

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Gilberto Walter
Arenas Miranda E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 19/12/97.

ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Uma Contribuição para Aplicações em Controle Adaptativo Otimizado no Torneamento

Autor : Gilberto Walter Arenas Miranda

Orientador: Nivaldo Lemos Coppini

12/97

199786

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

Uma Contribuição para Aplicações em Controle Adaptativo Otimizado no Torneamento

Autor :Gilberto Walter Arenas Miranda

Orientador: Nivaldo Lemos Coppini

Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Fabricação

Dissertação de Mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1997

S.P. - Brasil

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

Ar33c Arenas Miranda, Gilberto Walter
 Uma contribuição para aplicações em controle
 adaptativo otimizado no torneamento. / Gilberto Walter
 Arenas Miranda.--Campinas, SP: [s.n.], 1997.

 Orientador: Nivaldo Lemos Coppini
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

 1. Processo de fabricação. 2. Usinagem. 3. Máquinas
 - monitoramento. I. Coppini, Nivaldo Lemos. II.
 Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Mecânica. III. Título.

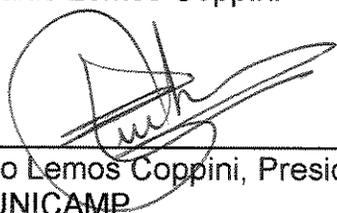
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

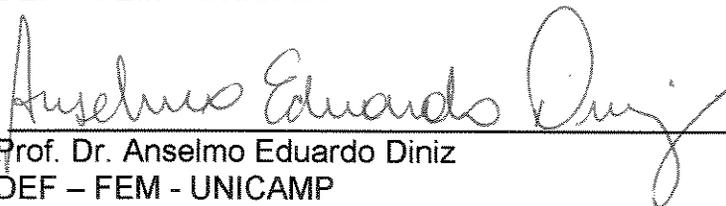
Uma Contribuição para Aplicações em Controle Adaptativo Otimizado no Torneamento

Autor : Gilberto Walter Arenas Miranda

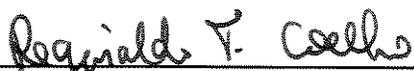
Orientador: Nivaldo Lemos Coppini



Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini, Presidente
DEF – FEM – UNICAMP



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
DEF – FEM - UNICAMP



Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho
EESC - USP

Campinas, 17 de dezembro de 1997

Dedicatória

À minha querida esposa Ana Terezinha e a meus filhos Ana Lydia, Ana Regina e Gilberto Walter.

Agradecimentos

Ao professor Dr. Nivaldo Lemos Coppini orientador deste trabalho, pela ajuda, auxílio, incentivo e amizade.

Aos órgãos financiadores CAPES e FINEP, o primeiro pela concessão de bolsa de estudos e o segundo pela aquisição do material necessário a elaboração dos ensaios experimentais.

Aos professores do DEF, Prof. Anselmo Eduardo Diniz, Prof. Antônio Batocchio, Prof. Olivio Novaski, Prof^a Maria Helena Robert, e Prof^a Roseana da Exaltação Trevisan, pela amizade e excelente clima de trabalho proporcionado.

Aos colegas de pós graduação, especialmente ao colega João Roberto Ferreira pela ajuda e auxílio prestados.

A todos os funcionários do DEF, pela colaboração para o sucesso deste trabalho.

A Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós Graduação e professores da Universidade de Taubaté (UNITAU), especialmente ao Prof. Milton de Freitas Chagas e Prof. Adalberto Vieira de Mattos pela ajuda, incentivo e amizade.

Resumo

ARENAS MIRANDA, Gilberto Walter, *Uma Contribuição para Aplicações em Controle Adaptativo Otimizado no Torneamento*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997. 100 p. Tese (Mestrado)

Este trabalho trata da proposta de metodologia que, tomando como base a vida da aresta de corte em termos de número de peças usinadas ou comprimento de corte, permite através da utilização de um sistema especialista a otimização de processo de usinagem, além de propiciar a determinação do melhor momento para a troca da aresta de corte. O sistema de monitoramento empregado utilizando sensores de força / potência de corte pode cumprir funções para tomada de decisões ou simplesmente de segurança. O número de peças ou comprimento de corte foram os critérios adotados para definir o momento de troca da aresta de corte. O trabalho permite concluir que a metodologia é adequada para ser utilizada em Controle Adaptativo Otimizado.

Palavras Chave

Otimização, Usinagem, Monitoramento

Abstract

ARENAS MIRANDA, Gilberto Walter, *A Contribution in Optimized Adaptive Control Application in Turning*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997. 100 p. Tese (Mestrado)

This work presents a proposed methodology to be applied for Optimized Adaptive Control. The methodology validity was done experimentally. The methodology based on the cutting edge tool life helps the user to find the optimized cutting speed with the aid of an expert system . Force and power sensors were used, first to help the user to determine the best moment to change the cutting edge and second as a safety system. The experiences carried out in the work allow to conclude that the proposed methodology is very adequate to be used for Optimized Adaptive Control.

Key words

Optimization, Machining, Monitoring

Sumário

	Página
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
NOMENCLATURA	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
2. DESGASTE E CRITÉRIO DE FIM DE VIDA DA FERRAMENTA	3
2.1 Evolução das Ferramentas / Mecanismos de Desgaste.....	3
2.2 Critério de fim de vida da aresta de corte.....	8
3. MONITORAMENTO DA USINAGEM DOS MATERIAIS	12
3.1 Introdução.....	12
3.2 Métodos Diretos de Monitoramento.....	14
3.2.1 Óptico.....	14
3.2.2 Radioatividade.....	15
3.2.3 Dimensão da Peça Usinada.....	15
3.2.4 Resistência Elétrica na junção Peça/Ferramenta.....	15
3.2.5 Distância Ferramenta/Peça.....	16
3.3 Métodos Indiretos de Monitoramento.....	16
3.3.1 Forças de Usinagem.....	16
3.3.1.1 Relação entre Força de Corte e o Desgaste da Ferramenta.....	17
3.3.1.2 Relação entre Força de Corte e Condições de Usinagem.....	17
3.3.1.3 Esforços de Corte e Quebra da Ferramenta.....	19

3.3.2 Parâmetros Elétricos da Máquina-Ferramenta.....	20
3.3.3 Via Emissão Acústica.....	21
3.3.3.1 Influência das Condições de Usinagem e da Geometria da Ferramenta nos Valores de E.A.....	24
3.3.3.2 Monitoramento do Desgaste e Quebra da Ferramenta via E.A.....	25
3.3.4 – Via Vibração.....	27
3.3.4.1 Influência das Condições de Usinagem na Estabilidade do Sistema	28
3.3.4.2 Montagem e Instrumentação.....	29
3.3.4.3 Análise do Sinal e Estratégia de Monitoramento do Desgaste.....	31
4. SISTEMAS DE MONITORAMENTO – APLICAÇÕES PRÁTICAS.....	34
4.1 Introdução.....	34
4.2 Comentários.....	41
4.3 Conclusão.....	43
5. TRABALHOS PRÉVIOS DE OTIMIZAÇÃO.....	44
5.1 Introdução.....	44
5.2 Trabalhos Prévios de Otimização.....	46
5.3 Inteligência Artificial.....	49
5.3.1 Introdução.....	49
5.3.2 Sistemas Especialistas (SEs).....	52
5.3.2.1 Composição dos SEs.....	52
5.3.2.2 Sistema Especialista de Usinagem – SEU.....	53
5.4 Conclusão.....	54
6. METODOLOGIA EXPERIMENTAL, RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
6.1 Aquisição de Dados.....	55
6.2 Máquina, Materiais, Ferramentas e Corpos de Prova.....	58
6.2.1 Máquina.....	58
6.2.2 Materiais.....	58
6.2.3 Ferramentas.....	59

6.2.4	Corpos de prova.....	59
6.3	Metodologia Proposta para Otimização do Processo de Usinagem e Troca da Aresta de Corte em Operações de Torneamento.....	60
6.4	Metodologia Aplicada aos Ensaios.....	63
6.4.1	Ensaios com material SAE 4340.....	63
6.4.2	Ensaios com Compósito de Resina Fenólica reforçada com Fibras de Carbono.....	67
6.5	Análises de Produção e Custos – Usinagem do material SAE 4340.....	70
7.	CONCLUSÕES.....	73
7.1	Conclusões.....	73
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

ANEXOS

A Desenhos Ilustrativos de Fixação do Porta-Ferramenta na Máquina

B Calibração do Dinamômetro

C Projeto de Instrumento Virtual para Aquisição de Dados

D Amostra de Resultados de Medições

Lista de Figuras

CAPÍTULO 2

Página

Figura 2.1	Ferramenta de Metal Duro com Triplo Recobrimento (Catálogo Sandvik)...	4
Figura 2.2	Desgastes típicos de uma ferramenta de metal duro recoberta.....	9

CAPÍTULO 3

Figura 3.1	Componentes básicos de um sistema de monitoramento.....	14
Figura 3.2	Influência das condições de usinagem na pressão específica de corte K_s ..	18
Figura 3.3	Força de Avanço no instante da Quebra da Ferramenta.....	19
Figura 3.4	Valores de Corrente para diversas situações de Corte $V_c = 180$ m/min, $f = 0,45$ mm/volta, $a_p = 4$ mm.....	21
Figura 3.5	Zonas de Geração de E. A. na usinagem.....	23
Figura 3.6	Montagem Experimental para Monitoramento por E.A.....	23
Figura 3.7	Influência da velocidade/ avanço /profundidade de corte no sinal de E.A...	25
Figura 3.8	Influência do desgaste de flanco nos valores de E.A.....	26
Figura 3.9	Sinal de E.A. no momento de quebra da ferramenta.....	26
Figura 3.10	Esquema de montagem de Sistema de monitoramento da Vibração.....	30

CAPÍTULO 4

Figura 4.1	Auditoria em 31 Usuários - Aplicações de Sistemas de Monitoramento.....	36
Figura 4.2	Levantamento realizado na M. Benz sobre Sistemas de Monitoramento....	36
Figura 4.3	WEISS (1994). Sistemas de Monitoramento em função do tipo de Sensor.	37
Figura 4.4	WEEIS (1994). Área de utilização dos Sistemas de Monitoramento.....	38
Figura 4.5	WEISS (1994). Sistemas de Monitoramento por Área de Aplicação.....	38
Figura 4.6	Avaliação de DIEL (1993) Performance dos Sistemas de Monitoramento...	39

CAPÍTULO 5

Figura 5.1	Intervalo de Máxima Eficiência (IME).....	45
Figura 5.2	Principais Aplicações de IA.....	50
Figura 5.3	Arquitetura do SEU para versão semi-automática.....	54

CAPÍTULO 6

Figura 6.1	Esquema do Sensor de Efeito HALL e Filtro.....	56
Figura 6.2	Esquema de Redutor de Tensão.....	56
Figura 6.3	Circuito de Alimentação dos Sensores de Corrente e Tensão.....	57
Figura 6.4	Desenho Esquemático do Sistema de Aquisição dos Dados.....	58
Figura 6.5	Corpo de Prova utilizado nos Ensaios.....	59
Figura 6.6	Diagrama da Metodologia Proposta.....	61
Figura 6.7	Diag. da Metodologia proposta- Uso de várias arestas de corte por peça...	62
Figura 6.8	Ensaios de Validação com $V_{c_{ot}} = 350$ m/min e (.....) $Z_{ot} = 22$ peças.....	64
Figura 6.9	Valores Iniciais e Finais das Forças de Corte.....	66
Figura 6.10	Valores Iniciais e Finais das Forças de Avanço.....	66
Figura 6.11	Fotografia mostrando Desgaste de Flanco.....	67
Figura 6.12	Fotografia mostrando Lascamentos.....	67
Figura 6.13	Desgaste de Flanco (VB) & Comprimento de Corte (Lc).....	68
Figura 6.14	Fotografia mostrando o desgaste típico na aresta de corte.....	69
Figura 6.15	Ensaios de Validação $V_{c_{ot}} = 235$ m/min, $L_{c_{ot}} = 670$ m.....	69
Figura 6.16	Ensaios de Validação $V_{c_{ot}} = 235$ m/min, $L_{c_{ot}} = 670$ m.....	70

Lista de Tabelas

	Página
CAPÍTULO 2	
Tabela 2.1 Principais elementos de recobrimento de ferramentas.....	6
Tabela 2.2 Principais recobrimentos associados.....	7
CAPÍTULO 3	
Tabela 3.1 Faixas de Frequências Sensíveis ao Desgaste da Ferramenta.....	31
CAPÍTULO 6	
Tabela 6.1 Composição Química do Aço SAE 4340.....	59
Tabela 6.2 Tempos, Custos, e Produção Horária para os dois Enfoques.....	71

Nomenclatura

Letras Latinas

h = espessura de corte [mm]

b = largura de corte [mm]

a_p = profundidade de usinagem [mm]

V_c = velocidade de corte [m/min]

K_s = pressão específica de corte [N/mm^2]

F_f = Força de Avanço [kgf]

F_c = força de corte [kgf]

f = avanço [mm/volta]

V_{mxp} = velocidade de máxima produção [m/min]

V_o = velocidade de mínimo custo [m/min]

t_{ft} = tempo de troca da aresta de corte [min]

Sh = salário do operador [R\$/hora]

Sm = custo total da máquina [R\$/hora]

K_{ft} = custo da aresta de corte por vida [R\$]

x, K = coeficientes de Taylor

RMS = raiz quadrada da média (root mean square)

V_{RMS} = RMS da tensão do sinal de E.A [V].

Z_t = número de peças usinadas por vida de aresta de corte

t_c = tempo de corte [min]

K_{ft} = custo da vida da aresta da ferramenta [R\$]

KV_o = custo por componente (peça) trabalhada com V_o [R\$]

KV_{mxp} = custo por componente (peça) trabalhada com V_{mxp} [R\$]

L_c = comprimento de corte [m]

$V_{c_{ot}}$ = velocidade de corte otimizada [m/min]

Z_{ot} = número otimizado de peças

V_B = desgaste de flanco [mm]

$L_{c_{ot}}$ = comprimento de corte otimizado [m]

C_p = Custo de usinagem/peça [R\$]

Ph = Produção horária [peças/h]

Abreviações

ACC – Controle Adaptativo com Restrição

ACO - Controle Adaptativo Otimizado

APC – Aresta Postiça de Corte

CVD – Deposição Química a Vapor

PVD – Deposição Física a Vapor

CNC – Comando Numérico Computadorizado

FFT – Transformada de Fourier

E.A. – Emissão Acústica

PSD – Densidade de Potência Espectral

TCM – Monitoramento da Condição da Ferramenta

IME – Intervalo de Máxima Eficiência

IA – Inteligência Artificial

SEs – Sistemas Especialistas

SEU – Sistema Especialista de Usinagem

VLS – Veículo Lançador de Satélites

CTA – Centro Técnico Aeroespacial

SSE – Sistema de Segurança

M-F-D-P – Máquina, Ferramenta, Dispositivo, Peça

Siglas

SAE – Society of Automotive Engineers

HB – Dureza Brinell

HRC – Dureza Rockwell C

HV – Dureza Vickers

ISO – Organização Internacional de Normalização

Capítulo 1

Introdução

O processo atual de globalização faz com que os produtos precisem ter qualidade e baixo custo para que realmente sejam competitivos. Afim de atingir estes objetivos, as empresas têm modificado ou estão em vias de modificar sua organização, seu sistema produtivo e a cultura de seus recursos humanos. É dentro desta ótica que a otimização do processo de usinagem, e mais especificamente a utilização de sistemas de monitoramento tentando estabelecer de forma automática o melhor momento para a troca da ferramenta em tempo real, tem-se constituído no maior desafio da área de pesquisa envolvida.

Diversas equipes de pesquisa têm dedicado seu tempo ao monitoramento dos processos de usinagem para definir o melhor momento de troca da ferramenta em tempo real utilizando critérios físicos, que determinam o fim de sua vida. Visando a manufatura completamente automatizada, estes sistemas de monitoramento estão ligados aos controles dos processos de manufatura e aos denominados Controles Adaptativos, isto é: Controle Adaptativo com Restrição (ACC) ou Controle Adaptativo Otimizado (ACO).

Muitos trabalhos têm sido publicados (BYRNE, et al., 1995) a respeito de sistemas de monitoramento para determinar o melhor momento de troca da ferramenta. Estes trabalhos realizados em laboratório, em condições específicas e controladas, não podem, na maioria das vezes, ser reproduzidos em ambiente real de produção. Infelizmente, na situação atual, os sistemas de monitoramento não são sempre confiáveis para aplicações práticas, gerando a necessidade da utilização em

forma simultânea de sistemas diferentes, com a finalidade de assegurar com confiabilidade o fim de vida da ferramenta. No geral os sistemas de monitoramento são muito intrusivos na área de produção o que dificulta a sua aplicação.

Na prática, em função dos motivos apresentados, é o operador da máquina ferramenta que toma a decisão sobre o melhor momento para a troca da mesma, baseado na sua "experiência" ou sensibilidade, utilizando como critérios anomalias no processo como sons estranhos, faiscamento, vibração temporária e outros, ou seja, geralmente sem o uso de critérios lógicos.

Este trabalho tem por objetivo a otimização do processo produtivo de usinagem por torneamento em condições reais de chão de fábrica. Objetiva ainda contribuir no sentido de propor procedimento visando determinar o momento de troca da ferramenta de forma mais confiável e prática.

Para tanto este trabalho é dividida em sete capítulos, quais sejam:

Capítulo 1 – Introdução

Capítulo 2 – Desgaste e Critério de Fim de Vida da Ferramenta

Capítulo 3 – Monitoramento da Usinagem dos Materiais

Capítulo 4 – Sistemas de Monitoramento – Aplicações Práticas

Capítulo 5 – Trabalhos Prévios de Otimização

Capítulo 6 – Metodologia Experimental, Resultados e Discussões

Capítulo 7 – Conclusões e Sugestões para trabalhos Futuros

Capítulo 2

Desgaste e Critério de Fim de Vida da Ferramenta

2.1 Evolução das Ferramentas de Corte / Mecanismos de Desgaste

As empresas fabricantes de ferramentas têm realizado esforços no sentido de desenvolver novas ferramentas de metal duro com revestimentos adequados às exigências do mercado. Uma ferramenta de usinagem deve satisfazer três exigências consideradas básicas (SUH, 1980):

1. resistência ao desgaste
2. resistência à deformações plásticas
3. tenacidade

Uma ferramenta tem resistência ao desgaste, quando apresenta estabilidade química e dureza em altas temperaturas. De forma geral, um material com as características indicadas não apresenta a tenacidade necessária para suportar choques e interrupções normais em um processo de usinagem. É também conhecido que utilizando ferramentas com maior tenacidade, estas têm a sua vida diminuída devido a seu desgaste rápido. Foi pensando em se obter uma ferramenta com o núcleo tenaz e com a parte que entra em contato com a ferramenta e com a peça resistente ao desgaste, que foram desenvolvidas as ferramentas de metal duro recobertas.

Na figura 2.1 é mostrada de forma esquemática uma ferramenta de metal duro com uma das composições mais utilizadas na indústria

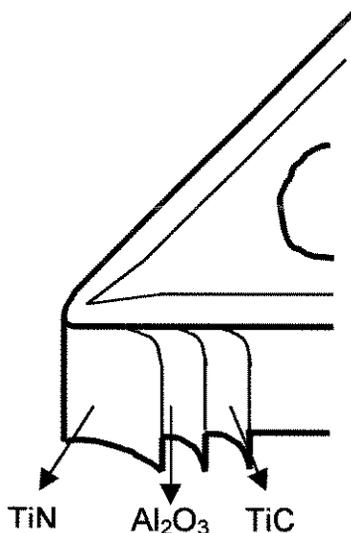


Figura 2.1 – Ferramenta de Metal Duro com Triplo Recobrimento (Catálogo Sandvik)

Nas ferramentas de metal duro recobertas podem ser determinados mecanismos principais de desgaste, que podem operar de forma exclusiva ou associada (SARAMAH & KHARE, 1988), a saber: adesão, abrasão, oxidação, difusão e deformação plástica da aresta da ferramenta. Os de maior ocorrência, especialmente em ferramentas recobertas são indicados a seguir.

1 – *Desgaste por aderência ou adesão* – ocorre pela fratura da junta formada em função de ligações atômicas (aderência) provocadas por altas tensões de compressão, altas taxas e quantidades de deformação assim como da pureza do material em contato com a ferramenta. (TRENT, 1988)

2 – *Desgaste por aderência e arrastamento “attrition”* – ocorre, geralmente a baixas velocidades de corte, quando o fluxo de material sobre a superfície de saída da aresta de corte se torna irregular. A aresta postiça de corte pode aparecer, e o contato com a aresta de corte se torna menos contínuo. Nestas condições, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto com o fluxo de material adjacente à interface.

3 – *Desgaste por abrasão* – acontece em decorrência da presença de partículas duras nas interfaces cavaco/aresta de corte e aresta de corte/peça, devido ao atrito que ocorre quando o cavaco se movimenta sobre a superfície de saída da aresta de corte e a peça se movimenta em relação à superfície de folga da aresta de corte, desgastando-a por ação mecânica. As partículas duras podem ter como origem constituintes duros, imperfeições do material da peça usinada ou partículas da própria aresta de corte.

4 – *Difusão intermetálica* – ocorre em condições de temperatura elevada, normalmente em operações de desbaste, por ocasião do contato na interface cavaco/superfície de saída e peça/superfície de folga, principalmente na primeira. Este contato realizado a alta temperatura pode provocar a perda de certos elementos constituintes da ferramenta (difusão), diminuindo assim sua vida. Para existir difusão intermetálica é necessário que, além da alta temperatura de corte, exista também afinidade físico-química entre os materiais da peça e da aresta de corte. Como exemplo, pode-se citar a usinagem das ligas ferrosas com arestas de corte de diamante policristalino, onde o elemento carbono do diamante se difunde na peça formando-se o carboneto de ferro em temperaturas da ordem de 600 °C.

A temperatura de corte, que depende diretamente da velocidade de corte, é o fator principal na definição da importância de cada um dos fenômenos descritos acima em uma determinada operação. Em baixas velocidades de corte e avanço forma-se a Aresta Postiça de Corte (APC). Ela ocorre por movimento de discordâncias, ocorrendo, portanto, encruamentos TRENT (1988). Este fenômeno, somente se realiza em temperaturas menores que a temperatura de recristalização do material da peça e a utilização de recobrimentos nas ferramentas como o de TiN visam diminuir este fenômeno.

Existe uma tendência de se trabalhar com velocidades de corte cada vez maiores, visto o estágio atual de desenvolvimento das máquinas ferramentas utilizadas. Este é um fator que induz nas ferramentas, maior probabilidade de incidência dos desgastes por abrasão e difusão intermetálica

O conhecimento dos mecanismos de desgaste é útil na seleção correta da ferramenta para uma determinada operação, sob condições específicas de usinagem e é essencial para o desenvolvimento de novos materiais de ferramentas.

O desenvolvimento dos recobrimentos para as ferramentas de metal duro, iniciou-se com um recobrimento de (TiC), depois passou-se para dois (TiC + Al₂O₃), três (TiC + Al₂O₃ + TiN) até os dias de hoje, onde temos ferramentas com um número bem grande de recobrimentos

Como demonstrativo da evolução dos materiais utilizados nos recobrimentos pode-se citar o "widalon", pastilha com 13 recobrimentos compostos de TiC, Ti (CN) e ALON, esta último obtido a partir do Al₂O₃. Os 13 recobrimentos apresentam espessuras inferiores a 0.2 µm cada, encontrando-se intercalados.

Outros materiais foram desenvolvidos, como o Balenit B TiCN, da empresa Balzers, que tem como característica a combinação da dureza alta do TiC com o baixo coeficiente de atrito do TiN, sendo utilizado para a usinagem do alumínio de alto teor de silício (GABOR, 1989). O Ovonic desenvolvido pela empresa Carolina Coating Technologies Inc. especialmente para a usinagem de materiais não ferrosos como o alumínio e o titânio, além de outros resistentes ao calor.

Na tabela 2.1 estão indicados os elementos de recobrimento, sua dureza, espessura, natureza e campo de aplicação. A tabela 2.2 mostra os mesmos elementos porém associados, constituindo assim as ferramentas multirecobertas (PIERE & VINTERHOLLER, 1994).

Recobrimento	Dureza (HV)	Espessura (µm)	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 ₂ O ₃	2500 a 3100	3	WC	Aços

Tabela 2.1 - Principais elementos de recobrimento de ferramentas

Multirecobrimentos	Espessura (μm)	Substrato	Aplicação
TiN + TiC	5	WC /HSS	Aços
TiC + TiN	8	WC /HSS	Aços
TiN + TiC + AlO	8	WC	Aços e fundidos
TiN + Al ₂ O ₃	6	WC	Aços e fundidos

Tabela 2.2 - Principais recobrimentos associados

Na atualidade são utilizados dois métodos em nível industrial para recobrir ferramentas de usinagem (HANASAKI, 1990):

1 - *CVD* – Deposição química de vapor, é o método normalmente utilizado para a deposição do recobrimento em pastilhas de metal duro, sendo as temperaturas envolvidas no processo da ordem de 900 a 1050 °C, razão pela qual o processo não pode ser utilizado no recobrimento de aço rápido. A deposição é feita a partir de uma atmosfera reativa que se decompõe na superfície da ferramenta, constituindo-se assim o composto que serve de recobrimento.

2 – *PVD* – Deposição física de vapor – As pressões e temperaturas envolvidas são inferiores, sendo esta última da ordem de 450 a 500 °C, facilitando a sua utilização em ferramentas de aço rápido, além das de metal duro.

A seguir são indicadas as principais características dos recobrimentos mais empregados na prática (COLL, 1989)

a – *Carboneto de titânio* (TiC) – responsável pela alta resistência ao desgaste, se comporta ainda como elemento de liga com o metal duro. É muitas vezes utilizado de forma única em função da sua alta dureza.

b – *Óxido de Alumínio* (Al₂O₃) – utilizado como elemento intermediário em ferramentas multirecobertas ou no recobrimento superior em ferramentas com dois recobrimentos. Tem por finalidade, garantir a estabilidade a altas temperaturas, e melhorar a resistência ao desgaste por abrasão.

c – *Nitreto de Titânio (TiN)* – a principal característica é a redução do coeficiente de atrito entre a pastilha, o cavaco e a peça, além de aumentar a resistência à oxidação.

De maneira 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 de 60 HRC, assim como ligas resistentes ao calor.

2.2 Critério de fim de vida da aresta de corte

A vida de uma aresta de corte é definida pelo tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzidos os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingido esse tempo, a ferramenta deve ser reafiada ou substituída.

Diversos fatores determinam a fixação de um determinado valor limite de desgaste para o fim de vida da aresta de corte, tais como:

1 – os desgastes atingirem valores elevados que se receia a quebra da aresta de corte. Esta situação é comum em operações de desbaste onde são desenvolvidas altas pressões e temperaturas;

2 – os desgastes chegam a valores, cuja temperatura da aresta de corte (proveniente em grande parte do atrito da aresta de corte com o cavaco e com a peça) se aproxima da temperatura na qual a aresta de corte perde o fio;

3 – devido ao desgaste da superfície de folga da aresta de corte, não é mais possível manter as tolerâncias exigidas na peça;

4 – o acabamento superficial da peça usinada não é satisfatório;

5 – o aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da aresta de corte, interfere no funcionamento da máquina. (FERRARESI, 1977)

A vida da aresta de corte está diretamente relacionada às características de cada processo, às condições de usinagem empregadas e às variações das

características do material usinado. Conhecidas algumas das variantes possíveis, a prática tem mostrado que uma série de fenômenos podem ocorrer durante o processo de usinagem, provocando desgastes diversos ou isolados, determinando o fim de vida da aresta de corte.

Na figura 2.3 encontram-se esquematizados os desgastes que ocorrem nas arestas de corte de pastilhas de metal duro recobertas, utilizadas em processo de torneamento, tais como:

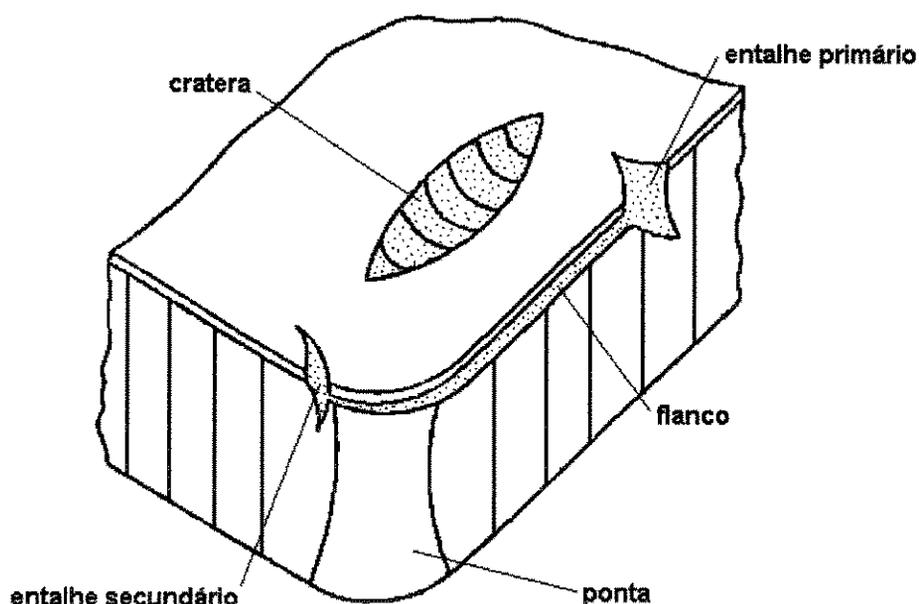


Figura 2.3 – Desgastes típicos de uma ferramenta de metal duro recoberta

1 – *Desgaste de flanco ou frontal* – é o desgaste que está presente em todas as operações de usinagem, sendo causado pelo atrito da peça com a superfície de folga da aresta de corte. O desgaste de flanco ocorre pelo processo de abrasão e quando acontece a penetração da cobertura por abrasão e difusão (CHUBB & BILLINGHAM, 1980). Segundo DEARNLEY (1985) o desgaste homogêneo ou liso da superfície de folga da aresta de corte é produzido por dissolução/difusão e pequenas deformações plásticas. É o tipo de desgaste mais utilizado quando se deseja monitorar diretamente a vida da aresta de corte.

2 – *Desgaste tipo entalhe* – O perfil e o comprimento do entalhe dependem em grande parte da precisão de posicionamento da aresta de corte. Quando o desgaste da aresta de corte 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. Ele ocorre, principalmente, na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas (ligas de níquel, titânio, cobalto e aço inoxidável), como consequência dos mecanismos de desgaste de abrasão, difusão e “attrition”, influenciados pelas interações com a atmosfera (oxidação). O desgaste de entalhe secundário prejudica em muito o acabamento superficial da peça.

3 – *Desgaste de cratera da superfície de saída* – este desgaste é diretamente relacionado com as altas temperaturas e tensões na interface cavaco/ferramenta. O desgaste de cratera é um processo complexo, combinado de diversos mecanismos de desgaste (CHUBB & BILLINGHAM, 1980). Diversos pesquisadores afirmam porém, ser o mecanismo de difusão o principal causador do desgaste de cratera. A profundidade da cratera pode ser utilizada como medida do desgaste da ferramenta, podendo um valor pré-determinado utilizado como critério de fim de vida da ferramenta. A posição da cratera em relação à aresta de corte é também de grande importância, sendo que o crescimento da mesma pode fazer com que a mesma intercepte o desgaste frontal, provocando a quebra da aresta de corte. 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. O desgaste de cratera acontece principalmente nas ferramentas não recobertas. As ferramentas recobertas com TiN e Al₂O₃ apresentam uma alta estabilidade química, dificultando este tipo de desgaste.

De modo geral (com exceção do desgaste de cratera – ver página 17), os desgastes mencionados afetam a superfície usinada aumentando a força a potência consumidas, assim como a vibração do sistema.

O desgaste e critério de fim de vida da ferramenta, objeto deste capítulo, são importantes no contexto deste trabalho, onde o conhecimento dos mecanismos de desgaste, dos recobrimentos das ferramentas de metal duro, assim como dos critérios utilizados na prática para definir o fim de vida da aresta de corte são necessários.

Capítulo 3

Monitoramento da Usinagem dos Materiais

3.1 Introdução

As máquinas CNC executam diversas funções anteriormente realizadas pelo operador de uma máquina convencional como a aproximação, afastamento e posicionamento da ferramenta, fixação do avanço e velocidade de corte, indexação da ferramenta, etc.. Os sistemas de monitoramento e controle do processo tem por finalidade realizar as funções que ainda continuam sobre responsabilidade do operador tendo como objetivo a máxima automação do processo produtivo.

O desenvolvimento dos sistemas de monitoramento é devido principalmente a: (MICHELETTI et al.,1976)

- Novos e caros materiais para ferramentas que precisam ter a sua utilização otimizada;
- Surgimento de materiais de difícil usinagem e cujo comportamento no processo ainda é desconhecido;
- Mudanças nos processos produtivos que estão tornando os lotes cada vez menores, encarecendo a rejeição de peças;
- A procura da automatização da manufatura.

Os sensores para monitorar as condições da ferramenta devem preencher vários requisitos. A partir dos seus sinais deve ser possível detectar a quebra da ferramenta, o desgaste da mesma e a vibração nos processos de usinagem. De acordo com TÖNSHOFF et al.(1988), os sensores para monitoramento do processo devem cumprir os seguintes requisitos:

- Possibilitar a mediçãõ o mais perto possível do ponto de usinagem;
- Não provocar reduçãõ dos esforços estáticos e dinâmicos da máquina ferramenta;
- Não oferecer restrições ao espaçõ de trabalho e aos parâmetros de usinagem;
- Serem livres de manutençãõ e desgaste, de fácil troca e baixo custo;
- Resistentes à sujeira, cavacos e influênciã eletromagnética/térmica;
- Funcionar de forma independente em relaçãõ à ferramenta/peça;
- Possuir características metrológicas adequadas;
- Transmitir sinais confiáveis

Por razões de ordem técnica, somente uma fraçãõ dos sensores encontrados no mercado são adequados para o monitoramento das condições da ferramenta e, por isso, a pesquisa nesta área é incessante.

Os diversos sistemas de monitoramento citados na literatura tem sido classificados em:

- *diretos e indiretos* - direto é aquele em que a mediçãõ do parâmetro 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. Nos sistemas de monitoramento indireto, o sensoreamento do desgaste e quebra da ferramenta é realizado indiretamente, através da mediçãõ de um outro parâmetro possível de ser monitorado em tempo real;

- *contínuo ou intermitente*;

- *em processo ou pós processo* - a grandeza é monitorada durante o processo ou depois de concluído o processo;

- *sistemas com multi-sensores* - apresentam maior confiabilidade nos resultados, obviamente são mais caros e complexos.

Os sistemas de monitoramento e controle de usinagem são formados de quatro partes básicas, a saber: sensores, condicionamento do sinal, modelos e estratégia dos sensores (TÖNSHOFF et al., 1988).



Figura 3.1 – Componentes básicos de um sistema de monitoramento

Os sinais fornecidos pelos sensores precisam para sua análise de um tratamento, como amplificação, filtragem, conversão analógico-digital, etc.. A este tratamento denomina-se condicionamento do sinal. Após o mesmo, poderá ser realizada a análise, que pode ser no domínio do tempo, utilizando parâmetros estatísticos como a média, o valor médio quadrático (RMS), desvio padrão, ou no domínio da frequência, através da análise espectral usando a transformada de Fourier (“Fast Fourier Transform-FFT”).

Os modelos servem para correlacionar os parâmetros medidos com os parâmetros a serem monitorados. Isto é feito de forma empírica (KOREN et al., 1986) ou através de desenvolvimentos teóricos (KANNATEY et al., 1981).

Os sistemas de monitoramento, após detectar alguma condição desfavorável no processo, como por exemplo quebra ou desgaste excessivo da ferramenta, podem fazer a indicação numa tela de computador, fazer soar um alarme, diagnosticar o problema e propor uma solução ou, através dos chamados controles adaptativos, variar os parâmetros de usinagem adequando os mesmos às novas condições.

3.2 - Métodos Diretos de Monitoramento

3.2.1 – Óptico

É baseada no princípio de que a reflexão da luz é diferente em uma ferramenta nova do que em uma ferramenta que já tenha sofrido desgaste, vários métodos de

monitoramento ótico foram pesquisados tais como o que utiliza feixe de raios laser para iluminar a zona de desgaste, sendo a visualização realizada através de uma câmara. A imagem obtida é digitalizada sendo obtida a amplitude do desgaste (JEON & KIM, 1988), outro método emprega sensores óticos para a mesma finalidade (GIUSTI et al., 1979). É importante salientar que estas medições não podem ser realizadas "on line", devendo o processo ser interrompido para que o desgaste seja analisado.

3.2.2 – Radioatividade

A perda volumétrica de material por desgaste pode ser determinada através do uso de sensores de radioatividade (COOK, 1980). O método é baseado no bombardeamento da ferramenta com partículas radioativas. Em função do desgaste progressivo da ferramenta, partículas ativadas são extraídas e misturadas ao cavaco, trazendo como resultado o decaimento radioativo na zona de usinagem, que pode ser medido. A sua aplicação é restrita a casos muito específicos, pois a radioatividade representa um sério risco e exige um alto investimento.

3.2.3 – Dimensão da Peça Usinada

O desgaste da ferramenta provoca o afastamento da aresta de corte e conseqüentemente, a dimensão da peça varia. O sensoreamento da medida da peça é realizada através de apalpadores, ou sem contato coma peça através de feixes de raios laser (COLDING & NOVAK, 1981 e MICHELETTI et al., 1976) ou através de sensores eletromagnéticos (EL GOMAYEL & BREGGER, 1986), o maior inconveniente do método é a impossibilidade de prevenir a quebra repentina da ferramenta.

3.2.4 – Resistência Elétrica na junção Peça/Ferramenta

A superfície de contato entre a peça e a ferramenta aumenta progressivamente com o aumento do desgaste da mesma diminuindo a resistência à passagem da corrente elétrica (UEHARA, 1973). O método usa uma película fina condutora de

eletricidade colocada junto ao flanco da ferramenta, quando a ferramenta se desgasta a resistência a passagem da corrente diminui, estabelecendo-se uma relação entre a diferença da medida inicial com a medida instantânea e o desgaste da ferramenta. Nesta medição a variação de temperatura e forças de usinagem tendem a mascarar os resultados.

3.2.5 – Distância Ferramenta/Peça

Na operação de usinagem, a distância entre um ponto fixo da ferramenta em relação a peça diminui em função do desgaste da ferramenta e conseqüente crescimento da dimensão da peça. A medição pode ser realizada através de micrômetro eletrônico, que mede constantemente a distância entre a posição fixa da ferramenta e a peça (TAKEYAMA et al., 1967). Neste método surgem alguns problemas difíceis de serem controlados, como a expansão térmica da ferramenta, irregularidade da superfície usinada, vibração entre a peça e a ferramenta e a falta de precisão da máquina ferramenta.

3.3 - Métodos Indiretos de Monitoramento

3.3.1 – Forças de Usinagem

É o método indireto de monitoramento que tem mais tempo de utilização em função da facilidade de se medir forças de usinagem diretamente através de dinamômetros. O equipamento mais usado para se medir forças de usinagem é o dinamômetro piezoelétrico que, quando comprimido emite sinal elétrico proporcional às forças dinâmicas atuantes. Existem também os dinamômetros/torquímetros com extensômetros "strain gauges". Extensômetros são elementos que ao serem deformados variam sua resistência elétrica. Normalmente são presos ao porta-ferramentas ou ao eixo-árvore, formando uma ponte de "Wheatstone".

3.3.1.1 – Relação entre Força de Corte e o Desgaste da Ferramenta

Existem diversos trabalhos de pesquisa publicados a respeito. As questões mais importantes a serem comentadas são as seguintes:

a - Quando somente o desgaste de flanco é verificado, a medida que o mesmo cresce em função do atrito peça/ferramenta, crescem também as forças de usinagem (DE FILIPPI & IPPOLITO, 1969).

b - Ocorrendo além do desgaste de flanco o desgaste de cratera, o crescimento das componentes das forças de usinagem não é tão marcante, isto porque com a existência da cratera o ângulo de saída efetivo da ferramenta aumenta, diminuindo os esforços de deformação do cavaco.

c - LEE et al. (1989), fizeram estudos em relação ao comportamento das componentes dinâmicas da força de corte e o desgaste da ferramenta, através da análise do espectro dos sinais de força, concluindo que, independentemente das condições de usinagem, a máxima amplitude se dá na frequência de ressonância do porta ferramenta. A deformação plástica sobre a ponta da ferramenta em altas temperaturas explicaria o crescimento constante da força dinâmica seguido por um decréscimo abrupto perto do fim da vida da ferramenta.

3.3.1.2 – Relação entre Força de Corte e Condições de Usinagem

Um dos empecilhos à utilização dos esforços de corte para monitoramento indireto dos desgastes da ferramenta, está na influência das condições de usinagem, que faz com que o crescimento da força de usinagem não seja exclusivamente causado pelo crescimento do desgaste, o que pode mascarar algumas medições dos esforços de corte.

A força de corte pode ser calculada pela equação: (FERRARESI, 1977)

$$F_c = K_s \times A = K_s \times h \times b \quad (3.1)$$

Onde A é a área da seção de corte ($b \times h$), sendo h a espessura de corte e b a largura de corte. Na figura 3.2, pode-se verificar o comportamento da pressão específica de corte em relação à profundidade de usinagem a_p , à espessura de corte h e à velocidade de corte V_c

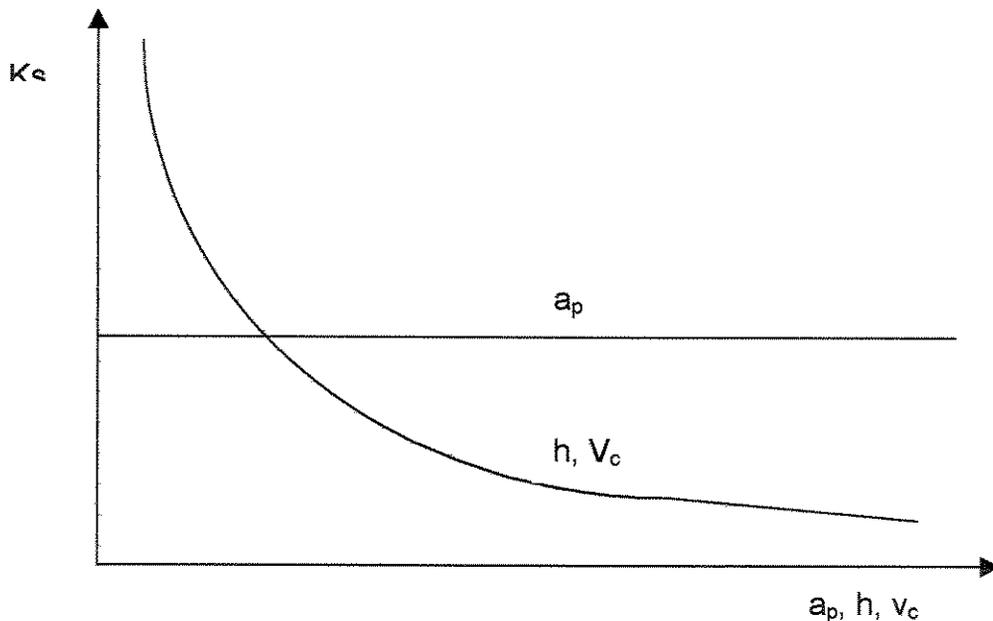


Figura 3.2 – Influência das condições de usinagem na pressão específica de corte K_s

Na figura acima pode-se observar que K_s decresce exponencialmente com h e V_c , mas quando a velocidade de corte atinge valores típicos de operações com ferramentas de metal duro (acima de 100 m/min ou mais), a força de corte permanece quase constante. É importante salientar que, apesar de K_s decrescer com h , a força de corte cresce, pois a área da seção de corte ($A = b \times h$) cresce, mas, o crescimento da força com h não é acentuado devido à diminuição de K_s . Com relação à profundidade de usinagem a_p , como esse parâmetro não influencia K_s , há um aumento da força diretamente proporcional à mesma a_p .

Com a finalidade de minimizar a influência das condições de usinagem no monitoramento do desgaste da ferramenta através dos esforços de corte, a literatura recomenda três abordagens

1 -Relacionar os valores das componentes da força de usinagem em início e fim de vida da ferramenta com as condições de usinagem

2 - Análise do espectro de frequências, escolhendo-se a faixa de frequências que somente é influenciada pelo desgaste da ferramenta.

3 - Relação entre os componentes da força de usinagem, quando se divide um componente da força por outro, muitas vezes consegue-se evitar a influência das condições de usinagem.

3.3.1.3 – Esforços de Corte e Quebra da Ferramenta

O monitoramento da quebra da ferramenta junto com o monitoramento do desgaste é muito importante, porque a detecção prévia de uma quebra pode evitar severos danos à máquina-ferramenta, à peça que está sendo usinada e à própria ferramenta.

WARNECKE & JENEWEIN (1988) estudaram relação entre a força de avanço e uma quebra da ferramenta em um processo de usinagem por torneamento (figura 3.3)

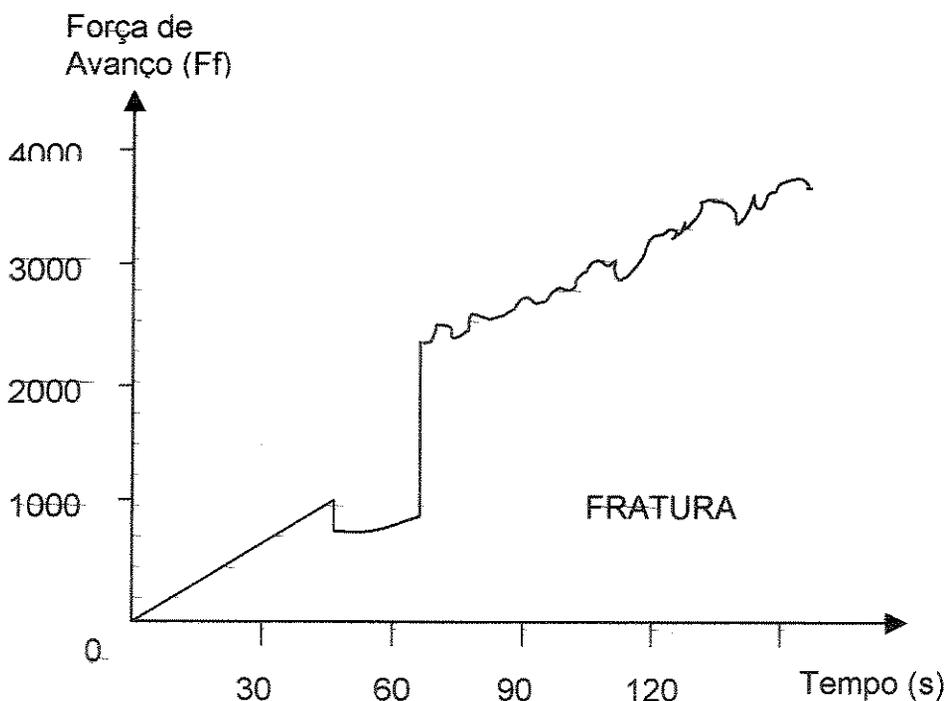


Figura 3.3 – Força de Avanço no instante da Quebra da Ferramenta

Observando a figura, vê-se que quando acontece uma quebra, o valor da força de avanço cai rapidamente permanecendo constante durante cerca de 20 ms, que é

o tempo aproximado de uma rotação da peça, onde o contato ferramenta-peça foi interrompido. Assim que a ferramenta quebrada toca novamente a peça, faz com que a força cresça novamente. Em função disso, o sistema pode interromper o processo no intervalo de tempo no limiar do crescimento súbito da força ou interromper o processo antes da quebra, ao se atingir um valor limite para a força.

Existem trabalhos com posições diferenciadas em relação à força de corte e o desgaste da ferramenta. LISTER & BARROW (1986) afirmam que o melhor parâmetro para se monitorar o processo de usinagem é a força de corte principal (F_c), a qual cresce com o aumento do desgaste. TLUSTY & ANDREWS (1983) afirmam que a força principal de corte não tem qualquer relação com o desgaste da ferramenta.

3.3.2 – Parâmetros Elétricos da Máquina-Ferramenta

É baseada na correlação que existe entre a potência/corrente elétrica dos motores de acionamento da máquina-ferramenta e a potência mecânica consumida pelo processo. Medir parâmetros elétricos é medir indiretamente os esforços de corte. FERRARESI, (1977) cita as equações:

$$R \times I^2 = K_s \times b \times h \times v_c / \eta \text{ como } F_c = K_s \times b \times h, \text{ temos que:}$$

$$R \times I^2 = F_c \times v_c / \eta \quad (3.2)$$

Se: b , h , η , assim como v_c forem mantidos constantes teremos os parâmetros R e I proporcionais à força de corte F_c

DAN & MATHEW, (1990), STEIN & SHIN, (1986), e STEIN & CHURN, (1990), concluíram que a sensibilidade da corrente elétrica ao crescimento dos desgastes não é tão boa, mas sua sensibilidade à quebra da ferramenta é muito alta o que facilita a sua utilização especialmente em torneamento de desbaste.

A figura 3.4 extraída do trabalho de STEIN & CHURN, (1990) apresenta níveis de corrente para alguns estágios de desgaste da ferramenta, para uma determinada condição de usinagem. Observando a figura pode-se ver que a diferença entre os

valores de corrente para uma ferramenta recém afiada (nova) e um corte intermediário não é muito grande, mas esta diferença é acentuada entre o corte intermediário e o momento da quebra da ferramenta. Pode-se desta maneira fixar um valor de corrente um pouco abaixo do valor onde ocorre a quebra, de forma a ter um ganho de custo e tempo em operações de desbaste.

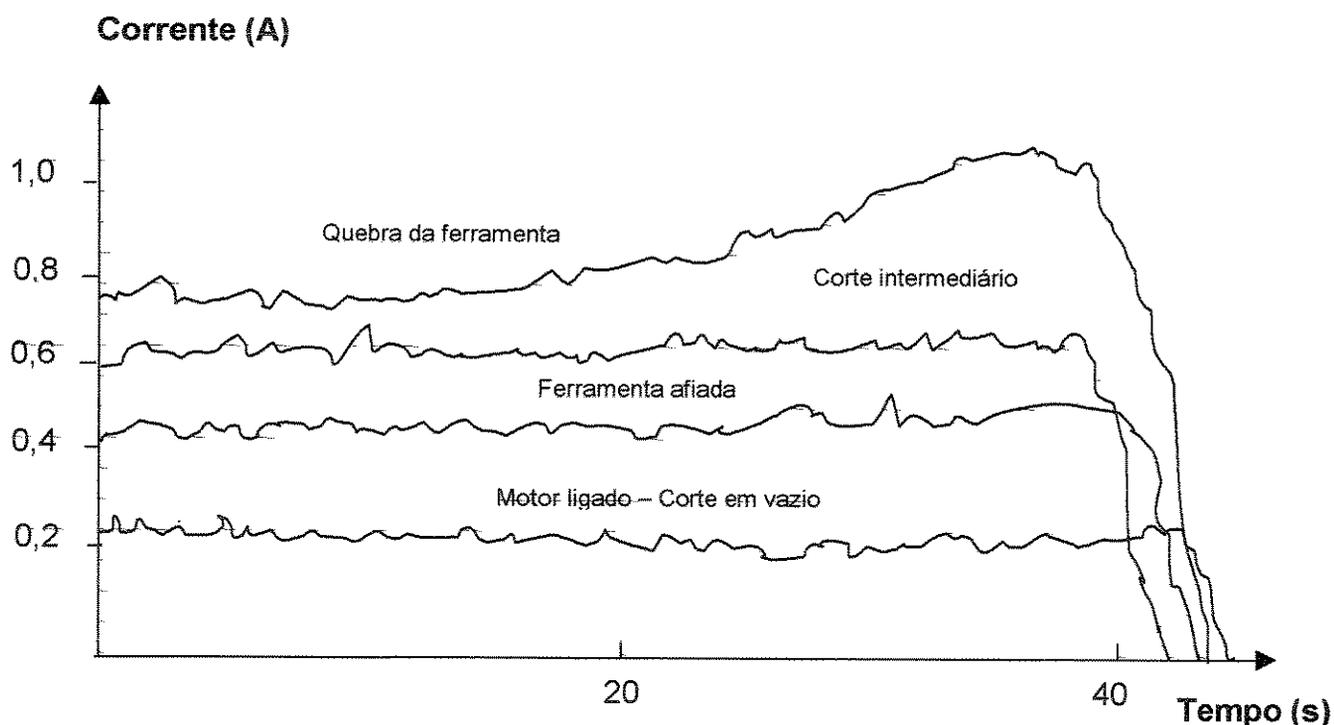


Figura 3.4 – Valores de Corrente para diversas situações de Corte
 $V_c = 180 \text{ m/min}$, $f = 0,45 \text{ mm/volta}$, $ap = 4\text{mm}$

Os trabalhos de dissertação realizados na UNICAMP por BRAGA (1992) trabalhando com aço ABNT 1045 e pastilha de metal duro não recoberta e COSTA (1995), com aço ABNT 4340 e pastilha de metal duro recoberta, verificaram o comportamento da corrente elétrica da armadura do motor principal para operações de torneamento, ambos concluindo que a melhor utilização da corrente seria na sinalização da vida útil da ferramenta evitando-se a quebra da aresta de corte, já que a corrente cresce sensivelmente pouco antes da quebra e decresce após.

3.3.3 – Via Emissão Acústica

Trata-se de um dos monitoramentos que vêm sendo estudado há bastante tempo e um dos mais difundidos, o qual tem várias vantagens em relação a outros métodos, tais como:

- Sensores pequenos simples (não intrusivos) e de custo relativamente baixo.
- As fontes de emissão acústica tem relação direta com o processo de corte de usinagem.
- Devido a poder captar sinais de alta frequência na faixa de 50 KHz a 1 Mhz, não sofre a influência de sinais de ruídos e vibrações mecânicas, os quais podem facilmente ser filtrados.

A emissão acústica (E.A.) é definida por BLUM (1988) e BLUM & INASAKI (1990) como sendo ondas de tensão elástica geradas como resultado da liberação rápida de energia de deformação dentro de um material submetido a um estímulo externo, devido ao rearranjo de sua estrutura. Estas ondas de tensão produzem deslocamento na superfície do material o que pode ser detectado por um sensor piezoelétrico que converte os deslocamentos em sinais elétricos. A frequência do sinal gerado pode chegar a ordem de Mhz. As fontes principais de E.A. durante o processo de usinagem são: o atrito cavaco-ferramenta, o atrito ferramenta-peça, a deformação e a quebra do cavaco. Como o desgaste de ferramenta tem ação direta em todas elas, seu crescimento pode ser medido indiretamente através da E.A..

Os sinais de E.A. podem ser classificados em sinais contínuos associados à deformação plástica dos materiais dúcteis e sinais de pico associados ao crescimento de trincas em materiais que ocorrem na quebra do cavaco e no lascamento e quebra da ferramenta

Na figura 3.5 , estão mostradas as zonas de deformação plástica durante o processo de usinagem, assim como a localização do mecanismo de fratura do cavaco. A zona primária ou zona de cisalhamento é onde começa e termina a formação do cavaco. A zona secundária de deformação compreende a área de contato cavaco-ferramenta; nesta região o cavaco novamente é deformado em função do atrito do mesmo com a superfície de saída da ferramenta. A zona terciária

de deformação é a região de contato ferramenta-peça, onde ocorre a deformação pelo atrito da peça com a parte desgastada da superfície de folga da ferramenta. A associação das três regiões de deformação geram sinais de emissão acústica do tipo contínuo e a quebra do cavaco sinais do tipo de pico.

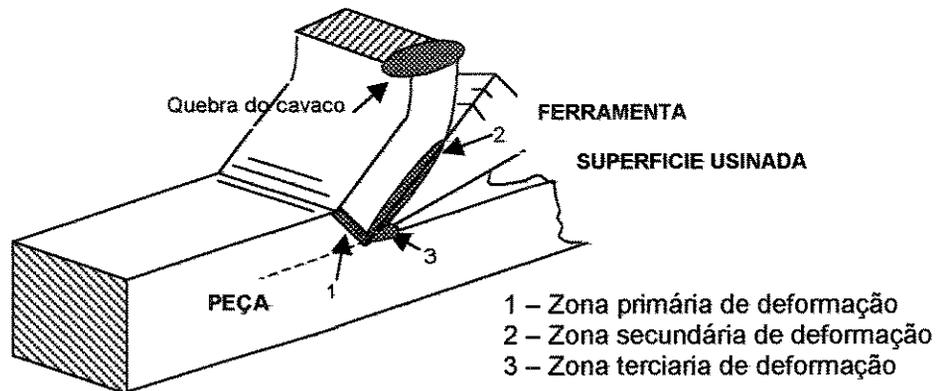


Figura 3.5 – Zonas de Geração de E. A. na usinagem

Na figura 3.6 DINIZ (1994) apresenta montagem experimental normalmente utilizada no monitoramento de usinagem por E.A.. Alguns dos componentes são comentados a seguir:

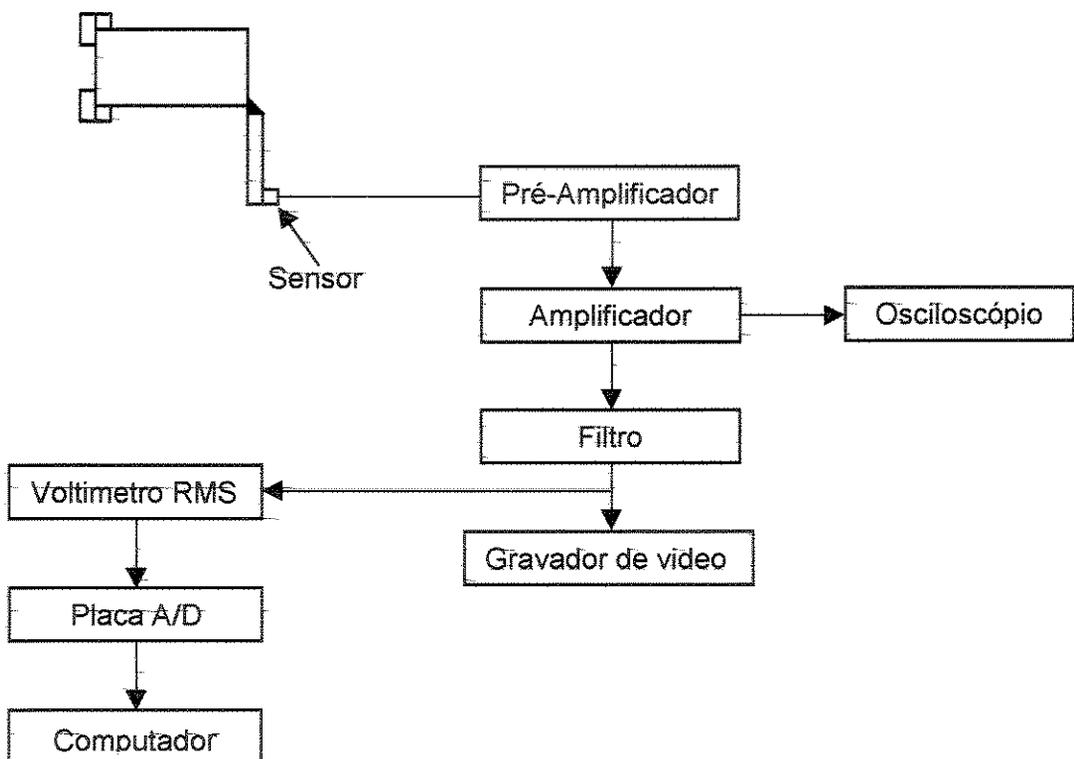


Figura 3.6 – Montagem Experimental para Monitoramento por E.A.

Sensores - podem ser eletromagnéticos, piezoelétricos, microfones capacitivos ou baseados em interferometria laser, sendo os mais utilizados os piezoelétricos. No torneamento, o melhor lugar para instalar o sensor é a parte traseira do porta-ferramenta, mas traz o inconveniente de não possibilitar a rotação da mesma. CHANG et al. (1992) apresentaram trabalho mostrando a fixação do sensor em processos de retificação na mangueira de fluido de corte

Pré-amplificador e Amplificador – Os sinais emitidos pelo sensor, quando percorrem um caminho longo até o amplificador, apresentam uma perda considerável de tensão. Normalmente é comum o uso de um pré-amplificador de ganho fixo perto do sensor (frequência de resposta de 20 KHz a 2MHz) e um amplificador de ganho variável junto aos demais instrumentos de condicionamento de sinal.

Filtros de frequência – Tem por finalidade restringir a análise espectral a faixa de frequência que realmente interessa sendo eliminados os ruídos e as faixas de frequência de pouco interesse.

Voltímetro RMS – Na impossibilidade de digitalizar o sinal bruto de E.A. em tempo real, utiliza-se instrumento cuja saída é o valor médio quadrático do valor de entrada com uma frequência menor

Gravador de vídeo – Permite a gravação do sinal bruto, para posterior análise do sinal.

3.3.3.1 – Influência das Condições de Usinagem e da Geometria da Ferramenta nos Valores de E.A.

Na figura 3.7, , extraídas de trabalho de BLUM & INASAKI, (1990), pode-se verificar o comportamento da velocidade de corte, do avanço e da profundidade de corte em relação ao modo de E.A. (parâmetro semelhante ao RMS do sinal de E.A.). O crescimento da velocidade de corte provoca o aumento da energia produzida no processo de usinagem e da energia acústica gerada, já o crescimento do avanço ou da profundidade de corte proporciona um decréscimo da taxa de deformação do

material que esta em processo de corte, sendo que no caso da profundidade de corte esta deformação é compensada pelo aumento de volume de material em corte, fazendo com que a influência deste parâmetro de corte no valor da emissão acústica seja desprezível.

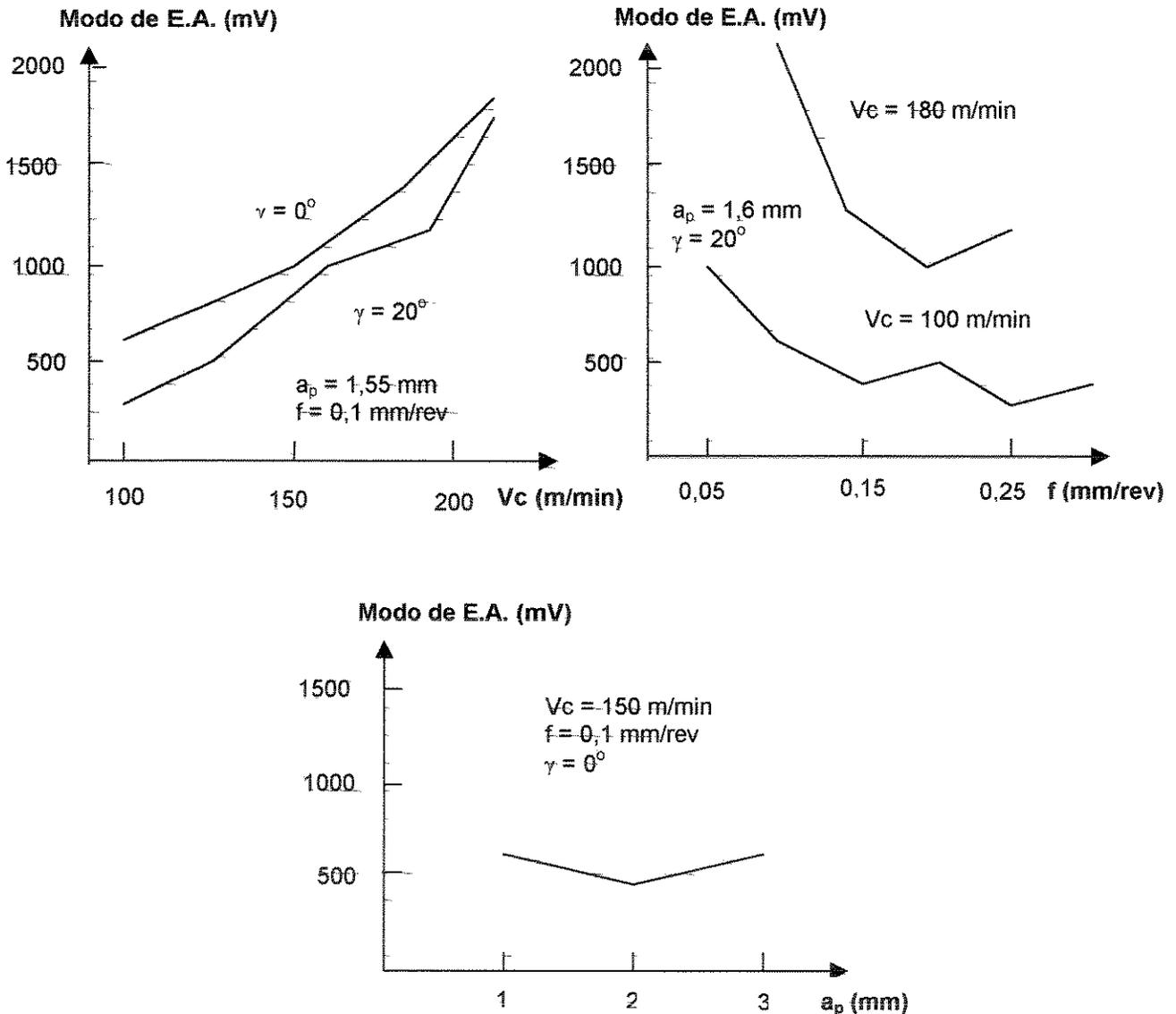


Figura 3.7 - Influência da velocidade de corte, do avanço e da profundidade de corte no sinal de E.A.

3.3.3.2 – Monitoramento do Desgaste e Quebra da Ferramenta via E.A.

O maior campo de atuação da E.A. na usinagem está no monitoramento do desgaste e quebra da ferramenta, sendo o mais estudado e utilizado atualmente (VINCENT & ROYER, 1990). A figura 3.8 apresentada no trabalho de BLUM &

INASAKI (1990) mostra o crescimento do modo de E.A. em relação ao desgaste de flanco da ferramenta.

Quando ocorre a quebra da ferramenta é produzido um sinal bem típico no valor do sinal de V_{RMS} , conforme pode ser visto na figura 3.9 abaixo.

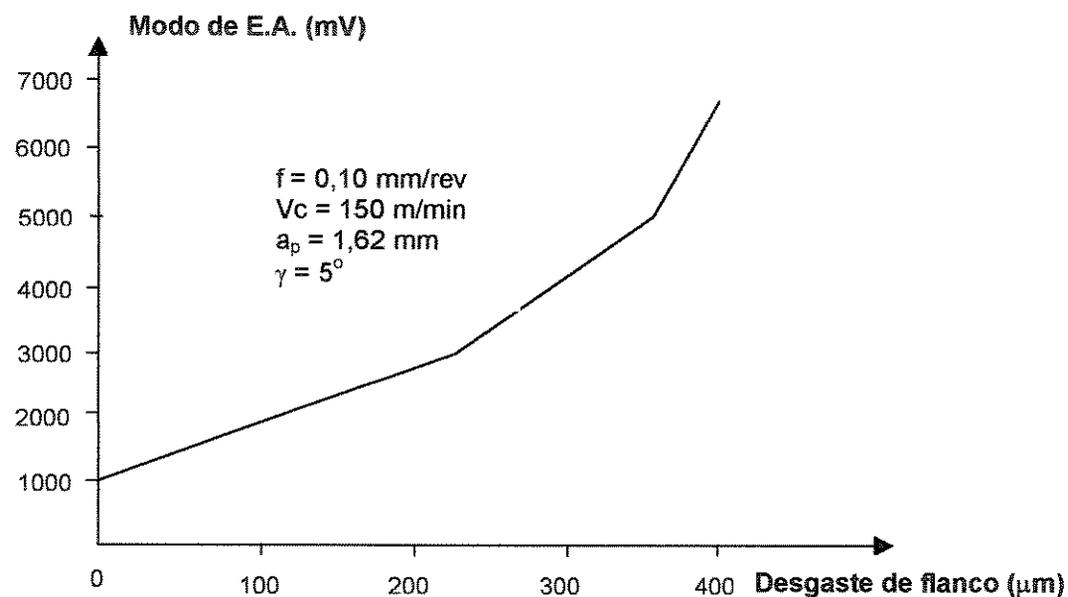


Figura 3.8 Influência do desgaste de flanco nos valores de E.A.

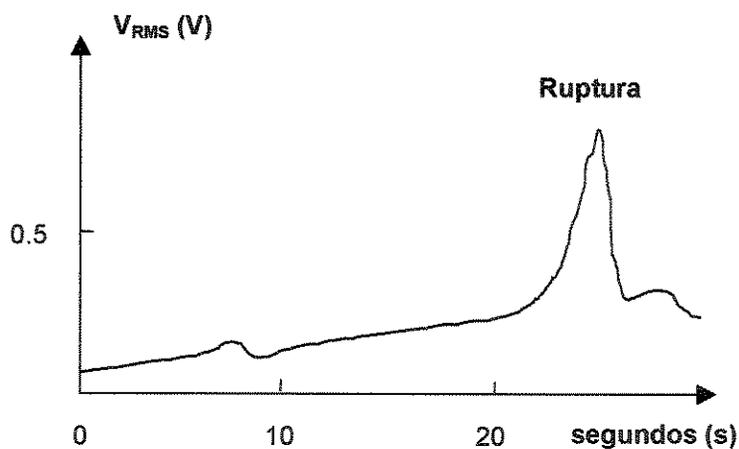


Figura 3.9 - Sinal de E.A. no momento de quebra da ferramenta

PIGARI (1995) em trabalho de dissertação, analisou o comportamento dos sinais de emissão acústica gerados em processo de torneamento, verificando que o sinal de E.A. (V_{RMS}) altera-se quando o fim de vida da aresta está próximo. O sinal cresce em operações de acabamento e diminui em operações de desbaste se não

houver correção na profundidade de usinagem efetiva, demonstrando que é possível a determinação do momento de troca da aresta, através do monitoramento do sinal de E.A. DINIZ, et al.(1992) correlacionaram a vida da ferramenta, ao desgaste e a rugosidade superficial monitorando sinais de E.A. em torneamento de acabamento.

3.3.4 – Via Vibração

O sistema completo de usinagem possui uma série de componentes que são fontes geradoras de vibração, uma das dificuldades encontradas é justamente a separação dos fatores que geram vibração e que não têm nada a ver com o processo de desgaste da ferramenta.

Este processo de monitoramento tem sido investigado por muitos pesquisadores tendo sido objeto de diversos trabalhos a nível de laboratório, todavia a aplicação prática é muito discutível.

Segundo SHAW (1986) as fontes que geram vibração em um processo de usinagem podem ser classificadas em dois tipos:

Vibração forçada – Acontece quando forças externas variando ciclicamente, apresentam uma frequência que se aproxima da frequência natural do sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça (M-F-D-P), o sistema tende a absorver ligeiramente mais energia por ciclo vibracional do que retorna ao meio através do amortecimento gerando a ressonância. Dentre os fatores que geram vibração forçada podemos citar:

- Desbalanceamento dos eixos
- Folgas nos mancais de rolamentos
- Má lubrificação
- Quebra de engrenagem
- Má utilização do equipamento

A amplitude vibracional devido à vibração forçada pode ser reduzida por: (JACOBSEN & AYRE, 1956)

- Eliminação das forças excitantes cíclicas
- Evitando a coincidência da frequência da força excitante e a frequência natural do sistema
- Aumento de rigidez do sistema
- Aumento do amortecimento

Vibração auto-excitada – Ocorre quando mais energia é absorvida do que desprendida durante um ciclo simples. Para induzir essa vibração basta apenas a ferramenta sofrer algum tipo de choque ou encontrar uma pequena incrustação mais dura no material da peça. O processo de formação de cavaco é um processo cíclico que gera vibração auto-excitada, outras fontes deste tipo de vibração podem ser a usinagem descontínua, a espessura do cavaco, o atrito, etc. (FERRARESI, 1977)

Conforme pode ser concluído das definições a vibração que interessa ao monitoramento de processo de desgaste e quebra da ferramenta é a vibração auto-excitada.

3.3.4.1 Influência das Condições de Usinagem na Estabilidade do Sistema

A estabilidade do sistema M-F-D-P depende de parâmetros tais como: velocidade de corte; avanço; condição da aresta de corte (forma, afiação); geometria de usinagem e material da ferramenta e da peça.

Segundo ARSHINOV & ALEKSEEV (1979):

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

b - Em velocidades de corte baixas, a vibração do sistema cresce com o aumento da velocidade. A partir de um determinado valor de velocidade, que depende da rigidez do sistema e da formação da aresta postiça de corte (APC), as vibrações tendem a decrescer. A rugosidade superficial especialmente em

operações de acabamento acompanha o da vibração, isto é, em altas velocidades de corte a rugosidade é menor devido às menores vibrações.

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

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

e - Quanto maior o raio de ponta, maior será a vibração do sistema, devido ao aumento da largura do cavaco, o que diminui sua espessura média, aumentando a pressão específica e os esforços de corte.

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

g - A forma da ferramenta também influencia a vibração, é o caso das ferramentas chanfradas que tendem a diminuir a vibração do sistema.

h - No torneamento de eixos finos e compridos ou de furos de diâmetro pequeno, é difícil evitar-se as vibrações, em consequência existe maior dificuldade de obter-se bons acabamentos superficiais e tolerâncias, sendo facilitada a quebra da ferramenta.

3.3.4.2 – Montagem e Instrumentação

A figura 3.10 mostra de uma maneira didática a montagem completa de um sistema experimental de monitoramento da vibração, para processos de torneamento (DINIZ, 1994). No sistema são utilizados equipamentos tais como:

Amplificadores, tem por finalidade amplificar a um nível adequado os sinais de saída dos sensores;

Filtros de Frequência, tem por finalidade a separação da faixa de frequência que realmente se deseja analisar eliminando-se os sinais provenientes de fenômenos alheios aos que se quer monitorar. Os filtros são classificados em três categorias: passa-baixa (filtram os sinais a partir de uma dada frequência superior),

passa-alta (que filtra os sinais com frequência inferior a um dado valor) e a passa banda (deixa passar somente os sinais de uma determinada faixa de frequência);

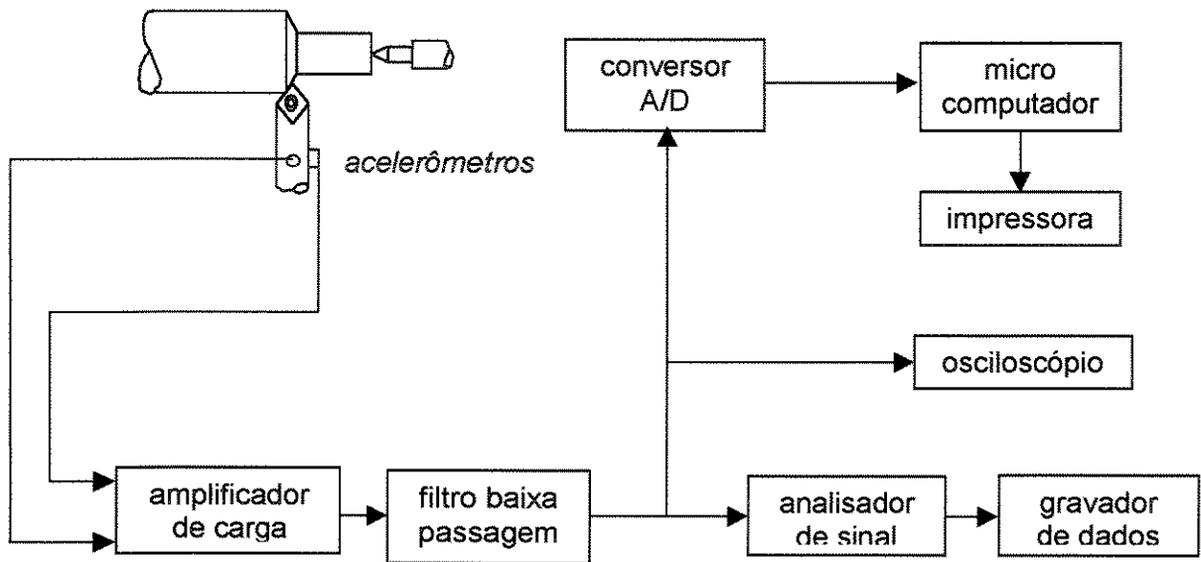


Figura 3.10 - Esquema de montagem de Sistema de monitoramento da Vibração

Gravador de Dados, tem pôr finalidade o armazenamento do sinal, possibilitando a sua análise posterior e um estudo mais detalhado do processo;

Analisador de Sinal, permite a construção do espectro de frequências do sinal via "hardware";

Osciloscópio, tem pôr finalidade o acompanhamento visual do sinal, muito importante na fase de análise do processo

Computador, permite gravar os dados, analisar o sinal, etc..;

Conversor A/D, permite integrar o uso de microcomputadores ao meio ambiente externo, sendo que estas placas interfaceiam os micros aos diversos sinais existentes externamente, sejam eles analógicos ou digitais;

Acelerômetros Piezoelétricos, (COSIDINE & ROSS, 1964). Os chamados materiais piezoelétricos são materiais que respondem eletricamente a uma força mecânica, sendo utilizados como dispositivos transdutores de choque, vibração e pressão. Os materiais piezoelétricos utilizados em acelerômetros geram uma força eletromotriz (fem) quando sujeitos a um movimento mecânico, e não geram saída

em condições de força estática. Estes materiais tem um alcance elástico linear em que produzem uma “fem” proporcional à aceleração do movimento mecânico do corpo em contato com ele (daí a origem do nome acelerômetro).

3.3.4.3 – Análise do Sinal e Estratégia de Monitoramento do Desgaste

A análise do sinal de vibração assim como outros tipos de sinais, pode ser feita no domínio do tempo ou da frequência. No domínio do tempo, são utilizados parâmetros estatísticos (média, desvio padrão, RMS, etc.). No domínio da frequência, a técnica mais utilizada é a da análise espectral, que permite avaliar a densidade de potência espectral (PSD), função que representa a distribuição de energia sobre o domínio da frequência. Em resumo quando um corpo vibra, normalmente o faz em infinitas frequências diferentes, cada uma com sua amplitude de vibração. A PSD permite ter uma idéia do valor desta amplitude para cada faixa de frequência.

A faixa de frequências para o estudo do monitoramento da vibração se situa na faixa de 0 a 20000 Hz, porém a maioria dos trabalhos de pesquisa limita a faixa de real interesse até no máximo 8000 Hz. Na tabela 3.1 estão indicados alguns trabalhos de pesquisa e suas respectivas faixas de frequência sensíveis ao desgaste da ferramenta.

PESQUISADOR	FAIXA DE FREQUÊNCIA SENSÍVEL
JIAN & XU, (1987)	0 – 117 Hz 510 Hz
RAO, (1986)	1850 Hz 3200 Hz 4800Hz
AKIHIKO & FUJITA, (1989)	500 - 800 Hz
PANDIT & KASHOU, (1982)	4300 – 4700 Hz
WELLER et al.,(1969)	0 – 4000 Hz
SOKOLOWSKI & KOSMOL, (1991)	0 – 600 Hz 5000 – 6000 Hz
MARTIN et al.,(1974)	2000 – 2500 Hz
FANG et al., (1991)	0 – 150 Hz 2000 – 2500 Hz

Tabela 3.1 – Faixas de Frequências Sensíveis ao Desgaste da Ferramenta

A determinação da faixa de frequências sensíveis ao desgaste da ferramenta é a principal dificuldade que o pesquisador enfrenta, todavia uma vez feita sua determinação, o monitoramento via vibração torna-se muito atraente. A faixa encontrada está associada a frequência natural do porta-ferramenta, que pode ser determinada, sendo necessário somente causar um impacto no porta-ferramenta e, com o próprio sistema de monitoramento, encontrar sua frequência natural, que será a frequência do sinal de resposta causado na ferramenta pelo impacto.

WELLER et al. (1969) apresentaram procedimento para análise do sinal de vibração na usinagem:

- divide-se o sinal, com filtros de frequência, em duas faixas, uma de 0 a 4000 Hz e a outra de 4000 a 8000 Hz;
- os sinais passam por um circuito que divide o valor do sinal de um pelo outro, obtendo-se uma relação;
- em função dos resultados obtidos, o sinal da faixa de frequências mais alta não se altera com o desgaste, o que ocorre na faixa mais baixa;
- quando tal relação chega a um nível pré-determinado, emite-se um sinal de indicação de ferramenta gasta.

AKIHIKO & FUJITA (1989) comparam o sinal entre a ferramenta nova e o valor instantâneo da vibração, sendo esta relação a representação do fenômeno de desgaste da ferramenta.

MARTIN et al. (1974) apresentam método para determinação da ferramenta gasta. Admite-se uma relação de 1:10 entre o nível de sinal emitido pela ferramenta gasta e aquele emitido pela ferramenta em início de vida, quando esta relação é atingida procede-se a troca da ferramenta.

SOKOLOWSKI & KOSMOL (1991) executaram análises do sinal para detecção do desgaste de flanco da ferramenta, estabelecendo relações entre o fator de desgaste da ferramenta e a amplitude da vibração.

RAO (1986) descreve técnica para monitoramento em tempo real do desgaste de flanco em operação de torneamento usando WI ("Wear Index") que é uma medida de resistência na interface peça-ponta da ferramenta ao longo do flanco, para as oscilações do porta-ferramenta durante a usinagem.

BONIFÁCIO (1993) usinando aço ABNT 4340 com pastilha de metal duro recoberta, analisou o sinal de vibração, chegando a conclusão que o mesmo é um bom parâmetro para monitoramento de torneamento de acabamento, afim de definir o fim de vida da aresta de corte. Tendo obtido em ensaios bons resultados e repetibilidade. Verificou também, que a rugosidade e o RMS do sinal não têm comportamento similar durante a usinagem, salvo quando ocorre o desgaste rápido da aresta de corte e que a influência das condições de corte na rugosidade foi diferente da influência no sinal de vibração.

Capítulo 4

Sistemas de Monitoramento – Aplicações Práticas

4.1 Introdução

Conforme indicado no capítulo 3 os sensores a serem utilizados em monitoramento devem cumprir uma série de requisitos, sendo que somente uma fração dos sensores disponíveis no mercado podem ser utilizados para monitorar as condições da ferramenta.

TÖNSHOFF et al.(1988) em trabalho sobre desenvolvimento e tendências em monitoramento e controle dos processos de usinagem, comenta a respeito do uso limitado dos sistemas de monitoramento na indústria, existindo por exemplo sistemas de monitoramento que supervisionam e controlam trabalhos específicos como a usinagem de uma peça com um determinado material e parâmetros de usinagem. Aponta também que outra das razões de falha da maioria dos sistemas de monitoramento e controle é a aplicação de modelos sofisticados, nos quais existe uma pequena correlação entre a variável detectada pelos sensores e a variável interessante do processo. O trabalho normalmente é restrito a usinagem de peças de ferro fundido de geometria simplificada e repetitiva.

Concluindo, comenta que os sistemas de monitoramento e controle podem aumentar sua confiabilidade nos processos de usinagem uma vez que os mesmos estão em seu início, devendo ser feito muito antes que aplicações com sucesso sejam comuns na prática.

Mais recentemente BAYRNE et al. (1995) publicaram trabalho a respeito do monitoramento da condição da ferramenta (TCM) – “Estado da Pesquisa e Aplicação

Industrial”, apontando os sensores de força, potência e emissão acústica como os mais comuns no ambiente industrial de usinagem. No trabalho tiveram participação representantes dos pesquisadores acadêmicos, dos fabricantes dos sistemas industriais e dos usuários dos mesmos.

Os bons resultados técnicos obtidos nos processos de produção, assim como na fabricação de ferramentas não são os únicos desafios a serem vencidos para o sucesso dos sistemas de monitoramento de uso industrial. É necessário também vencer os desafios a respeito de:

- a incerteza na mente do usuário a respeito do que será medido;
- a dúvida a respeito do sistema de monitoramento mais adequado;
- das razões para uma inadequada ou inesperada performance dos sistemas de monitoramento, que podem não estar relacionadas com a tecnologia de monitoramento mas com outras dificuldades, como defeitos na interface da máquina, erros de operação no “setup” ou na operação do sistema de monitoramento.

Os construtores de máquinas ferramentas frequentemente preferem ver estes sistemas de monitoramento usados para proteção da máquina ferramenta/eixo principal de eventos inesperados ou falhas (KEGG, 1993)

INASAKI (1994) em trabalho de auditoria realizado em 31 usuários no Japão, aponta aplicações de sistemas de monitoramento distribuídas entre os seguintes grupos industriais: fabricantes de máquinas-ferramenta (30%), componentes automotivos (17%), fabricantes de ferramentas (13%), fabricantes de produtos elétricos/mecânicos (25%) e “outros” (15%), como pode ser visualizado na figura 4.1 abaixo.

Em relação à tecnologia do sensor, a segurança do sistema e da informação transmitida foi classificada como a mais “alta importância” (acima de 80 % dos auditados). A segurança foi mais importante para os usuários que a relação custo/benefício, na avaliação 87% e 45% respectivamente.

A maioria de aplicações relacionadas com a quebra/desgaste da ferramenta foi considerada menos importante. Os auditados também sentiram que os sistemas de

monitoramento deveriam ter a capacidade de auto-diagnóstico e teste de função incorporadas.

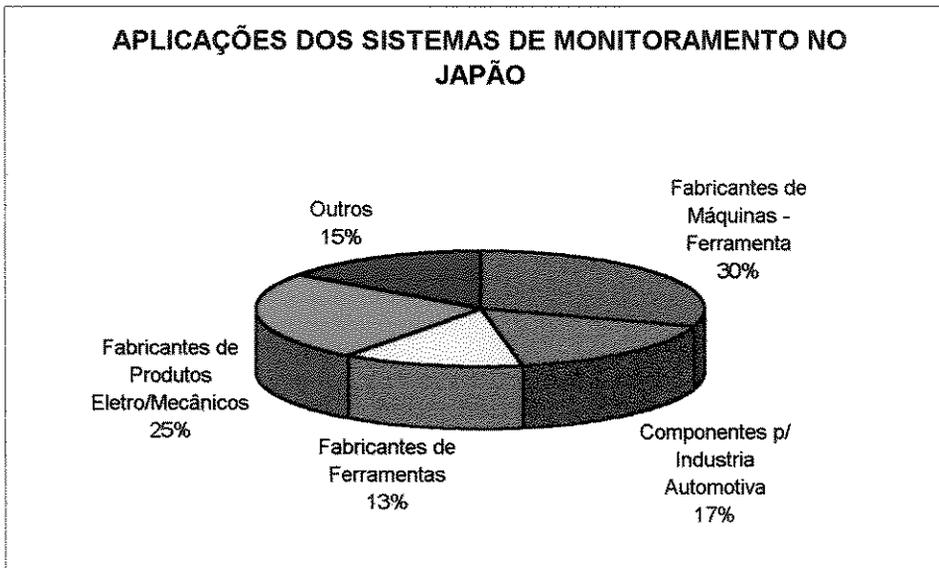


Figura 4.1 - Auditoria em 31 Usuários - Aplicações de Sistemas de Monitoramento

Outro trabalho muito importante foi realizado pela indústria automotiva alemã, através da empresa Mercedes Benz AG, a qual tomou a seu cargo uma avaliação de sistemas implementados na sua produção. Dos sistemas de monitoramento avaliados 57% foram usados em torneamento e 42% em furação. (Figura 4.2)

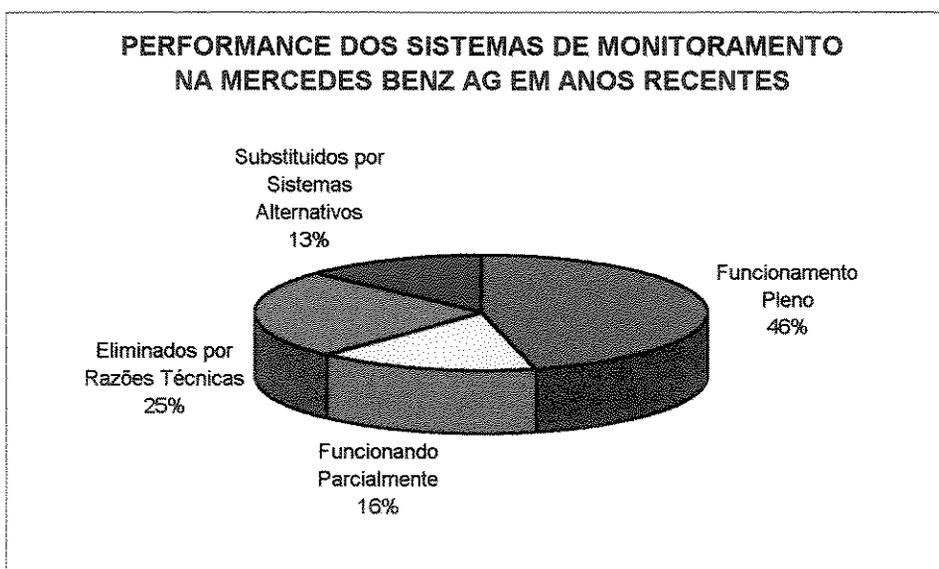


Figura 4.2 - Levantamento realizado na M. Benz sobre Sistemas de Monitoramento

Na avaliação de sistemas instalados, foi encontrado que somente 46% eram plenamente funcionais, 16% tinham limites no seu funcionamento, 25% dos sistemas não eram funcionais devido a limitações de ordem técnica e 13% tinham sido substituídos por sistemas alternativos. Foi apontada a interação incorreta do usuário como uma das causas principais para que os sistemas fossem colocados fora do ambiente de produção. O treinamento do pessoal é deste modo um elemento vital na implementação bem sucedida dos sistemas de monitoramento das condições da ferramenta.

WEISS (1994) inspecionou 26 fabricantes de sistemas de monitoramento das condições da ferramenta e 20 usuários num total de 1161 sistemas instalados em áreas industriais (alta ênfase no ramo automotivo). Os sistemas de monitoramento incluíam sensores de emissão acústica (27%), deformação (22%), força (17%), corrente (17%), e outros (17%), figura 4.3. Estes sistemas foram implementados para monitorar o desgaste da ferramenta (28%), colisão (22%) e quebra (50%), figura 4.4, mostrando resultados similares a os de INASAKI. A figura 4.5 mostra a distribuição dos sistemas de monitoramento por área de aplicação.

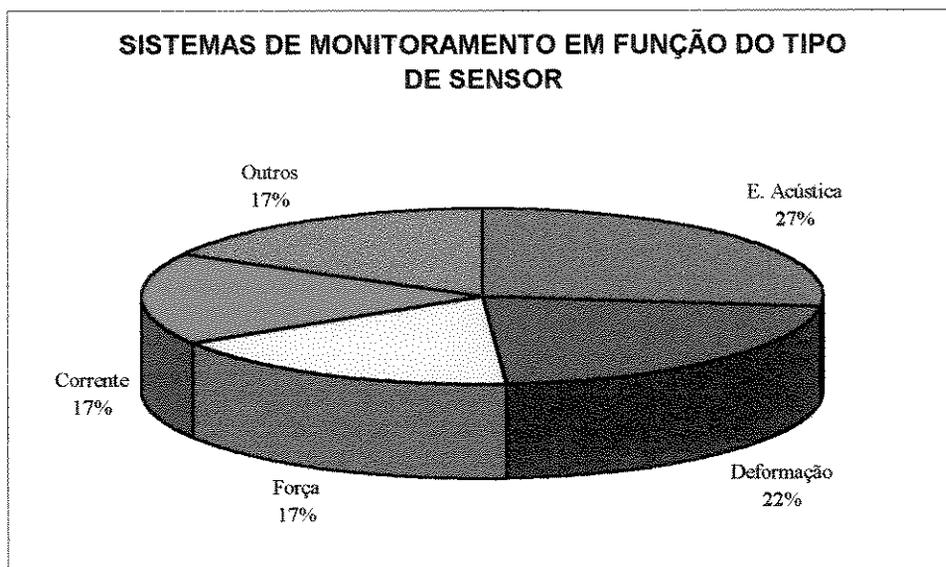


Figura 4.3 – WEISS (1994) Sistemas de Monitoramento em função do tipo de Sensor

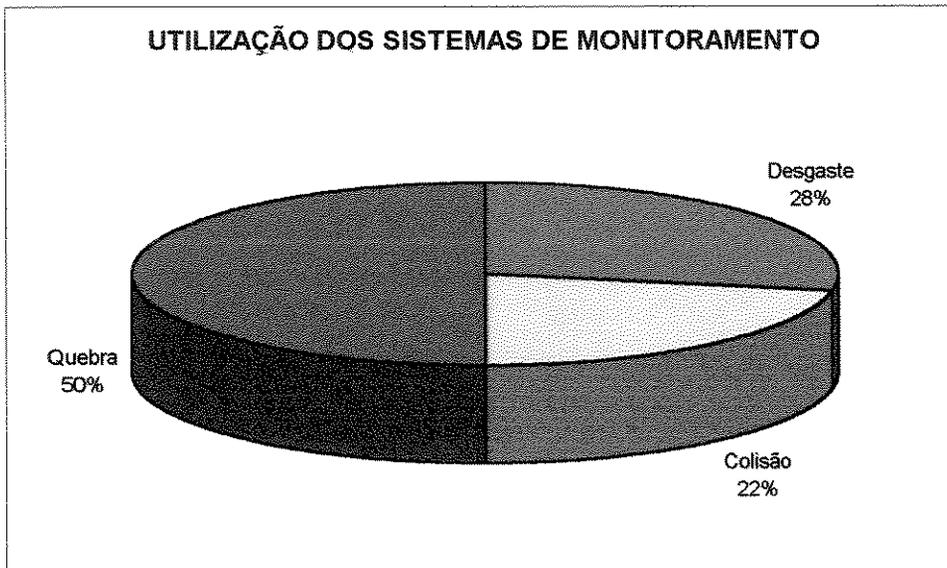


Figura 4.4 – WEISS (1994) Área de utilização dos Sistemas de Monitoramento

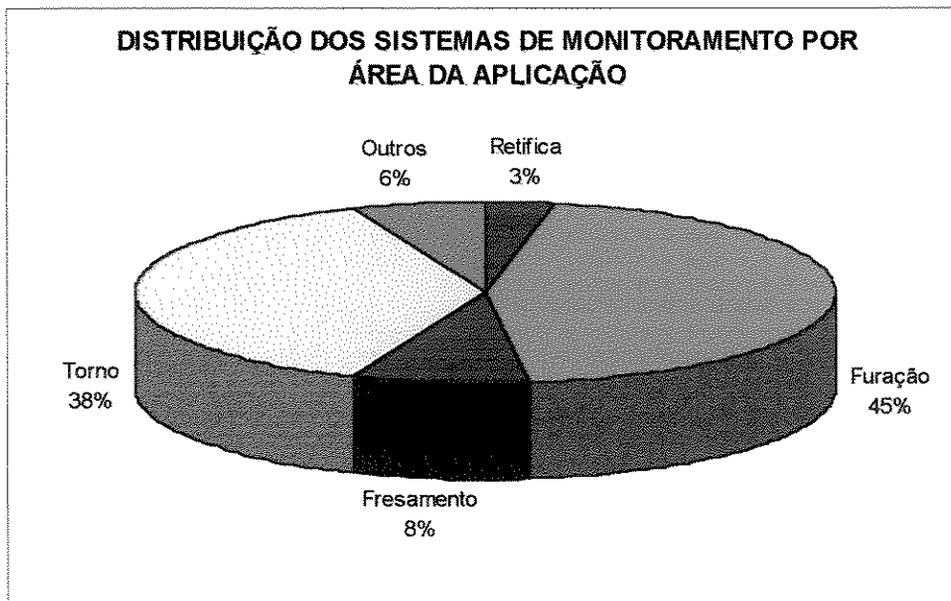


Figura 4.5 - WEISS (1994) Sistemas de Monitoramento por Área de Aplicação

A percepção que os usuários de sistemas podem ter do sucesso ou falha de uma determinada tecnologia de monitoramento depende das suas expectativas em

relação à performance do sistema. DIEL (1993), apontou diferenças substanciais no interesse dos usuários de comparar o monitoramento de colisão da aresta de corte (sistema normalmente instalado na máquina ferramenta), em relação ao monitoramento do desgaste, quebra e colisão da aresta de corte. Similarmente, quando a performance dos sistemas de monitoramento é avaliada, somente 15% das falhas são devidas ao sistema de monitoramento, 50% à erros do operador, 20% à defeitos de interface da máquina ferramenta e 15% à escolha de uma estratégia de monitoramento errada. (figura 4.6) As expectativas para que os sistemas não apresentem defeitos é de somente 5%. Em função deste número nenhum sistema deverá ter expectativas de operar com 100% de segurança.

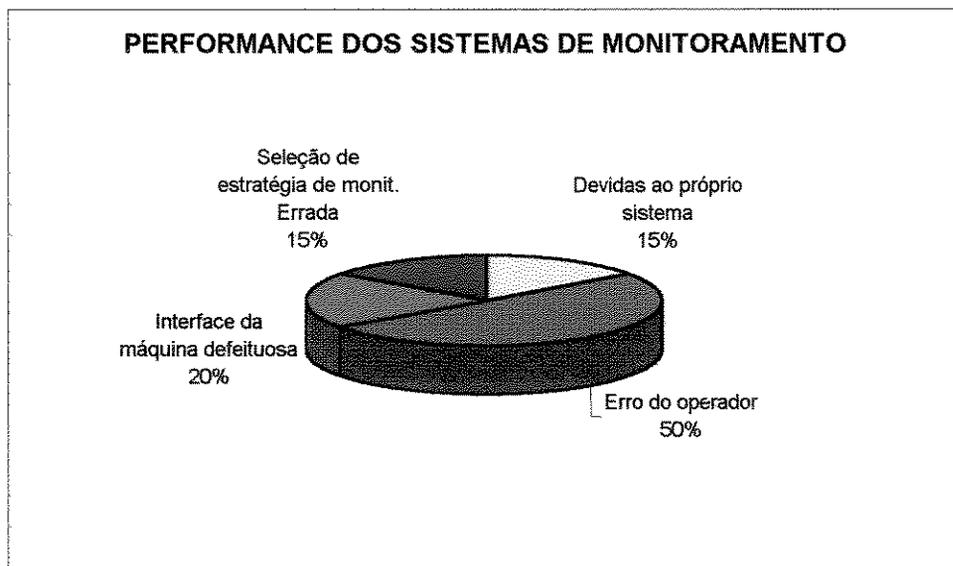


Figura 4.6 – Avaliação de DIEL (1993) Performance dos Sistemas de Monitoramento

A transformação dos sensores únicos usados basicamente em serviços de diagnóstico nos processos de usinagem, para sensores fazendo parte de um sistema inteligente de monitoramento da ferramenta, processo e controle tem ocorrido muito ativamente na última década. KEGG (1994) resume a história das aplicações de sensores em máquinas ferramenta dos anos de 1950 a 1980. Os chamados sensores inteligentes incluem como parte de suas habilidades a calibração e diagnóstico próprios, condicionamento de sinal e, importante, a decisão a ser tomada

Como conclusões e perspectivas para futuras pesquisas e desenvolvimentos o trabalho de BYRNE et al. (1995) aponta:

1 – Os usuários de sistemas relataram a espera de melhoramentos na estabilidade do processo, na detecção da quebra da ferramenta, na redução do tempo não produtivo, na otimização do emprego da ferramenta, etc.

2 – Em função das colocações acima, nos futuros sistemas de monitoramento das condições da ferramenta, diversas solicitações feitas por usuários deverão ser obedecidas, tais como:

- Reduzido tempo de resposta
- Máxima confiabilidade de operação
- Ampla capacidade de integração nos sistemas de manufatura
- Alta robustez
- Baixos custos de instalação
- Operação amigável, com o mínimo de calibração
- Pequeno espaço requerido
- Modificações mínimas no sistema de manufatura , para sua instalação
- Pequena manutenção

3 – A adequabilidade do sistema deverá ser provada em termos econômicos.

4 – Os futuros sistemas de monitoramento serão caracterizados pela alta performance devido à integração mais eficaz entre “hardware” e “softwares”, em função de:

- Rápidos e mais eficientes processadores de sinais digitais
- Miniaturização dos componentes microeletrônicos
- Desenvolvimento de componentes híbridos (sensores e circuitos analógicos e digitais em um só chip)
- Componentes de sistemas baratos(CPU, hard disk, memórias etc.)

Esta integração permitirá o emprego de tecnologias inteligentes de informação tais como: redes neurais, sistemas especialistas, lógica fuzzy, modelos baseados em algoritmos, etc. que irão ajudar na determinação do relacionamento de processos complexos com os dados colhidos através dos sensores.

Os sistemas de monitoramento comercializados e que podem ser utilizados com relativa segurança, tem frequentemente limites estreitos de performance ou requerem um treinamento importante ou demandam que o tempo de "setup" funcione corretamente. Todavia, atividades de pesquisas e desenvolvimento prometem um melhoramento seguro nestes sistemas

KLUFT (1997) coloca em evidência, o fato que, atualmente os fabricantes de sistemas de monitoramento oferecem uma vasta gama de soluções individuais para processos de corte, com plataformas diferentes de "hardware" limitando-se a uma única estratégia de monitoramento e, na maioria das vezes, a uma única variável de sensor. Como as unidades de produção usam, em consequência, uma grande variedade de sistemas de monitoramento, as diferenças de estratégias operacionais e de painéis de controle levam à confusão ou à esforços injustificáveis de reparos e manutenção.

4.2 Comentários

1 – Conforme pode-se verificar através das mais recentes fontes bibliográficas existem muitos pesquisadores empenhados em melhorar os sistemas atuais de monitoramento.

2 – Os fabricantes de sensores estão empenhados em obter produtos que possam atender as exigências do mercado.

3 – O futuro dos sistemas de monitoramento é sem dúvida muito bom e dia há de vir quando realmente os sistemas possam ser confiáveis e incorporados no dia a dia da produção, especialmente os chamados sistemas inteligentes.

4 – Pode também ser verificado que, mesmo com a comprovação obtida de funcionamento de determinados sistemas de monitoramento em laboratório, a prática da utilização destes sistemas deixa muito a desejar e os usuários solicitam e reivindicam uma série de providências.

5 – Os levantamentos de performance apresentados na bibliografia realizada por diversos pesquisadores nos chamados países do primeiro mundo e apresentados em gráficos, mostram que é necessário melhorar não somente o equipamento, mas também é necessário investir no fator humano e naquilo que diz respeito a seu treinamento e motivação.

6 – Os sistemas de monitoramento que mais têm sido aplicados na prática industrial estão ligados à detecção da colisão e quebra da ferramenta, especialmente quando se fala de operações de torneamento.

7 – Os usuários envolvidos na pesquisa feita por INASAKI, (1994) declararam considerar o monitoramento do desgaste da aresta de corte menos importante que o monitoramento da quebra da aresta de corte, mostrando uma clara preocupação em primeiro lugar com a segurança.

8 – A globalização e a necessidade das empresas serem cada dia mais competitivas, isto ligado ao fato de que existe uma evolução nas ferramentas tornando-as mais eficientes e custosas, deverá fazer com que as indústrias sejam mais interessadas no monitoramento do desgaste da aresta corte no futuro.

9 – A maioria das máquinas ferramentas para operações de torneamento instaladas nas fábricas no mundo inteiro e principalmente do nosso país não possuem hoje sistemas de monitoramento do desgaste da ferramenta em operação, do mesmo modo não possuem um critério definido para a troca da ferramenta, a qual passa a ser trocada em função da experiência do operador, o que tem gerado despesas desnecessárias às empresas envolvidas. PIRES & DINIZ, (1996) publicaram trabalho a respeito do desperdício de ferramentas de torneamento em empresas de usinagem não automatizada.

4.3 Conclusão

Os capítulos 3 e 4 tratam especificamente sobre monitoramento, o primeiro a respeito do monitoramento de forma geral focaliza os diversos sistemas utilizados em usinagem, o segundo trata da aplicação prática destes sistemas em função de relatórios e trabalhos conhecidos e citados. Estes dois capítulos são importantes no contexto do trabalho apresentado, principalmente o segundo, pois mostra que, mesmo existindo grandes desenvolvimentos em nível de pesquisa, nos ambientes de produção existe ainda muito a ser feito. É justamente para facilitar e otimizar o trabalho produtivo de uma forma mais simplificada, que a metodologia objeto desta dissertação é proposta, até que os modernos sistemas de monitoramento possam ser plenamente utilizados industrialmente.

Capítulo 5

Trabalhos Prévios de Otimização

5.1 Introdução

Conforme RODRIGUES et al. (1987), para determinar-se as condições de usinagem de uma peça é necessário considerar:

a – o avanço e profundidade de usinagem em função de considerações restritivas do sistema (geometria da ferramenta, geometria da peça, tolerâncias, rigidez do sistema máquina-dispositivo-ferramenta-peça, etc.) Satisfeitas as restrições, os valores de avanço e profundidade de corte devem ser máximos

b – uma velocidade de corte otimizada que considere um equilíbrio entre custo e produção. Nestes casos, fala-se que a velocidade de corte deve estar dentro do intervalo de Máxima Eficiência (IME), que é limitado pela Velocidade de Mínimo Custo (V_o) e pela Velocidade de Máxima Produção ($V_{m\text{xp}}$). A $V_{m\text{xp}}$ é a velocidade de corte para a qual a soma dos tempos de troca de ferramenta e de usinagem são mínimos. V_o é a velocidade para a qual existe um equilíbrio entre o custo referente ao salário/homem e o salário/máquina de uma parte e o custo de número de arestas de corte utilizadas de outra parte. Na figura 5.1 (FERRARESI, 1977) é mostrado o IME., sendo necessário o cálculo de V_o e de $V_{m\text{xp}}$ o que é feito através das fórmulas:

$$V_{m\text{xp}} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1)t_{\text{ft}}}} \quad (5.1)$$

Onde:

- x e K são as constantes de Taylor, onde x representa a sensibilidade de vida da aresta de corte para a variação da velocidade de corte e K representa a influência do material, isto é, pode ser interpretado como a vida da ferramenta para uma velocidade de corte de 1m/min.

- t_{ft} é o tempo de troca da aresta de corte

$$V_o = \sqrt[x]{\frac{C_2 \times K}{60 \times (x-1) \times C_3}} \quad (5.2)$$

Onde:

- $C_2 = Sh + Sm$

- $C_3 = K_{ft} + t_{ft} / 60 \times (Sh + Sm)$

- Sh é o salário do operador (R\$/hora)

- Sm é o custo total da máquina (R\$/hora)

- K_{ft} é o custo da aresta de corte por vida (R\$)

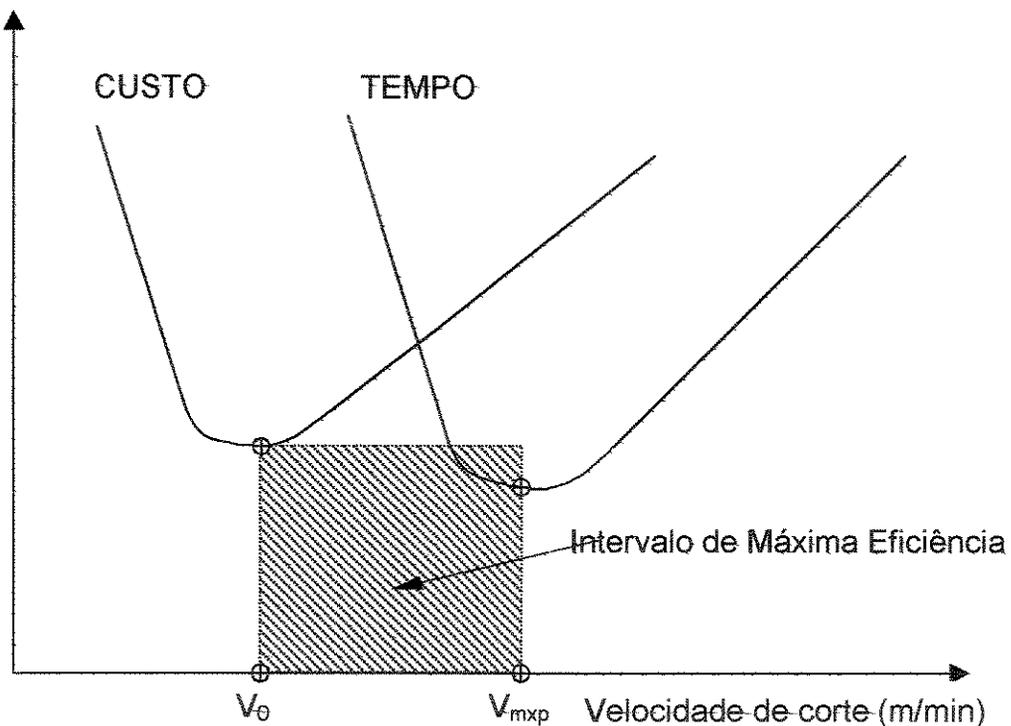


Figura 5.1 – Intervalo de Máxima Eficiência (IME). FERRARESI (1977)

5.2 Trabalhos Prévios de Otimização

PALLEROSI & COPPINI (1975) apresentaram trabalho sobre “Durabilidade das Ferramentas de Corte sobre Condições Reais”. Iniciando-se pela equação de Taylor é possível determinar que:

$$x = 1 + \frac{\log[Zt_i / Zt_{i+1}]}{\log[Vc_{i+1} / Vc_i]} \quad (5.3)$$

$$K = Zt_i \times tc_i \times (Vc_i)^x \quad (5.4)$$

Onde:

(x), (K) São os coeficientes de Taylor

(Zt) É o número de peças usinadas por vida de aresta de corte

(Vc) É a velocidade de corte mantida constante [m / min]

(tc) É o tempo de corte [min]

(i) Caracteriza a condição inicial de corte adotada no início da aplicação da metodologia

Seguindo o método proposto, os coeficientes da vida da ferramenta x e K podem ser obtidos durante a evolução do processo de usinagem, podendo ser aplicados para alta produção bem como para alta frequência de lotes do mesmo componente (peça) ou componentes (peças) similares classificadas sobre a base da Tecnologia de Grupo.

Para aplicar a metodologia, a primeira Vc deve ser selecionada seguindo metodologias tradicionais.(catálogo de fabricante de ferramentas ou velocidade normalmente utilizada na produção das peças envolvidas) Para a Vc selecionada, a média do número de peças por vida de aresta de corte deve ser tomada em conta durante a produção normal. É muito importante manter sempre o mesmo critério específico para a troca da aresta de corte.

O mesmo procedimento pode ser aplicado para um segundo valor de velocidade de corte, adotado em torno de $\pm 20\%$ em relação ao primeiro. Quando a mesma ferramenta trabalha em vários estágios, a condição de validade para (x) e (K) deverá ser verificada. As vantagens do estabelecimento de equações gerais a partir da média do número de peças usinadas por vida de aresta de corte (Z_t) , é evidente porque a substituição da ferramenta na prática, deve ser feita somente na base do limite do desgaste convencional.

Posteriormente, VILELLA et al. (1989) propuseram metodologia para determinar a melhor velocidade de corte para a máxima produção. Para uma melhor seleção de velocidade de corte, eles mostraram que é suficiente utilizar como referência válida, somente o lado direito do intervalo de máxima eficiência, isto é a velocidade de corte para a máxima produção. Seguindo esta sugestão, não é necessário, na maioria das vezes, determinar o lado esquerdo do mencionado intervalo, o qual é definido pela velocidade de corte para o custo mínimo.

A metodologia proposta usa a determinação dos coeficientes da equação de TAYLOR em condições reais e a melhor condição é baseada somente em condições técnicas. Para a minimização dos custos de produção é necessária a utilização de sistema complementar de análise e determinação de custos como o sistema ABC, etc.

Na validação do método, o autor usa a relação (D) entre (V_{msp}) , velocidade de corte para a máxima produção e (V_o) , velocidade de corte para o custo mínimo; o qual é dado por:

$$D = \frac{V_{msp}}{V_o} = \sqrt[3]{1 + \frac{60 \times K_{ft}}{(Sh + Sm) \times t_{ft}}} \quad (5.5)$$

Onde:

(K_{ft}) É o custo da vida da aresta da ferramenta [R\$]

(t_{ft}) É o tempo de substituição da ferramenta [min]

(S_m) É o custo total da máquina [R\$/hora]

(S_h) É o custo do operador [R\$/hora]

É muito fácil deduzir que (D) é sempre igual ou maior que 1. Isto quer dizer que a $(V_{m\text{xp}})$ é sempre igual ou maior que (V_0) . Como a $(V_{m\text{xp}})$ foi determinada em “condições reais”, a melhor velocidade de corte a ser selecionada deverá ser menor ou igual ao valor da $(V_{m\text{xp}})$.

Para analisar se $(V_{m\text{xp}})$ poderia ser a condição suficiente a ser usada como referência para a seleção da velocidade de corte, foi considerada a variação de (D) quando K_{ft} , S_{h} , S_{m} e t_{ft} assumem valores diferentes. Esta validação foi feita modificando os valores dos parâmetros numa simulação hipotética.

Dois casos foram apontados:

- Quando (D) tende para 1
- Quando (D) tende para um número grande

Para ambos casos foram analisadas as performances dos seguintes parâmetros:

(K_{V_0}) É o custo por componente (peça) trabalhada com V_0

$(K_{V_{m\text{xp}}})$ É o custo por componente (peça) trabalhada com $V_{m\text{xp}}$

(R_k) É a relação $K_{V_{m\text{xp}}} / K_{V_0}$

No primeiro caso, (D) tende para 1, quando (K_{ft}) tende para um valor baixo ou quando (S_{h}) , (S_{m}) e (t_{ft}) tendem para valores altos. Sempre que (R_k) diminui, $(V_{m\text{xp}})$ é condição suficiente a ser usada como referência para uma melhor determinação da velocidade de corte a ser utilizada, a qual deverá situar-se muito próxima da $(V_{m\text{xp}})$. Esta seleção é feita desta forma porque $(V_{m\text{xp}})$ é aproximadamente igual a (V_0) .

No segundo caso (D) tende para um grande número, quando (t_{ft}) , (S_{h}) , e (S_{m}) tendem para um valor baixo, ou quando (K_{ft}) tende para um valor muito alto. Quando (t_{ft}) tende para um valor muito baixo, $(V_{m\text{xp}})$ tende para um valor alto que normalmente torna-se maior que a velocidade máxima de corte existente na máquina ferramenta. Por isto a melhor velocidade de corte a ser usada deverá ser selecionada perto da velocidade de corte máxima existente na máquina ferramenta.

Se ($V_{m\text{xp}}$) pertence à faixa das velocidades de corte existentes na máquina ferramenta, o autor sugere que a melhor velocidade de corte a ser utilizada deverá ser de cerca de 20 % menor que a ($V_{m\text{xp}}$). Esta recomendação é feita porque a relação (R_k) torna-se muito alta quando (t_{ft}) tende para um valor muito baixo e por isso torna-se muito dispendioso trabalhar muito perto da ($V_{m\text{xp}}$).

Por outro lado, quando (S_h) e ou (S_m) tornam-se baixos e (K_{ft}) torna-se muito alto, a relação (R_k) é um fator limitante, porque torna-se muito alto. Neste caso os autores também sugerem que a melhor velocidade de corte a ser usada seja selecionada cerca de 20 % abaixo que a ($V_{m\text{xp}}$), pela mesma razão mencionada acima.

5.3 Inteligência Artificial

5.3.1 Introdução

A Inteligência Artificial (IA) é simplesmente uma maneira de fazer o computador pensar inteligentemente (ARARIBOIA, 1988). Isto é obtido através do estudo de como as pessoas pensam quando estão tentando tomar decisões e resolver problemas, dividindo esses processos de pensamentos em etapas básicas e projetando um programa de computador que solucione problemas usando essas mesmas etapas.

Os programas de IA possuem estruturas de controle apartadas do domínio de conhecimento e esse conhecimento ficará disponível, podendo ser utilizado quando for necessário na solução de um problema. Em programas normais, as mudanças de bases de dados geralmente acarretam grande impacto para o programa, o que não acontece no caso de programas inteligentes onde a troca de bases de dados é corriqueira e feita quando necessário.

As aplicações conhecidas da IA são mostradas na figura 5.2. Essas aplicações foram definidas por NILSSON (1980)

- *Busca Heurística* – é um método de soluções de problemas em que se utiliza tentativa e erro, executada em estrutura de árvore, começando no topo de uma condição inicial e bifurcando cada vez que se toma uma decisão.

- *Representação do Conhecimento* – os procedimentos inteligentes não são baseados somente em métodos de raciocínio, mas principalmente no conhecimento armazenado (devido ao vasto conhecimento que um ser humano adquire durante a vida, tornando-o um especialista em determinada área). Para que a exploração do conhecimento possa ser feita, é vital que este seja representado de forma conveniente. O formalismo lógico é requisitado, pois sugere uma forma poderosa de se derivar novos conhecimentos a partir dos velhos.

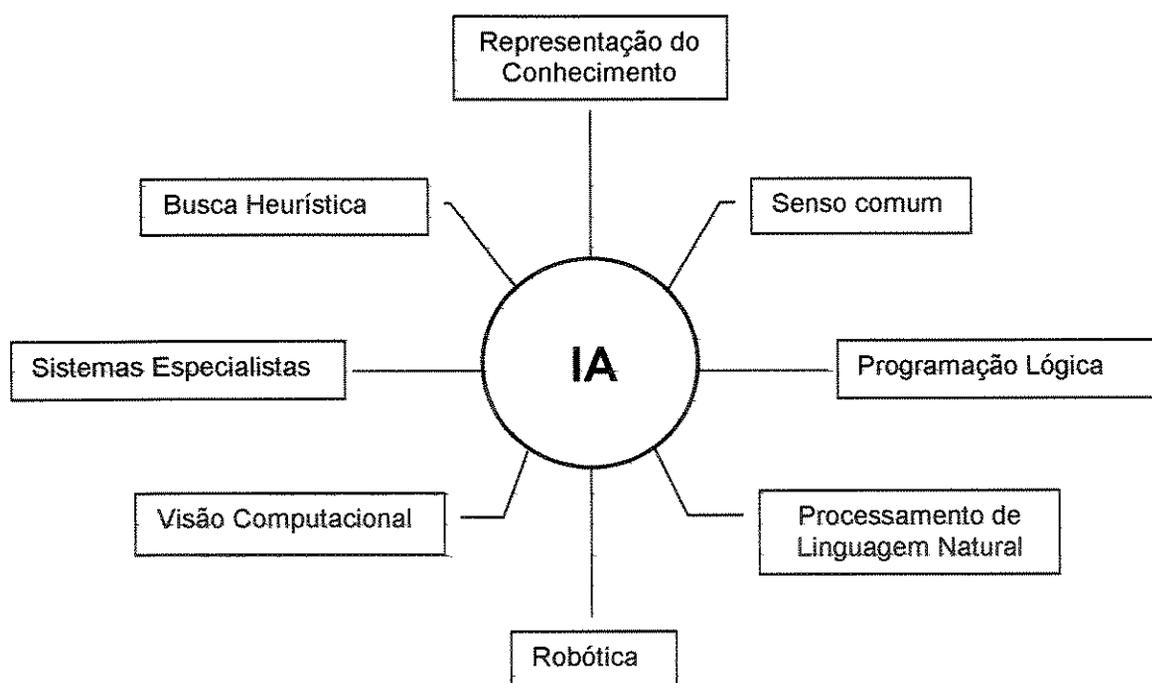


Figura 5.2 – Principais Aplicações de IA

- *Senso Comum e Lógica* – o raciocínio de senso comum é difícil para se modelar em computador. Senso comum é raciocínio de baixo nível, pois está diretamente ligado a aspectos subjetivos como vivência e senso prático. É necessário repassar à máquina regras para que ela possa executar a programação com entendimento satisfatório. A representação do senso comum, em sistemas de programação, é considerada um tópico chave em IA, com poucas chances de

solução satisfatória em pouco tempo. Uma outra área muito importante em IA é a Programação Lógica, através da qual pode-se realizar deduções através de fatos e regras.

- *Processamento de Linguagem Natural* – esta área se preocupa em desenvolver programas que entendam a linguagem falada e escrita, visando a interação com máquinas por meio desta linguagem. O processo empregado para se fazer um computador entender sentenças é composto de programas que juntos formam o “analisador de linguagem natural”.

- *Visão Computacional* – a visão processada por computadores possibilita-lhes ver, identificar e entender o que estiver “procurando” (CAILLIRAUX & ALVARENGA, 1989). Esse processo pode ser subdividido em várias partes: sensoreamento, pré-processamento, segmentação, descrição, reconhecimento e interpretação.

- Sensoreamento: o processo de aquisição de imagem;
- Pré-processamento: serve para a redução de ruído e realce de detalhes;
- Segmentação: é o processo de partir a imagem em objetos de interesse;
- Descrição: serve para identificar características que são usadas para diferenciar um objeto de outro;
- Reconhecimento: processo de identificação de um objeto específico;
- Interpretação: atribui um significado especial a um conjunto de objetos que foram reconhecidos.

- *Sistemas especialistas* - são sistemas projetados para emitir uma decisão ou parecer sobre determinada área do conhecimento humano.

- *Robótica* – o controle de robôs (não a sua construção), explora aspectos que envolvem flexibilidade, adaptação ao ambiente e capacidade de planejar, tornando-os mais interativos com o ambiente.

5.3.2 Sistemas Especialistas (SEs)

Os SEs são programas que imitam o comportamento de especialistas humanos, utilizando informações que o usuário fornece, para emitir uma opinião sobre determinado assunto (SCHILDT, 1989).

BARBORAK et al. (1991), definem o SE como aquele projetado para simular o conhecimento e raciocínio de um especialista humano e faz com que o conhecimento fique disponível para outras pessoas de forma útil. Os termos Sistemas de Conhecimento e Sistemas Baseados em Conhecimento são frequentemente usados como sinônimos de SEs.

5.3.2.1 Composição dos SEs

Os SEs são compostos por três partes fundamentais: Base de Conhecimento, Base de Dados e Máquina de Inferência.

- *Base de Conhecimento* – “knowledge base” é que contém toda a sabedoria de um especialista, sendo formada por descrições, relacionamentos e procedimentos em relação a um determinado domínio. As descrições identificam e diferenciam objetos e classes, e geralmente incluem regras a respeito de suas aplicações. Os relacionamentos descrevem as dependências e associações entre as informações na base de conhecimento. Os procedimentos especificam o raciocínio das operações que devem ser executadas.

- *Base de Dados* – “data base” contém os fatos e informações relativas ao domínio que está sendo explorado. É uma coleção simples de símbolos usados para refletir um fato, um estado ou uma hipótese, sendo que a interpretação desses símbolos dependem basicamente da natureza da aplicação

- *Máquina de Inferência* – “inference system” é o sistema de controle que dirige a implementação do conhecimento. Ela decide quais técnicas de busca heurística são usadas para determinar como as regras de base de conhecimento

são aplicadas para o problema. A rotina de busca analisa através de soluções alternativas para proceder de um ponto de partida, ou estado inicial, para um objetivo ou vice-versa.

A máquina de Inferência é um protocolo de programa para navegar através de regras e dados da representação do conhecimento para resolver o problema. Sua tarefa é selecionar e aplicar a regra mais apropriada em cada passo da execução do SE.

5.3.2.2 Sistema Especialista de Usinagem - SEU

COPPINI & BATOCCHIO (1994), desenvolveram sistema especialista de usinagem (SEU), especificamente concebido para selecionar a melhor velocidade de corte durante as atividades de usinagem em fábrica. A máquina de inferência do SEU foi construída tendo como base os trabalhos prévios de otimização indicados no item 5.2. Todos os parâmetros de usinagem restritivos foram considerados no SEU. Isto quer dizer que para calcular a $V_{m\dot{x}p}$ e selecionar a melhor velocidade de corte, o SEU primeiramente checa os limites em termos de força de alimentação, força de corte, potência do acionamento principal e rotação do eixo da máquina a ser utilizada.

O SEU foi concebido em uma versão semi-automática, conforme arquitetura indicada na figura 5.3. Isto quer dizer que o SEU toma as decisões de corte e adota os parâmetros de corte em função da base de dados e todas as regras da base de conhecimento. A máquina de inferência providencia o cálculo da $V_{m\dot{x}p}$, a qual é utilizada como referência para selecionar a melhor velocidade de corte a ser usada. Entretanto o usuário, aqui o operador da máquina ferramenta, deverá colocar pessoalmente através da interface do usuário (teclado do computador), as seguintes informações:

- Número de peças usinadas para cada velocidade de corte (Z_t)
- Tempo de troca da ferramenta (t_{tt})
- Tempo de corte (t_c)

O operador da máquina ferramenta deverá providenciar também:

- A mudança da velocidades de corte no programa CNC, toda vez que SEU forneça novo valor para este parâmetro
- A troca do componente (peça) após o ciclo completo de usinagem
- A troca da aresta de corte, sempre que o critério de substituição tenha sido atingido.

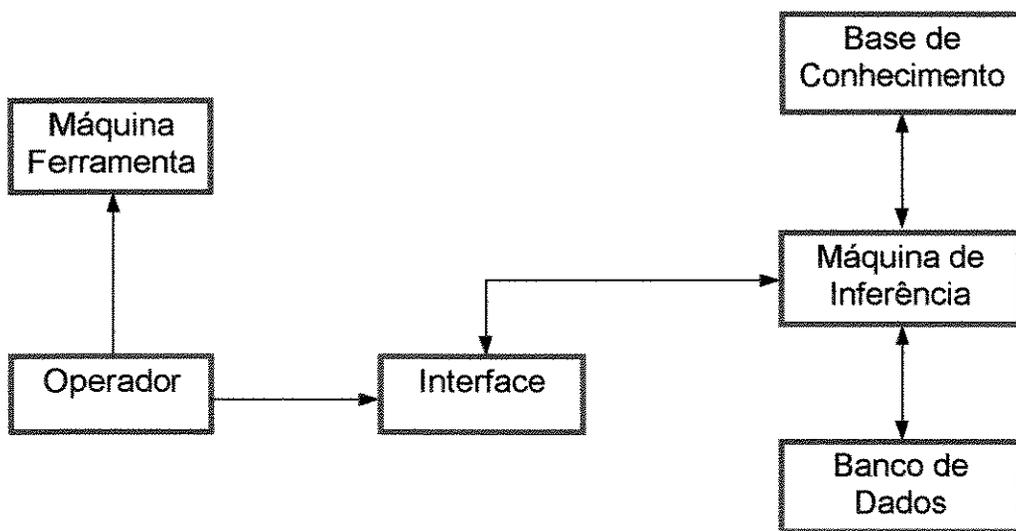


Figura 5.3 - Arquitetura do SEU para versão semi-automática.

5.4 Conclusão

Os trabalhos prévios sobre otimização e sistema especialista realizados por: RODRIGUES et al. (1987), PALLEROSI & COPPINI (1975), VILELLA et al. (1989), e COPPINI & BATOCCHIO (1994) e aqui apresentados de forma muito resumida, constituem o alicerce do trabalho de dissertação, servindo de base para a montagem da metodologia mostrada no capítulo 6.

Capítulo 6

Metodologia Experimental, Resultados e Discussões

6.1 Aquisição de Dados

Nas experiências realizadas em laboratório foram obtidos dados provenientes de sensores para obter valores de corrente e tensão do motor principal de acionamento da máquina e forças de corte e avanço.

Os sinais elétricos são sinais analógicos e para sua utilização através do uso de computador foi necessário a sua conversão em sinais digitais, permitindo que os mesmos fossem armazenados, para posterior análise dos dados.

Os sinais de corrente elétrica foram obtidos a partir de um sensor de efeito "HALL" com uma sensibilidade de 0,1V na saída, isto é, para cada ampère que passa pelo fio que é circundado pelo sensor ocorre uma variação de 0,1V na saída. Desta forma, tem-se uma tensão proporcional à corrente que se quer monitorar na saída do sensor, a qual pode ser medida via computador.

O esquema do sensor de efeito "HALL" pode ser visto na figura 6.1. O sensor deve ser alimentado com tensão de +/- 9V.

A tensão do motor principal pode atingir um valor da ordem de 400V, que foi necessário reduzir para um valor de no máximo 10V, que é o valor que a placa que faz a conversão do sinal analógico para digital pode aceitar. A redução foi realizada através de um redutor de tensão fornecido pela empresa LYNX, com uma relação entre os sinais de saída e entrada de 100 vezes. A alimentação do redutor foi com tensão de +/- 15V (Figura 6.2).

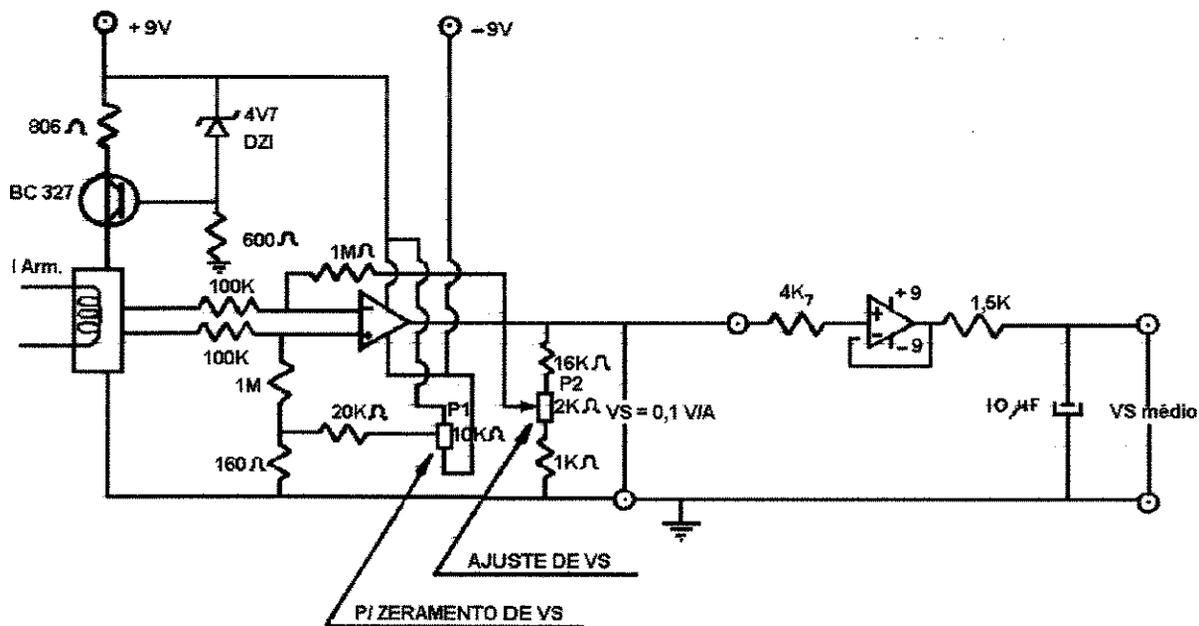


Figura 6.1 – Esquema do Sensor de Efeito HALL e Filtro

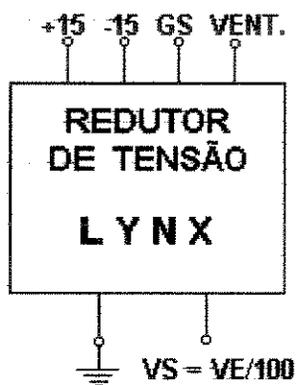


Figura 6.2 - Esquema do Redutor de Tensão

Na figura 6.4 esta mostrado desenho esquemático da montagem feita em laboratório para o sistema de aquisição de dados

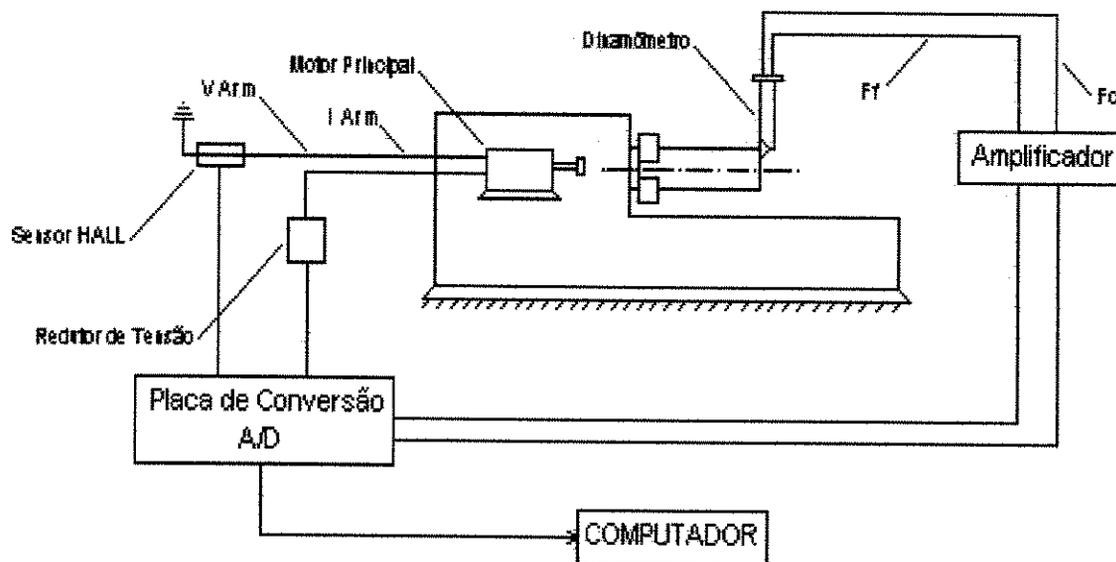


Figura 6.4 – Desenho Esquemático do Sistema de Aquisição dos Dados

6.2 Máquina , Materiais, Ferramentas e Corpos de Prova

6.2.1 Máquina

A máquina ferramenta utilizada para a usinagem experimental foi um torno CNC COSMOS-30 de fabricação nacional ROMI, com 30 HP de potência, com o motor principal e servo motores de avanço da ferramenta alimentados em corrente contínua.

6.2.2 Materiais

Os materiais utilizados nos ensaios foram:

- Aço laminado com 50,8 mm (2") de diâmetro na especificação SAE 4340, fornecido pela usina Aços Especiais Itabira (ACESITA), com uma dureza média verificada de ~ 300 HB (Brinell) e composição química conforme mostrada na tabela 6.1

- Material compósito constituído de resina fenólica reforçada com fibras de carbono. O compósito foi confeccionado com fibras de carbono picadas (~ 40% em massa), impregnadas com resina fenólica (~ 60% em massa), e densidade de 1,4 a 1,5 g/cm³

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
0,39	0,69	0,30	0,02	0,01	0,73	1,70	0,25	0,025

Tabela 6.1 Composição Química do Aço SAE 4340

6.2.3 Ferramentas

Foram utilizadas dois tipos básicos, a ferramenta de metal duro ISO TNMG 16 04 08 – QM, GC435 para a operação de usinagem do aço e a ferramenta ISO SNGN 12 04 08 - K10 para a usinagem do compósito, a primeira multirecoberta, com três camadas TiC, Al₂ O₃ e TiN, a segunda sem nenhum recobrimento.

6.2.4 Corpos de prova

O aço laminado, foi previamente usinado em corpos de prova representando duas peças conforme mostrado na figura 6.5.

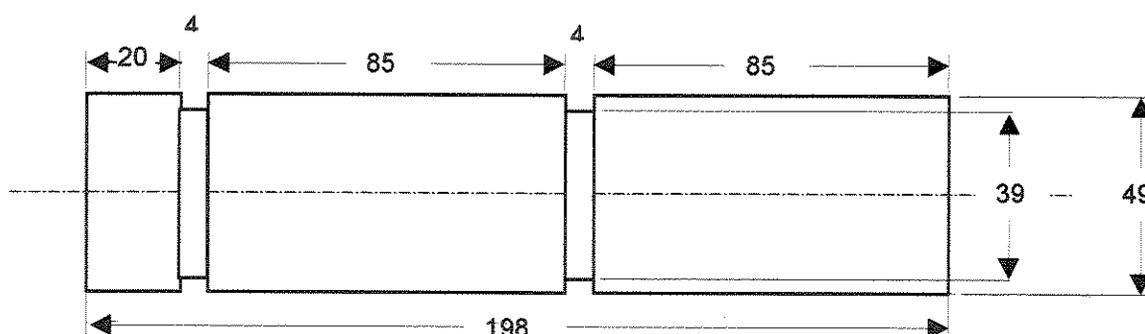


Figura 6.5 – Corpo de Prova utilizado nos Ensaios

O material compósito usado foi proveniente de uma tubeira de veículo lançador de satélites VLS, com as seguintes dimensões cilíndricas: externa: ϕ 370 \times 250; interna: ϕ 300 \times 200, cedido pelo Centro Técnico Aeroespacial do Ministério de

Aeronáutica (CTA) à UNICAMP, como parte de trabalho conjunto para estudo da usinabilidade de compósitos reforçados com fibras de carbono. (FERREIRA & COPPINI, 1993)

6.3 Metodologia Proposta para Otimização do Processo de Usinagem e Troca da Aresta de Corte em Operações de Torneamento

A metodologia toma como ponto de partida para o início da usinagem os parâmetros de corte utilizados normalmente na produção do componente pelo usuário e na falta desta experiência, os parâmetros recomendados em catálogos de fabricantes de ferramentas.

Conforme mostrado na figura 6.6 a velocidade de corte V_{c_i} é a base para a determinação do número inteiro de peças Z_i , para o que será necessário usinar as mesmas até que seja acionado o sistema de segurança (SSE) dentro de um critério previamente fixado (*desgaste excessivo da aresta de corte, aumento acima de determinado valor da corrente do motor principal/ força de corte/ força de avanço, quebra da aresta de corte, etc.*). O (SSE), pode atuar através da utilização de sensores de força, potência, emissão acústica, etc. Desta forma pode-se obter Z_{t_i} que será igual a $Z_i - 1$, constituindo-se no primeiro passo da metodologia proposta.

No capítulo 5 foram apresentadas as bases da otimização das condições de usinagem utilizadas pelo sistema especialista (SEU) que será empregado como parte integrante da metodologia proposta, dentro da concepção do trabalho de COPPINI & VILELLA, (1989) que é a base do SEU. É necessário adotar para uma segunda velocidade um acréscimo de $\sim 20\%$. Logo, no nosso caso teremos: $V_{c_{i+1}} = 1,2 V_{c_i}$. Para esta nova velocidade é possível obter de forma similar à descrita anteriormente um número inteiro de peças Z_{i+1} que dará origem a $Z_{t_{i+1}}$ que será igual a $Z_{i+1} - 1$, constituindo-se no segundo passo da metodologia proposta.

Com os valores das velocidades V_{c_i} , $V_{c_{i+1}}$ e números de peças Z_{t_i} , $Z_{t_{i+1}}$ o sistema especialista (SEU) será acionado calculando a velocidade de corte otimizada e o número otimizado de peças. Todavia, é possível que não seja obtida a otimização de forma imediata sendo necessária um segundo ou terceiro cálculo com

variação da velocidade de $\sim 20\%$ para baixo ou para cima, em função do resultado obtido no cálculo da V_{mxp} que poderá ficar fora do intervalo da V_{C_i} , e $V_{C_{i+1}}$.

Durante a produção em chão de fábrica, é normal, que em lotes diferentes a composição química e características mecânicas variem dentro das faixas permitidas pela norma especificada, mais que podem fazer atuar o SSE. Se o número de vezes que o SSE atua aumenta acima de determinado valor, um novo ciclo de otimização será necessário de forma similar ao descrito.

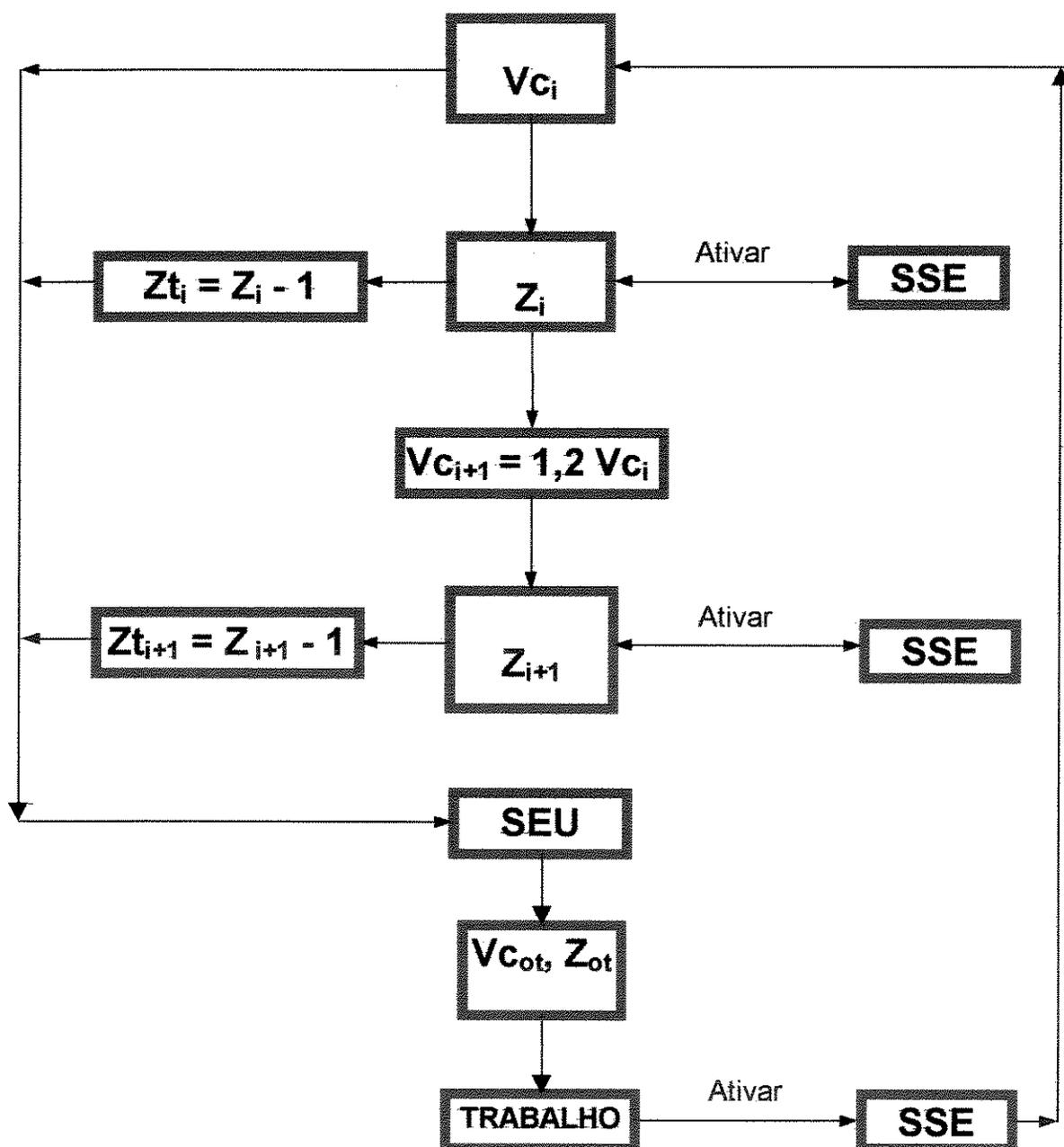


Figura 6.6 – Diagrama da Metodologia Proposta

A metodologia proposta pode ser aplicada também de forma similar quando são trabalhadas peças que podem consumir várias arestas de corte durante sua usinagem, como cilindros de laminação e eixos de grande porte. Nestes casos a metodologia apresentada determinará um comprimento ou a vida em minutos da aresta de corte e uma velocidade de corte otimizadas. A figura 6.7 abaixo, leva em conta o comprimento de corte L_c . Para o caso da vida da aresta em minutos T , basta substituir L_c por T .

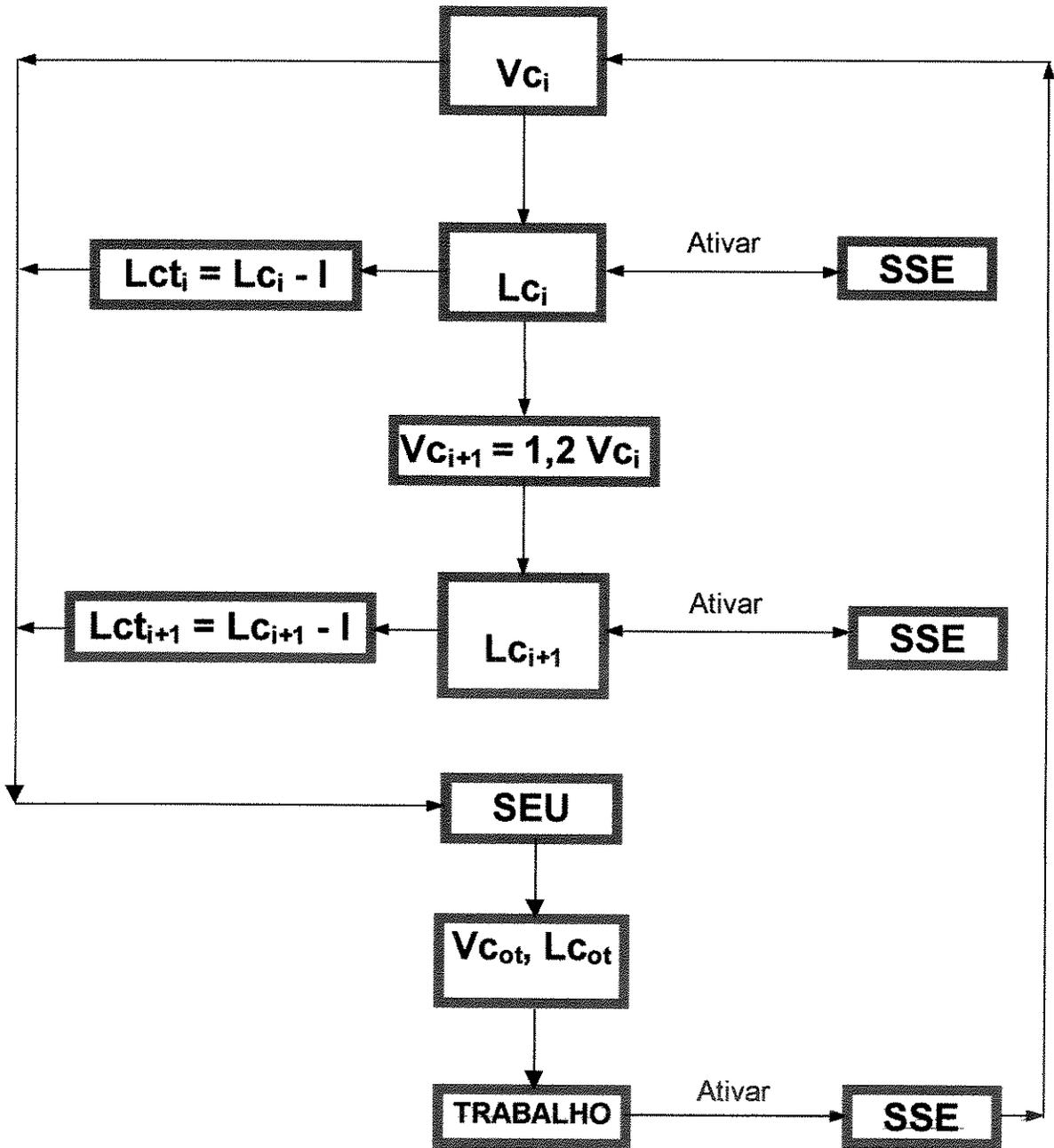


Figura 6.7 – Diag. da Metodologia proposta- Uso de várias arestas de corte por peça

6.4 Metodologia Aplicada aos Ensaio

6.4.1 Ensaio com material SAE 4340

No início do processo de otimização, parte-se dos parâmetros de corte recomendados em catálogo de fabricante de ferramenta, para pastilha de metal duro ISO TNMG 16 04 08, com triplo revestimento de TiC, Al_2O_3 e TiN e material com dureza de 300 HB (Brinell). A velocidade de corte recomendada foi de $V_{C_i} = 125$ m/min, para um avanço de $f = 0,2$ mm/volta, uma profundidade de usinagem adotada $a_p = 1$ mm e uma vida prevista para a aresta de corte de 15 minutos. Com estes dados iniciais foi calculado o número de peças a serem usinadas por vida de aresta da ferramenta, tendo-se obtido o valor de 30 peças.

Dois lotes de corpos de prova foram usinados com velocidades de corte V_{C_i} respectivamente de 125 m/min e 200 m/min. Em ambos casos o processo foi interrompido quando o número de peças Z_i chegou a 100, sem que a aresta de corte apresentasse um desgaste significativo. Foi verificado um desgaste de flanco da ordem de $V_B = 0,5$ mm em ambos casos.

Um novo ensaio foi iniciado com uma velocidade de corte V_{C_i} de 250 m/min, tendo sido utilizado o sistema de monitoramento para acompanhamento do ensaio, e determinação posterior do melhor parâmetro a ser definido para caracterizar o SSE. O fim de vida da aresta de corte foi estabelecido em todos os ensaios realizados pela quebra da mesma, como resultado chegou-se a quantidade de $Z_i = 44$ peças e $Z_{t_i} = 43$ peças. Aumentando-se a velocidade de corte de 20%, isto é com $V_{C_{i+1}} = 300$ m/min, foram obtidos $Z_{i+1} = 35$ peças e conseqüentemente $Z_{t_{i+1}} = 34$ peças.

Em função da metodologia de otimização empregada é necessário fornecer ao SEU, para que o cálculo da $V_{m_{xp}}$ seja processada, o valor do tempo de troca da ferramenta (t_R). Este foi cronometrado, e após uma concessão de fadiga de 20% , resultou em valor médio de 1,5 minutos. O SEU forneceu, após cálculos, uma $V_{m_{xp}} > 300$ m/min. Isto faz que dentro da metodologia de otimização seguida, a nova V_{C_i} passe a ser de 300 m/min, o Z_{t_i} igual a 34 peças e a $V_{C_{i+1}} = 360$ m/min. Procedendo-

se a usinagem dos corpos de prova com a nova velocidade de 360 m/min obteve-se $Z_{i+1} = 22$ peças e conseqüentemente $Z_{t_{i+1}} = 21$ peças. Utilizando-se o SEU e após os respectivos cálculos, foi obtido o valor da $V_{m_{xp}} = 350$ m/min que é um valor situado no intervalo das velocidades V_{c_i} e $V_{c_{i+1}}$, sendo portanto o valor adotado como a velocidade ótima $V_{c_{ot}} = 350$ m/min, que corresponde a um número otimizado de peças $Z_{ot} = 22$ peças.

Pode-se observar que existe uma grande diferença, já apontada em outros trabalhos de pesquisa, entre os dados de catálogo e os resultados reais. Todavia, deve-se salientar que todo fabricante de ferramentas em função das diversas variáveis inerentes ao processo de usinagem, tendem a ser conservadores. No caso em estudo tem-se uma variação da velocidade de corte de $V_{c_i} = 125$ m/min para uma velocidade otimizada $V_{c_{ot}} = 350$ m/min e uma produção variando de $Z_i = 30$ peças para $Z_{ot} = 22$ peças, o que permite uma significativa racionalização da produção com as conseqüentes repercussões de ordem econômica que serão apresentadas adiante.

Após a obtenção das condições otimizadas e em função do material disponível foram realizados ensaios para validação da metodologia apresentada, conforme figura 6.8.

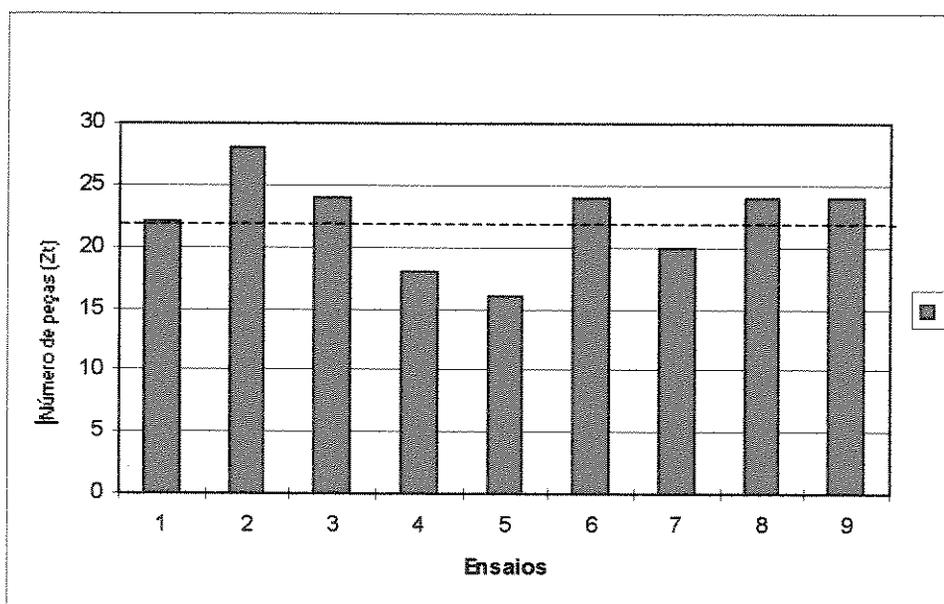


Figura 6.8 – Ensaio de Validação com $V_{c_{ot}} = 350$ m/min e (-----) $Z_{ot} = 22$ peças

Foram realizados nove ensaios e os resultados são mostrados na figura 6.8. Como pode ser visto, o sistema de segurança poderia ser ativado somente três vezes durante os ensaios 4,5 e 7.

Nos processos automatizados, os sensores (SSE) informam o momento exato em que deve ser trocada a aresta de corte. Desta forma, além das condições de corte estarem otimizadas, as arestas de corte poderão ser utilizadas de forma racional, até o final de suas respectivas vidas, as quais variam devido às características randômicas do processo de usinagem. Entretanto, observa-se que o valor médio do número de peças usinadas por vida de ferramenta é 22,22. Este valor mostra uma proximidade bastante satisfatória do valor $Z_{ot} = 22$ peças calculado através da aplicação da metodologia.

Nos processos semi-automatizados, o número de peças otimizado Z_{ot} indicado na figura 6.8, pode ser usado pelo operador da máquina ferramenta para definir a troca da ferramenta sem a necessidade de considerar a ativação do sistema de segurança(SSE). Em outras palavras, somente as condições otimizadas são novas para o operador, pois em geral os sensores não são usados em processos semi-automatizados. Nestes, quando o operador troca a ferramenta ao Z_{ot} ser atingido (ensaios 2,3,6,8, e 9), algumas peças que poderiam ser usinadas deixam de sê-lo. De outra forma, o operador pode tomar a decisão sobre a troca da ferramenta antes de atingir Z_{ot} , como no caso dos ensaios 4, 5, e 7, baseado na sua experiência ou evento característico do processo de usinagem (barulho proveniente de vibração do sistema, observação de falha na aresta de corte, etc.).

Nas figuras 6.9 e 6.10 pode ser verificado o comportamento das forças de corte e avanço nos ensaios realizados. Para o caso específico estudado de material e ferramenta, nota-se que a força de avanço é mais sensível que a força de corte ao crescimento do desgaste da ferramenta. A relação entre a força inicial e a final é sempre maior que 100%, enquanto no caso da força de corte a variação é de ~20%, desde o início do corte com aresta nova até o fim de vida da aresta de corte.

Nas fotografias das ferramentas mostradas nas figuras abaixo, pode-se constatar o desgaste de flanco de uma das arestas de corte utilizadas (figura 6.11). Em função das camadas de proteção, a progressão do desgaste provocou lascamentos na aresta determinando o seu fim de vida (figura 6.12).

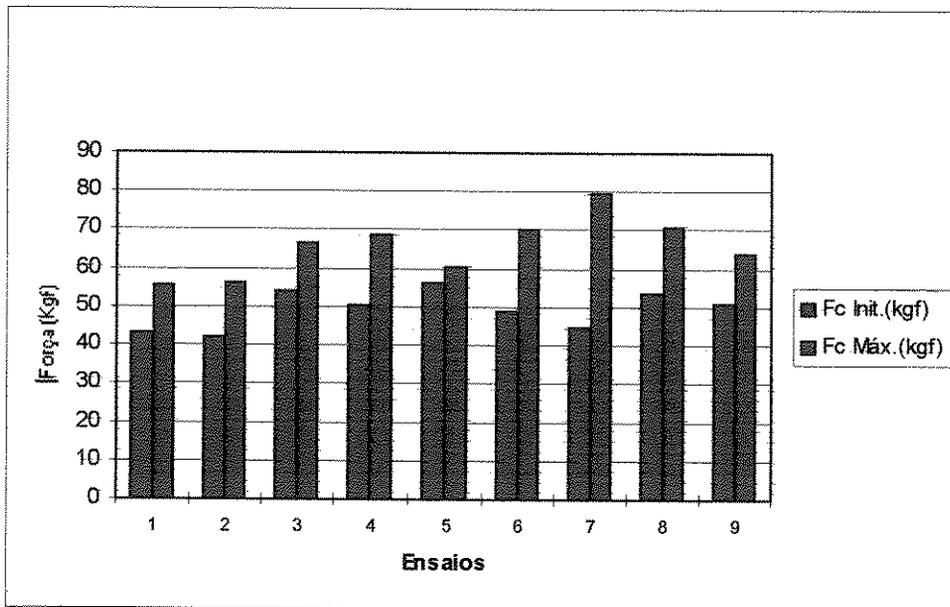


Figura 6.9 – Valores Iniciais e Finais das Forças de Corte

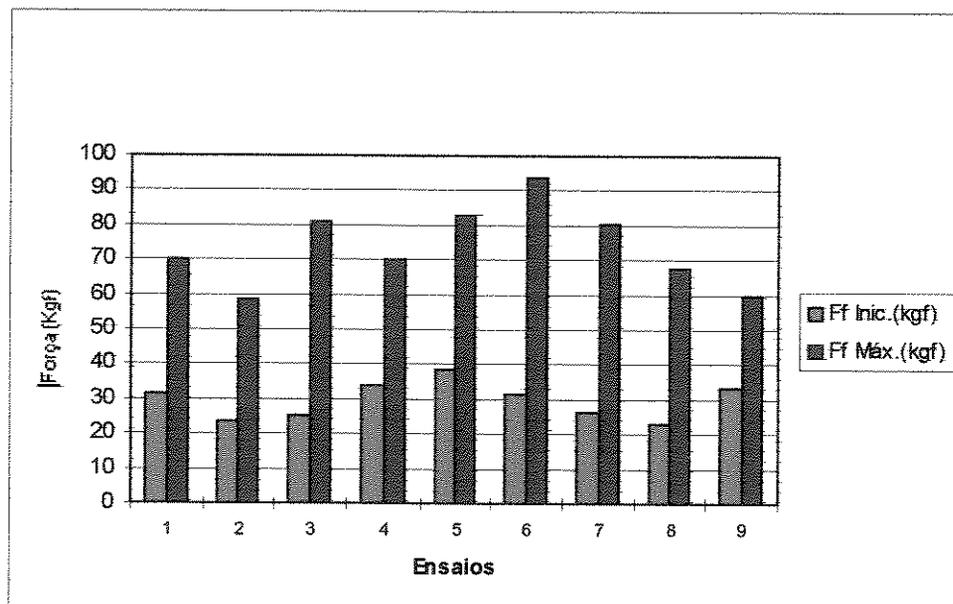


Figura 6.10 – Valores Iniciais e Finais das Forças de Avanço

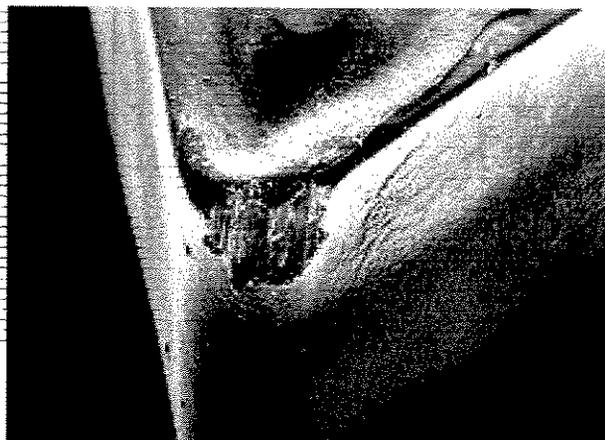


Figura 6.11 – Fotografia mostrando Desgaste de Flanco

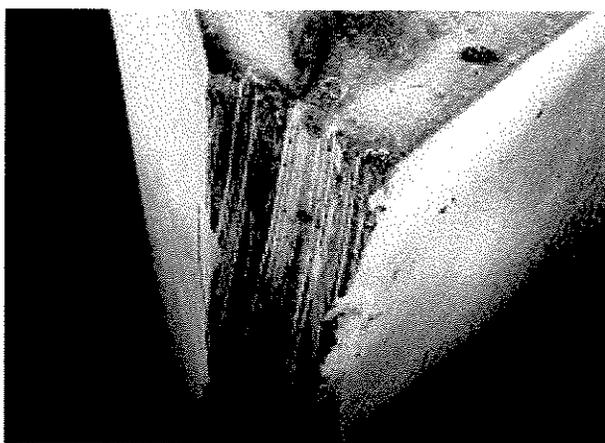


Figura 6.12 – Fotografia mostrando Lascamentos

6.4.2 Ensaios com Compósito de Resina Fenólica reforçada com Fibras de Carbono

O corpo de prova utilizado proveniente da tubeira de veículo lançador de satélites VLS, proporcionou a oportunidade de experimentar o comportamento de um material não ferroso, assim como comprovar a variante da metodologia que trata da otimização do comprimento de corte, ao invés do número de peças, isto devido a natureza do material e as dimensões do corpo de prova.

Para este material compósito não foi possível encontrar parâmetros de corte em catálogos de fabricantes de ferramentas , assim como também não foi possível encontrar literatura válida a respeito de experiências com usinagem .

Nos ensaios foram empregadas pastilhas de metal duro ISO SNGN 12 04 08 - K10 sem revestimento.

O ponto de partida para a otimização foi a usinagem realizada em diversas velocidades e comprimentos de corte conforme pode ser visto na figura 6.13. Foi adotada um avanço $f = 0,12$ mm/volta, e uma profundidade de usinagem $a_p = 1$ mm. Foi definido o critério de fim de vida com um desgaste de flanco de 1 mm. Tomando-se como base as velocidades $V_{c1} = 200$ m/min, $V_{c_{+1}} = 250$ m/m e utilizando-se o sistema SEU, foi possível a determinação da velocidade de corte otimizada $V_{c_{ot}} = 235$ m/min e o comprimento de corte otimizado $L_{c_{ot}} = 670$ m.

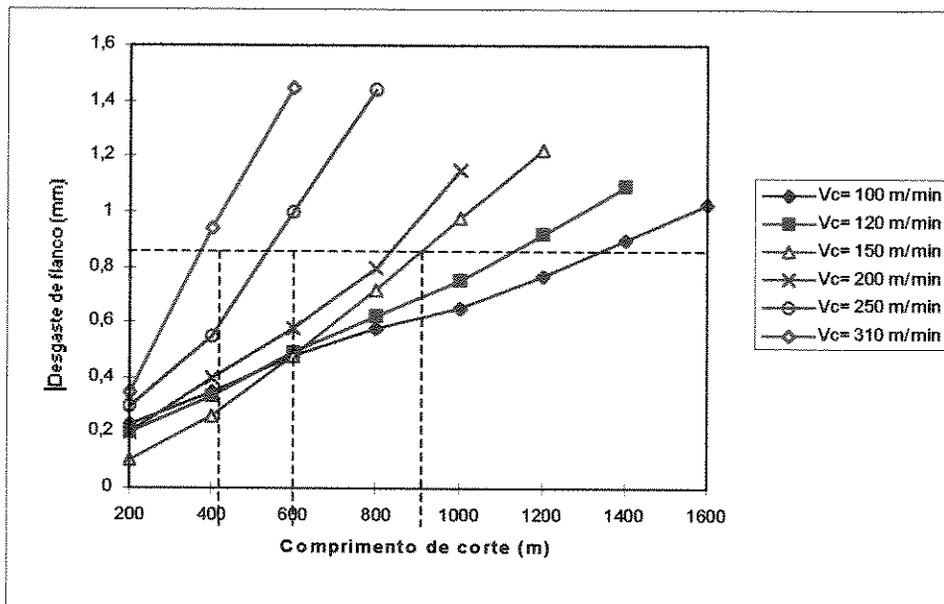


Figura 6.13 – Desgaste de Flanco (VB) & Comprimento de Corte (Lc)

No processo de usinagem foi constatado que a força de corte apresenta um valor relativamente baixo em relação à força de avanço, isto principalmente devido à que durante a usinagem não existe deformação plástica. O cavaco quebra instantaneamente formando pó. Na fotografia mostrada na figura 6.14 pode-se observar o desgaste típico provocado por este material.

Foram realizados três ensaios de validação da metodologia, podendo –se observar um comportamento similar ao do material metálico. Também em relação à sensibilidade da força de avanço, pode ser constatadas características muito semelhantes nos três ensaios realizados, conforme pode ser visto na figura 6.15.



Figura 6.14 – Fotografia mostrando o desgaste típico na aresta de corte

No caso do material compósito, o desgaste da aresta de corte aumenta de forma progressiva e as forças de corte são muito baixas, não sendo detectadas fraturas na aresta, mesmo para grandes valores de comprimento de corte. Isto ocorre por ser o principal mecanismo de desgaste a abrasão. Caso fosse seguido o monitoramento das forças de corte e a potência do motor principal, a definição de um critério para troca da aresta torna-se trabalhoso. Neste trabalho foi definido o desgaste de flanco $VB = 1$ mm, como poderia ter sido definido outro valor dentro de uma faixa razoável de VB .

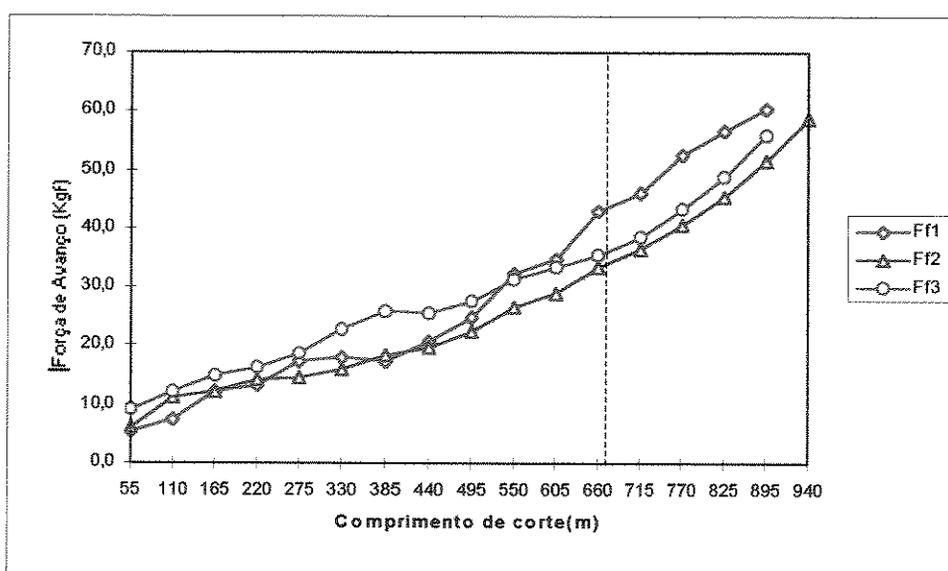


Figura 6.15 – Ensaios de Validação $V_{c_{ot}} = 235$ m/min, $L_{c_{ot}} = 670$ m

Na figura 6.16 é mostrada a evolução do comportamento da corrente nos ensaios realizados

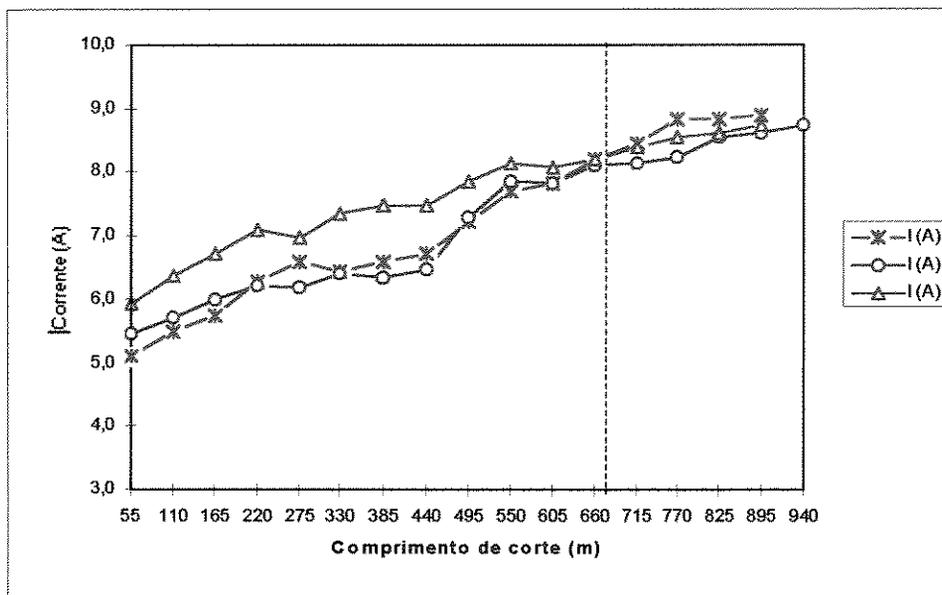


Figura 6.16 – Ensaios de Validação $V_{c_{ot}} = 235$ m/min, $L_{c_{ot}} = 670$ m

6.5 Análises de Produção e Custos – Usinagem do material SAE 4340

Como mostrado existem dois enfoques para as condições de usinagem do aço SAE 4340. O primeiro com as informações obtidas de catálogo de fabricante de ferramentas ($V_c = 125$ m/min, $Z_i = 30$ peças) e um segundo com as condições de processo que utilizam a metodologia de otimização proposta ($V_{c_{ot}} = 350$ m/min, $Z_{ot} = 22$ peças).

É feita a seguir uma análise de tempos e custos de usinagem (sem considerar custos de matéria prima), para os dois enfoques, permitindo uma idéia quantitativa de comprovação experimental da metodologia. Para tanto, utiliza-se os modelos de tempos e custos exclusivos de usinagem apresentados nas equações (6.1) e (6.2) FERRARESI, (1977).

$$t_t = t_c + t_i + \left(\frac{t_c}{T} - \frac{1}{Z} \right) t_{fn} \quad (6.1)$$

$$C_p = t_t \frac{(S_h + S_m)}{60} + \frac{t_c}{T} C_{fn} \quad (6.2)$$

A tabela 6.2 mostra uma simulação de tempos e custos considerando-se o torneamento de peça similar ao corpo de prova com 170 mm de comprimento, partindo-se de um diâmetro de 49 mm até ser atingido o diâmetro de 39 mm, em 5 passes. Trata-se de apresentar uma situação prática bastante simplificada, mas suficiente para mostrar a vantagem econômica da metodologia proposta.

Item		Metod. Convencional	Metod. Proposta
Tempo de corte	t_c (min)	4,80	1,72
Tempos improdutivos	t_i (min)	0,35	0,35
Tempo de troca ferramenta	t_{ft} (min)	1,5	1,5
Vida da ferramenta	T (min)	15	4,1
Número de peças do lote	Z	2000	2000
Tempo de fabricação/peça	t_t (min)	5,63	2,69
Custo do operador	S_h (R\$/hora)	8	8
Custoda máquina	S_m (R\$/hora)	25	25
Custo da ferramenta/vida	C_{ft} (R\$)	2	2
Custo de usinagem/peça	C_p (R\$)	3,74	2,31
Produção horária	P_h (peças/h)	10,6	22,3

Tabela 6.2 – Tempos, Custos, e Produção Horária para os dois Enfoques

No caso do exemplo mostrado, devido a tratar-se de uma peça simples, com um pequeno tempo de corte, tem-se uma grande influência dos tempos improdutivos no tempo de fabricação da peça (t_t). Esta influência tende a minimizar a diferença de custo de usinagem (C_p) e da produção horária (P_h) entre os dois enfoques. Mesmo assim, pode-se constatar que, com a implementação da metodologia de otimização, há um aumento significativo da produção da ordem de 110% por peça usinada e uma redução de custos da ordem de 38%. Em peças mais complexas, com um maior tempo de corte, os efeitos da metodologia proposta deverão ser mais significativos.

Na atividade industrial é normal, principalmente quando se trabalha em plena capacidade, o aparecimento de gargalos de produção envolvendo um ou mais tipos de máquinas ferramentas. Estes comprometem o faturamento da linha de produção envolvida ou, em alguns casos, de toda a empresa, com repercussões econômicas muito grandes. Com a utilização da metodologia proposta será possível um aumento de produtividade minimizando-se os gargalos com os consequentes reflexos de redução de custos.

Capítulo 7

Conclusões

7.1 Conclusões

Dado o exposto nos capítulos anteriores, pode-se concluir em relação à metodologia de otimização aplicada à usinagem em operações de torneamento para material metálico (aço SAE 4340) e não metálico (compósito de resina fenólica reforçada com fibras de carbono) que:

- A metodologia de otimização mostrou-se confiável e possível de ser aplicada em processos automatizados e semi-automatizados de operações de usinagem por torneamento.

- Foi demonstrado após a aplicação do processo de otimização, que é possível aplicar a metodologia sem qualquer sensor em especial e, assim mesmo, introduzir melhorias significativas quanto à eficiência do processo.

- Nos casos analisados, a força de avanço foi o melhor parâmetro para fazer a caracterização do Sistema de Segurança (SSE). Para o caso do material compósito, como a fratura da cunha de corte não é evidente, um valor limite deve ser estabelecido ou um outro fenômeno mais seguro deverá ser monitorado.

- A metodologia proposta traz uma significativa racionalização no processo de usinagem possível de ser empregado em chão de fábrica, com aumento de produtividade e redução de custos.

- A implementação da metodologia em sistemas produtivos semi-automatizados vem de encontro com o interesse da pequena e média empresa que, em geral, não dispõem de sistemas sofisticados de monitoramento e também carecem de mão-de-obra especializada.

- A metodologia aplicada a gargalos de produção, traz vantagens econômicas multiplicadoras, uma vez que pode envolver faturamento de toda uma linha de produção ou mesmo em alguns casos o faturamento de uma empresa.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Implementar a automatização do Sistema visando o Controle Adaptativo Otimizado (ACO).

- Realização de ensaios com outros materiais/ferramentas.

- Aplicar a metodologia em outros processos de usinagem

Referências Bibliográficas

AKIHIKO, N., FUJITA, S. Development of a Cutting Tool Failure Detector. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, v. 23, p. 134-139, 1989.

ARARIBOIA, G. *Inteligência Artificial: Um Curso Prático*, LTC, 1988.

ARSHINOV, V., ALEKSEEV, G. *Metal Cutting Theory and Cutting Tool Design*. MIR Publishers, Moscou, Rússia, 1979.

BARBORAK, D. M. PC – Based Expert System and their Application to Welding, *Welding*, p.29-38, jan., 1991.

BLUM, T. *Study of Acoustic Emission Monitoring in Metal Cutting*. PhD Thesis, Keyo University, Tokyo, Japan, 1988.

BLUM, T., INASAKI, I. A Study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process. *Journal of Engineering for Industry*, v. 112, p. 203-211, 1990.

BONIFACIO, M. E. R. *Monitoramento do Processo de Torneamento de Acabamento Via Sinais de Vibração*. Tese de mestrado, DEF-FEM-UNICAMP, 1993.

BRAGA, Durval Uchoa. *Monitoramento do Processo de Torneamento via Parâmetros Elétricos do Motor da Máquina*. Tese de Mestrado, DEF-FEM-UNICAMP, 1992.

BYRNE, G., DORNFELD, D., INASAKI, I., KETTELER, G., KÖNIG, W., TETI, R. Tool Condition Monitoring (TCM) – The Status of Research and Industrial Application. *Annals of the CIRP*, v. 44/2, p. 541-567, 1995.

CHANG, Y. P., DINIZ, A. E., DORNFELD, D. A. Monitoring the Grinding Process through Acoustic Emission Using a Squirter. *Proceedings of the 1992 Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, p. 335-340, 1992.

CHUBB, J. P. e Billingham, J. Coated Cutting Tools – A Study of Wear Mechanisms in high Speed Machining. *Wear* v. 61 p. 283-293, 1980.

COLDING, B., NOVAK, A. Sensing of Workpiece Diameter, Vibration and Out-of-roundness by Laser Way to Automate Quality Control. *Annals of the CIRP*, v. 30, p. 473-476, 1981.

COOK, N. H. Tool Wear Sensor. *Wear* v. 62 p. 49-57, 1980.

COLL, B. Dépôts par Voie Thermochimique (C.V. D.) et Diffusion des métaux, ATTT, CETTIM, *Senils*, p. 83-104, 1989.

COPPINI, N. L., BATOCCHIO, M. C. A. Otimização das Condições de Usinagem através de um Sistema Especialista. *III Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste*, Belém – PA, Brasil, p.564-567, 1994.

COSIDINE, M. D., ROSS, D. S. *Handbook of Applied Instrumentation*. Mc-Graw Hill, New York, USA, 1964.

COSTA, C. E. *Monitoramento do Processo de Torneamento de Desbaste via Corrente Elétrica do Motor Principal da Máquina e via Vibração da Ferramenta*. Tese de mestrado, DEF-FEM-UNICAMP, 1995.

- DAN, L., MATHEW, J. Tool Wear and Failure Monitoring Techniques for Turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.30(4), p. 579-598, 1990.
- DE FILIPPI, A., IPPOLITO, R. Adaptive Control in Turning: Cutting Forces and Tool Wear Relationship for P10, P20, P30 Carbides. *Annals of the CIRP*, v. 27, p. 377-385, 1969.
- DEARNLEY, P. A. Rake and Flank Wear Mechanisms of Coated and Uncoated Cemented Carbides. *J. Eng. Mat. Technol.* v. 107 p. 68-82, 1985.
- DIEL, F. Prometec GmbH Sensing Systems. *Proc. workshop on Tool Condition Monitoring*. v. II Dornfeld, D. A., Byrne, G., eds., CIRP, Paris, p.49-51, 1993.
- DINIZ, A. E., LIU, J. J. and DORNFELD, D.A. Correlating Tool Life, Tool Wear and Surface Roughness by Monitoring Acoustic Emission in Finish Turning. *Wear* v. 152 p. 395-407, 1992.
- DINIZ, A. E. *Monitoramento e Controle automático do Processo de Usinagem*. Apostilha, UNICAMP, 1994.
- EL GOMAGEL, J. L., BREGGER, K. D. On line Tool Wear Sensing for Turning Operation. *Journal of Engineering for Industry*, v. 108, p. 44-47, 1986.
- FANG, D. X., YAO, Y., ARNDT, G. Monitoring Groove Wear Development in Cutting Tools via Stochastic Modelling of Three Dimensional Vibration. *Wear* v. 151 p. 143-156, 1991.
- FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. São Paulo, Ed. Edgar Blucher Ltda., 1977.

FERREIRA J.R., COPPINI N. L. Torneamento de Material Compósito reforçado com Fibras de Vidro e Carbono. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 12, 1993, Brasília. *Anais...* Universidade de Brasília: ABCM, p. 1627-1630 dez. 1993.

GIUSTI, F., SANTOCHI, M., TANTUSSI, G. A Flexible Tool Wear Sensor for NC Lathes. *Annals of the CIRP*, v. 33, p. 229-232, 1984.

HANASAKI, K. Tool Wear Coated Tools when Machining a high Nickel Alloy. *Annals of the CIRP*, v. 39, p. 77-80, 1990.

INASAKI, I. Monitoring of Cutting and Grinding in Japan. *Proc. Workshop on Tool Condition Monitoring*, v. III, Dornfeld, D. A., Byrne, G., eds., CIRP, Paris, p. 43-49, 1994.

JACOBSEN, S.L., AYRE, R. *Engineering Vibrations with Applications to Structures and Machinery*. Mc-Graw Hill, New York, USA, 1956.

JEON, J. U., KIM, W. Optical Flank Wear Monitoring of Cutting Tools by Image Processing. *Wear* v. 127 p. 207-217, 1988.

JIANG, Y. C., XU, J. H. In Process Monitoring of Tool Wear Stage by the Frequency Band Energy Method. *Annals of the CIRP*, v. 36, p. 45-48, 1987.

KANNATEY-ASIBU Jr., E., DORNFELD, D. A. Quantitative Relationship for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting. *Journal of Engineering for Industry*, v. 103(3), p. 330-340, 1981.

KEGG, R. Presentation at working group meeting. *Proc. First workshop on Tool Condition Monitoring (TCM)*. Dornfeld, D. A., Byrne, G., eds., CIRP, Paris, 1993.

KEGG, R. Sensor History – Machine Tool Applications Table. *Proc. Workshop on Tool Condition Monitoring*, v. III, Dornfeld, D. A., Byrne, G., eds., CIRP, Paris, p. 51, 1994.

KLUFT, W. Monitorando a ferramenta e visualizando o processo de corte, melhora-se a produção. *Máquinas e Metais*, p. 20-49, jul. 1997.

KOREN, Y., ULSOY, A. G., DANAY, K. Tool Wear and Breakage Detection Using a Process Model. *Annals of the CIRP*, v. 35(1), p. 283-288, 1986.

LEE, L. C., LEE, K. S., GAN, C. S. ON the Correlation between Dynamic Cutting Force and Tool Wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 29(3), p. 295-303, 1989.

LISTER, P. M., BARROW, G. Tool Condition Monitoring System. *Proceedings of the 26th IMTDR*, p. 271-288, 1986.

MARTIN, P., MUTEL, B., DRAPIER, J. D. Influence of Lathe Tool Wear on the Vibrations Sustained in Cutting. *Proceedings of the 15th International Machine Tool Design and Research Conference*, p. 251-274, 1974.

MICHELETTI, G. F., KÖNIG, W., VICTOR, R. H. In Process Tool Wear Sensors for Cutting Operations. *Annals of the CIRP*, v. 25, p. 483-496, 1976.

NILSSON, N. J. *Principles of Artificial Intelligence*, Tioga Publishing Company, Palo Alto, California, 1980.

PALLEROSI, C. A., COPPINI, N. L. Durabilidade de Ferramentas de Corte na Usinagem dos Metais. *Metalurgia*, v. 31 n° 215, out. 1975.

PANDIT, M. S., KASHOU, S. A Data Dependent System Strategy of On-Line Tool Wear Sensing. *Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry*, v. 104, p. 217-223, 1982.

PIERE, J. P. e Vinterholler, O. Revestidas por CVD ou PVD, as Ferramentas tem Vida Melhor. *Máquinas e Metais*, p. 68-79, set. 1994.

PIGARI, A. C. *Monitoramento do Desgaste da Ferramenta no Processo de Torneamento Usando Emissão Acústica*. Tese de mestrado, DEF-FEM-UNICAMP, 1995.

PIRES, J. R. e DINIZ, A. E. Evitando o desperdício de ferramentas de torneiar: uma aplicação em chão-de-fábrica. *Máquinas e Metais*, p. 73-75, nov. 1996.

RAO, B. S. Tool Wear Monitoring through the Dynamics of Stable Turning. *Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry*, v. 108, p. 184-189, 1986.

RODRIGUES, A. C. S., DINIZ, A. E., COPPINI, N. L. Análise das Condições Operacionais Visando a Obtenção de Condições de Usinagem Otimizadas. *Anais do 7º Seminário de Comando Numérico do Brasil*, São Paulo, 1987.

SARMAH, B. P., KHARE, M. K. Some Investigation of Wear Mechanisms Widalon Carbide Inserts Machining. *Wear* v. 127 p. 229-240, 1988.

SHAW, M. C., *Metal Cutting Principles*. Claredon Press Oxford, New york, USA, 1986.

SHU, N. P. New Theories of Wear and their Implications for Tool Material. *Wear* v. 62 p. 1-20, 1980.

SOKOLOWSKI, A., KOSMOL, J. Utilization of Vibration Instruments of Machine Tool Elements in the Monitoring of the Cutting Tool Condition. *Proceedings of the 4th World*

Meeting on Acoustic Emission and 1st International Conference on Acoustic Emission in Manufacturing, p. 327-333, 1991.

STEIN, J. L., CHURN, H. W. Analysis of Power Monitoring on AC Induction Drive Systems. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, v. 112, p. 239-248, 1990.

STEIN, J. L., SHIN, K. C. Current Monitoring of Field Controlled DC Spindle Drivers. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, v. 108, p. 289-295, 1986.

TAKEYAMA, H., DOI, Y., MITSOKA, T., SEKIGUCHI, H. Sensors of Tool Life for Optimization of Machining. *Proc. of the 18th IMTDR*, p. 191-208, 1967.

TLUSTY, G., ANDREWS, C. A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining. *Annals of the CIRP*, v. 33, p. 563-572, 1983.

TRENT, E. M. Metal Cutting and the Tribology of Seizure: II – Movement of work Material Over the Tool in Metal Cutting. *Wear* v. 128 p. 47-64, 1988.

UEHARA, K. New Attempts for short Time Tool Life Testing. *Annals of the CIRP*, v. 22, p. 23-24, 1973.

VILELLA, R. C., DINIZ, A. E., COPPINI, N. L., RODRIGUES, A. C. S. Otimização das Condições de Usinagem em Células de Fabricação. *Máquinas e Metais*, nº 281, p. 48-54, 1989.

VINCENT, P., ROYER, J. *Surveillance des Outils de Coupe par L'analyse des Emissions Acoustiques*. ENSAM, Paris, 1990.

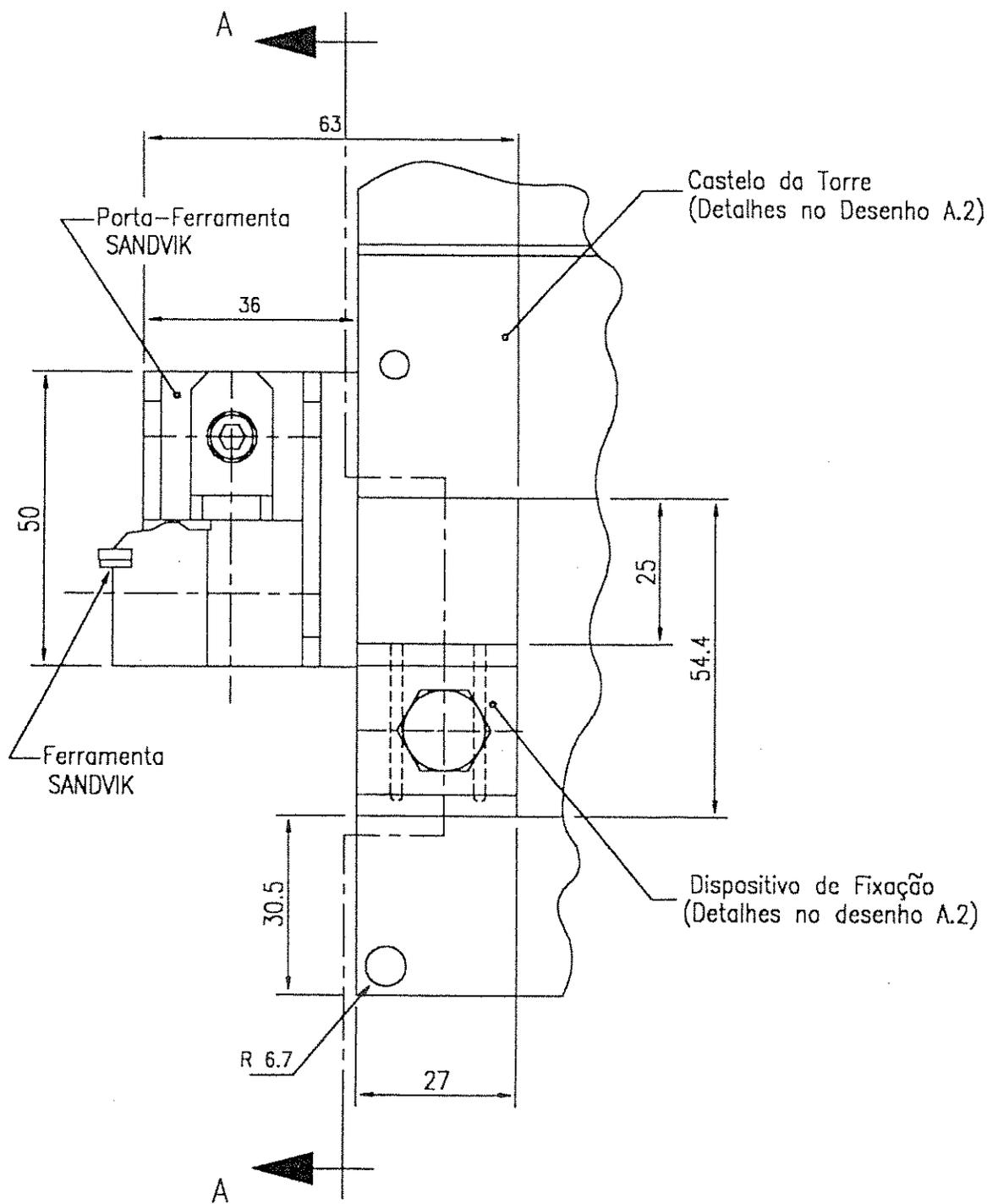
WARNECKE, G., JENEWEIN, A. A Cutting Force Model for Tool Condition Monitoring when Turning with Ceramic Tools. *Proceedings of the 16th North American Manufacturing Research Conference*, p.171-177, 1988.

WEISS, W. Survey: Industrial Applications of TCM Systems. *WBK*. University of Karlsruhe, karlsruhe, Germany, 1994.

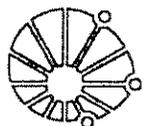
WELLER, J. E., SCHRIER, M. H., WECIHBRODT, B. What Sound can be Expected from a Worn Tool?. *Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry*, v. 13, p. 525-534, 1969.

ANEXO A

Desenhos Ilustrativos de Fixação
do Porta-Ferramenta na Máquina



Corte A-A representado no desenho A.3
(conforme posição de montagem do porta-ferramenta)



UNICAMP

VISTA PRINCIPAL DE CONJUNTO
DE FIXAÇÕES NA MÁQUINA II

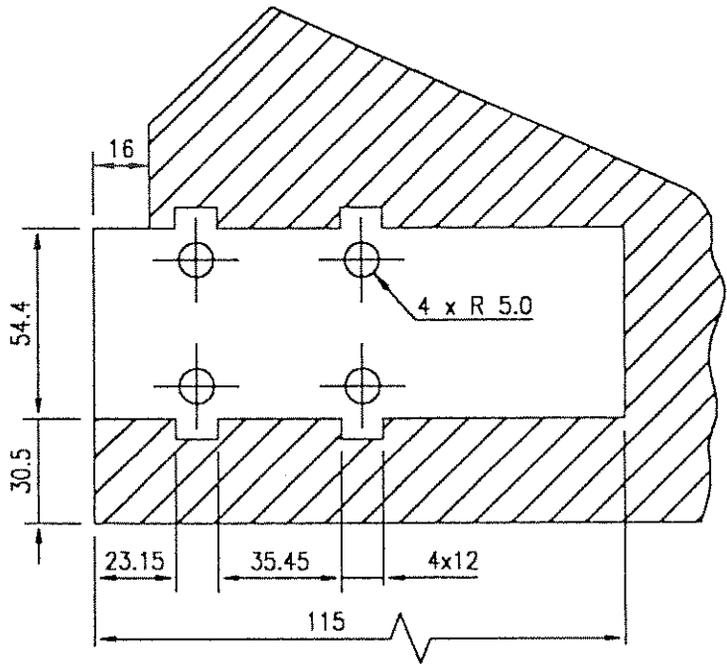
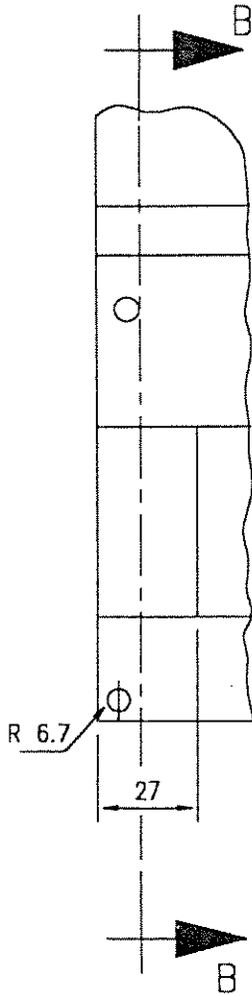
ANEXO A

DESENHO A.1

DATA 15/12/95

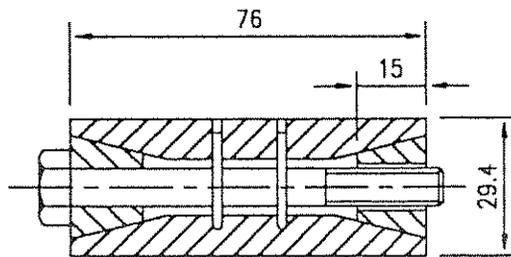
PAG. A1

Detalhe 1
Sem Escala

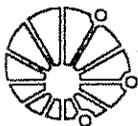
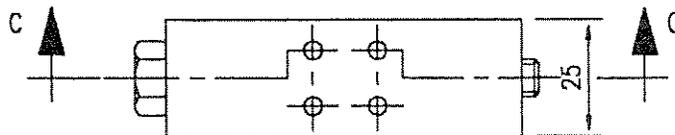


Corte BB
Sem Escala

Detalhe 2



Corte C-C



UNICAMP

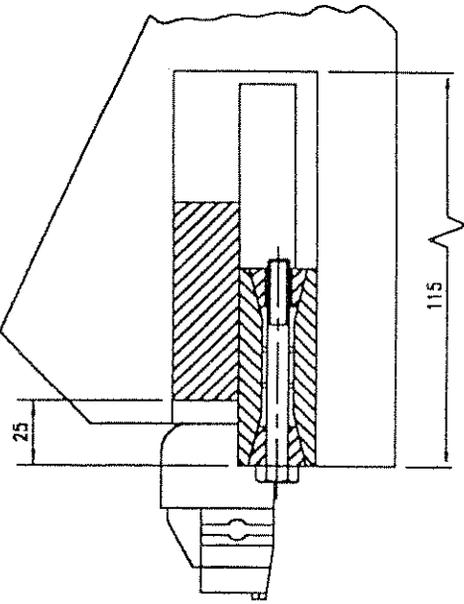
VISTA DE DETALHES
DO DESENHO A.1

ANEXO A

DESENHO A.2

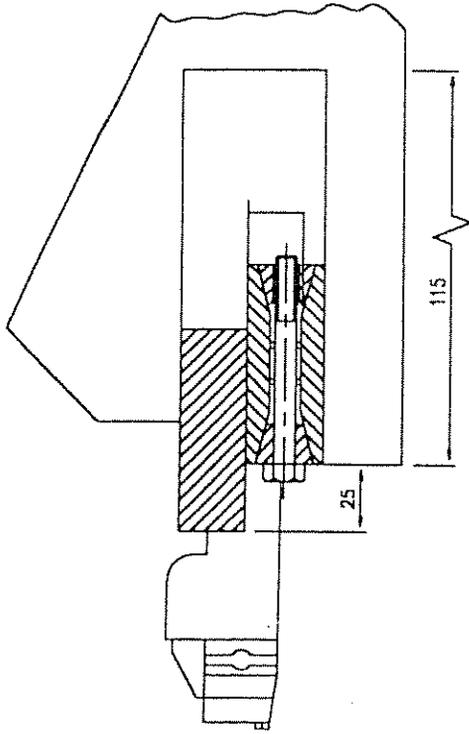
DATA 15/12/95

PAG. A2



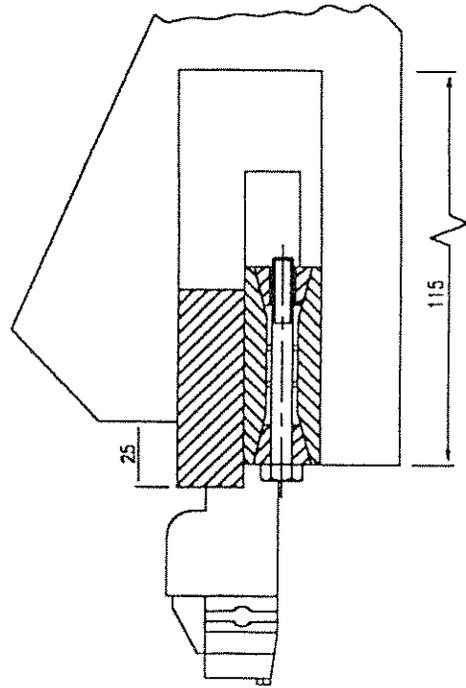
FIXAÇÃO 1

Corte A-A



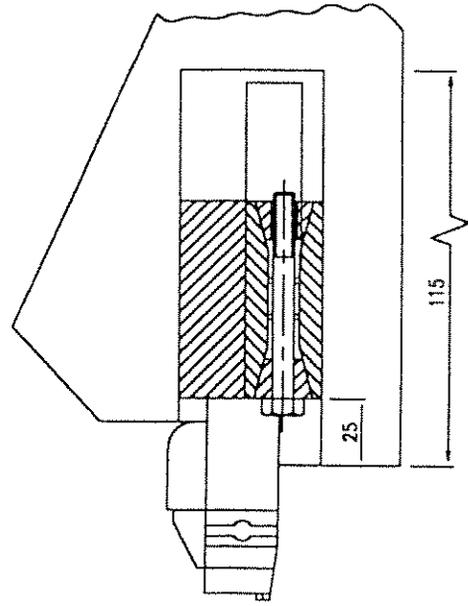
FIXAÇÃO 2

Corte A-A



FIXAÇÃO 3

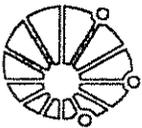
Corte A-A



FIXAÇÃO 4

Corte A-A

Sem Escala



UNICAMP

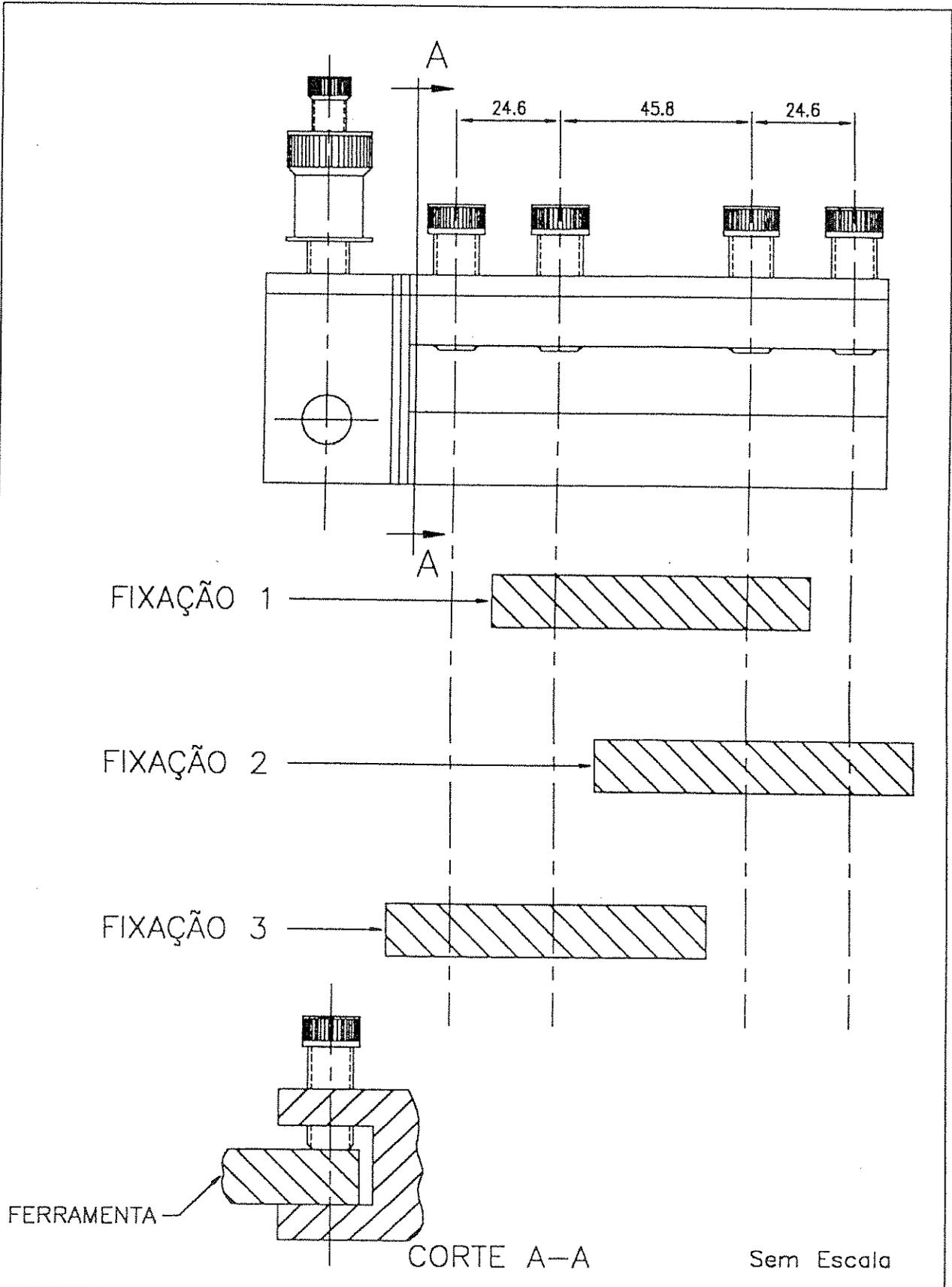
VISTA PARCIAL DAS
FIXAÇÕES NA MÁQUINA II

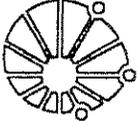
ANEXO A

DESENHO A.3

DATA 15/12/95

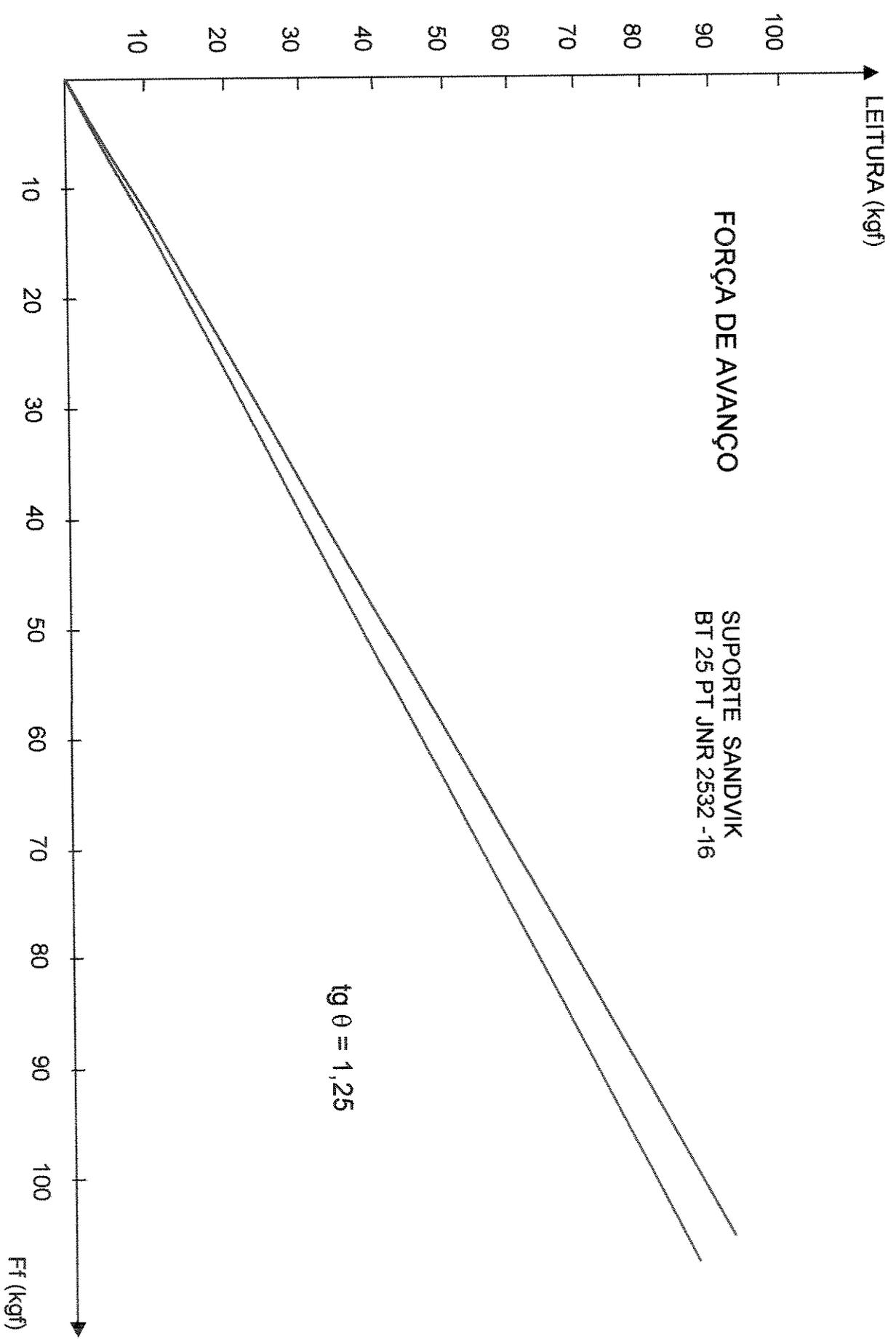
PAG. A3

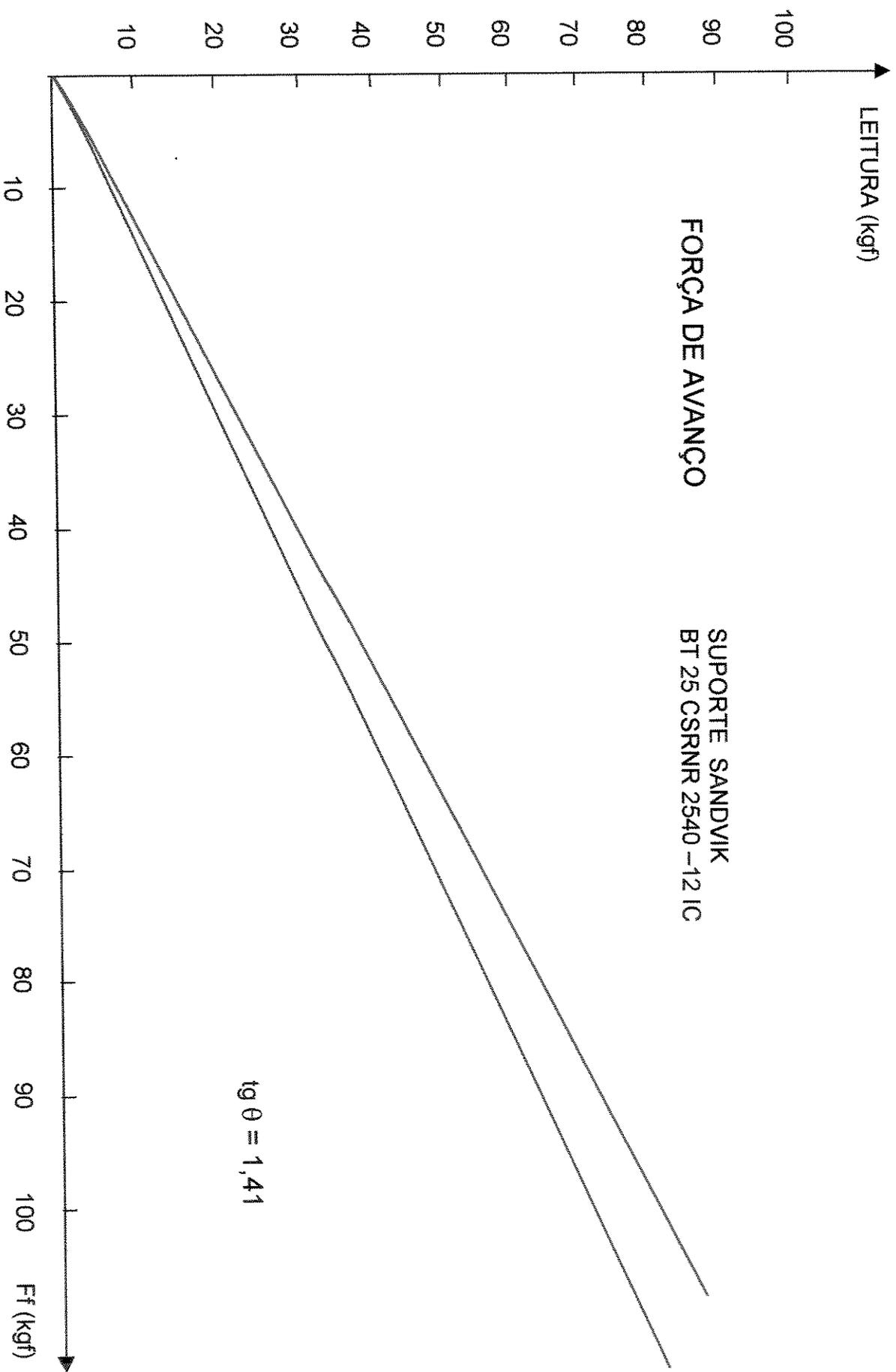


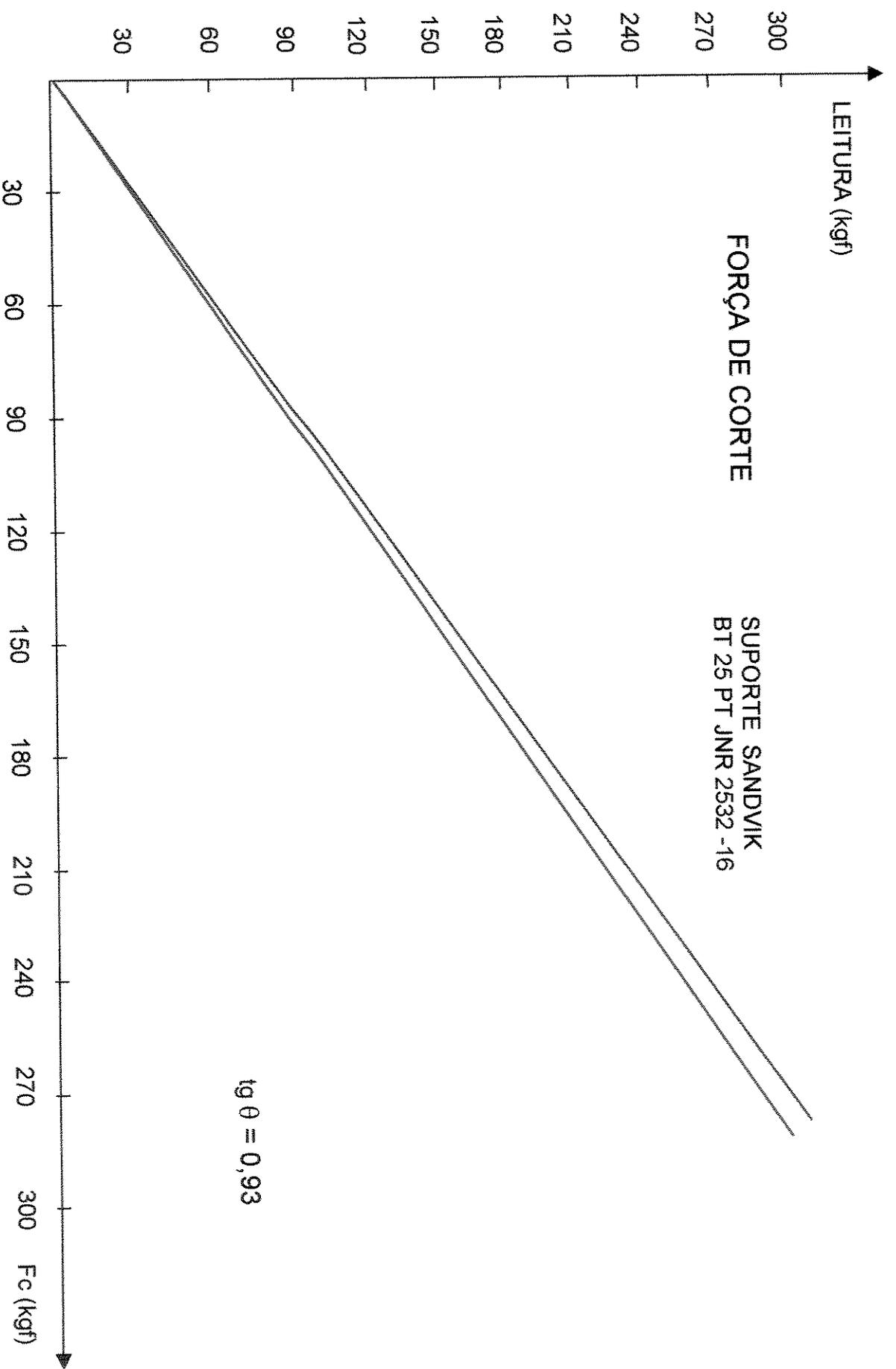
 UNICAMP	ALTERNATIVAS DE FIXAÇÃO DO SUPORTE NA MÁQUINA IV	
	ANEXO A	DESENHO A.4
		DATA 18/12/95
		PAG. A4

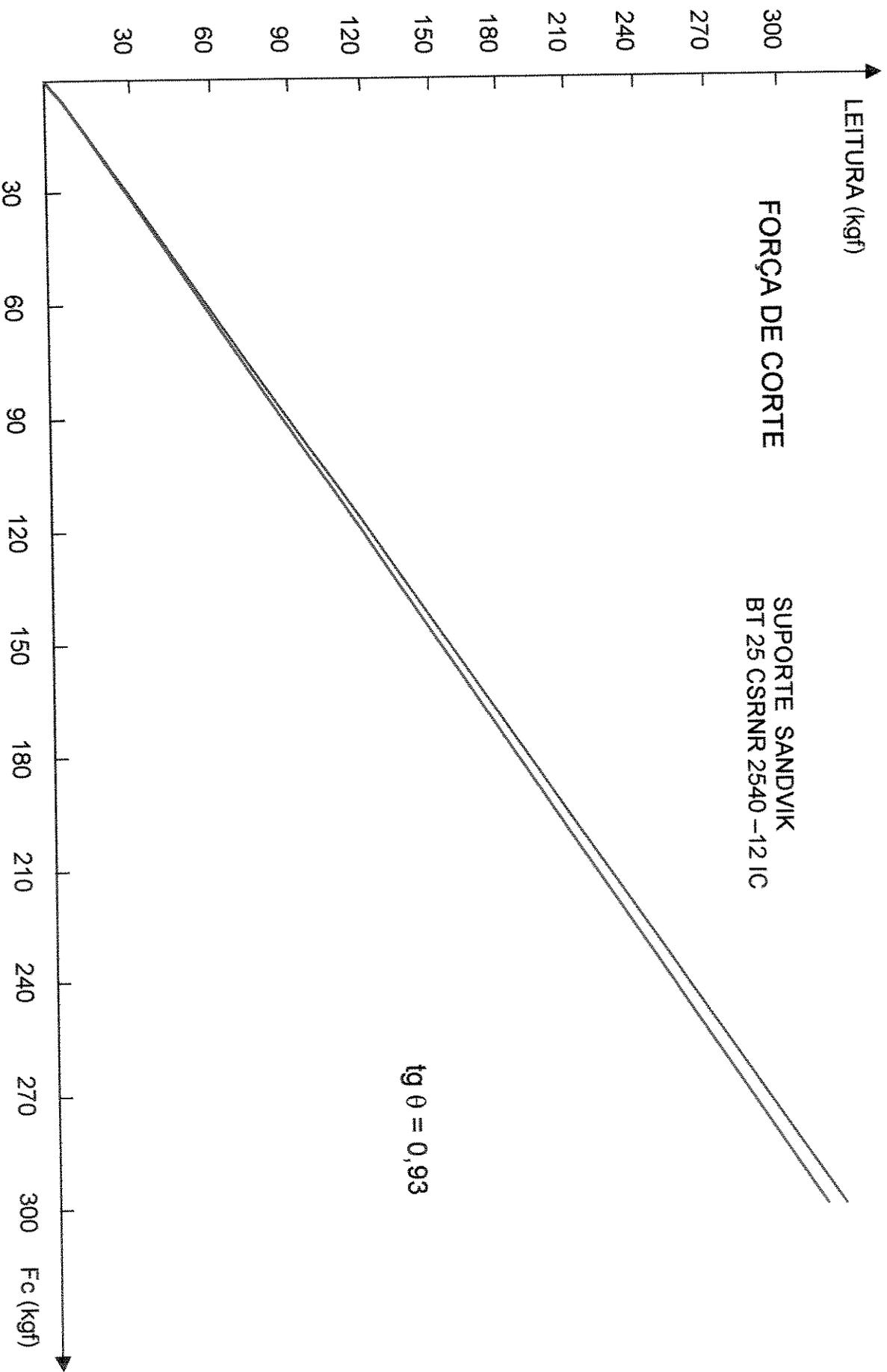
ANEXO B

Calibração do Dinamômetro









ANEXO C

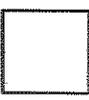
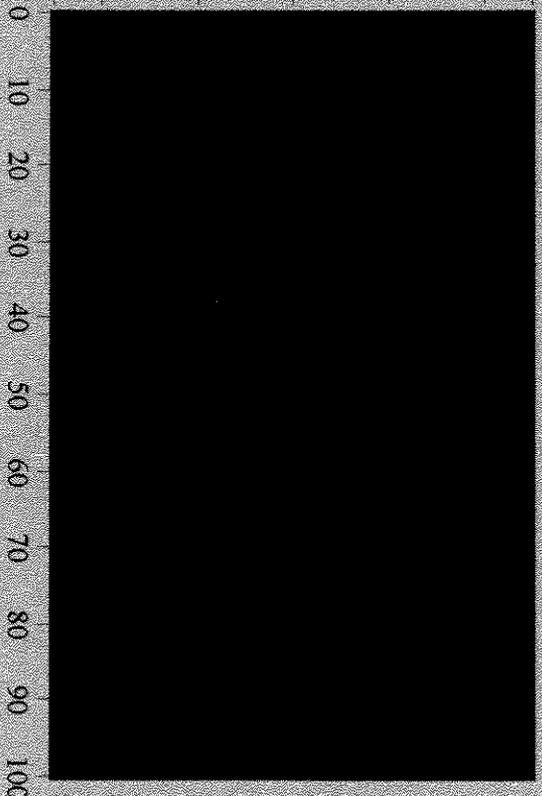
Projeto de Instrumento Virtual
para Aquisição de Dados

Device 1
Channel 0-3
N. Samples / ch 100
Scan rate 100,00
High Limit 5,00
Low Limit -5,00

File Name: dat

Ic 0
Vc 1
Fc 2
Fa 3

On/Off 



ANEXO D

Amostra de Resultado de Medições

Ensaio 08/01/97, Vc = 350 m/min, f = 0,2 mm/volta, ap = 1 mm

Material Aço SAE 4340 -Ferramenta TNMG 16-04-08 QM 435

Aresta de Corte 15

*** Cada número representa o desvio padrão de 100 aquisições**

**** Média de 100 aquisições**

Números em vermelho representam média das médias

* ** * ** * ** * **

Corpo de prova 41 [diâmetro 45 mm para 43 mm]

I (ampères)		V (volts)		Fc (kgf)		Ff (kgf)	
5.275	-13.599	19.432	341.140	8.552	-50.610	9.836	28.839
4.964	-18.156	30.667	331.069	3.036	-48.929	7.405	30.365
4.708	-18.103	58.538	327.068	7.086	-47.295	6.541	31.464
4.877	-17.765	52.385	326.655	4.916	-48.907	7.400	30.945
4.512	-17.915	50.572	328.979	7.613	-47.476	6.538	35.156
	-17.108		330.982		-48.643		31.354

Corpo de prova 42 [diâmetro 45 mm para 43 mm]

4.396	-18.839	29.885	331.404	6.283	-51.609	6.676	34.454
4.739	-17.641	29.892	331.799	6.113	-49.974	6.982	32.623
5.485	-17.382	48.045	334.294	6.328	-49.156	9.899	34.576
4.332	-19.175	28.415	335.269	6.189	-48.362	7.663	36.255
4.715	-17.679	28.199	335.796	5.681	-49.497	7.267	35.095
4.488	-17.677	27.222	340.439	5.319	-48.475	6.114	34.149
	-18.066		334.834		-49.512		34.525

Corpo de prova 43 [diâmetro 45 mm para 43 mm]

5.271	-17.691	39.082	331.846	4.117	-50.065	7.401	33.844
4.167	-17.773	34.594	335.603	4.443	-48.725	9.166	33.051
5.068	-17.761	39.568	330.825	6.662	-47.703	6.291	35.004
4.042	-17.684	22.976	340.332	5.181	-47.567	6.721	35.156
4.597	-17.396	26.153	341.682	6.105	-48.748	6.691	34.027
	-17.661		336.058		-48.562		34.216

Corpo de prova 44 [diâmetro 45 mm para 43 mm]

4.960	-14.931	24.937	334.666	3.282	-52.244	9.640	36.285
4.606	-17.612	55.353	325.334	5.552	-52.131	8.061	36.804
4.701	-17.503	33.321	334.155	7.455	-49.020	10.421	36.682
4.235	-17.957	32.968	339.539	5.879	-51.450	8.115	38.574
4.737	-17.568	24.800	343.223	7.004	-49.338	6.235	40.253
4.504	-17.595	26.960	343.633	5.808	-49.406	8.580	40.955
	-17.194		336.758		-50.598		38.259

Corpo de prova 45 [diâmetro 45 mm para 43 mm]

4.634	-18.220	33.462	334.590	5.425	-53.448	5.697	38.635
4.375	-17.628	27.132	336.047	6.206	-52.449	7.940	38.177
4.545	-17.646	34.836	339.155	6.803	-52.312	7.304	40.436
5.407	-18.281	63.744	315.881	5.180	-53.834	9.007	38.757
5.083	-17.259	16.481	350.818	4.888	-52.653	7.338	42.450
4.589	-17.497	26.843	344.668	4.861	-51.450	11.333	42.694
	-17.755		336.860		-52.691		40.192

Corpo de prova 46 [diâmetro 45 mm para 43 mm]

4.681	-18.703	34.189	329.248	4.534	-49.611	11.897	41.748
4.141	-18.066	23.679	335.630	6.730	-49.474	3.927	44.617
4.575	-19.164	22.505	340.642	6.903	-50.496	8.571	45.227
4.195	-17.946	26.923	337.625	7.034	-50.087	4.964	46.417
3.963	-18.101	22.167	342.087	7.092	-48.203	7.354	46.539
	-18.396		337.046		-49.574		44.910

Corpo de prova 47 [diâmetro 45 mm para 43 mm]

4.757	-18.817	31.601	332.437	3.061	-50.564	4.967	45.868
4.956	-17.711	32.811	336.399	4.461	-51.313	3.984	46.814
4.811	-18.448	48.675	331.147	7.096	-50.746	10.555	45.502
4.811	-18.448	48.675	331.147	7.096	-50.746	10.555	45.502
4.334	-17.850	26.739	340.918	6.191	-48.543	4.391	46.692
5.082	-17.567	39.160	339.487	6.953	-48.203	7.931	46.265
	-18.140		335.256		-50.019		46.107

Corpo de prova 48 [diâmetro 45 mm para 43 mm]

4.619	-17.991	60.625	322.344	6.829	-56.490	6.466	47.241
4.875	-17.638	31.624	334.685	3.789	-55.469	8.032	47.119
4.815	-17.671	35.381	339.360	8.411	-56.558	7.405	47.760
4.500	-17.706	28.542	341.772	4.566	-55.809	8.887	48.889
4.377	-17.705	34.236	339.055	7.017	-54.469	8.965	50.415
	-17.742		335.443		-55.759		48.285

Corpo de prova 51 [diâmetro 45 mm para 43 mm]

4.612	-18.278	37.634	331.926	6.220	-57.716	6.821	51.697
5.328	-18.055	18.207	350.818	5.450	-57.512	6.417	54.077
4.491	-18.477	41.834	335.532	3.851	-58.511	11.914	53.101
4.597	-18.329	20.213	344.917	7.177	-57.058	9.449	56.000
5.165	-17.935	55.920	331.023	6.963	-56.286	6.874	54.535
	-18.215		338.843		-57.417		53.882

Corpo de prova 52 [diâmetro 45 mm para 43 mm]

4.275	-18.540	28.392	335.881	7.553	-61.463	3.901	55.511
4.570	-18.325	29.036	339.568	5.782	-59.192	7.585	56.793
4.987	-18.828	37.797	333.000	3.439	-58.329	14.431	56.763
4.420	-18.447	21.266	343.809	4.491	-57.058	3.436	58.533
4.701	-18.337	25.866	340.937	5.306	-57.512	3.869	57.831
	-18.495		338.639		-58.711		57.086

Corpo de prova 53 [diâmetro 45 mm para 43 mm]

5.052	-19.026	39.767	330.803	7.822	-55.060	4.544	61.737
4.822	-18.603	32.453	333.389	8.458	-54.401	7.513	59.204
5.293	-19.627	42.743	332.617	5.622	-55.627	9.538	61.493
4.383	-18.811	21.003	339.268	4.407	-55.060	10.423	59.296
4.010	-18.877	23.690	339.790	3.361	-53.993	6.860	60.638
	-18.989		335.173		-54.828		60.474

Corpo de prova 54 [diâmetro 45 mm para 43 mm]

4.140	-19.600	25.075	330.173	5.779	-53.607	5.891	65.430
4.921	-18.399	37.743	330.889	6.410	-53.380	5.921	66.101
5.047	-19.107	39.921	334.797	4.392	-56.013	8.992	71.045
3.959	-19.983	21.131	340.276	5.518	-60.645	11.116	67.902
4.904	-20.286	32.541	334.229	8.899	-63.574	26.716	93.903
4.808	-19.976	30.618	332.683	8.941	-70.045	19.698	69.672
	-19.559		333.841		-59.544		72.342