser estudado com relação ao monitoramento do processo de torneamento em desbaste. Então, como sugestão para trabalhos futuros, tem-se :

A). Análise dos sinais de vibração da ferramenta utilizando-se outras técnicas como redes neurais e "wavelets";

B). Construção de um sistema que possibilite o controle da operação em tempo real, baseado nos sinais de corrente elétrica do motor principal da máquina-ferramenta. Tal sistema deve analisar os sinais em tempo real (enquanto outros sinais estão sendo armazenados), decidir qual é o momento de troca da ferramenta e informá-lo à máquina CNC, a fim de que esta processe a troca da ferramenta;

C). Verificar a viabilidade de outros tipos de sensores para o mesmo fim, como os de emissão acústica, de força e de temperatura de corte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Ashok, H. e Kline, W. A. : O Uso de Trandutores de Força em Uusinagem com Tornos de CNC, Máquinas e Metais, pp 21, agosto, (1.994).

- Archinov, V., Alexiev, G. : Coupe Desmetaux Oultils de Coupe, Ed. Mr. Moscou, (1.972).

- Akihiko, N. e Fujita, S. : Development of a Cutting Tool Failure Detector, Bull, Japan Soc. of Prec. Eng., vol. 23, pp. 134 - 139, (1.989).

- Agostinho,O. L., Rodrigues, A.C., Lirani, J. : Principios de Engenharia de Fabricação Mecânica - Processos de Fabricação, Escola de engenharia de São Carlos, USP, vol. 2, pp 141 - 180, (1.981).

- Bonifácio, M. E. R. : Monitoramento do Processo de Torneamento de Acabamento Via Sinais de Vibração Dissertação de Mestrado, DEF - FEM - UNICAMP, (1.993).

- Braga, D. U. : Monitoramento do Processo de Torneamento Via Parâmetros Elétricos do Motor da Máquina, Tese de Mestrado, DEF - FEM - UNICAMP, (1.992).

- CAD 12 / 36 : Manual do Usuário e de Referência Linx - Tecnologia Eletrônica, (1.990).

- Coll, B. : Dépots par Voi e Thermochimique (C.V.D.) et Difusion desmétaux, ATTT, CETTIM, Senils, pp. 83 - 104. (1989).

- Cosidine, M. D. , Ross, D. S.. : Handbook of Apllieed instrumentation, MacGraw - Hill, New York, (1.964).

- Dan, L.., Mathew, J. : Tool Wear Failure Monitoring Techiques for Turning, Int. J. Mach. Tools Manuf., vol 30, pp 579 - 598, (1.990).

- Ferraresi, D. : Fundamentos da Usinagem dos Metais, São Paulo, Ed. Edgard Blucher Ltda. (1970).

- Gabor, H. : Novos Revestimentos para Ferramentas, Máquinas e Metais, pp.62 - 65. (junho 1.989).

- Giusti, F., Santochi, M. : Development of a Fibre Optic Sensor for in Process Mesurement of Tool Flanc Wear Proc. 20 th MTDR, PP. 351 - 360, (1979).

- Hanasaki, K. : T ool Wear Coated Tools When Machining a High Nickel Alooy, Annals of the Cirp, vol 39, pp 77 - 80 (1.990).

- Industrias Romi S.A. : Manual de Programação, Manual num. 397938, pp. 80 - 83 (1.992).

- Inasaki, I. , Yonetsu, S. : In Process Detection of Cuting Tool Damege by Acoustic Emission Mesurement, Proc.22 th IMTDR, pp. 261 - 268, (1.981).

- Jacobsen, L. , Ayre, R. : Engieneering Vibrations With aplications to Strutures and Machinery, Macgraw - Hill, New York, (1.956).

- Jiang, Y. C. , Xu, J. H. : In Process Monitoring of Tool Wear Stage by Method, Annals of the C.I.R.P., vol. 36, pp. 48 - 52, (1.987).

- Lee, L.C. et all : On the Correation Beteween Cuting Force and Tool Wear, Int. J. Mach. Tools Man., vol.29, pp. 295 - 303, (1.989).

- Lister P. M., Barrow, G. : Tool Condition Monitoring ystem, Proc. of 26 th IMTDR, pp. 271 - 288, (1986).

- Mann, A. M. , Broms, S. : Monitoring and Adaptative Control of Cuting Process by Motor Power and Current Measurement, Annals of the CIRP., vol. 38, (1.989).

- Martin, P., Mutel, B., Drapier, J. D. : Influence of Lathe Tool Wear on the Vébrations sustened in Cutting operations, Proc. of the 15 th IMTDR, pp. 251 - 274, (1.974).

- Micheletti, G. F. et al : In Process Tool Wear for Cutting, Annals of the CIRP, pp 483 - 496, (1.976).

- Novaski, O. : Materiais para Ferramentas, Universidade estadual de Campinas, abril (1.990).

- Novaski, O. : Determinação das Condições Econômicas da Usinagem através de Parâmetros Obtidos na Indústria, Tese de Doutoramento, DEF - FEM - UNICAMP. (1.989).

- Novaski, O. : Uma Contribução ao Estudo das Condições Econômicas de Usinagem, Tese de Mestrado, DEF - FEM - UNICAMP (1.98).

- Novaski, O. : Custos da Usinagem, Centro de Tecnologia UNICAMP, num.12. (1990).

- Pal, R. : Control and Monitoring of a Froth Flotation Colunn Usining a Personal Computer, Masling, J. Transist Meas control, vol 13 n. 1 pp 2 - 10 (1.991).

- Pandit, S. M. : Variation Friction coeficient With Tool Wear, vol 84, pp 65 - 79,(1.983).

- Piere, J. P. e Vinterholler, O. : Revestidas por CVD ou PVD, as Ferramentas tem Vida Melhor, Máquinas e Metais, pp 68 - 79, setembro (1.994).

- Sampath, A., Vajpayee, S. : Tool Health Monitoring Usining Acoustic Emission, I,t. J. Prod., vol 25, pp. 703 - 719, (1987).

- Sandivik,Coromant : Herramientas y Plaquitas para tornear, Catálogo Geral. (1.991).

- Santa, M. D. : Estudo da Modelagem Matemática para Otimização das Condições de Usinagem, Tese de Doutoramento, DEF - FEM - UNICAMP, (1.989).

- Sarmah, B. P., Khare, M. K. : Some Investigation of Wear Mechanisms os Widalon Carbide Inserts Machining en 24 (317 M 40) Steel, Wear vol. 127 pp. 229 - 240. (1988).

- Shaw, M. C. : Metal Cutting Principles, Clarendon Press - Oxford, (1.968).

- Shu N. P. : New Theories of Wear and Their Implications for Tool Material, Wear vol. 62 pp. 1-20 (1.980).

- Shiaraishi, M. : Scop of in - Process Measurement, Monitoring and control Thechniques in Machining Process - Part 1 : In - Process Techniques for Tools, pp 179 - 189.,(1988).

- Soisson, H. E. . : Instrumentação Industrial, Edit. Hemus, São Paulo - S. P., (1.985).

- Stein, J. L.. : SHIN, K. C. : Current Monitoring of field Controlled DC Spindle Drivers, Journal of Dinamic Systems, Measurement, and Control, vol. 108, pp. 289 - 295, (1.986).

- Tanguy, J. C. : Monitoração Automática da Usinagem : Como e Porque, CETIM, Senlis (França), tradução Lima, N. P, Máquinas e Metais,fevereiro, (1.993).

- Takeyama, Y. et all : Sensors of Tool Life for Optimization of Machining, Proc. of 18 th IMTDR, pp 191 - 208, (1.967).

- Teti, R. , Micheletti, G. F. : Tool wear Monitoring Though acoustic Emission, Annals of the C.I.R.P., vol. 38, pp. 99 - 102, (1.989).

- Thonsom, W. : Teoria da Vibração, Ed. Interciência, (1.978).

- Toshiba Tungaloy CO. Ltda : Turning & Boring Tools, pp 6 - 19 (1989).

- Tlusty, G., Andrews,C. : A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining, Annals of the C.I.R.P. vol 33, pp 563 - 572, (1.983).

- Uehara, K. : New attempts fot short time Tool-life Testing Annals of the CIRP., vol 22, pp. 23 - 24, (1.993).

- Kakino, Y. : Monitoring of Metal Cutting and Grinding Process by Acoustic Emission, Journal of Acoustic emission, vol 3 pp 108 - 116, (1984).

- Kovan, V. : Fundamentals of Process Engeneering, Mr Publishrs , Moscou, (1.973).

- Kistler Instrument Corperation. : Operations Instrumenctions, New York, USA, (1.985).

APÊNDICE.

Como já comentado neste trabalho, a cada dia a informática tem participado ativamente do desenvolvimento técnico / ciêntífico propiciando por meio de equipamentos cada vez mais sofisticados a elaboração de experimentos com respostas também cada vez mais confiáveis. Um exemplo prático foi o desenvolvimento deste trabalho. Para tanto utilizou-se de computadores estando listados na sequência os programas utilizados.

A). APÊNDICE - A - Valores numérico dos sinais vibração e corrente elétrica do motor principal após tratamento por meio dos programas listados abaixo.

B). APÊNDICE - B - Programama utilizado para aquisitar os sinais de vibração e corrente elétrica do motor principal da máquina. (software pascal)

C). APÊNDICE - C- Programa utilizado para separar os sinais aquisitados agora em valores numérico em colunas formando assim a matriz que possibilitou o feitio dos gráficos. (software matlab e exel)

APÊNDICE - A

VALORES NUMÉRICOS

TABELA -1

Monitoramento da Usinagem Via Parâmetros Elétricos e Via Vibração

Operação de Desbaste em Torneamento

Máquina = Torno Cosmos - 30

Ferramenta = TNMG 160408 - QM, GC 435

Material Usinado = Aço SAE 4340

Diâmetro Inicial = 62 / Diâmetro Final = 52

Lc = Comprimento de Corte em Metro

Cp = Corrente do Motor Principal da Máquina

Vi = Vibração da Ferramenta em RMS

Desgaste = Desgaste Frontal da Ferramenta em mm

Ensaio = 172 / 235 A

f = 0,30mm/volta

Vc = 150m/min.

ap = 2mm

Lc (m)	Cp (A)	Vi (RMS)	Desgaste (mm)
38,96	9,8	630	
76,65	9,8	560	
113,1	9,8	550	
148,28	9,8	530	
182,21	9,8	520	
214,88	9,8	530	
253,84	9,8	620	0,1
291,54	9,8	560	
327,98	10,29	560	
363,17	9,8	530	
397,1	9,8	520	
429,77	9,8	540	
468,73	10,29	630	
507,69	10,29	560	
546,65	10,29	530	0,15
585,61	10,29	520	
624,57	10,78	540	
663,53	10,78	630	
702,49	10,29	590	
741,45	10,29	560	0,25
780,41	11,27	530	
819,37	10,78	520	
858,33	11,27	540	
897,29	10,78	640	
939,25	10,78	570	
975,21	10,78	570	

1014,17	11,76	530				
1053,13	11,27	530	0,35			
1092,09	11,27	540				
1131,05	11,76	670				
1170,01	12,74	580				
1208,97	11,76	580				
1247,93	12,25	540	0,4			
1286,89	12,25	560				
1325,85	12,74	670	0,45			
1364,81	12,25	590				
1403,77	13,72	590				
1442,73	13,72	530				
1481,69	13,23	550				
1520,65	13,72	500	0,5			
1559,61	14,21	690				
1598,57	15,68	600				
1637,53	15,19	560	0,7			
1676,49	15,19	550	0,8			
1715,45	15,68	570	0,9			
1754,41	15,68	700				
1793,37	17,64	650				
1832,33	17,15	560	1			
1910,25	17,15	540				
1949,21	17,15	580	1,2			
1988,17	17,64	730				
2027,13	21,56	630				
2066,09	21,56	630				
2105,05	22,01	590				
2144,01	26,95	630				
2182,97	27,44	620				
2221,93	26,95	630				
2260,89	27,44	800				
2299,85	28,05	750				

TABELA -2

Monitoramento da Usinagem Via Parâmetros Elétricos e Via Vibração

Operação de Desbaste em Torneamento

Máquina = Torno Cosmos - 30

Ferramenta = TNMG 160408 - QM, GC 435

Material Usinado = Aço SAE 4340

Diâmetro Inicial = 62 / Diâmetro Final = 52

Lc = Comprimento de Corte em Metro

Cp = Corrente do Motor Principal da Máquina

Vi = Vibração da Ferramenta em RMS

Desgaste = Desgaste Frontal da Ferramenta em mm

Ensaio = 237 / 257 B

f = 0,30mm/ volta

Vc = 200m/min

Ap = 2mm

Lc (m)	Cp (A)	Vi (RMS)	Desgaste (mm)
38,96	9,81	694	
76,65	9,8	640	
113,1	10,53	676	0,1
182,21	10,14	669	
214,88	10,04	720	
253,84	10,19	749	0,15
291,54	10,92	656	
253,84	11,31	667	
291,54	11,71	693	0,2
327,98	11,71	675	
363,17	12,15	675	
397,1	13,27	769	0,35
429,77	13,47	705	
468,73	13,27	666	
507,09	13,47	718	0,5
546,65	14,55	716	
585,61	15,63	783	
624,57	16,17	811	1
663,53	16,56	777	1,2
702,49	19,15	759	
741,45	20,77	823	
780,41	25,23	851	

TABELA -3

Monitoramento da Usinagem Via Parâmetros Elétricos e Via Vibração

Operação de Desbaste em Torneamento

Máquina = Torno Cosmos - 30

Ferramenta = TNMG 160408 - QM, GC 435

Material Usinado = Aço SAE 4340

Diâmetro Inicial = 62 / Diâmetro Final = 52

Lc = Comprimento de Corte em Metro

Cp = Corrente do Motor Principal da Máquina

Vi = Vibração da Ferramenta em RMS

Desgaste = Desgaste Frontal da Ferramenta em mm

Ensaio = 106 / 134 C

f = 0,25mm/volta

Vc = 200m/min.

Ap = 2mm

Lc (m)	Cp (A)	Vi (RMS)	Desgaste (mm)
38,96	8,82	570	
76,65	9,31	590	
113,1	9,31	600	
148,28	9,8	570	0,15
182,21	9,8	550	
214,88	9,8	580	
253,84	9,8	590	0,2
291,54	9,8	620	
327,98	10,29	660	
363,17	10,29	590	0,3
397,1	11,27	560	
429,77	11,27	600	
468,73	11,76	620	0,35
507,69	11,76	630	
546,65	12,74	660	
585,61	12,74	610	0,4
624,57	13,72	620	
663,53	14,21	630	
702,49	14,7	670	0,6
741,45	15,68	700	
780,41	16,66	670	
819,37	17,15	640	0,75
858,33	18,62	680	
897,29	19,6	710	
939,25	21,07	730	0,9
975,21	21,56	750	

TABELA - 4

Monitoramento da Usinagem Via Parâmetros Elétricos e Via Vibração

Operação de Desbaste em Torneamento

Máquina = Torno Cosmos - 30

Ferramenta = TNMG 160408 - QM, GC 435

Material Usinado = Aço SAE 4340

Diâmetro Inicial = 62 / Diâmetro Final = 52

Lc = Comprimento de Corte em Metro

Vi = Vibração da Ferramenta em RMS

Desgaste = Desgaste Frontal da Ferramenta em mm

Ensaio = 258 / 272

D

f = 0,30mmvolta

Vc = 200m/min.

Ap = 2mm

Lc (m)	Cp (A)	Vi (RMS)	Desgaste (mm)
38,96	9,31	660	
76,65	9,31	620	
113,1	9,8	670	0,1
148,28	9,8	680	
214,88	10,29	750	
253,84	10,78	760	0,15
291,54	12,25	670	
327,98	12,25	640	
363,17	13,72	690	0,5
397,1	14,21	680	
429,77	14,7	700	
468,73	15,68	760	0,8
507,69	18,13	770	1,2
546,65	22,54	780	

TABELA - 5

Monitoramento da Usinagem Via Parâmetros Elétricos e Via Vibração

Operação de Desbaste em Torneamento

Máquina = Torno Cosmos - 30

Ferramenta = TNMG 160408 - QM, GC 435

Material Usinado = Aço SAE 4340

Diâmetro Inicial = 62 / Diâmetro Final = 52

Lc = Comprimento de Corte em Metro

Cp = Corrente do Motor Principal da Máquina

Vi = Vibração da Ferramenta em RMS

Desgaste = Desgaste Frontal da Ferramenta em mm

Ensaio = 163 / 171

E

f = 0,30mm/volta

Vc = 250m/min.

Ap = 2mm

Lc (m)	Cp (A)	Vi (RMS)	Desgaste (mm)
38,96	9,8	850	
76,65	9,8	870	
113,1	10,29	860	
148,28	10,29	990	
182,21	12,25	860	
214,88	14,7	830	
253,84	17,66	950	
291,54	19,6	960	
327,98	21,56	1090	

TABELA - 6

Monitoramento da Usinagem Via Parâmetros Elétricos e Via Vibração

Operação de Desbaste em Torneamento

Máquina = Torno Cosmos - 30

Ferramenta = TNMG 160408 - QM, GC 435

Material Usinado = Aço SAE 4340

Diâmetro Inicial = 62 / Diâmetro Final = 52

Lc = Comprimento de Corte em Metro

Cp = Corrente do Motor Principal da Máquina

Vi = Vibração da Ferramenta em RMS

Desgaste = Desgaste Frontal da Ferramenta em mm

Ensaio = 148 / 162

f = 0,30mm/volta

Vc = 200m/min.

Ap = 2mm

Lc (m)	Cp (A)	Vi (RMS)	Desgaste (mm)
38,96	8,82	630	
76,65	9,8	640	
113,1	9,8	650	0,2
148,28	10,29	640	
182,21	10,29	690	
214,88	10,29	710	0,3
253,84	11,27	660	
291,54	12,25	670	
327,98	13,23	680	0,5
363,17	14,21	740	
397,1	15,19	770	
429,77	15,19	740	0,8
468,73	18,13	740	
507,69	18,13	750	1,2
546,69	21,07	760	
585,61	24,05	820	

TABELA - 7

Monitoramento da Usinagem Via Parâmetros Elétricos e Via Vibração

Operação de Desbaste em Torneamento

Máquina = Torno Cosmos - 30

Ferramenta = TNMG 160408 - QM, GC 435

Material Usinado = Aço SAE 4340

Diâmetro Inicial = 62 / Diâmetro Final = 52

Lc = Comprimento de Corte em Metro

Cp = Corrente do Motor Principal da Máquina

Vi = Vibração da Ferramenta em RMS

Desgaste = Desgaste Frontal da Ferramenta em mm

Ensaio = 135 a 147

f = 0,35 mm/volta

Vc = 200 m/min.

Ap = 2 mm

Lc (m)	Cp (A)	Vi (RMS)	Desgaste (mm)
38,96	10,29	720	
76,65	11,27	730	
113,1	12,25	730	0,1
148,28	14,21	790	
182,21	15,19	770	
214,88	16,66	850	0,25
253,84	18,13	800	
291,54	20,58	770	
327,98	23,03	830	0,4
363,17	24,5	850	
397,1	24,5	970	1

APÊNDICE B.

Programa utilizado para aquisição dos dados (sinais) de vibração (VI)
e corrente elétrica do motor principal da máquina (PE).

```
Program Tese_CARLOSCOSTA;

{ ================================================================================
}
{ =    Programacao basica da placa, uso do Timer e de DMA          = }
{ =                                                                 = }
{ =    Este programa esta' escrito na linguagem Turbo Pascal 5.0 e  = }
{ =    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. secundario da CAD12/36 - Reg. de Limite   }
      SecPonteiro =  1; { End. secundario da CAD12/36 - Ponteiro Memoria }
      SecComAD   =  2; { End. secundario 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=3072;

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

  Var CadCtr0  : word;       { Reg. Contador 0 da CAD12/36 }
    CadCtr1  : 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;

{ ================================================================== }
{ =      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);    { Endereco da Memoria de Canais }
  EscreveRegSecundario (SecMemoria,  Dado);       { Canal e Ganho correspondente  }
end;


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

Procedure AutoCalibracao;

begin
  EscreveRegSecundario (SecAutoCal, 0);
  Delay (300);
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 + G2+ 0); { memoria 0 com canal 3, unipolar e ganho 1 }
 EscreveMemcanais (1, Bipolar + G2+ 2);
 EscreveMemcanais (2, Bipolar + G2+ 3);
end;




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

Procedure AlocaBuffer;

  { =                                               = }
  { = Exemplo de Alocacao Dinamica de Memoria:      = }
  { = Esta rotina aloca um buffer de 32 K Bytes dentro de um  = }
  { = mesmo segmento de 64 K Bytes, ou seja, um buffer que    = }
  { = esteja contido em uma area cujo endereco esteja entre   = }
  { = i000h:0000h  e j000h:0000h (j=i+1 e i entre 0 e 0Fh.    = }
  { =                                               = }

  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 Endereco }
 Port[DMAUsado*2]:= (Seg(Buffer^) shr 4) and $ff; { Byte Mais  Signif. do Endereco }
 Port[succ(DMAUsado*2)]:= Lo(2*NAm-1);     { Byte menos Signif. da Contagem }
 Port[succ(DMAUsado*2)]:= (2*NAm-1) shr 8;  { Byte Mais  Signif. 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:FOT'+NUM+'.DAT';
     ASSIGN(ARQT,NOMEARQ);

     REWRITE(ARQT);
       FOR J:=1 TO Nam DO
        BEGIN
          STR((Buffer^[J]/16):7:1
          ,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);
     TEXTBACKGROUND(BLACK);
     TEXTCOLOR(WHITE);
     CLRSCR;
     WRITELN;
     WRITELN(' AQUISICAO DE DADOS PARA MONITORAR');
```

```
    WRITELN(' VIDA E DESGASTE DA FERRAMENTA  NO');
    writeln(' TORNEAMENTO VIA VI e PE.');
    writeln('canal 1 ---> SINAL DE PE, canal 2 --->vi.');
    writeln;
    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');
   writeln;
   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]/16) :7:1);
  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 DO TORNEAMENTO VIA VI e PE.');
  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 ;
  Writeln ('Mestrando: carlos eduardo costa');
  Writeln ('Orientador: Pr. Dr. Anselmo Eduardo Diniz');
  Writeln;
  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 enderecos de I/O da placa CAD12/36  }
  ProgramaTimer (0, 2,125);        { Programa Timer 0 no modo 2 e a 100 Hz = 2e6/20e3 }
  EscreveRegSecundario (SecRM, 0);     { Zera Registrador de Modo da CAD12/36          }
  AutoCalibracao;                  { Comando de Auto-Calibracao do Conversor A/D     }
  ProgramaMemoriaCanais;           { Programa a memoria de canais                    }
  EscreveRegSecundario (SecLimite, 2);  { Carrega numero de canais menos 1 no Reg. Limite  }
  EscreveRegSecundario (SecPonteiro, 0); { Zera Ponteiro da memoria de canais        }
  LimpaFIFO;                       { Limpa a memoria FIFO da CAD12/36               }
  ProgDMA;
  NUM_PECA;

  DELAY(1000);
  ColetaViaDMA;
  Arquivo;
  MostraDados;
  repeat until keypressed

end.
```

APÊNDICE C

```
clc;

w=input('ENTRE COM A QUANTIDADE DE ENSAIOS =  ');
m=input('ENTRE COM O NUMERO DE CANAIS :  ');
matriz=zeros(w,m);
for nun_arq=1:w
        format short;
        nun_arq
        s=input('ENTRE COMO NOME DO AQUIVO : ','s');
        fid=fopen(s);
        arq=fscanf(fid,'%f');

        j=1;
        i=1;
        n=input('ENTRE COM A QUANTIDADE DE PONTOS DE CADA CANAL =  ');
        if m==3
          while i<=((n*m)-(m-1)) & j<=n
                canal1(j)=abs(arq(i));    %canal-1 : aquisita corrente principal
                canal2(j)=abs(arq(i+1));  %canal-2 : aquisita corrente de avanco
                canal3(j)=arq(i+2);       %canal-3 : aquisita vibracao
                i=i+m;
                j=j+1;
          end
            matriz(nun_arq,1)=mean(canal1);
            matriz(nun_arq,2)=mean(canal2);
            matriz(nun_arq,3)=norm(canal3)/sqrt(n);
                  %CALCULO  DO COMPRIMENTO DE CORTE
            f=input('ENTRE COM O VALOR DO AVANCO [mm/volta] =  ');
            d(nun_arq)=input('ENTRE COM O VALOR DO DIAMETRO NO ENSAIO [mm] =  ');
            ap=input('ENTRE COM O VALOR DA PROFUNDIDADE DE CORTE [mm] =  ');
            lf=input('ENTRE COM O VALOR DO COMPRIMENTO USINADO [mm] =');
            lc(nun_arq)=pi*d(nun_arq)*lf/f
            if nun_arq ==1
                matriz(nun_arq,4)=lc(nun_arq);
            else
                matriz(nun_arq,4)=lc(nun_arq)+matriz(((nun_arq)-1),4);
            end;

            matriz
            disp(' cp_medio   ca_medio  vi_ rms   lc_soma');
            pause
        else if m==2
                  while i<=((n*m)-(m-1)) & j<=n
                        canal1(j)=arq(i);
```

```
                canal2(j)=arq(i+1);
                i=i+m;
               j=j+1;
            end
        else
            while i<=((n*m)-(m-1)) & j<=n
                canal1(j)=arq(i);
                i=i+m;
                j=j+1;
            end
        end
    end
end
```