

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR DUEVAL UCHSAS
BRAGA E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 21/08/92.
Frederico Eduardo Ruiz
ORIENTADOR

MONITORAMENTO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO VIA
PARÂMETROS ELÉTRICOS DO MOTOR DA MÁQUINA

29/92

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

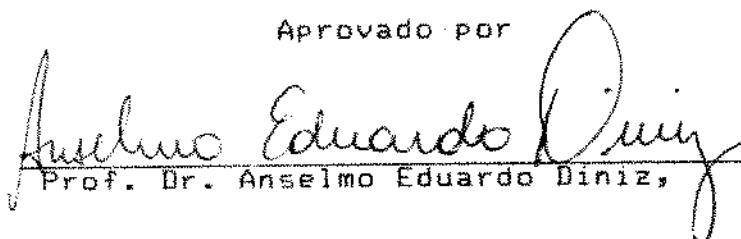
Tese de: Mestrado

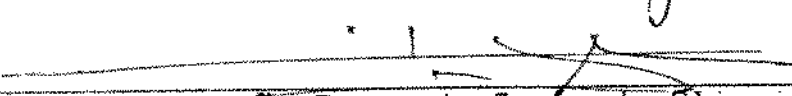
Título da Tese: MONITORAMENTO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO
VIA PARÂMETROS ELÉTRICOS DO MOTOR DA MÁQUINA

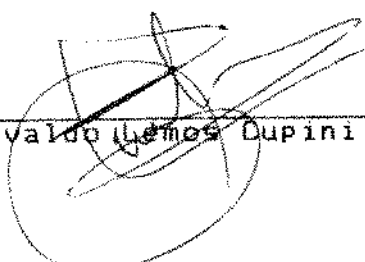
Autor: Durval Uchôas Braga

Orientador: Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

Aprovado por


Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, Presidente


Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira


Prof. Dr. Nivaldo Lemos Dupini

Campinas, 21 de agosto de 1992.

A Fátima, minha esposa dedicada, e a meus filhos Luciano, Liliiane e Leandro, pela compreensão e abdicação das horas de lazer.

A meus pais, pela dedicação incansável no aprimoramento de minha formação.

A Deus, pela presença constante,

Eu dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao DEMEC e à FUNREI, pelo empenho na formação acadêmica de seu corpo docente.

Ao DEF e à UNICAMP, pela seriedade com que desenvolvem suas linhas de pesquisa.

Aos Drs. Anselmo Eduardo Diniz e Nivaldo Lemos Cupini, professores do DEF/FEM/UNICAMP, pelo seu grande esforço e dedicação.

À FAPESP, pelo financiamento da pesquisa.

À FAEP, pela liberação de alguns recursos financeiros.

Aos colegas de mestrado, professores e funcionários do DEF, em particular ao Eng. Felipe, o Eng. Dalberto e os Técnicos Claudomiro e Aristides, pelo apoio humano e técnico.

Ao Ms. Délvio Franco Bernardes, professor do DEL/EFEI, pelo apoio na confecção do sistema para condicionamento de sinais.

Ao Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka, professor do GEPROM/FEM/UNICAMP, pelo apoio em sistemas para conversão de sinais analógicos para digitais

Ao Dr. Sérgio Tonini Button, professor do DEMA/FEM/UNICAMP, pelo apoio em assuntos computacionais do projeto.

Ao Ms. Ronaldo de Castro Villela (in memoriam), pela sua dedicação nas decisões de escolha dos equipamentos da tese.

Ao prof. Geraldo Tibúrcio de Almeida, do DELAC/FUNREI, pela carinhosa revisão do texto deste trabalho.

MONITORAMENTO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO VIA
PARÂMETROS ELÉTRICOS DO MOTOR DA MÁQUINA.

RESUMO

Este trabalho consiste na realização de experimentos para analisar o comportamento da corrente elétrica enquanto variável de controle, como resposta indireta à variação da deterioração da ferramenta no processo de torneamento (desbaste e acabamento). A corrente proveniente dos motores principal e de avanço da máquina-ferramenta foi digitalizada e armazenada na memória de um microcomputador para posteriores análises.

Uma das mais importantes conclusões deste trabalho é que a corrente elétrica é um bom parâmetro para monitorar a quebra da ferramenta e, por ser um método simples, barato e não intrusivo, se torna útil para ser aplicado em condições industriais.

MONITORING THE TURNING PROCESS THROUGH ELETRIC PARAMETERS OF THE MACHINE TOOL

ABSTRACT

Some experiments were carried out to study the utilization of the eletrical current of the machine tool motors to indirectly monitor tool wear and breakage in rough and finish turning. The current from the main and feed motors was digitalized and stored in a computer memory in order to be analysed later. One of the most important conclusion of this work is that the eletrical current is a good parameter to monitor tool breakage and, because it is simple, cheap and non-intrusive, it is very useful to be used in industrial conditions.

CAPÍTULO V	
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
V-1- REPETIBILIDADE DO EXPERIMENTO.....	50
V-2- OPERAÇÃO DE DESBASTE NO TORNEAMENTO.....	51
V-2-1- INFLUÊNCIA DO DESGASTE DE CRATERA NA CORRENTE DE ARMADURA DO MOTOR PRINCIPAL.....	57
V-3- OPERAÇÃO DE ACABAMENTO NO TORNEAMENTO.....	58
V-4- MONITORAMENTO DE AVARIAS NA FERRAMENTA.....	61
CAPÍTULO VI	
CONCLUSÕES.....	63
CAPÍTULO VII	
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	65
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....	68
ANEXO 1	
LISTA DE SÍMBOLOS.....	71
ANEXO 2	
ÍNDICE DE TABELAS E FIGURAS.....	72
APÊNDICE 1	
TABELAS GERAIS DOS EXPERIMENTOS.....	75
APÊNDICE 2	
"SOFTWARE" PARA OBTENÇÃO DOS DADOS.....	85

ÍNDICE

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO.....	1
-----------------	---

CAPÍTULO II

MONITORAMENTO E CONTROLE DO PROCESSO DE USINAGEM.....	3
II-1- CONTROLE DO PROCESSO DE MANUFATURA.....	6
II-2- COMPONENTES BÁSICOS DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE.....	10
II-2-1- SENSORES.....	10
II-2-2- CONDICIONAMENTO DO SINAL.....	24
II-2-3- MODELOS E ESTRATÉGIA.....	25

CAPÍTULO III

AVARIAS E DESGASTES DA FERRAMENTA

ESFORÇOS DE CORTE E RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA

CRITÉRIOS DE FIM DE VIDA PARA A FERRAMENTA.....	29
III-1- AVARIAS E DESGASTES DA FERRAMENTA.....	29
III-2- DESGASTE E VIDA DA FERRAMENTA.....	30
III-3- FORÇAS DE USINAGEM EM OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO.....	33
III-4- RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA.....	36

CAPÍTULO IV

MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	40
IV-1- SISTEMAS DE MONITORAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM.....	40
IV-2- MÁQUINA, MATERIAIS E FERRAMENTAS.....	43
IV-3- CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO MOTOR PARA CON- TROLE DA ROTAÇÃO DO EIXO-ÁRVORE DA MÁQUINA...	44
IV-4- CALIBRAÇÃO DO SISTEMA PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	46
IV-5- OPERAÇÃO DE DESBASTE NO TORNEAMENTO.....	47
IV-6- OPERAÇÃO DE ACABAMENTO NO TORNEAMENTO.....	49
IV-7- OUTROS ENSAIOS.....	49

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

A demanda de pequenos e médios lotes de peças tem exigido a implantação de sistemas automatizados de manufatura com consequente aumento da flexibilidade dos setores produtivos, reduzindo custos de produção e mão de obra .

Esta flexibilidade está sendo possível com a implantação de Centros de Usinagem , Células de Manufatura e até mesmo a Manufatura Integrada por Computador (CIM) [1], onde a intervenção do operador é minimizada em função da atuação mais eficiente de sistemas de monitoramento e controle no processo produtivo.

Uma constante preocupação nos sistemas de manufatura que trabalham com usinagem dos metais é o momento de troca da ferramenta de corte, o que implica na adoção de critérios físicos que determinam o fim de sua vida. Os critérios de fim de vida da ferramenta mais utilizados são: desgaste, tanto na superfície de saída como de folga da ferramenta, forças de usinagem, rugosidade superficial e/ou tolerância dimensional da peça, dentre outros.

Para que se atinja o estágio da manufatura completamente automatizada é importante que os parâmetros utilizados nestes critérios (desgaste, rugosidade etc.) possam ser monitorados em tempo real, a fim de que se possa controlar o processo através dos chamados Controles Adaptativos, que podem ser:

a- o Controle Adaptativo com restrição (ACC), que faz com que as condições de usinagem variem quando uma restrição é atingida. Por exemplo, pode-se diminuir o avanço da ferramenta quando a força de corte, que cresce devido ao aumento do desgaste da ferramenta, atingir um determinado valor.

b- o Controle Adaptativo Otimizado (ACO), que permite a realimentação da variável de interesse, a fim de se conseguirem valores ótimos de custo ou tempo de produção.

Este trabalho tem por objetivo estudar a viabilidade de se monitorar a vida da ferramenta em torneamento de desbaste e acabamento, utilizando-se de medidas de parâmetros elétricos, tais como corrente, tensão e/ou potência consumida pela máquina, como elemento de correlação com o desgaste na superfície de folga da ferramenta e com o acabamento superficial da peça, respectivamente.

Grande parte dos sistemas de monitoramento e controle envolvem

sensores que interferem direta ou indiretamente no processo de usinagem, podendo citar o caso de dinamômetros presos aos suportes das ferramentas que limitam a flexibilidade de seleção de pastilhas de formas diferenciadas, precisam ser protegidos contra o fluxo de cavaco e de fluido de corte e, em alguns casos, limitam a utilização de outras ferramentas na mesma torre porta-ferramenta.

Os motores de acionamento do eixo-árvore e de avanço da ferramenta encontram-se fora da região agressiva da usinagem, proporcionando maior segurança para a instalação de sensores de sinais elétricos. Os sinais podem ser convertidos de analógico para digital e arquivados na memória de um microcomputador, permitindo assim maior flexibilidade na geração e análise dos dados. Outra vantagem de se monitorar os parâmetros elétricos é que este é um método simples e barato de sensoreamento do processo [2,3].

Em operação de desbaste, o objetivo é correlacionar a potência elétrica do motor de acionamento do eixo-árvore e/ou do carro de avanço com o desgaste da ferramenta, para diferentes avanços e velocidades.

Já na operação de acabamento, procurar-se-á correlacionar a potência elétrica desses motores com o acabamento superficial e/ou com a tolerância dimensional da peça.

Essas correlações servirão de referência para tomada de decisão quanto ao momento de troca da ferramenta de corte, permitindo sua utilização em sistemas de controle adaptativo, em que a interferência humana é mínima.

Este trabalho se divide em sete capítulos, quais sejam:

Capítulo I - Introdução.

Capítulo II - Monitoramento e Controle do Processo de Usinagem.

Capítulo III - Avarias e Desgastes de Ferramentas, Esforços de Corte e Rugosidade Superficial da Peça, Critérios de Fim de Vida da Ferramenta.

Capítulo IV - Métodos Experimentais.

Capítulo V - Resultados e Discussões

Capítulo VI - Conclusões.

Capítulo VII - Sugestões Para Trabalhos Futuros.

CAPÍTULO II

MONITORAMENTO E CONTROLE DO PROCESSO DE USINAGEM

O monitoramento de processos de fabricação por usinagem, consiste no acompanhamento geral ou específico das fases que envolvem a transformação da matéria prima em produto, onde as propriedades específicas de cada elemento da máquina-ferramenta, da peça e da ferramenta podem ser avaliadas, aumentando assim a flexibilidade de produção com um mínimo de paralisação do processo produtivo. [1,4,5]

Para uma utilização adequada de um sistema de monitoramento, é desejável que ele tenha, dentre outras, as seguintes características:

- confiabilidade, indicando a dependência entre o parâmetro medido e o parâmetro que está sendo monitorado, incluindo o fator repetibilidade da performance do sensor em ambientes reais, isto é, ambiente de fábrica;

- seja não intrusivo, o que corresponde à não necessidade de se montarem complexos dispositivos que interfiram no funcionamento da máquina;

- seja econômico;

- que o parâmetro medido seja somente influenciado pelo que se deseja medir; por exemplo, fatores como vibração, ruídos, variação de parâmetros do processo não devem influenciar no parâmetro de monitoramento do desgaste da ferramenta.

A figura 2.1 ilustra a importância da aplicação do monitoramento em processos de fabricação. Nela se vê que o tempo efetivo de utilização da máquina apresenta um aumento de 55%, oriundo da recuperação de tempos improdutivos durante a troca entre turnos de trabalho, feriados, finais de semana, manutenção e outros. [5]

A introdução do computador no controle das máquinas-ferramenta aumentou a flexibilidade de produção por permitir a substituição rápida do programa em operações de usinagem, garantir um maior controle dimensional em tempos relativamente menores, dentre outros. Os investimentos associados a tais máquinas-ferramenta causam um acréscimo nos custos de mão de obra e ferramentas, exigindo que os parâmetros de corte sejam otimizados, justificando assim a utilização crescente dos

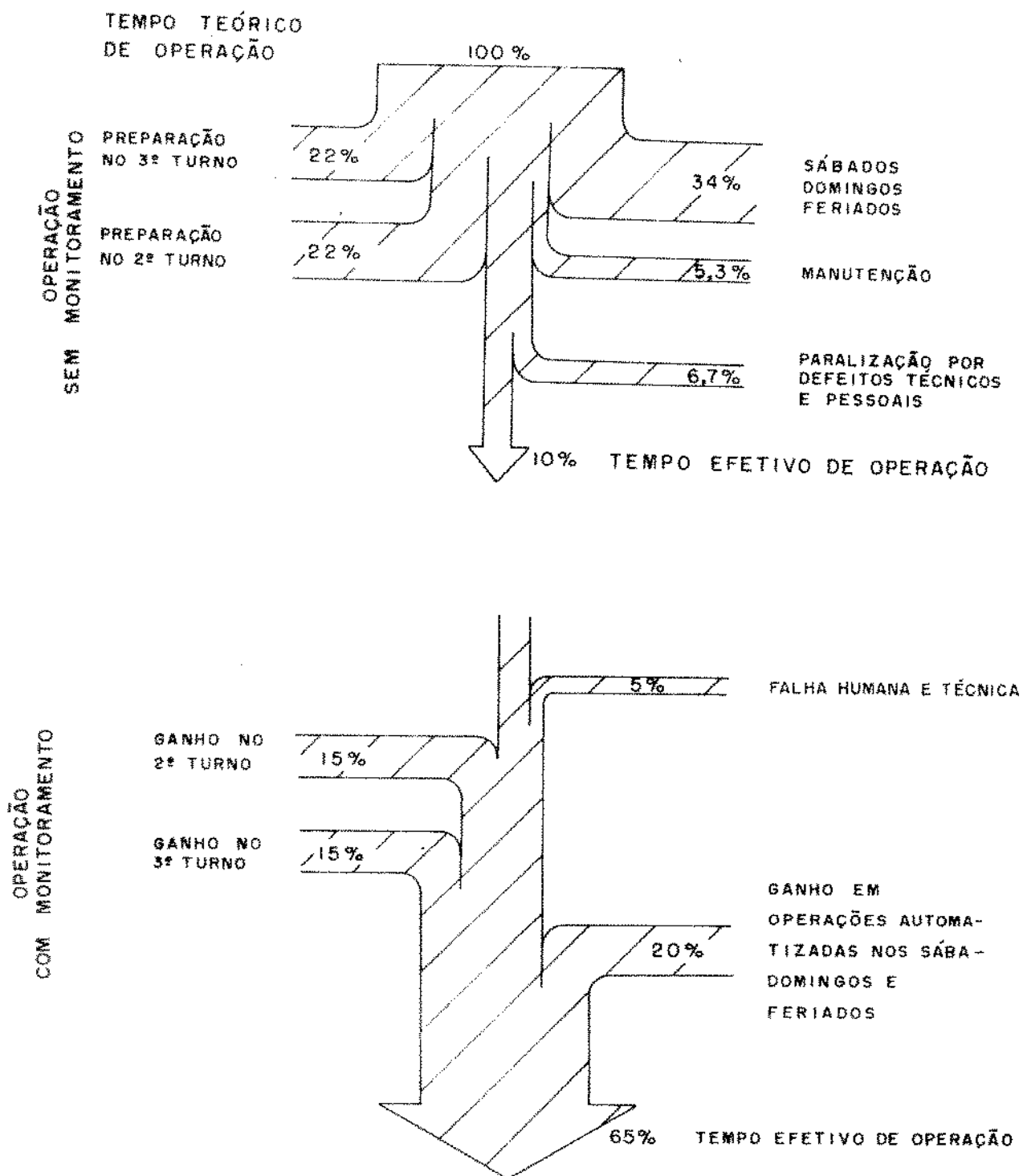


Fig 2.1- Importância Econômica do Monitoramento em Processos de Fabricação. [5]

sistemas de monitoramento e controle . [6]

Assim, as justificativas econômicas para a utilização de sistemas de monitoramento e controle do processo se encaixam dentro das justificativas para a utilização de máquinas CNC e sistemas flexíveis e automatizados de produção. Quando se pensa em produção sem a participação do homem (unattended machining), sistemas de monitoramento e controle da usinagem são peças fundamentais para que o todo funcione.

Além disso outras justificativas se colocam, tais como:

a) os novos e caros materiais de ferramentas (CBN e diamante) fazem com que a quebra ou a deterioração rápida da ferramenta devam ser evitadas a todo custo;

b) o corte de materiais difíceis de usinar e com poucas informações disponíveis sobre seu comportamento, tais como materiais reforçados com fibras, ligas resistentes ao calor etc., faz com que o processo se torne de certo modo imprevisível, o que ressalta a necessidade de monitoramento em tempo real;

c) os pequenos lotes de peças encarecem a rejeição de uma peça.

O tempo de resposta em tais sistemas é muito importante, pois pode-se evitar choques entre elementos em movimento relativo , corrigir desvios ocorridos tanto na máquina como na ferramenta e na peça devido aos fenômenos de quebra, desgastes, vibrações e outros. Podem-se ter sistemas de monitoramento, onde o tempo é crítico (da ordem de milissegundos), o qual prevê correções em tempo real nas variáveis de controle que são importantes para continuidade do processo produtivo.

Os sistemas em que o tempo não é crítico envolvem controles em tempos maiores, onde as variáveis não interferem diretamente na continuidade do processo produtivo.

A tabela 2.1 mostra algumas variáveis do processo que podem ser controladas em tempo crítico e em tempo não crítico, variáveis essas tanto da máquina quanto da ferramenta, processo e peça. [5]

A redução de tempos improdutivos, pela previsão de quebra e/ ou desgaste da ferramenta, pela correção imediata de posicionamento e dimensão das peças, ou ainda a utilização de parâmetros de corte mais severos à usinagem, são algumas das principais vantagens que viabilizam a introdução do monitoramento e controle em processos de usinagem automatizados.

	TEMPO CRÍTICO	TEMPO NAO CRÍTICO
Máquina	- Controle do CNC - Colisão	- Precisão - Deformação Térmica
Ferramenta	- Quebra - Posicionamento - Desgaste	- Desgaste - Presença
Processo	- Vibração - Força, Potência - Formação do Cavaco - Temperatura	- Refrigerante
Condicionamento da Ferramenta	- Dressagem	- Compensação do Posicionamento. - Zeramento
Peca	- Dimensão - Forma - Rugosidade	- Dim. Mat. Prima. - Material. - Integridade de Superfície.

Tabela 2.1- Variáveis de Controle do Processo de Usinagem Monitoradas em Tempo Crítico e Não Crítico. [5]

II-1- CONTROLE DO PROCESSO DE MANUFATURA

Durante as últimas décadas, a utilização de sistemas controlados por computador tem crescido muito em quase todos os campos da manufatura. Uma comum desvantagem em tais sistemas ocorre quanto às variáveis de controle da usinagem, que dependem de diversos fatores que nem sempre são levados em consideração pelos programadores de tais máquinas-ferramenta.

Essa dependência do conhecimento e experiência prévia dos operadores normalmente retardam a produção dos sistemas de manufatura. [7,8,9]

Para aumentar a produtividade de tais sistemas, foram desenvolvidos sistemas de Controle Adaptativos (AC), em que as variáveis do

processo são monitoradas e controladas em tempo real, permitindo que decisões possam ser tomadas cada vez mais independentemente da intervenção humana.

A figura 2.2 exemplifica um sistema de Controle Adaptativo.

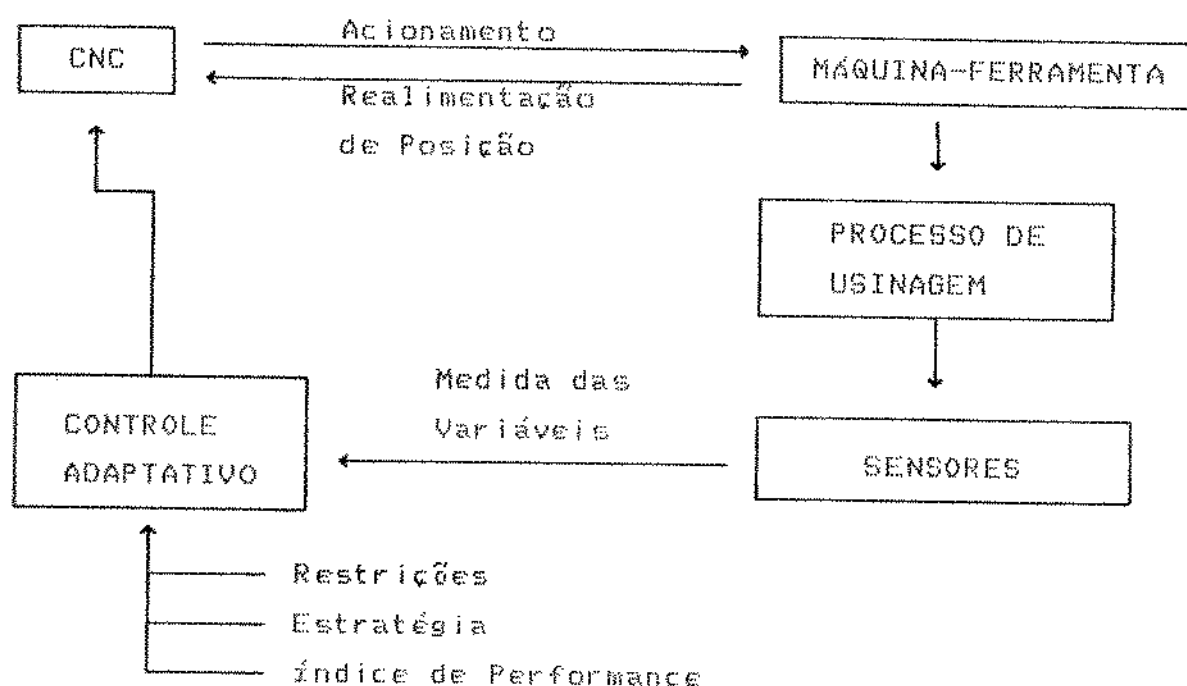


Fig.2.2- Sistema de Controle Adaptativo
Para Máquina-Ferramenta. [8]

Os sistemas de Controle Adaptativo podem ser classificados em três grupos distintos:

a) Controle Adaptativo Otimizado (ACO).

Com as informações provenientes dos sensores, estes sistemas corrigem as variáveis do processo, como o avanço ou a velocidade de corte, objetivando manter um ponto ótimo de funcionamento em conjunto com as restrições de entrada do Sistema Adaptativo. Este ponto ótimo é obtido obedecendo-se uma função econômica da usinagem, como o mínimo custo ou a máxima produção.

O ACO apresenta aplicações muito restritas devido à escassez de sensores capazes de monitorar em tempo real tanto o desgaste como qualquer outra variável do processo de usinagem, no ambiente de produção. [8]

b) Controle Adaptativo Geométrico (GAC)

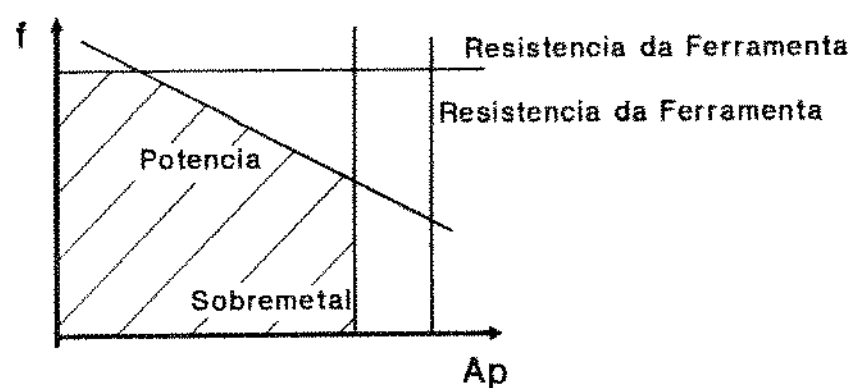
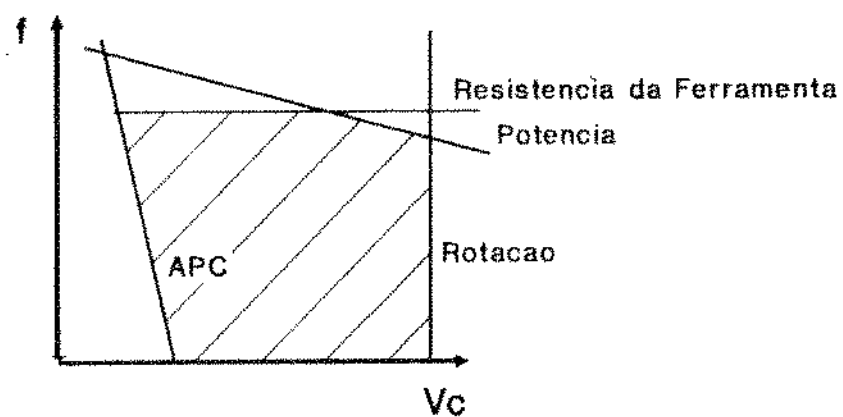
Este sistema tem por objetivo manter a geometria da peça, corrigindo erros de forma da mesma e compensando possíveis desvios da ferramenta, ocasionados por desgastes, dilatação térmica ou outros fatores inerentes ao processo de manufatura em operação de acabamento, tudo isso em tempo real. [8,10]

Neste caso procura-se controlar indiretamente a forma e o acabamento superficial da peça, normalmente medidos independentemente do processo, através do monitoramento de variáveis como o desgaste na superfície de folga e de saída da ferramenta, as quais afetam as variáveis do processo que se deseja controlar e tem correlação direta com elas. [8]

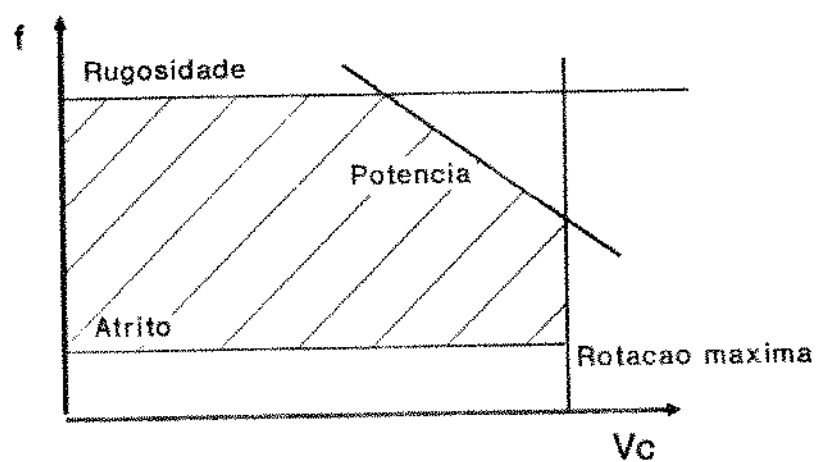
c) Controle Adaptativo com Restrição (ACC).

Este sistema de controle permite uma atuação no sistema, maximizando as variáveis de usinagem dentro de faixas definidas pelo processo e restrições do mesmo, como por exemplo: força de usinagem, potência de corte etc. A otimização econômica nesse caso não é realizada, visto que as correções das variáveis são processadas apenas para ajustar as condições de corte a fim de que o processo não ultrapasse uma determinada restrição. A tomada de decisão quanto à atuação no processo é função da estratégia pré-definida no Controle Adaptativo. [8]

A figura 2.2a exemplifica algumas curvas de restrições do processo de torneamento em desbaste e em acabamento.



Restrições no torneamento em desbaste.



Restrições no Torneamento em acabamento.

Fig. 2.2a- Restrições para Controle Adaptativo.

O ACC e GAC são os mais usados atualmente, e raramente controlam mais de uma variável do processo. A aplicação do ACC tem por objetivo aumentar a produtividade com a maximização dos parâmetros de corte, aumentando, conseqüentemente, a taxa de remoção do material em operação de desbaste.

II-2- COMPONENTES BÁSICOS DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE

O monitoramento e controle em processos de usinagem tem sido aplicado frequentemente em centros de usinagem, funcionando sem o auxílio de operador, em células e sistemas de manufatura flexíveis e atualmente em manufatura integrada por computador [1]. Essa aplicação permite aumentar a automação e melhorar a eficiência mecânica dos equipamentos do sistema produtivo.

Os componentes básicos do sistema de monitoramento estão mostrados na figura 2.3.

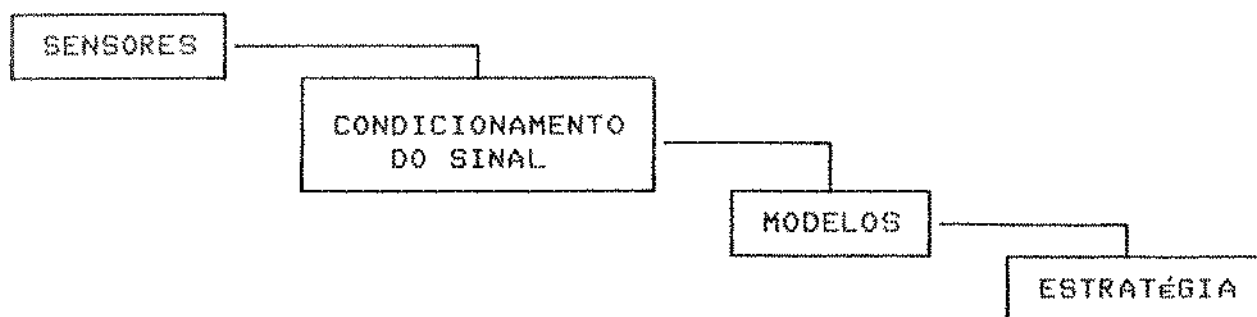


Fig 2.3 - Componentes Básicos do Sistema de Monitoramento. [5]

II-2-1 - Sensores

O desenvolvimento de sistemas de controle para melhorar a automação das máquinas-ferramenta e o desenvolvimento de sistemas de diagnóstico para detectar falhas no processo requer a utilização de sensores capazes de fornecerem informações seguras do processo em

geral. [3]

Projetos de sensores para máquinas-ferramenta são complexos e exigem cuidados especiais, como, por exemplo: custo de aquisição; manutenção e substituição dos mesmos; segurança; durabilidade; flexibilidade (Sensoriar mais de uma variável ao mesmo tempo); exatidão; sensibilidade estática e dinâmica, dentre outras. [11]

Os sensores permitem correções geométricas da peça, monitoram o desgaste e previnem quebra da ferramenta, permitem um funcionamento seguro do sistema de transmissão de potência da máquina e auxiliam no próprio sistema de controle da mesma. [8,12]

O monitoramento das variáveis de interesse do processo, como o acompanhamento do desgaste ou a previsão de quebra da ferramenta, podem ser sensoreados de forma direta ou indireta. [2,7,11,12,13,14,15,16]

O sensoreamento de forma direta é aquele através do qual a variável de interesse é avaliada diretamente durante o processo de usinagem, apresentando distorções geradas somente pela própria característica dinâmica do sensor. Podemos citar os tipos :

Sensores óticos. (Por reflexão de luz, fibra ótica, câmara de TV). Frost - Smith et al., [7] em 1970, e Yamazaki, K. et al., [7] em 1974, desenvolveram estudos sobre este tipo de sensor, que trabalha usando o seguinte princípio:

Uma superfície gasta se torna mais refletora em relação a uma superfície nova. Assim, pode-se avaliar o desgaste da ferramenta pela obtenção da quantidade de luz refletida ou da imagem obtida pela reflexão. Estes sensores são utilizados em processos intermitentes em que a superfície exposta à luz não está continuamente em contato com a peça, como é o caso de sensoreamento de desgastes em fresas.

Segundo os autores, este tipo de sensor pode ser aplicado com sucesso em sistemas de controle adaptativo (ACO), automatizando a troca de ferramentas pelo monitoramento de seu desgaste e conseqüentemente de sua vida. Tais sensores apresentam uma precisão de $\pm 0,01$ mm, e sua faixa de medida varia de 0,1 a 0,8 mm para o desgaste da superfície de folga da ferramenta. [7]

Sensores de Resistência Elétrica. A área de contato entre a peça e a ferramenta aumenta com o desgaste da mesma, reduzindo a resistência elétrica da referida seção. Esta variação de resistência elétrica tem sido utilizada com sucesso para avaliar o desgaste na

superfície de folga da ferramenta em operações de acabamento em torneamento.

Alguns cuidados são recomendados em relação ao modelo que relaciona a variação de resistência elétrica com o desgaste, visto que este varia com os parâmetros de corte, como velocidade, avanço e forças de usinagem [7]. Outras técnicas têm sido utilizadas para avaliar a resistência da área de contato por impregnação de pó de grafite ou um resistor de filme metálico na superfície de folga da ferramenta.

Um inconveniente em utilizar esse tipo de sensor é o aumento de custo do ferramental, onerando assim o custo do processo de produção.[7]

Sensores Radioativos. A ferramenta é ativada com neutrons ou com partículas radioativas variadas. Durante a usinagem, uma parte desse material é conduzida juntamente com o cavaco, permitindo que seja feita uma avaliação da perda volumétrica da ferramenta e consequentemente do seu desgaste total. A introdução de radioatividade no ambiente de trabalho e a constante necessidade de avaliar o material retirado da peça, assim como o fluido refrigerante, tem desfavorecido a aplicação desses tipos de sensores, em processos de fabricação. Uma variante desta técnica tem sido apresentada com o nome de micro-isótopo, em que a superfície de interesse é ativada com aproximadamente 10^{-8} curie e o monitoramento da perda desta radioatividade permite avaliar o desgaste da ferramenta.[7]

Sensores Pneumáticos. Um fluxo de ar comprimido é mantido próximo da superfície de folga da ferramenta; daí a pressão do ar se transforma em tensão elétrica e é controlada. O desgaste da ferramenta faz aumentar o espaçamento inicial entre a superfície de folga da ferramenta e o bico de ar e, então, um sistema de controle é acionado para retornar às condições iniciais. Essa correção é tida como indicadora do desgaste da ferramenta. Estes sensores têm sido aplicados em processos de retificação, em que a variação do desgaste da ferramenta serve de referência para a aproximação do dressador. [7]

Sensor Dimensional de Contato. Os sensores dimensionais de contato utilizam sondas que permitem monitorar a presença da peça e/ ou da ferramenta assim como suas geometrias. Medidas sucessivas feitas em um ponto de referência da aresta de corte da ferramenta poderão indicar o desgaste a partir de uma pré-calibração inicial da sonda de contato. [7]

O sensoreamento de forma indireta é aquele cuja variável de interesse é monitorada através de sinais de outras variáveis do processo, apresentando distorções não só pela dinâmica do sensor mas também pela estrutura do conjunto máquina-ferramenta. Os sensores que monitoram as máquinas-ferramenta são geralmente sensores indiretos. [3]

Os sensores de força são os mais utilizados para monitorar o desgaste e a quebra da ferramenta de corte. (Jetly, 1984; Matsushima et al., 1982; Micheletti et al., 1988; Tlustý et al., 1983). [3] O monitoramento da corrente e/ou voltagem do motor elétrico tem-se tornado um atrativo método de medida indireta tanto da força como da potência de usinagem, visto que o sensor (exceto o "shunt", que é uma resistência que permite monitorar a corrente elétrica utilizando a medida da queda de tensão gerada pela mesma que é proporcional à corrente, e montagens indutivas que permitem monitorar a corrente elétrica através da medida da tensão gerada por um campo magnético proporcional à corrente) já existe no projeto de muitas máquinas-ferramenta. Portanto, esses sensores são econômicos e de fácil adaptabilidade ao sistema de manufatura. As distorções introduzidas tanto pela dinâmica do sensor (motor) como pelo sistema de acionamento podem ser determinadas, como mostrado por Steinert et al., 1986 . [2]

No sensoreamento indireto deverá existir uma correlação bem definida entre o sinal sensoreado e a variável de interesse. O sensoreamento de forma indireta apresenta algumas vantagens, como, por exemplo, obter o monitoramento de variáveis que se encontram em ambientes agressivos pela correlação com outras variáveis do processo em condições mais acessíveis. Como desvantagem, podemos citar as dependências da variável de interesse com outras inerentes ao processo, como dureza da peça, condições de corte e outros.

Descreveremos, a seguir, alguns métodos de sensoreamento indireto de desgaste e quebra da ferramenta.

Método da Força de Corte. Neste método, tenta-se correlacionar as componentes da força de usinagem com o desgaste na superfície de folga da ferramenta. Micheletti et al., (1986), [7] concluíram que o desgaste da ferramenta varia linearmente com a força de corte, apresentando um alto grau de correlação. Esta correlação permite que o processo de usinagem possa ser monitorado em tempo real, sem interrupção da usinagem, evitando possíveis falhas do processo ou mesmo fornecendo sinais de entrada para utilização no Controle Adaptativo.

Em operação de torneamento com ferramenta CNMM 120412-71 P15 e material SS1672 pôde-se verificar um alto coeficiente de correlação entre o desgaste e as forças de avanço (F_f) e tangencial (F_c) da ferramenta, como mostra a figura 2.4. [17]

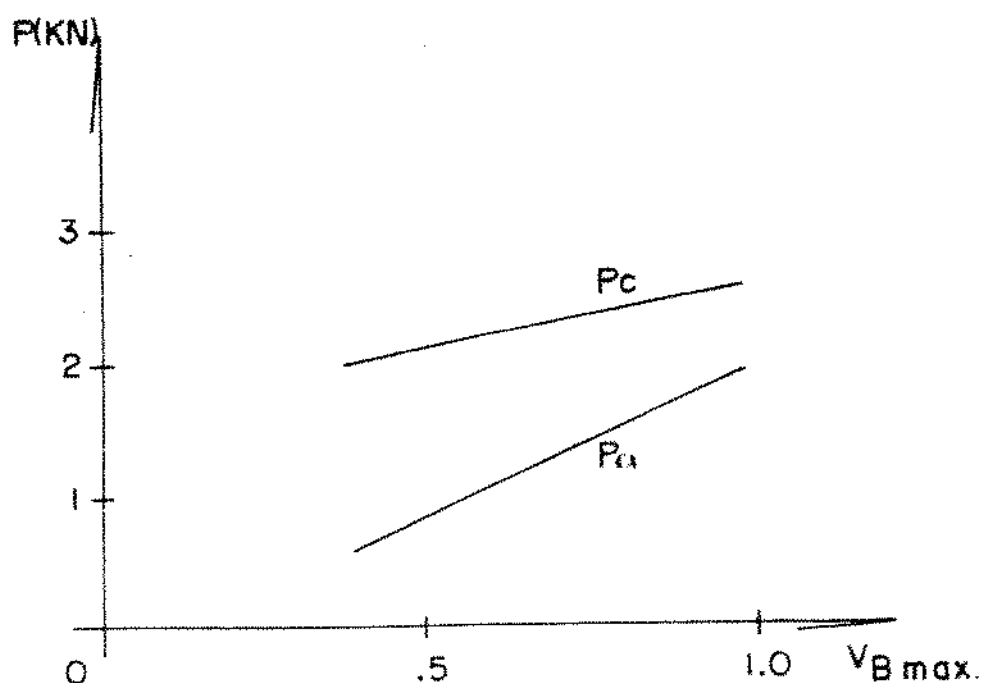


Fig 2.4- Correlação Entre as Forças de Corte e de Avanço em Relação ao Desgaste da Ferramenta. [17]

Os testes foram processados durante 20 minutos de corte e interrompidos quando observado um alto grau de desgaste ou quebra da ferramenta. Os ensaios foram feitos em três velocidades distintas de corte e, para cada velocidade, tanto o avanço da ferramenta como a profundidade de corte foram variados.

Método da Temperatura de Corte. A temperatura na interface peça-ferramenta pode ser sensoreada diretamente por radiação infravermelha ou indiretamente por utilização de termopares. Solaja e Vukelja (1983) e Colwell (1975), [7] encontraram uma correlação entre

o desgaste da ferramenta e o campo de variação da temperatura (ou balanço térmico).

Modelos teóricos também têm sido desenvolvidos com a finalidade de prognosticar o acréscimo da temperatura na interface ferramenta-peça devido ao desgaste. Outras técnicas podem ser encontradas, como a utilização de reações termoquímicas, medida da força termoeletromotriz, etc. O uso dessas técnicas para monitorar as condições da ferramenta em tempo real ficam muito prejudicadas devido à necessidade de um acesso direto à região do corte.[16]

Método da Emissão Acústica (EA). EA pode ser definida como ondas de tensão elástica geradas como um resultado da liberação rápida da energia de deformação dentro de um material submetido a um estímulo externo, devido ao rearranjo de sua estrutura.[13,16,18]

A geração de EA em processos de corte pode ser devido à deformações elástica e plástica do material da peça e/ou ferramenta, atrito ferramenta - peça, atrito, cavaco - ferramenta, quebra do cavaco, e falhas ou desgastes da ferramenta. O sinal de EA é usualmente detectado por transdutores e posteriormente são amplificados e transmitidos para um osciloscópio, um arquivo, um voltímetro, um registrador ou um analisador de espectro.

Em operações de torneamento, a análise espectral é muito utilizada para monitoramento de falhas da ferramenta. Trabalhos práticos têm demonstrado que a faixa segura de frequência se situa entre 100 KHz e 1 MHz. A metodologia de reconhecimento de padrões muitas vezes é utilizada para detectar uma ferramenta gasta, analisando-se seu espectro de frequência, como se pode constatar no trabalho de Jiang et. al., [25]

É importante salientar a extrema sensibilidade dos sinais de EA a falhas da ferramenta, como lascamento, trincas e quebras, onde o efeito intermitente aumenta a densidade do sinal e permite uma atuação quase instantânea, paralisando o sistema de avanço da ferramenta.[19]

Método dos Parâmetros Elétricos do Motor. Durante o processo de usinagem pode-se sensorar a corrente ou a potência elétrica dos motores de acionamento da máquina - ferramenta. A potência elétrica ou a corrente elétrica consumidas são proporcionais à potência mecânica consumida pelo processo e, com isso, proporcionais aos esforços de corte. Em outras palavras, medir parâmetros elétricos é medir indiretamente os esforços de corte. Como se vê extensamente citado na literatura específica, os esforços de corte são dependentes das condições de

corte (avanço, velocidade de corte, profundidade de usinagem), geometria da ferramenta e também (como citado em item anterior), com o desgaste da ferramenta. [2,3,16,17] Existem atualmente alguns sistemas de Monitoramento e Controle Adaptativo baseados na medida de corrente e potência do motor de acionamento de máquinas-ferramenta, disponíveis comercialmente, como, por exemplo, Monitoramento e Controle de Torque pela Cincinnati Milacron, e Controle Adaptativo do Avanço pela MAZAK, que trabalham com Controle Adaptativo com restrição da potência de corte; Monitoramento da força de corte pela " Swedish Machine - Tool Company ", integrado ao sistema de controle da máquina-ferramenta e sistemas de monitoramento de quebra da ferramenta pela Valenite e Sandvik. [17]

Liau, Y. S. (1986) [16] desenvolveu um modelo correlacionando a corrente elétrica do motor principal com o desgaste na superfície de folga da ferramenta de corte, como sendo:

$$I_A = K_2 [K_1 (V_B) + F_0] * D/2$$

Onde: I_A = Valor Médio Quadrático da Corrente.
 V_B = Desgaste na Superfície de Folga da Ferramenta.
 D = Diâmetro da Peça.
 K_1 , K_2 e F_0 = Constantes.

No ensaio proposto por Liau, o sinal de corrente foi amplificado e retificado, permitindo mensurar pequenas variações. O critério de fim de vida da ferramenta foi estabelecido quando o nível de corrente ultrapassava um valor considerado normal no processo de usinagem, e estabelecido anteriormente por ensaios experimentais.

Liau observou um aumento aproximadamente constante do percentual da corrente, quando usinado um mesmo material com velocidade de corte constante. O sistema de medida da corrente foi relativamente simples e sua montagem não interferiu no processo de usinagem.

A sensibilidade da corrente, ao desgaste da ferramenta, desde o momento da penetração da ferramenta na peça até o regime constante de corte, foi inferior, quando comparado a outros sensoreamentos como força de corte e vibração. Porém a sensibilidade à quebra da ferramenta se mostrou eficiente e passível de monitoramento em operação de torneamento de desbaste. [16]

Stein J. L., Shin K. C., (1986), [21] apresentaram um trabalho sobre monitoramento da corrente elétrica do motor, com campo controlado. A variação da corrente se mostrou sensível à variação do torque e

consequentemente ao desgaste e quebra da ferramenta de corte, componentes desalinhados da máquina, falhas em sistemas de lubrificação da máquina, dentre outros. Os sensores para detecção dessas falhas, de outra maneira que não com a corrente elétrica do motor, são geralmente caros e de difícil segurança quanto à instalação e interferência no sistema de manufatura.

Os autores comprovaram que os motores elétricos com excitação independente de campo e armadura possuem duas faixas distintas de rotação. O limite entre estas faixas de velocidades de rotação do eixo-árvore é denominada de rotação-base, cujo gráfico pode ser visto na fig 2.5. Até que se atinja a rotação-base do motor, o controle é processado pelo aumento da tensão de armadura, e, após esta rotação, o controle se processa pela redução da corrente de campo do motor, onde a tensão nominal de armadura permanece em seu valor máximo.

O sensoreamento destes parâmetros elétricos são importantes quando se trabalha com variação da rotação durante o corte. No presente trabalho utilizar-se-á rotação constante, o que não deverá implicar em variações significativas em tais parâmetros elétricos, pois a corrente de armadura se estabiliza em um valor constante durante uma mesma rotação da máquina. [2]

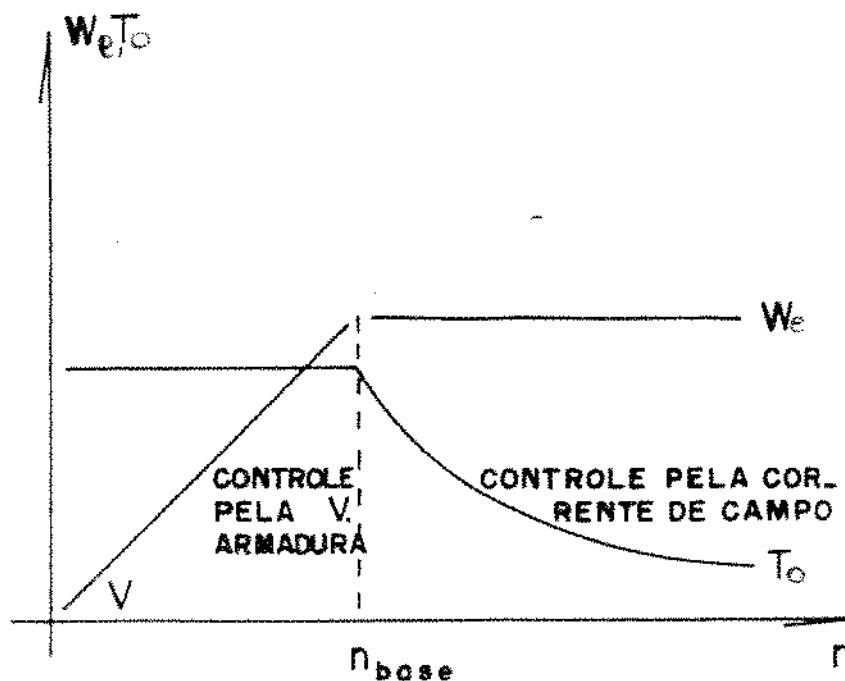


Fig 2.5- Curva Característica de Controle de Rotação do Motor Elétrico com Excitação Independente. [2]

Ainda os autores Stein e Shin [2] verificaram que a variação da corrente de armadura do motor é proporcional à variação do torque do eixo-árvore e, conseqüentemente, da força de usinagem na operação de torneamento. A figura 2.6 mostra a resposta transitória da corrente de armadura quando ocorre a penetração da ferramenta na peça, até o regime constante de corte. O tempo de resposta em regime transitório foi maior para rotações maiores, como mostra a figura 2.7. Essa variação é importante e deve ser levada em consideração em sistemas de monitoramento, em que se espera uma atuação no sistema antes que ocorra um número significativo de rotações da peça, podendo comprometer a continuidade do processo, por colisão entre peça, ferramenta e/ou máquina, ou mesmo comprometendo a qualidade e/ou tolerância dimensional do produto.

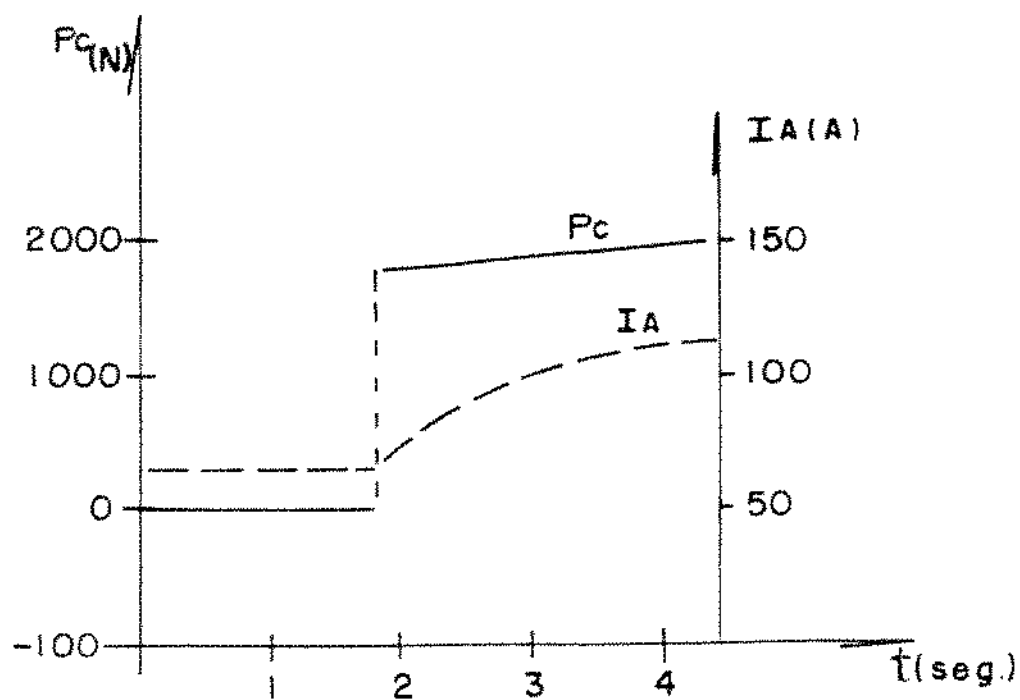


Fig 2.6- Característica da Corrente de Armadura Durante a Penetração da Ferramenta na Peça. [2]

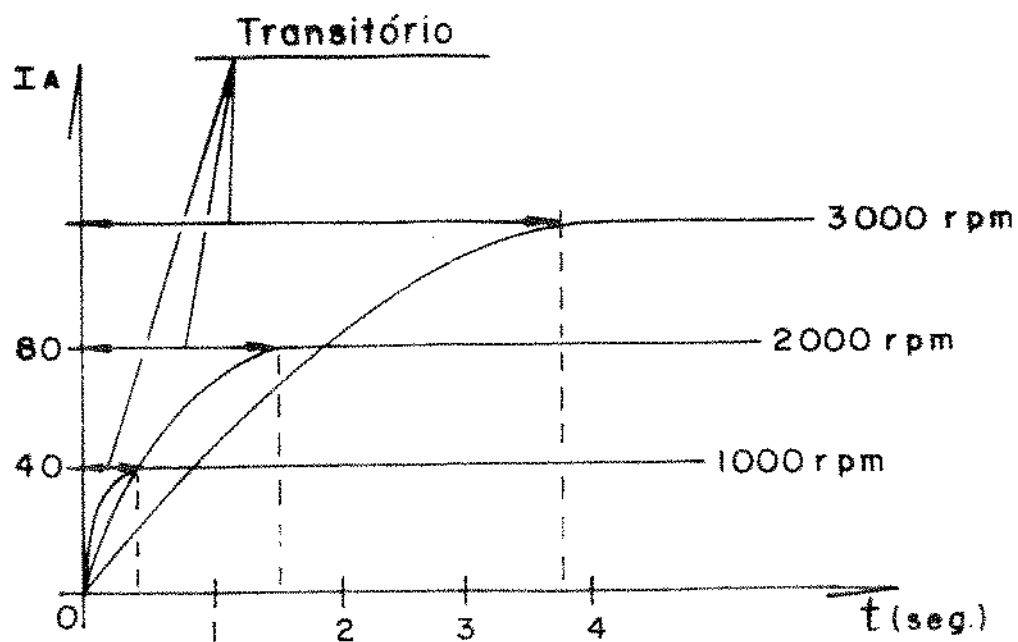


Fig 2.7- Variação do Regime Transitório da Corrente para Diferentes Rotações da Máquina. [2]

A sensibilidade da corrente se mostrou dependente das condições do processo. Entretanto, para uma faixa de trabalho em que os parâmetros de corte são constantes, pode-se considerar a corrente de armadura do motor como uma medida indireta da variação dos esforços de corte na ferramenta, [2,3]

Mannan M. A. et al. (1989)[31] desenvolveram um trabalho com objetivo de verificar a variação tanto da corrente como da potência elétrica do motor com relação ao desgaste, quebra e vibração da ferramenta. O trabalho avalia o efeito da frequência em ambos os sistemas mecânicos e elétricos e mostra um espectro de frequência semelhante tanto para a potência elétrica do motor e o torque do eixo árvore, como para a força de avanço da ferramenta e corrente elétrica do motor, como mostra a figura 2.8a e 2.8b.

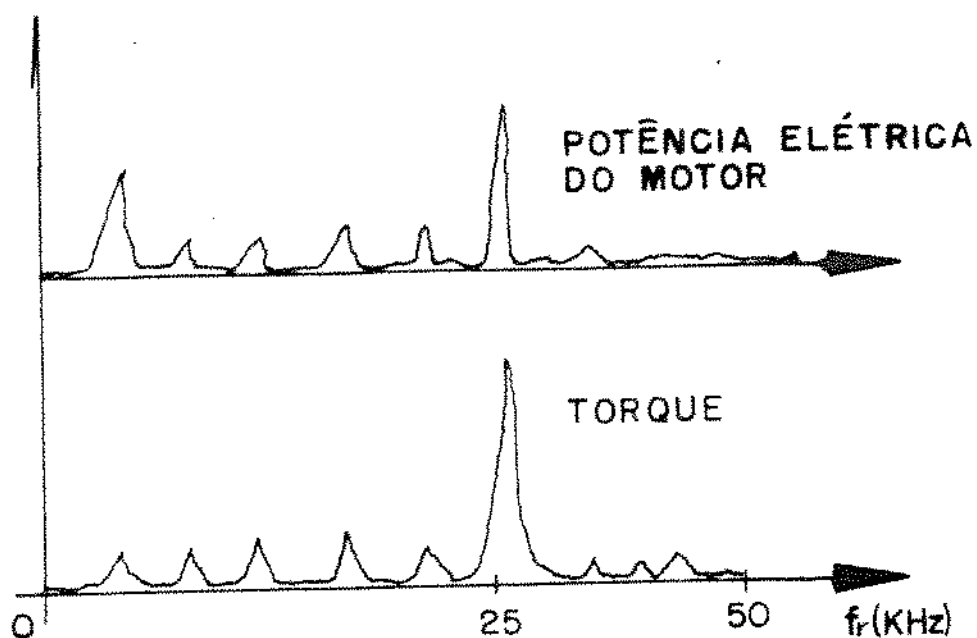


Fig 2.8a- Espectro de Frequência da Potência Elétrica do Motor e Torque do Eixo-Árvore da Máquina. [17]
Operação de Fresamento

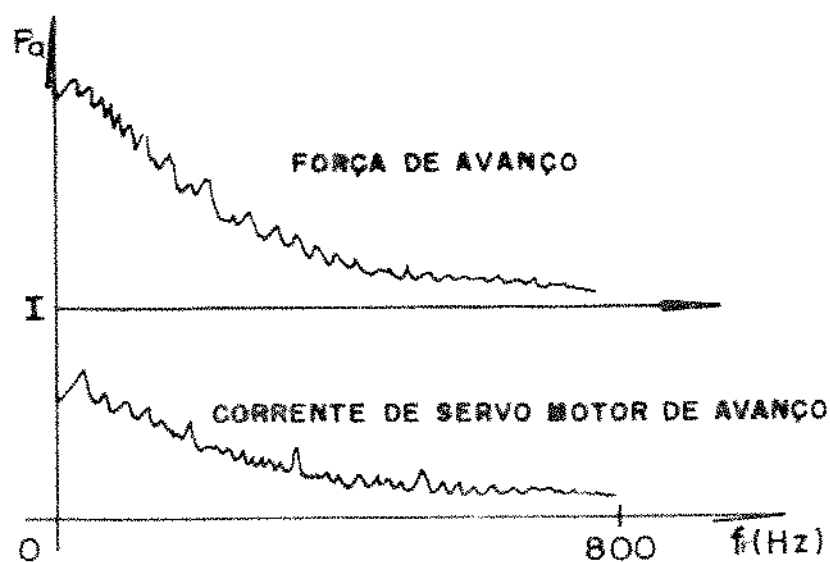


Fig 2.8b- Espectro de Frequência da Força de Avanço da Ferramenta e Corrente Elétrica do Motor. [17]
Operação de Fresamento

A figura 2.9 ilustra os diversos níveis de corrente para um conjunto peça-ferramenta e máquina-ferramenta à medida que a ferramenta se desgasta.[17] Nota-se que existe uma faixa razoavelmente grande entre as condições da ferramenta nova e quando ocorre sua quebra. Dessa forma pode-se admitir um valor intermediário da corrente que limite a ocorrência de quebra da ferramenta, com conseqüente ganho de custo e tempo de manufatura.

A tabela 2.3 apresenta os resultados do monitoramento da corrente elétrica nas mesmas condições da figura 2.9, onde, para a máquina em vazio, foi considerado um nível unitário de corrente e para as demais situações foram considerados múltiplos deste nível unitário.

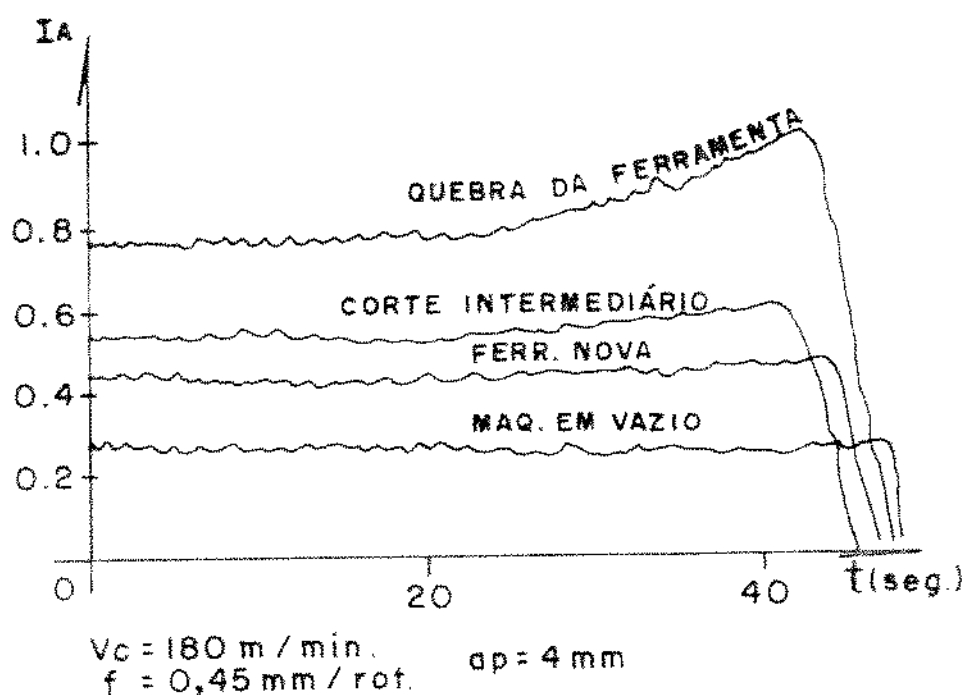


Fig 2.9- Níveis de Corrente para a Máquina em Vazio, a Ferramenta Nova, o Corte Intermediário e a Quebra da Ferramenta.[17]

	Corte em Vazio	Ferramenta Nova	Ferramenta Gasta	Quebra da Ferramenta
Corrente do Servo Motor de Avanço	1	1,8	3,6	3,3
Corrente do Motor Principal	1	5,0	5,9	6,8

Tabela 2.3- Comparação entre as correntes para a Máquina em Vazio, a Ferramenta Nova, o Corte Intermediário e a Quebra da Ferramenta.[17]

Embora venham sendo desenvolvidas através dos anos várias técnicas para sensoreamento de falhas em ferramentas, pouco tem sido aplicado com sucesso em processos de manufatura. Muitas dessas técnicas não são capazes de detectar e diagnosticar classes particulares de falhas em ferramentas, como, por exemplo, o desgaste e/ou quebra, o que inviabiliza a utilização universal de tais técnicas de sensoreamento.

Para efetivamente implementar o sensoreamento de falhas de ferramentas em processos flexíveis de manufatura, muitos trabalhos devem ser conduzidos de maneira a correlacionar melhor as variáveis do processo de manufatura com respeito às falhas da ferramenta, como, por exemplo:[16]

- a) desenvolver critérios seguros e práticos que reflitam o desgaste da ferramenta em tempo real;
- b) desenvolvimento de uma relação quantitativa entre o desgaste da ferramenta e os parâmetros de medida, o que permitirá uma efetiva variação de estratégias em processos de manufatura automatizada;
- c) desenvolver técnicas rápidas de detecção e diagnóstico, compatíveis com o rigor das máquinas controladas por computador;
- d) desenvolvimento de uma técnica rápida para processamento dos dados sensoreados, permitindo um controle da compensação da ferramenta de corte durante um processo de usinagem de precisão;
- e) desenvolvimento de sensores práticos, econômicos e aplicativos em ambientes industriais;

11-2-2- CONDICIONAMENTO DO SINAL

Os sinais provenientes dos sensores podem ser pré-amplificados, amplificados, filtrados em um intervalo definido de frequência de interesse e em muitos casos convertidos de analógico para digital, o que permite uma análise mais rápida e segura, utilizando-se um micro-computador, para o processamento dos dados.

A pré-amplificação é aplicada quando existe uma distância grande entre a geração do sinal e seu condicionamento, capaz de produzir queda de tensão do sinal gerado. Para se evitar esse problema, coloca-se um tipo de amplificador (pré-amplificador) perto do sensor.

A amplificação do sinal é utilizada para melhorar o condicionamento do mesmo através do ajuste do nível de tensão adequado à utilização desejada.

Muitos fenômenos importantes na usinagem apresentam uma faixa específica de frequência, que pode ser selecionada utilizando-se de filtros passa-banda, eliminando-se desta forma sinais indesejáveis, como é o caso dos ruídos.

A análise do sinal sensoreado pode ser feita tanto no domínio do tempo, utilizando-se de parâmetros estatísticos como média, desvio padrão, valor médio quadrático (RMS) etc., como no domínio da frequência, utilizando-se de análise espectral, a qual pode ser digital, através de transformada de Fourier (FFT) ou analógica, através da utilização de um analisador eletrônico de frequência.

Lee, L. C. et al., comprovaram o condicionamento do sinal dinâmico da força de corte no torneamento em função da frequência que caracteriza o desgaste na superfície de folga da ferramenta.[14] Veja-se figura 2.10.

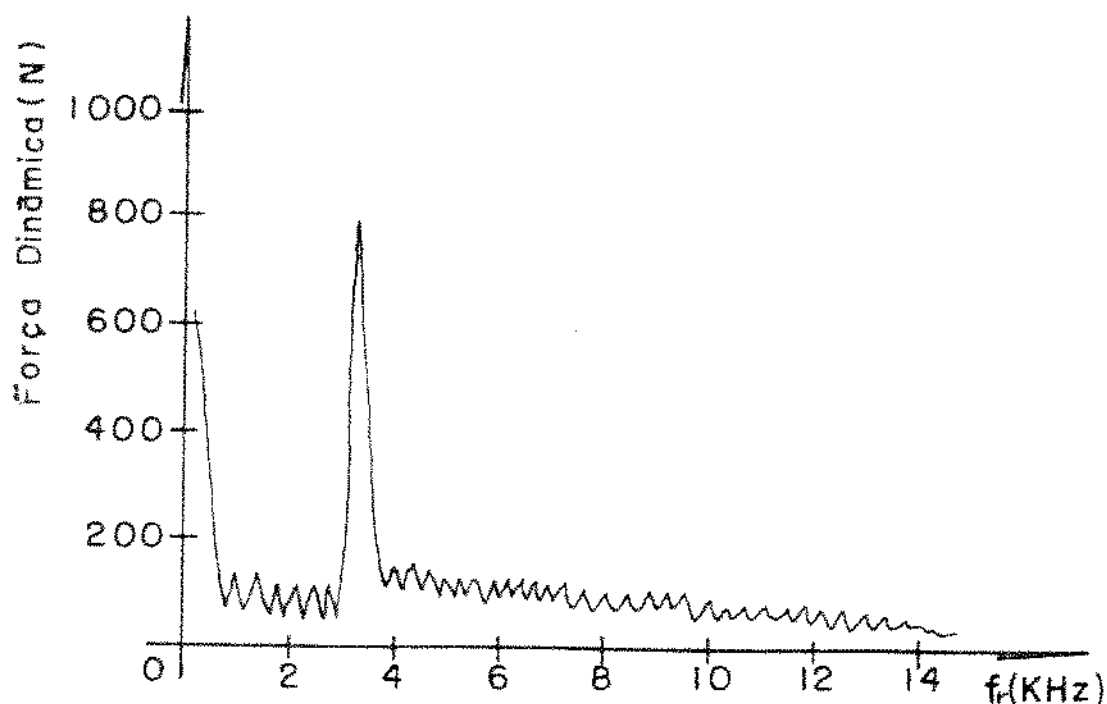


FIG 2.10- Espectro de Frequência para a Força de Corte Dinâmica. [14]

II-2-3 MODELOS

Os modelos em monitoramento são de grande importância para relacionar os diversos parâmetros de corte, a fim de que um determinado sinal sensoreado possa ser controlado em função de decisões pré-estabelecidas.

Os modelos podem ser teóricos ou empíricos, utilizando-se de equacionamento matemático para relacionar os parâmetros de corte constantes ou variáveis. Os modelos representam as leis que regem o processo em estudo, podendo ser uma função das variáveis do processo ou um sistema de equações que correlacionam tais variáveis.

Os modelos muitas vezes não representam o processo real de usinagem, pois não relacionam as propriedades menos fundamentais e os indicadores não dominantes. Consistem em um estudo analítico-experimental, envolvendo a teoria e a prática durante a operação de usinagem.

Para um modelamento matemático, deve-se atentar para a seguinte metodologia:

- a) definir com precisão as variáveis que intervêm no processo.
- b) formular adequadamente as relações matemáticas dos vínculos e restrições do sistema.
- c) propor uma função objetivo chamada de critério de otimização.

A programação pode ter uma relação linear ou não linear com a variável de controle do processo.

Os modelamentos existentes envolvem cálculo diferencial, método dos multiplicadores indeterminados de Lagrange, programação linear, geométrica e dinâmica, cálculo variacional e método do princípio ótimo.

Como exemplo de modelamentos matemáticos que relacionam os parâmetros de corte na usinagem, podemos citar: [20,21,22]

a) Equação de vida da ferramenta (T)

$$T = \frac{K1}{f^Y \cdot ap^Z \cdot Vc^X}$$

Duque [22] também encontrou um modelo para a vida da ferramenta levando em consideração um critério de fim de vida equivalente a 0.2 (mm) de desgaste frontal, ou seja:

$$T = \frac{1,9 \cdot 10^8}{f^{0.45} \cdot ap^{0.77} \cdot Vc^{3.1}}$$

b) Rugosidade Superficial da peça (Ra) [20,3]

$$Ra = K2 \frac{f^r \cdot ap^s}{Vc^t}$$

Duque [22] relatou o experimento de Taraman e Lambert, os quais determinaram tais constantes para o aço SAE 1018, e ferramenta de

metal duro sem revestimento em 1974 e encontraram o seguinte modelo matemático:

$$Ra = 872,467 \frac{f^{1.258} a_p^{0.185}}{V_c^{0.366}}$$

Um outro modelo, que relaciona o raio de ponta da ferramenta (r), a dureza do material (HB) e o ângulo de posição da aresta principal de corte da ferramenta (α), foi apresentado por Bhattacharyya, Gonzales e Han, citado em Duque [22] em 1973 e é dado por:

$$Ra = 3,14 \cdot 10^8 \frac{f^{1.004}}{V_c^{1.52} HB^{0.323} (90-\alpha)^{0.35} r^{0.714}}$$

Duque [22], em 1989, desenvolveu um modelo para a rugosidade superficial do aço ABNT 1045 usando ferramenta de metal duro tipo KNUX - 12 , onde:

$$Ra = 205,51 \cdot \frac{f^{1.19}}{V_c^{0.44} a_p^{0.185}}$$

c) Força de Corte [P_c]

$$P_c = K_3 \cdot f \cdot a_p$$

Kienzle desenvolveu um modelo simplificado para a força de corte , sendo: [1]

$$P_c = K_{s1} \frac{a_p}{\sin(\alpha)} \cdot (f \cdot \sin(\alpha))^{1-z}$$

onde K_{s1} (pressão específica de corte do material) e $(1-z)$ são constantes do material e α é o ângulo de posição efetivo.

Com o monitoramento do processo em tempo real, pode-se atualizar os coeficientes dos modelos para o sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça utilizado e usar tais coeficientes para otimização do processo via controle adaptativo.

-ESTRATÉGIA

A partir das informações obtidas com o monitoramento pode-se tomar diferentes ações quando se detectar alguma incorreção no processo, tais como: parada automática da máquina ou acionamento de algum tipo de alarme, a fim de que o operador tome alguma providência, modificação automática das condições de usinagem etc.

CAPÍTULO III

AVARIAS E DESGASTES DA FERRAMENTA

ESFORÇOS DE CORTE E RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA

CRITÉRIO DE FIM DE VIDA PARA A FERRAMENTA

III-1 - AVARIAS E DESGASTES DA FERRAMENTA

Consideram-se como avarias em ferramentas de corte as quebras, trincas, sulcos distribuídos em forma de pente e deformações plásticas, que ocorrem na aresta cortante durante o processo de usinagem. A quebra da ferramenta normalmente ocorre pela atuação de elevada força de usinagem na aresta da mesma. As ferramentas com pequenos ângulos de ponta ou cunha, os materiais frágeis, as operações com corte interrompido e a paralisação sem a prévia retirada da ferramenta de corte são as principais causas de quebra da ferramenta de corte. As trincas ocorrem principalmente em pastilhas de metal duro pouco tenazes e são causadas por variações bruscas de temperatura. [23,24] Além disso, trincas e/ou quebras acontecerão quando os desgastes atingirem valores elevados, principalmente em ferramentas de metal duro e cerâmica.

As causas principais dos desgastes da ferramenta são: o cisalhamento da aresta postiça de corte, a abrasão mecânica, a difusão e a ação química e eletrolítica (oxidação). Uma ou mais dessas causas podem prevalecer no processo de desgaste da ferramenta, dependendo sobretudo das condições de corte.

A aresta postiça de corte se forma devido ao atrito entre as superfícies de contato do cavaco e a superfície de saída da ferramenta. Neste ponto, em baixas velocidades de corte, acontecerá a solda entre as partes com posterior deposição de partículas do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta.

A presença da aresta postiça na região do corte causa modificações no comportamento da força de usinagem, no acabamento superficial da peça e no próprio desgaste da ferramenta de corte. O aparecimento da aresta postiça de corte está relacionada com a temperatura de corte e conseqüentemente com a velocidade de corte. Nota-se uma decomposição da aresta postiça de corte quando é atingida a temperatura de recristalização do material da peça. Os atritos entre superfície de saída-cavaco e superfície de folga - peça causam o desgaste da ferramenta por abrasão. Esse tipo de desgaste é predominante em elevadas velocidades de corte e é incentivado pela presença de partículas duras no material

da peça.

A difusão e a ação química e eletrolítica são ativadas pelo aumento da temperatura na região do corte. A difusão somente acontece quando existe algum tipo de afinidade entre os materiais da peça e da ferramenta, como é o caso da usinagem de metais ferrosos com ferramentas de diamante. A oxidação algumas vezes é incentivada pelo fluido de corte, principalmente quando este contém água.

A separação quantitativa dos componentes do desgaste é praticamente impossível de se realizar; qualitativamente, porém, pode-se concluir que o desgaste da ferramenta é influenciado principalmente pelo cisalhamento da aresta postiça de corte em baixas velocidades de corte; no contrário, em velocidades maiores de corte, o desgaste é influenciado por fatores cuja intensidade depende principalmente da temperatura de corte, tais como abrasão mecânica, difusão e oxidação. [23]

III-2- DESGASTE E VIDA DAS FERRAMENTAS

Vida da ferramenta é o tempo durante o qual a mesma trabalha efetivamente entre duas afiações sucessivas (deduzido os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido [21,23], como o acabamento superficial e/ou tolerância dimensional da peça, força de usinagem, potência máxima de usinagem, nível de desgaste da ferramenta, temperatura do gume de corte etc.

O desgaste ocorrido na superfície de folga da ferramenta é denominado de desgaste frontal (VB) e, quando ocorrido na superfície de saída da ferramenta, é denominado de desgaste de cratera (Kt). A figura 3.1 ilustra os tipos mais comuns de desgaste em ferramentas.

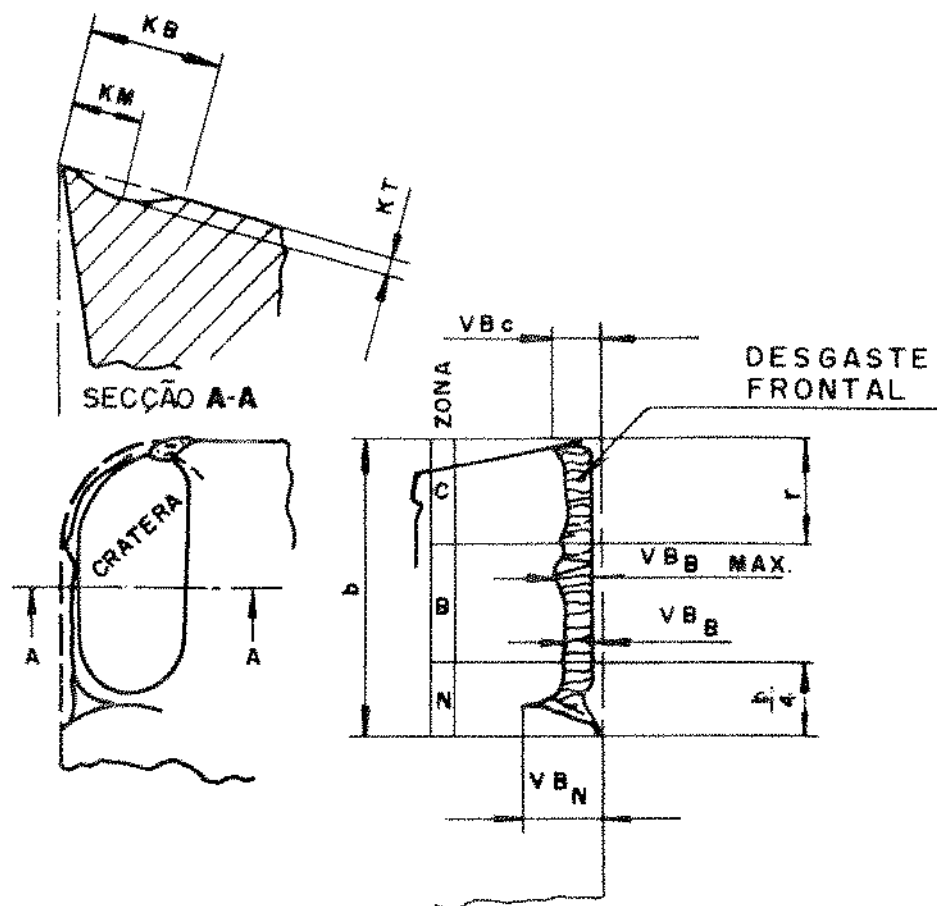


Fig 3.1- Alguns Tipos de Desgaste em Ferramentas de Torneamento. [24,26]

Os critérios utilizados para o estabelecimento do momento de troca da ferramenta são vários. Assim pode-se considerar o fim da vida da ferramenta quando: [21,23]

- a) o desgaste da superfície de saída da ferramenta atingir proporções tão elevadas que se receie uma quebra da mesma e conseqüente dano para com a peça, o suporte da mesma ou mesmo a máquina;
- b) os desgastes chegarem a valores tais que a temperatura do aresta cortante se aproxime da temperatura na qual a ferramenta perde o fio de corte.

c) devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta, não se consegue mais a manutenção das tolerâncias e ou rugosidade superficial exigidas pelo projeto da peça, principalmente em operações de acabamento.

d) o aumento da força de usinagem proveniente dos desgastes elevados da ferramenta interferir no funcionamento da máquina.

Os diferentes tipos de materiais para ferramentas apresentam diferentes comportamentos quando em processo de corte e deve-se atentar para o critério de fim de vida de tais ferramentas.

No caso de ferramentas de metal duro, o desgaste é progressivo até que ocorra a quebra da aresta de corte. Em ferramentas de aço rápido ocorre a destruição da aresta de corte, pela redução da dureza a quente, antes que se perceba um desgaste significativo. Em ferramentas de material cerâmico, normalmente ocorre a quebra de pequenos fragmentos da aresta cortante antes da percepção do desgaste. Isso se deve à fragilidade de tal material a variações térmicas e vibrações.

Na usinagem com ferramenta de metal duro, o desgaste frontal é geralmente maior que o desgaste de cratera. Por essa razão, os valores desse desgaste tem-se tornado muito importante para a determinação do fim da vida da ferramenta. Na usinagem de muitos materiais, a quebra da aresta de corte se caracteriza com valores do desgaste frontal entre 0.85 a 1,50 (mm). O desgaste frontal é influenciado principalmente pela velocidade de corte, depois pelo avanço e por último pela profundidade de corte.

A norma ISO 3685 [26] padroniza os valores do máximo desgaste frontal em aproximadamente 0.3 (mm) para o caso do desgaste uniforme na superfície de folga da ferramenta, e de aproximadamente 0.6 (mm), caso o desgaste não apresente um comportamento uniforme na superfície de folga da ferramenta. Para valores do desgaste inferiores a 0.3 (mm), ocorreria uma dispersão muito grande dos resultados, devido à maior influência da taxa inicial do desgaste. Para valores do desgaste superiores a 0.6 (mm), os ensaios se tornariam mais dispendiosos, podendo não se alcançar o fim da vida da ferramenta. [6, 26]

Caso exista desgaste de cratera, esta norma recomenda que o valor de K_t para o fim da vida da ferramenta seja igual a:

$$K_t = 0.06 + 0.3 * f, \text{ onde } f \text{ é o avanço da ferramenta (mm/rot).}$$

O desgaste de cratera se torna mais significativo do que o desgaste frontal, quanto maior for a velocidade de corte. Dessa forma, podem-se utilizar os dois critérios de fim de vida da ferramenta conforme ilustra a figura 3.2, onde a região que delimita a vida da ferramenta se encontra abaixo das curvas de K_t e VB. A relação linear entre $\log(T)$ e $\log(V_c)$ foi verificada para valores de profundidade de corte (a_p) entre 2 e 4 (mm) e velocidades de corte que correspondem à vida da ferramenta entre 10 e 50 (min).

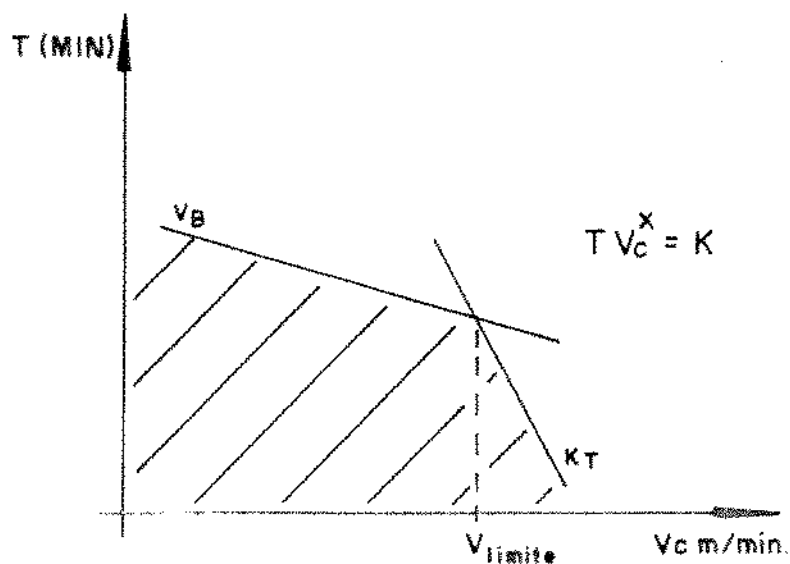


Fig 3.2- Representação da Curva de Vida Utilizando Dois Critérios Diferentes para o Fim da Vida da Ferramenta. [24]

III-3- FORÇAS DE USINAGEM EM OPERAÇÃO DE TORNEAMENTO

A figura 3.3 mostra um esquema dos diversos componentes da força resultante de usinagem (P_u). A decomposição de P_u é feita de tal maneira que se possa ter componentes segundo a direção de corte (força de corte P_c), de avanço (força de avanço P_a) e perpendicular ao plano de trabalho (força de profundidade P_p).

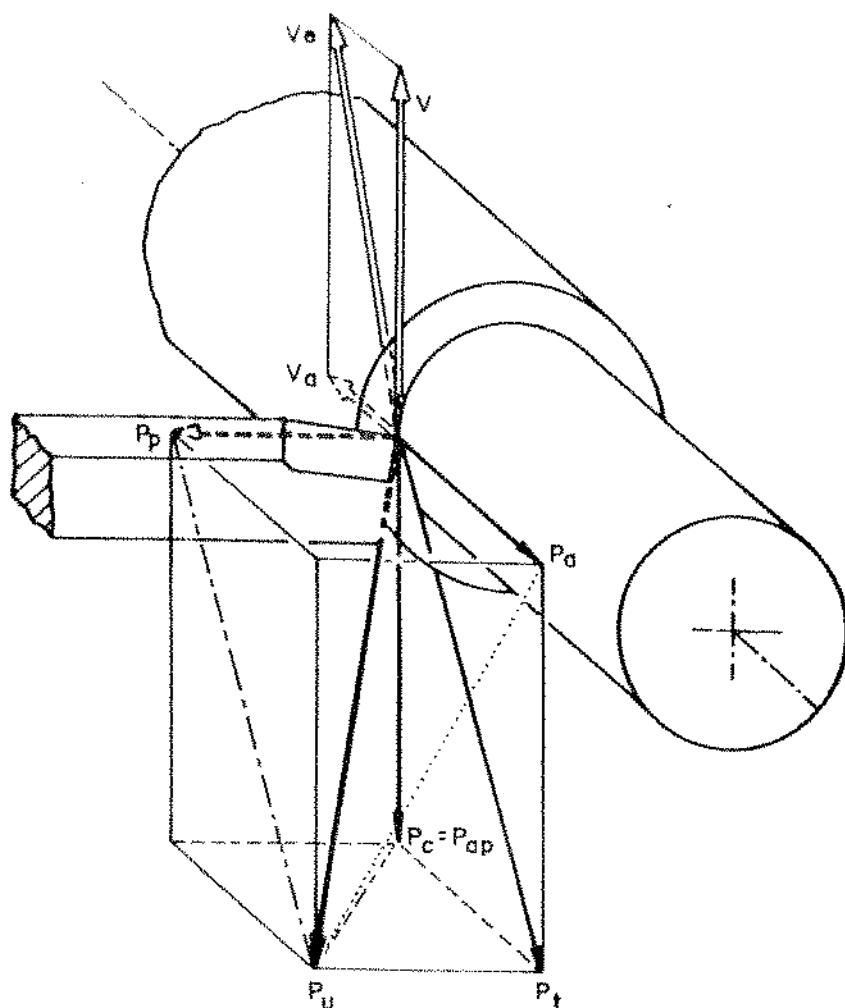


Fig 3.3- Forças de Usinagem no Torneamento [20,21]

A força de usinagem (P_u) depende de uma série de fatores como: material da peça e ferramenta, seção de corte, geometria da ferramenta, estado de afiação da ferramenta, dentre outros .

Vários pesquisadores, como Kronenberg, Ferraresi, Kienzle, entre outros, desenvolveram modelos matemáticos, objetivando quantificar a força principal de corte. Dentre todos os modelos, o mais utilizado é o desenvolvido por Kienzle e por isso será objeto de estudo neste trabalho, onde

$$P_c = K_s \cdot S = K_{s1} (a_p / \sin(\kappa)) \cdot (f \sin(\kappa))^{(1-z)}$$

Os valores de K_{s1} e z foram obtidos com ângulo de saída da ferramenta $\gamma=6^\circ$. Kienzle recomenda que, para ferramentas com ângulo de saída diferente de $\gamma=6^\circ$, deve-se acrescentar 1,5% na força (P_c) para cada redução de 1° no referido ângulo de saída, e reduzir 1,5% nesta força para cada acréscimo de 1° no ângulo de saída da ferramenta. Em resumo teremos:

†

$$P_c = [1 + (\phi - \gamma) \cdot 0,015] \cdot [K_{s1} \cdot (a_p / \sin(\alpha)) \cdot (f \cdot \sin(\alpha))^{(1-z)}]$$

A força de corte (P_c) aumenta com o desgaste frontal devido ao maior atrito entre a ferramenta e a peça, e diminui com o desgaste de cratera devido ao aumento do ângulo de saída efetivo da ferramenta.

A figura 3.4 exemplifica o crescimento das forças de usinagem P_c/a_p , P_a e P_p , do desgaste frontal (VB) e do desgaste de cratera (K_t) em função do tempo de usinagem [20]. Nota-se que o desgaste frontal (VB) é da ordem de milímetros e, portanto, maior que o desgaste de cratera (K_t), que é da ordem de microns. Assim sendo, os esforços de corte têm, inicialmente, um crescimento acentuado devido ao rápido crescimento do desgaste frontal, reduz sua taxa de crescimento quando o desgaste de cratera atinge um valor pouco maior e volta a crescer rapidamente com o aparecimento de possíveis avarias na ferramenta e ou crescimento acentuado do desgaste frontal, como pode ser comprovado na fase experimental deste trabalho.

A potência mecânica útil (W) consumida no corte é dada pela soma das potências de corte (W_c) e de avanço (W_f). Como a velocidade de corte é muito maior que a velocidade de avanço da ferramenta e a força de avanço é menor que a força de corte em operação de torneamento, podemos considerar a potência mecânica útil consumida no corte como sendo igual à potência de corte, ou seja:

$$W_c = P_c \cdot V_c = K_s \cdot f \cdot a_p \cdot V_c$$

No caso do monitoramento da usinagem via parâmetros elétricos do motor podemos notar que para K_s , f e V_c constantes a potência de corte W_c se comporta como uma função diretamente proporcional à profundidade de corte a_p . Assim sendo, teremos que a potência elétrica consumida $W_e = R I_{arm}^2$ é proporcional à profundidade de corte (a_p). Como a resistência de armadura varia muito pouco, poderemos afirmar que I_{arm}^2 é diretamente proporcional à profundidade de corte (a_p), o que pode ser verificado na figura 4.6 como resultado experimental deste trabalho.

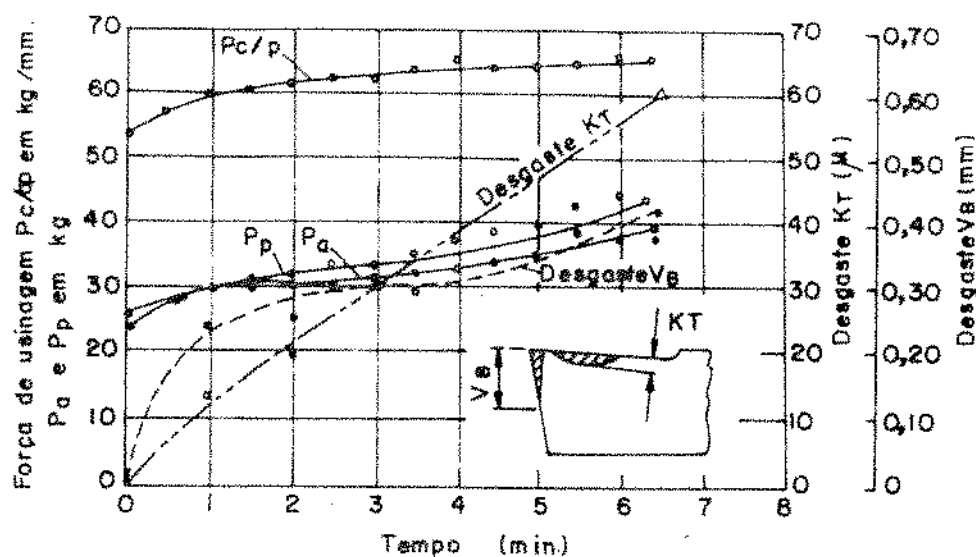


Fig 3.4-Variação das Forças de Usinagem e dos Desgastes Frontal e de Cratera em Função do Tempo de Corte, em Operação de Torneamento [1]

III-4- RUGOSIDADE SUPERFICIAL DA PEÇA

Rugosidade superficial é definida como diferenças micro-geométricas, como ranhuras ou sulcos (provenientes do avanço da ferramenta), estrias ou escamas (devido à formação do cavaco), e deformações estruturais (cristalização e modificações na estrutura do material).

As grandezas normalizadas pela ABNT para a medição da rugosidade superficial das peças são relativas ao sistema métrico e são referenciadas pela linha média do perfil de rugosidade.

O desvio médio aritmético (R_a) corresponde à média dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação a esta linha média em um comprimento pré-fixado de amostragem, como mostra a figura 3.5 [21], ou seja:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Y| dx, \text{ ou aproximadamente}$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y|, \text{ onde } n \text{ é o número de ordenadas consideradas.}$$

A altura máxima das irregularidades (R_{max}) corresponde à dimensão entre as máximas saliências e reentrâncias ocorridas em um comprimento pré-fixado de amostragem, como pode ser visto na figura 3.5 [21].

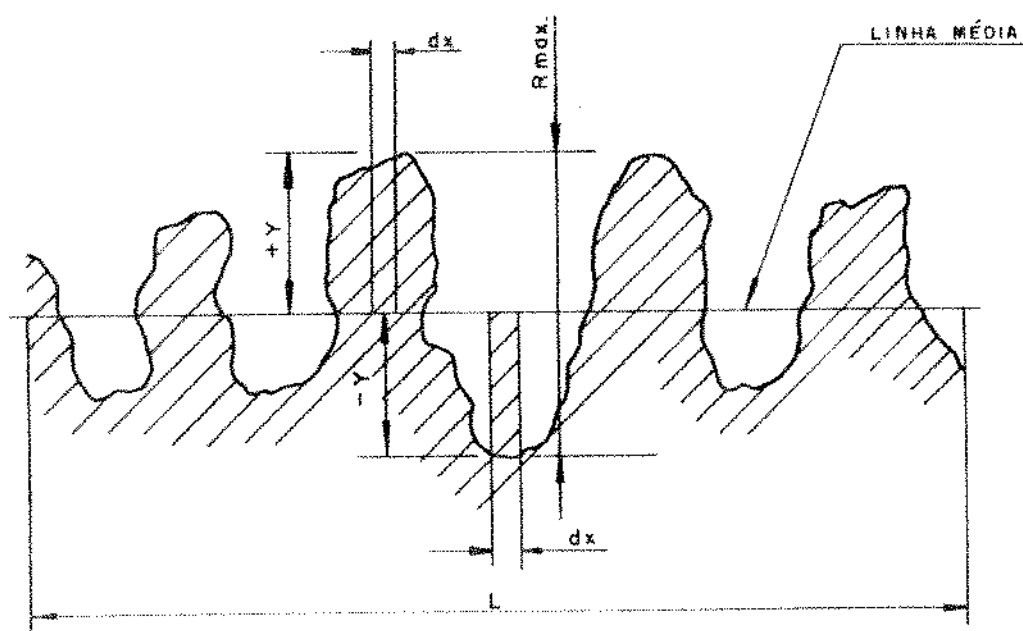


Fig 3.5- Esquema da Rugosidade Para um Comprimento Amostrado.

Os valores das grandezas normalizadas para medida da rugosidade para os diversos processos de fabricação podem ser vistos na tabela 3.1 [4].

Segundo Diniz A.E., [21] a altura máxima das irregularidades (R_{max}) apresenta menores dispersões quando comparada com o desvio médio aritmético (R_a) em operação de torneamento. Por esta razão é mais confiável fixar um valor de R_{max} , como critério de fim de vida da ferramenta, quando comparado com o valor de R_a .

Normalmente, em operação de torneamento em acabamento, os desgastes da ferramenta não chegam a níveis em que se receia a quebra do gume cortante da ferramenta e nem causam a elevação acentuada das forças de usinagem [21]. Por esta razão, o fim da vida da ferramenta neste tipo de operação é alcançado quando não mais se conseguem as tolerâncias e/ou rugosidade superficial desejadas na peça. Quando o desgaste da ferramenta começa a fazer com que as dimensões da peça saiam da faixa de tolerância exigida, existe ainda a possibilidade da correção da posição da ferramenta para que a peça retorne às dimensões desejadas. Assim, o acabamento superficial da peça usinada é um critério adequado para a substituição da ferramenta neste tipo de operação. A dificuldade de utilização desse critério reside no fato de se estabelecer, ao lado da máquina na fábrica, o momento em que a peça chegou ao nível de rugosidade permitido.

Diniz [21] mostrou que a comparação da rugosidade da peça com a rugosidade de uma peça padrão realizada pelo operador, através do tato, tem uma confiabilidade muito baixa. Mostrou também que a determinação prévia do número de peças usinadas até se atingir a rugosidade limite é um processo que apresenta boa confiabilidade em alguns casos e baixa confiabilidade em outros, dependendo principalmente da velocidade de corte utilizada. O presente trabalho busca correlacionar o crescimento da rugosidade superficial da peça com o crescimento da corrente de acionamento do motor principal e do servo motor de avanço da ferramenta, a fim de estabelecer o momento de troca da ferramenta através do monitoramento dos parâmetros elétricos dos motores da máquina - ferramenta.

Ra (inches)	2000	1000	500	250	125	63	32	16	8	4	2	1	0,5
Ra (mm)	51	25,4	12,7	6	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,013
Rq (inches)	2112	1056	528	265	134	66,2	35,5	16,8	8,4	4,1	2,06	1,0	0,52
Rq (mm)	53,5	26,8	13,4	6,7	3,4	1,68	0,88	0,42	0,21	0,105	0,053	0,026	0,013
Rmax (inches)	-	-	-	5,90	4,08	2,09	1,03	50	24	12	5,9	2,9	1,5
Rmax (mm)	-	-	-	15	10,3	5,60	2,70	1,25	0,60	0,30	0,15	0,07	0,04
CORTE POR CHAMFA													
MOLDAGEM EM AREIA													
LAMINAÇÃO A QUENTE													
FORJAMENTO													
PLAINAMENTO													
RASQUETE													
CORTE DE SERRA													
FURACÃO													
USINAGEM GUMICA													
CORROSÃO ELETROLÍTICA													
FRESAMENTO													
TORNEAMENTO / MANDRILAMENTO													
BROCHAMENTO													
ALARGAMENTO													
MOLDAGEM EM COQUILHA													
MOLDAGEM DE PRECISÃO EXTRUSÃO													
LAMINAÇÃO A FRIO - ESTIR													
MOLDAGEM SOB PRESSÃO													
RETIFICA													
ESPELHAMENTO													
POLIMENTO ELETROLÍTICO													
ROLAGEM													
POLIMENTO													
LAPIDACÃO													
SUPER ACABAMENTO													



APLICAÇÃO MENOS COMUM



CAMPO USUAL DE APLICAÇÃO

Tabela 3.1- Padrões de Rugosidade para Vários Processos de Usinagem. [4]

CAPÍTULO IV

MÉTODOS EXPERIMENTAIS

IV-1- SISTEMAS DE MONITORAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM

Os sinais elétricos de corrente e tensão provenientes da armadura do motor de corrente contínua que aciona o eixo-árvore da máquina e do servo motor de avanço da ferramenta são sinais analógicos. Esses sinais foram convertidos em sinais digitais, tornando possível o uso de um microcomputador para a aquisição e análise dos dados, com conseqüente ganho de tempo e confiabilidade dos resultados.

O sinal de corrente elétrica foi obtido utilizando-se um sensor de efeito "HALL" com precisão de 0,1 v/A, isto é, cada ampere que passa pelo fio que é circundado pelo sensor causa uma variação de 0,1 v na saída do mesmo. Assim tem-se uma voltagem proporcional à corrente que se quer monitorar, a qual pode ser medida via computador. O esquema desse sensor pode ser visto na figura 4.1, onde se acrescentou um filtro eletrônico permitindo obter o valor médio do sinal dinâmico de corrente fornecida pelos tiristores.

O sinal de tensão da armadura do motor principal pode atingir até 400 v. Tal voltagem é muito alta para entrar na placa que faz a conversão do sinal de analógico para digital. A máxima tensão que esta placa aceita é de 10 v. Assim, o sinal passa por um redutor de tensão fornecido pela empresa Lynx, cuja relação entre os sinais de saída e entrada é de 100 vezes, como mostra a figura 4.2.

O sensor de efeito "HALL" e o redutor de tensão necessitam de ser alimentados por tensões de ± 9 v e ± 15 v respectivamente. O circuito de alimentação pode ser visto no esquema da figura 4.3.

Os sinais elétricos sensoreados foram convertidos de analógicos em digitais em uma frequência de dez pontos por peça durante o processo de corte constante. Os parâmetros elétricos apresentam-se instáveis tanto no início como no fim do passe da ferramenta e se mantêm praticamente constantes quando o corte se encontra em regime de trabalho.

Para cada peça usinada obteve-se um arquivo com dez pontos amostrados de corrente e tensão da armadura do motor principal e também da corrente do servo motor de avanço da ferramenta. A média desses pontos amostrados por peça nos forneceu um valor para tais parâmetros elétricos que pôde ser correlacionado com o respectivo comprimento de

corte, ou número de peças usinadas até o limite de fim da vida da ferramenta. Assim, cada ponto dos gráficos do capítulo 5 é uma média dos 10 pontos amostrados em cada peça. Tais sinais elétricos foram processados em um microcomputador PC-AT - 286, conforme desenho esquemático da figura 4.4.

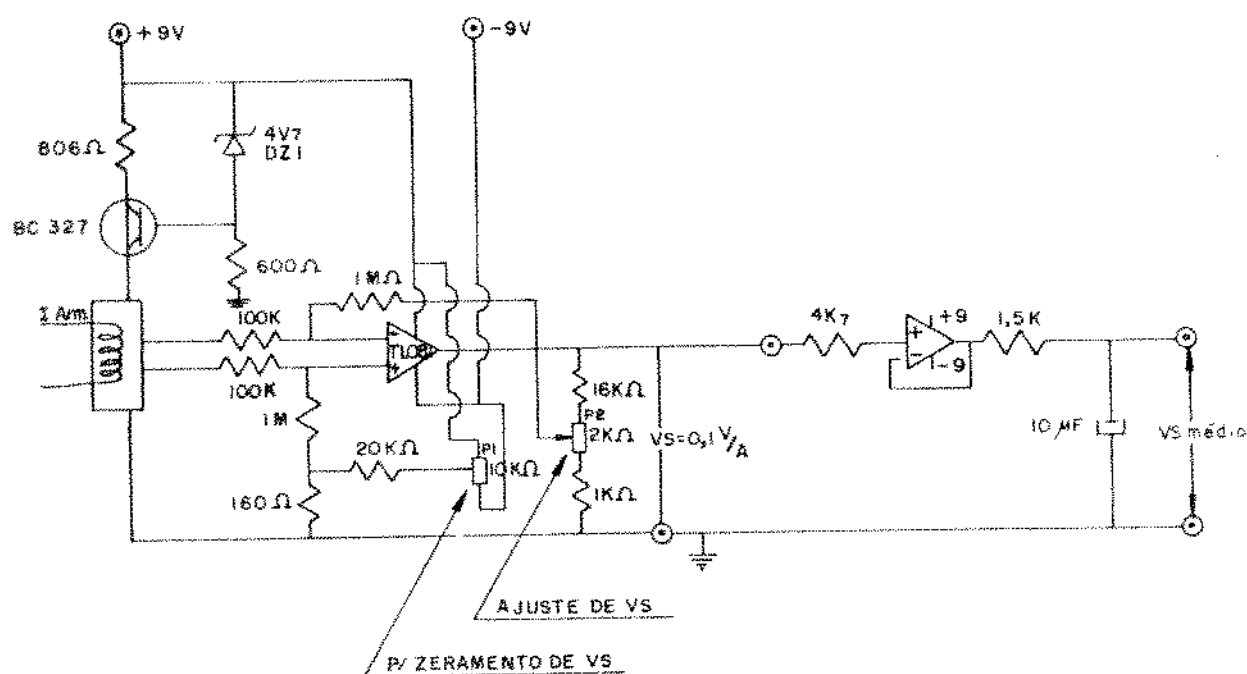


Fig.4.1 - Esquema do Sensor de Efeito "HALL" e Filtro Para o Sinal Médio da Corrente. (Newtronic)

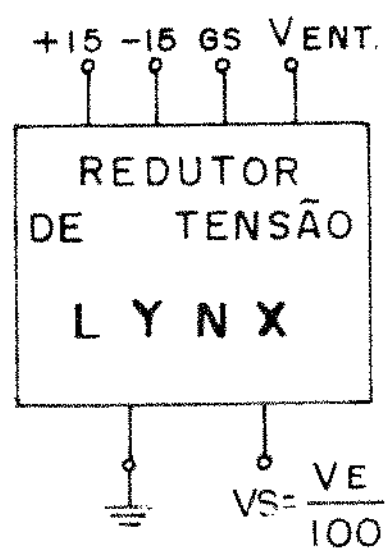


Fig 4.2 - Esquema do Redutor de Tensão. (Lynx)

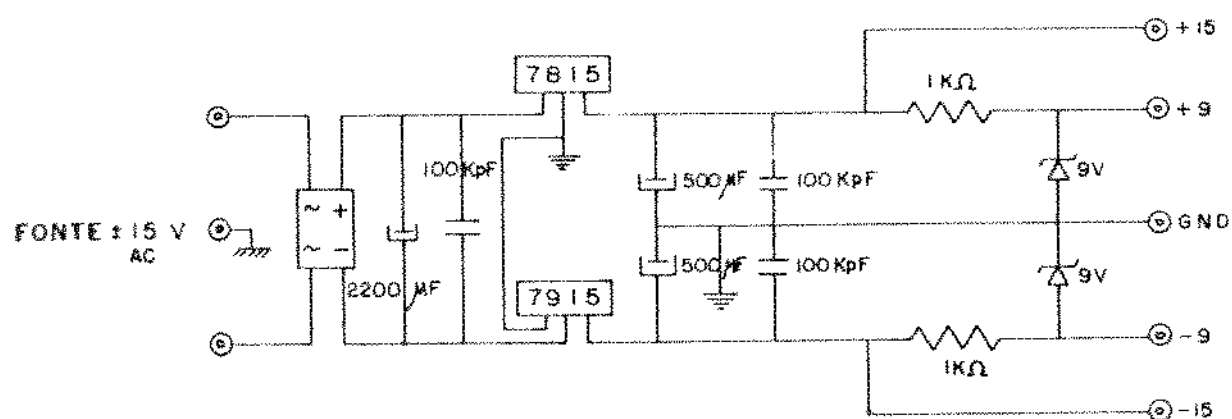


Fig.4.3- Circuito de Alimentação dos Sensores de Corrente e Tensão Elétrica.

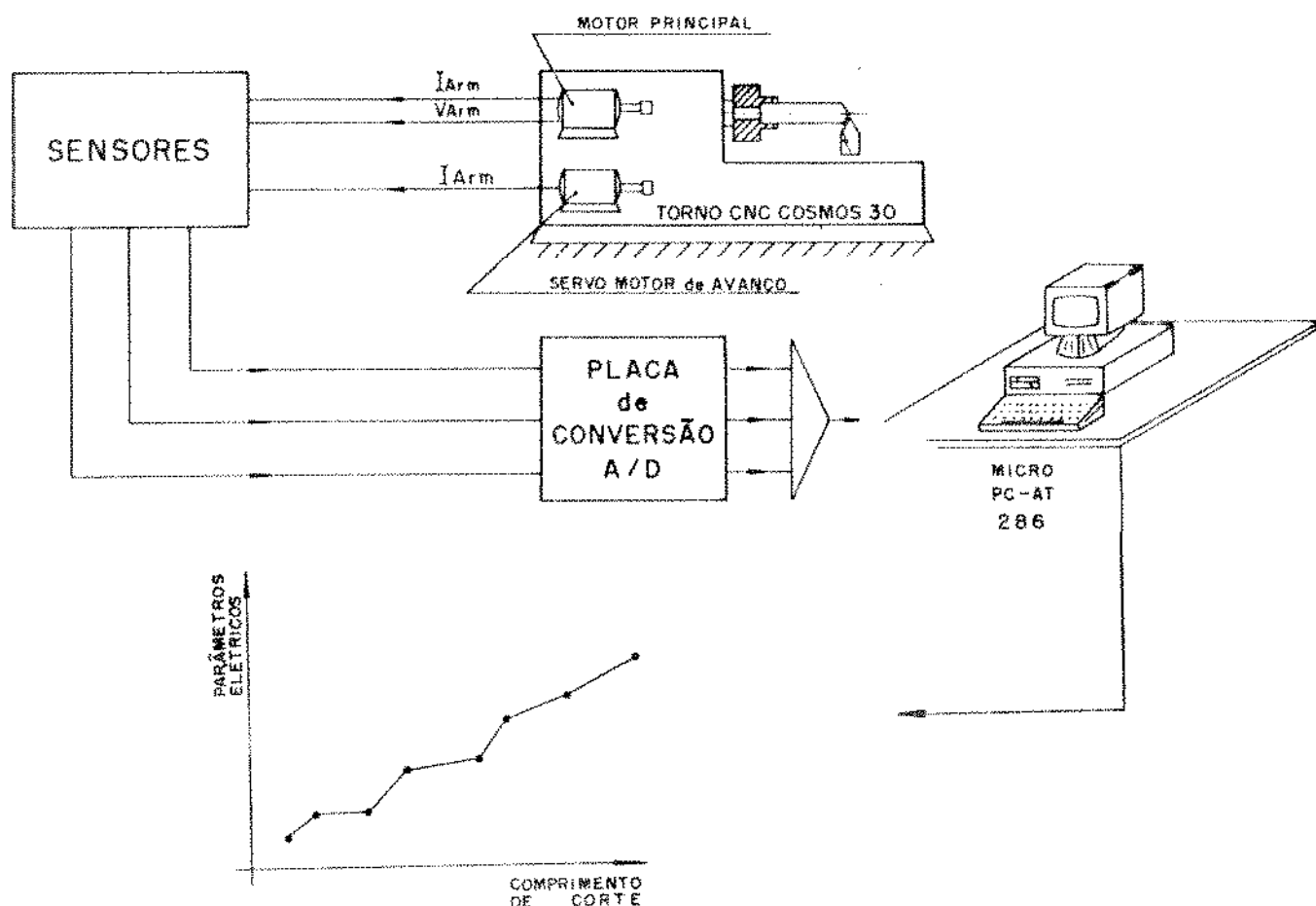


Fig. 4.4- Desenho Esquemático do Sistema para Aquisição dos Dados

IV-2- MÁQUINA, MATERIAL E FERRAMENTAS

Os experimentos foram realizados em um torno CNC de 30 HP de potência com motor principal e servo motores de avanço da ferramenta acionados por corrente contínua.

O material utilizado no ensaio foi o aço laminado ABNT 1045, obtido a partir de uma mesma corrida de fabricação, apresentando a seguinte composição química:

C = 0,47%; Si = 0,26%; Mn = 0,73%; P = 0,022%; S = 0,007%.

Segundo o certificado do fabricante, o mesmo aço apresenta as seguintes propriedades mecânicas:

Limite de escoamento a 0,2%	- 406 N/mm;
Limite de resistência	- 715 N/mm;
Alongamento	- 24%;
Estricção	- 47%.

A forma dos corpos de prova utilizados está mostrada na fig. 4.5

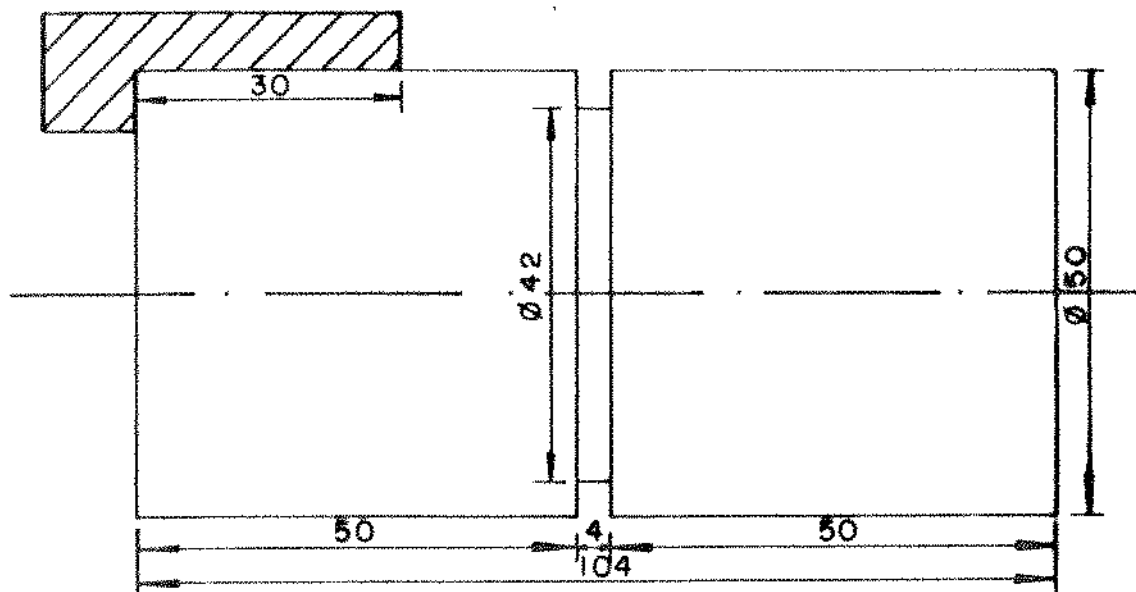


Fig 4.5- Corpo de Prova utilizado nos Ensaiois.

Quanto ao ferramental, foram especificados dois tipos básicos, quais sejam: para operação de desbaste no torneamento foi escolhida a ferramenta ISO TNMM 160404, P10 com suporte ISO PTGNR 2525M16. [27] A ferramenta sem cobertura foi escolhida propositalmente, objetivando acelerar o desgaste e conseqüentemente reduzir a vida da ferramenta. Esse procedimento permitiu reduzir a quantidade de peças usinadas, o custo e o tempo dedicado ao uso dos equipamentos do laboratório.

Para a operação de acabamento no torneamento foi escolhido a ferramenta ISO SNMG 120412, MF-GC425 com suporte ISO PSSNR 2525M12, [27] cuja geometria permitiu a quebra do cavaco e conseqüentemente contribuiu para o acabamento superficial da peça.

IV-3- CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO MOTOR PARA CONTROLE DA ROTAÇÃO DO EIXO ÁRVORE DA MÁQUINA

O motor elétrico de corrente contínua que aciona o eixo- árvore da máquina possui excitação independente de campo e de armadura. O controle da velocidade de rotação do seu eixo é feito pela variação linear da tensão da armadura, mantendo a corrente de campo em seu valor nominal, até que se atinja uma rotação limite chamada de rotação base. Nessa faixa de rotação, o motor fornece torque de eixo constante e potência

linearmente proporcional à rotação da máquina. (fig 4.6)

Para rotações acima da rotação-base, o controle da rotação é feito pela variação da corrente de campo, mantendo constante a tensão nominal da armadura e, conseqüentemente a potência elétrica até o limite máximo de rotação do mesmo. (fig 4.6)

Nesta pesquisa procurou-se manter a rotação de trabalho acima da rotação base, para que a variação da rotação fosse feita pela corrente de campo, que não foi correlacionada com os desgastes da ferramenta. Nestas condições os parâmetros elétricos provenientes da armadura do motor se mantêm praticamente constantes com a rotação e suas variações dependem apenas da variação de carga do eixo-árvore da máquina.

A figura 4.6 mostra o valor aproximado da rotação base igual a 1055 (rpm) no eixo-árvore da máquina. Essa curva foi levantada nos experimentos preliminares deste trabalho.

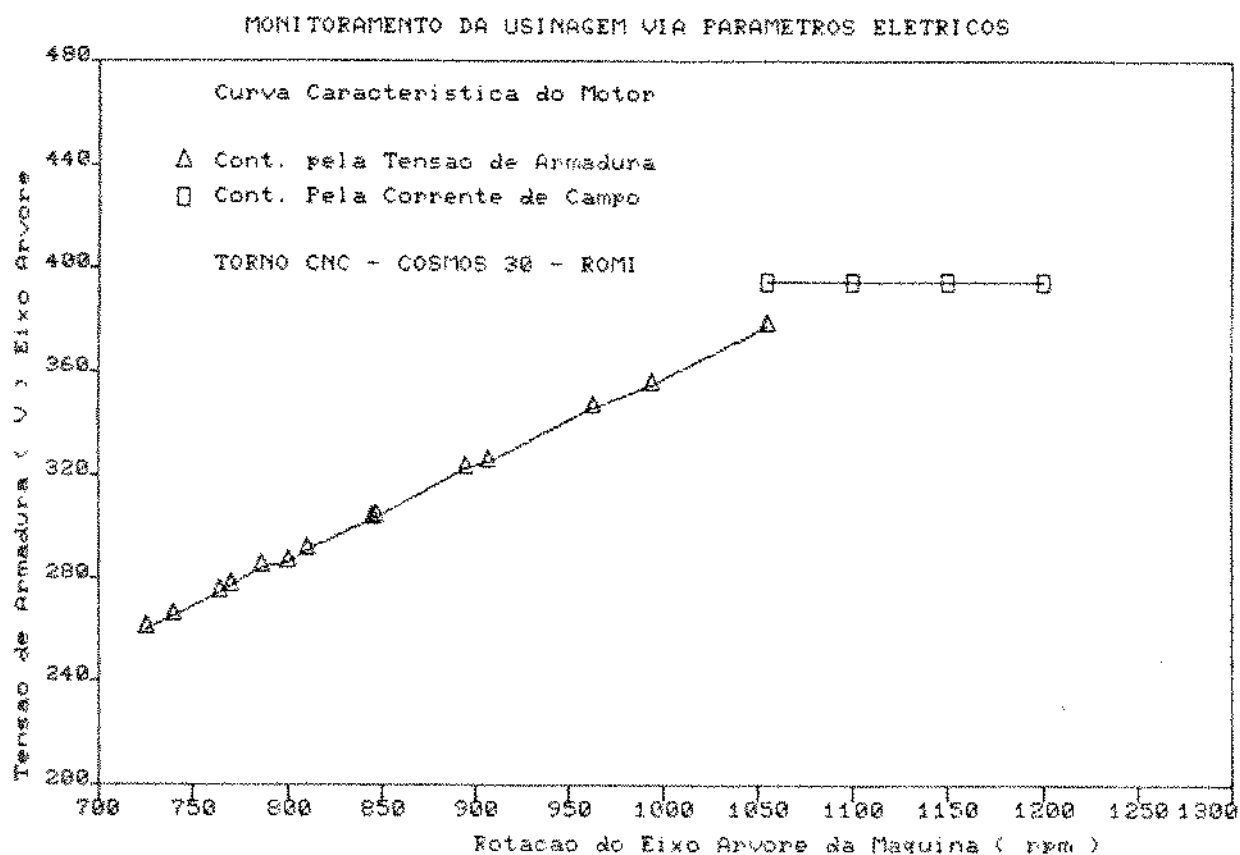


Fig. 4.6 - Variação dos Parâmetros Elétricos do Motor para Controle da Rotação no Eixo-Árvore da Máquina.

IV-4- CALIBRAÇÃO DO SISTEMA PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS

Considerando um processo de torneamento em que a velocidade de corte e o avanço da ferramenta são constantes, a potência elétrica útil consumida pela máquina é praticamente proporcional à profundidade de corte (a_p), ou seja:

$$W_{el.} = R \cdot I_{arm}^2$$

$$W_{mec.} = K_s \cdot f \cdot a_p \cdot V_c$$

$$W_{el.} = W_{mec.} / \eta_{total}$$

$$I_{arm}^2 = ((K_s \cdot f \cdot V_c) / (R \cdot \eta_{total})) \cdot a_p$$

Considerando que a variação de a_p não influencia no valor de K_s [20] e que a resistência elétrica (R) e o rendimento total (η) são constantes, tem-se que:

$$I_{arm}^2 = K \cdot a_p$$

$$\text{onde } K = (K_s \cdot f \cdot V_c) / (R \cdot \eta_{total}).$$

Desenvolveu-se então um procedimento experimental que visou testar a confiabilidade do sistema montado. A figura 4.7 mostra a relação entre o quadrado da corrente útil da armadura quando variamos a profundidade de corte. Para esse ensaio, procurou-se substituir a ferramenta no intervalo de cada passe, evitando assim a influência do desgaste nas superfícies da ferramenta. Pode-se ver que, realmente, I_a^2 mostrou-se diretamente proporcional a a_p , provando que o sistema montado mediu corretamente a corrente de armadura.

MONITORAMENTO DA USINAGEM VIA PARAMETROS ELETRICOS

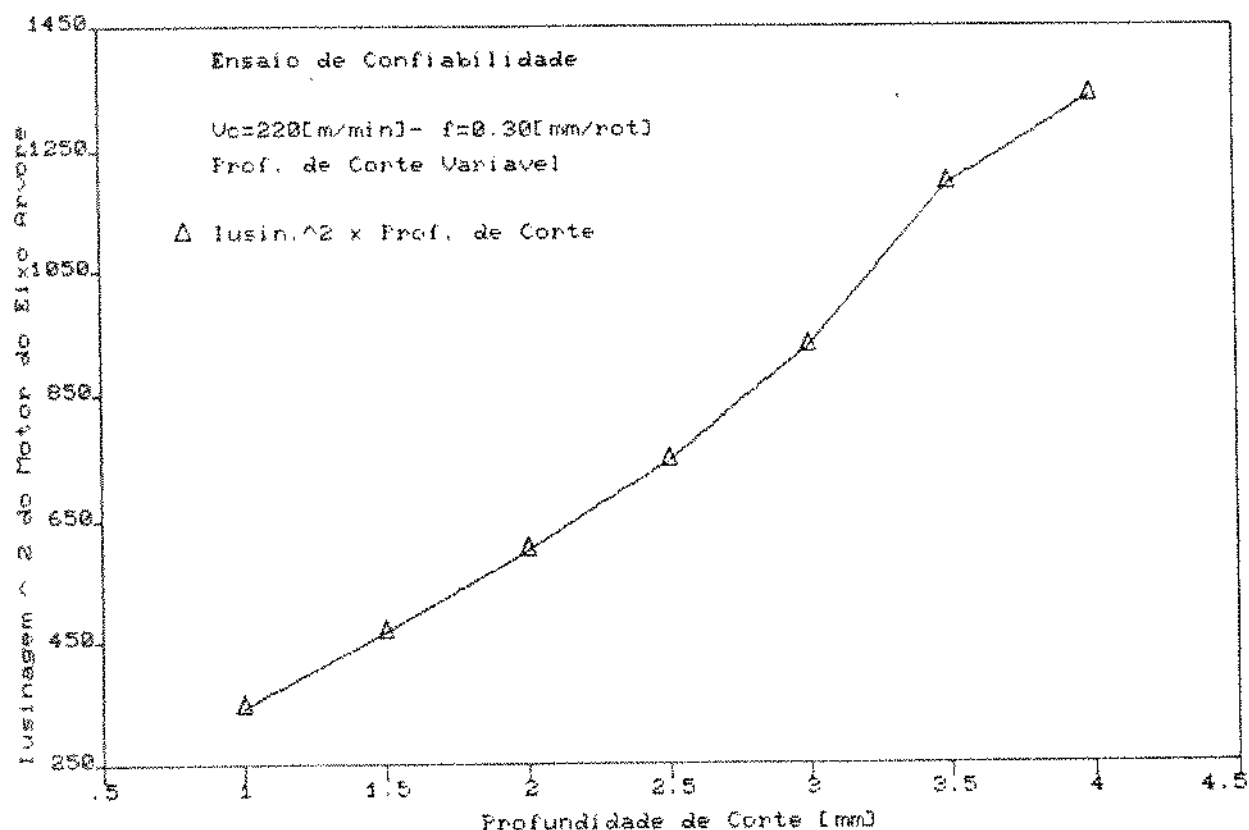


Fig. 4.7- Relação Entre o Quadrado da Corrente Elétrica Útil da Armadura do Motor versus a Profundidade de Corte.

IV-5- OPERAÇÃO DE DESBASTE NO TORNEAMENTO

O experimento foi dividido em três partes, a saber:

a) Avaliação da repetibilidade do ensaio. Nesta fase do experimento procurou-se manter constante a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte e repetiu-se o ensaio três vezes. O objetivo desta fase do trabalho é conhecer a possível tendência da variável independente e verificar se os dados obtidos podem ser confiáveis. Estes ensaios (pontos 5, 6 e 7) foram feitos com $a_p = 2 \text{ mm}$, $V_c = 300 \text{ m/min}$ e $f = 0,25 \text{ mm/volta}$. Os resultados podem ser vistos na fig.5.1.

b) Correlação entre a corrente elétrica do motor e o desgaste da ferramenta, com diferentes avanços da mesma para velocidade de corte e profundidade de corte constantes: a tabela 4.1 mostra as condições de usinagem utilizadas nestes ensaios, bem como seu sequenciamento.

Tabela 4.1- Parâmetros de Corte

Ponto	Velocidade de Corte	Profundidade do Corte	Avanço
1	250	2	0,25
2	250	2	0,20
3	250	2	0,30

Sequenciamento do Experimento

Avanço da
Ferramenta (mm/rot)

0,30

0,25

0,20

2

1

3

Velocidade de Corte. ————— 250 (m/min)

Profundidade de Corte ————— 2 (mm)

Além do monitoramento em tempo real dos parâmetros elétricos, o desgaste frontal da ferramenta era frequentemente medido através de um microscópio Karl Zeiss- Jena-modelo ZKM 01-208C, com amplificação de 40 vezes. O ensaio era interrompido quando o desgaste frontal VB atingia 1,0 (mm).

c) Correlação entre a corrente elétrica do motor e o desgaste da ferramenta, com diferentes velocidades de corte para avanço da ferramenta e profundidade de corte constantes: a tabela 4.2 mostra as condições de usinagem utilizadas nestes ensaios, bem como seu sequenciamento.

Tabela 4.2 - Parâmetros de Corte

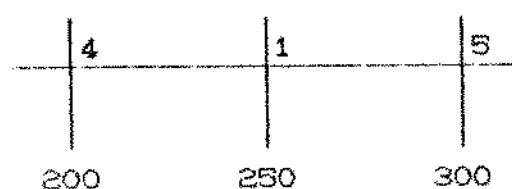
Ponto	Velocidade de Corte	Profundidade de Corte	Avanço
1	250	2	0,25
4	200	2	0,25
5	300	2	0,25

Sequenciamento do Experimento

Avanço da ferramenta — 0,25 (mm/rot)

Profundidade de Corte — 2 (mm)

Velocidade de Corte (m/min) —————



IV-6- OPERAÇÃO DE ACABAMENTO NO TORNEAMENTO

Escolheram-se os parâmetros $f = 0,18$ mm/rot, $V_c = 300$ m/min, e $a_p = 0,7$ mm, e monitorou-se a corrente de armadura do motor de acionamento do eixo árvore da máquina até que a rugosidade superficial da peça atingisse $R_a = 1,4$ μm e/ou $R_{\text{max}} = 11$ μm como critério de fim da vida da ferramenta. A rugosidade superficial das peças foi medida no rugosímetro portátil MITUTOYO Modelo SURF TEST 211.

IV-7- OUTROS ENSAIOS

Em consequência dos resultados obtidos nos ensaios de desbaste e acabamento, outros dois tipos de ensaios foram realizados. No primeiro gerou-se artificialmente um desgaste frontal na ferramenta para que se pudesse analisar a influência somente deste desgaste nos valores de corrente, sem a presença do desgaste de cratera. Este ensaio foi feito com o mesmo tipo de ferramenta usada nos ensaios de desbaste e com as seguintes condições de usinagem: $f = 0,25$ mm/volta, $V_c = 300$ m/min e $a_p = 2$ mm. No segundo ensaio, procurou-se deixar os desgastes da ferramenta evoluírem até que a quebra da mesma ocorresse. Este ensaio foi realizado com $f = 0,30$ mm/volta, $V_c = 300$ m/min e $a_p = 2$ mm.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

V-1- REPETIBILIDADE DO EXPERIMENTO

Antes de se iniciarem os ensaios propriamente ditos, um ensaio foi repetido 3 vezes para se testar a dispersão dos resultados.

Os resultados da replicação nos pontos 5, 6 e 7 podem ser vistos na figura 5.1 abaixo. Pode-se ver que a repetibilidade dos ensaios é boa, não se constatando dispersão maior do que 10% em nenhum dos pontos das três curvas. A partir deste resultado definiu-se que a dispersão poderia ser desprezada (pelo menos para o propósito desta pesquisa) e fez-se somente um ensaio em cada uma das condições de usinagem dos testes seguintes.

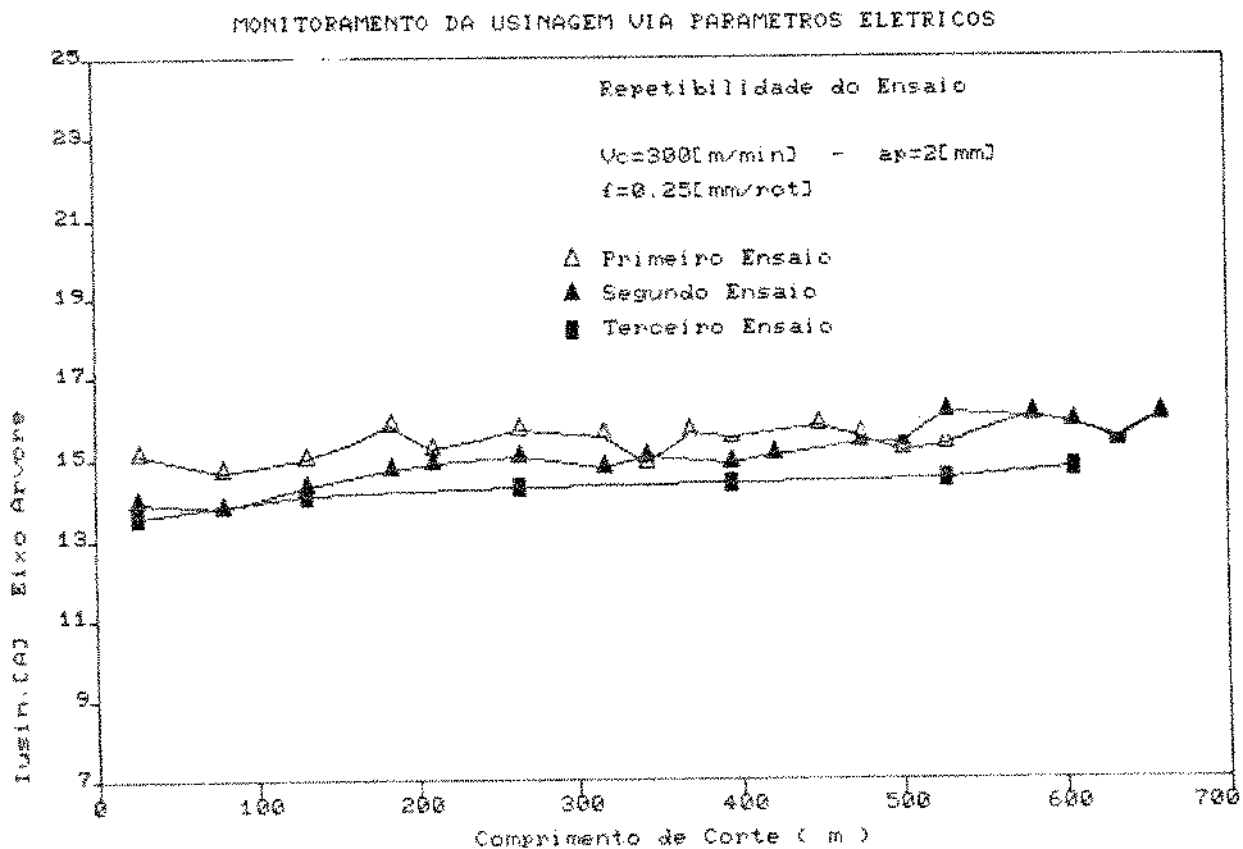


Fig. 5.1- Corrente de Usinagem da Armadura do Motor Principal versus Comprimento de Corte.

V-2- OPERAÇÃO DE DESBASTE NO TORNEAMENTO

As figuras 5.2, 5.3 e 5.4 mostram, respectivamente, as correlações entre o desgaste frontal (VB), a corrente de armadura do motor principal (Iusinagem - Eixo Árvore) e a corrente de armadura do servo motor de avanço (Iusinagem - Avanço da Ferramenta) com o comprimento de corte para três valores de avanços diferentes. A corrente de usinagem (Iusinagem) foi obtida pela diferença entre a corrente total sensoreada na usinagem e o valor da corrente em vazio, nas mesmas condições de rotação da máquina.

O sinal de tensão de armadura do motor principal, apesar de monitorado, não foi utilizado na análise, pois não variou com o comprimento de corte.

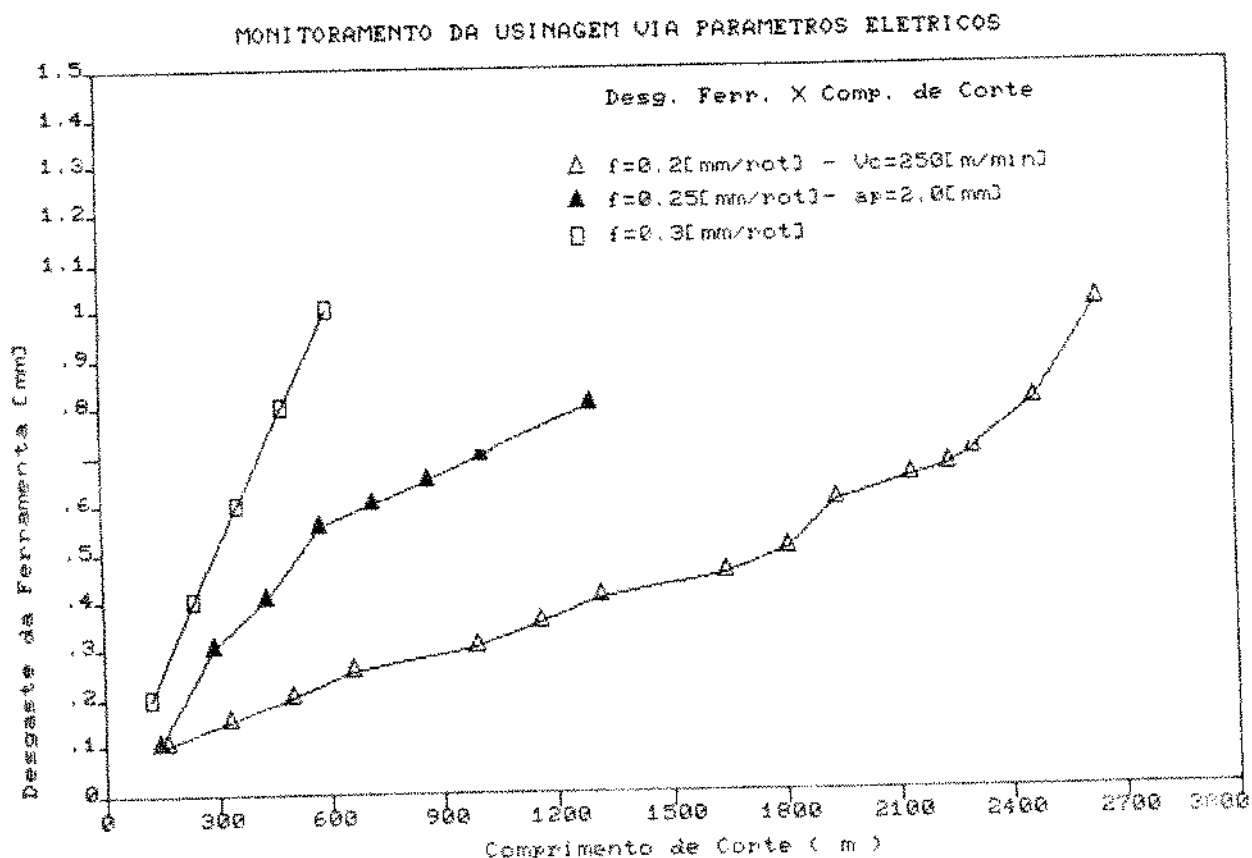


Fig. 5.2- Desgaste Frontal da Ferramenta versus Comprimento de Corte para Três Avanços distintos.

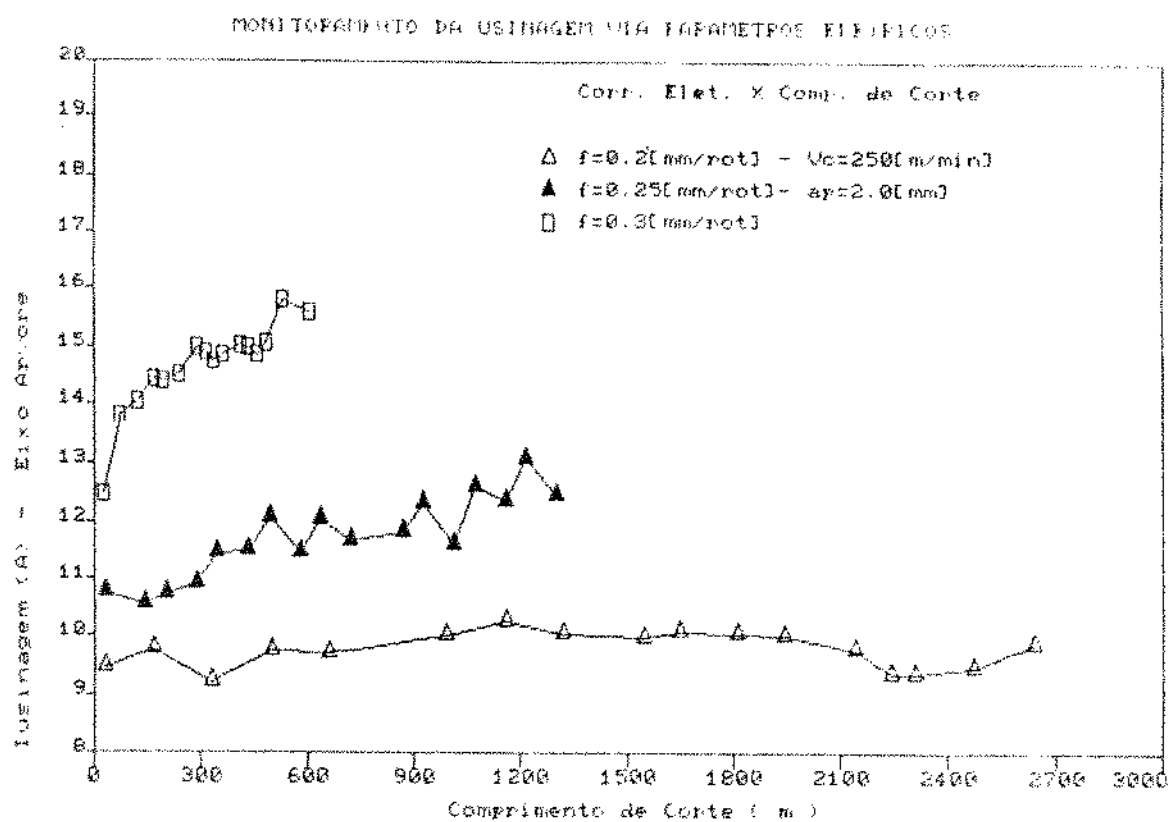


Fig. 5.3- Corrente de Usinagem da Armadura do Motor Principal versus Comprimento de Corte para Três Avanços distintos.

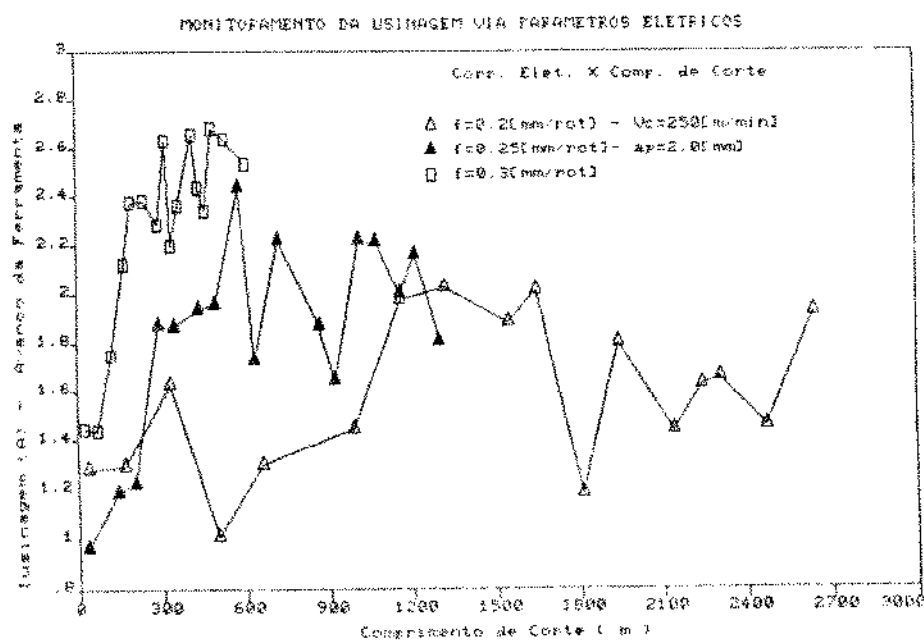


Fig. 5.4- Corrente de Usinagem do Servo-Motor de Avanço versus Comprimento de Corte para Três Avanços distintos.

Como se pode ver na figura 5.4, o sinal de corrente elétrica do servo motor de avanço da ferramenta apresentou variações muito grandes de ponto para ponto, o que impossibilita a tomada de decisão quanto ao momento de troca da ferramenta. Assim sendo, trabalharemos com os sinais elétricos de corrente obtidos na armadura do motor principal que alimenta o eixo árvore da máquina. Este parâmetro elétrico tem sido escolhido como a variável de monitoramento de processos de usinagem por alguns pesquisadores desta área. [2,3,16,17]

Pode-se ver nas figuras 5.2 e 5.3 que, apesar de a corrente de armadura apresentar uma pequena taxa de crescimento com o aumento do comprimento cortado (fig. 5.2), este crescimento foi bem menor que aquele apresentado pelo desgaste frontal (VB). Então partiu-se para a análise mostrada abaixo para se verificar a adequação deste parâmetro para monitoramento do desgaste.

Na figura 5.2 fixaram-se dois desgastes distintos da ferramenta, quais sejam $VB = 0,4 \text{ mm}$ e $VB = 0,8 \text{ mm}$ e obtiveram-se os comprimentos de corte referentes a estes desgastes nas três diferentes condições de avanço da ferramenta. Na figura 5.3, com estes comprimentos de corte, pudemos obter as correntes da armadura do motor principal em função do avanço da ferramenta, o que possibilitou a construção da figura 5.5, onde se percebe que a corrente apresenta maior sensibilidade ao desgaste da ferramenta quanto maior for o avanço da mesma. Assim, vê-se na figura 5.5 que, com $0,2 \text{ mm/volta}$ de avanço da ferramenta a corrente não cresceu quando o desgaste frontal passou de $0,4$ para $0,8 \text{ mm}$, enquanto que com os avanços $0,25$ e $0,30 \text{ mm/volta}$ houve um crescimento de cerca de 1 A na corrente para a mesma variação de desgaste. Estes resultados levam à conclusão de que a corrente de armadura não é um bom parâmetro para monitoramento do desgaste da ferramenta, já que sua variação para um aumento substancial do desgaste foi pequena e poderia ser facilmente confundida com o intervalo de confiança de cada ponto na figura. Portanto, tal parâmetro não deve ser usado para estabelecimento do fim da vida da ferramenta, pelo menos quando o critério de substituição da mesma for valores de VB de até $0,8 \text{ mm}$.

MONITORAMENTO DA USINAGEM VIA PARAMETROS ELETRICOS

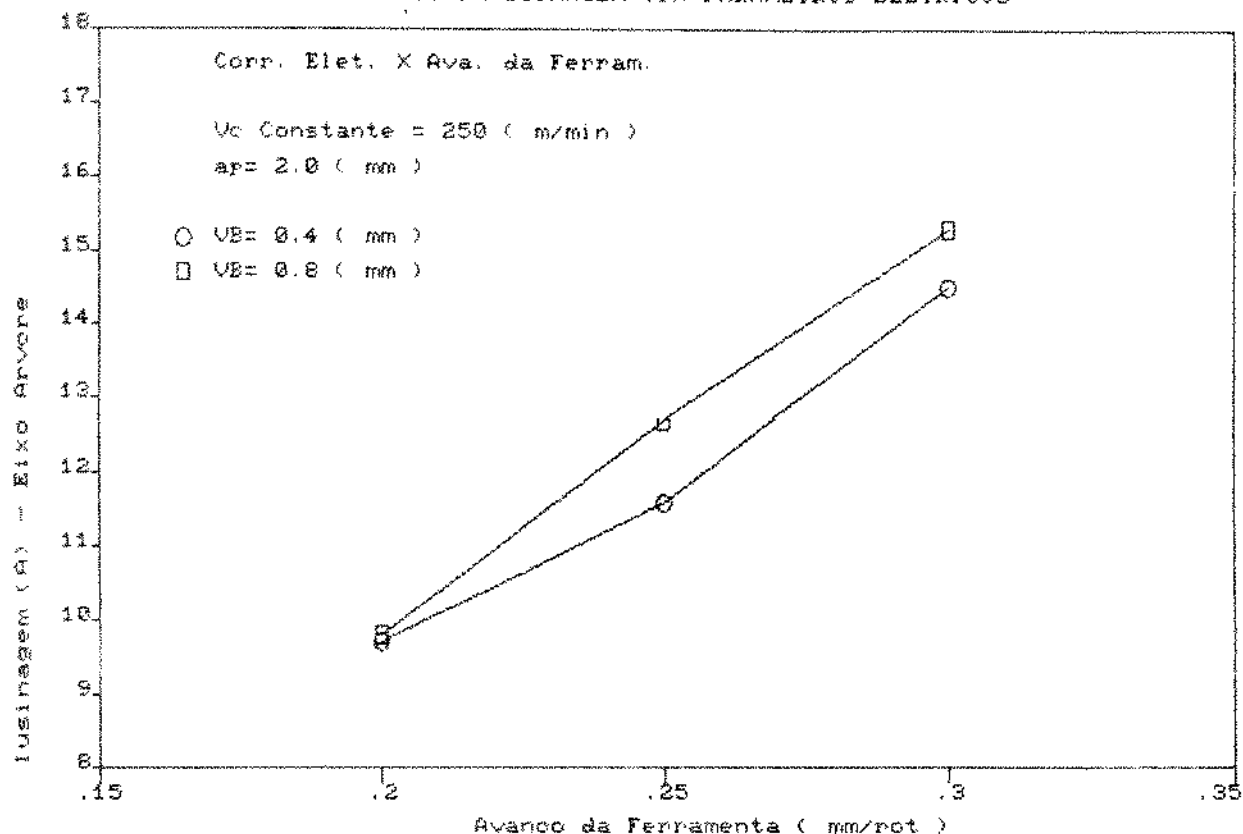


Fig. 5.5- Corrente da Armadura do motor Principal versus o Avanço da Ferramenta para Dois Desgastes frontais da Ferramenta.

Utilizando a mesma metodologia do item anterior, obtivemos as figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9. Pelos mesmos motivos vistos anteriormente, a corrente de armadura do servo-motor de avanço e a tensão de armadura do motor principal não foram utilizadas na análise dos resultados.

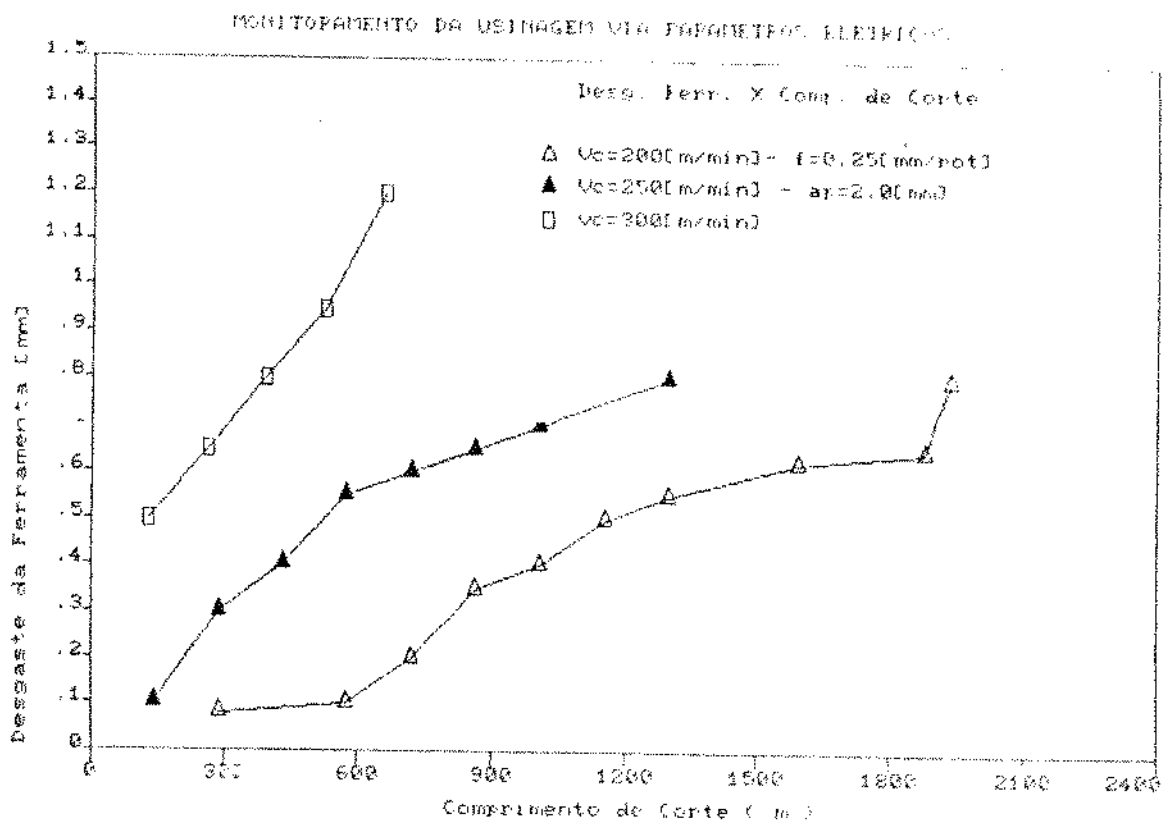


Fig. 5.6- Desgaste Frontal da Ferramenta versus Comprimento de Corte para Três Velocidades de Corte distintas.

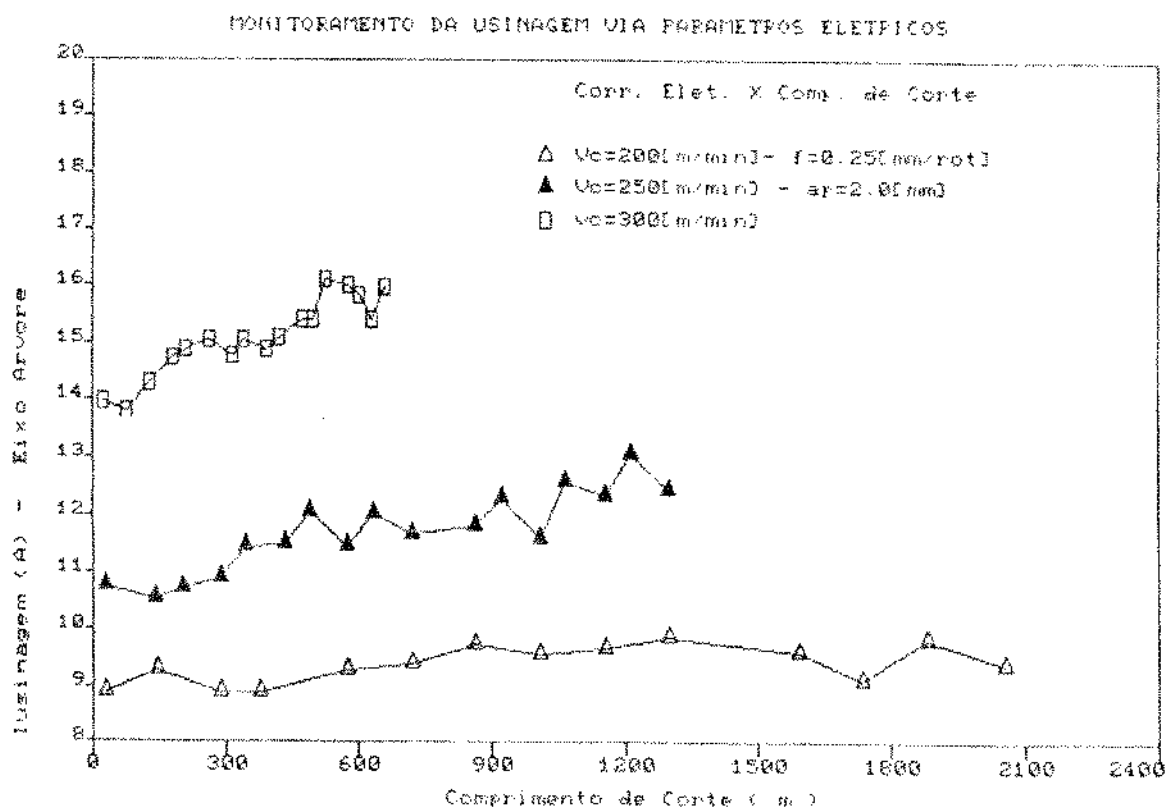


Fig. 5.7- Corrente de Usinagem da Armadura do Motor Principal versus Comprimento de Corte para Três Velocidades de Corte distintas.

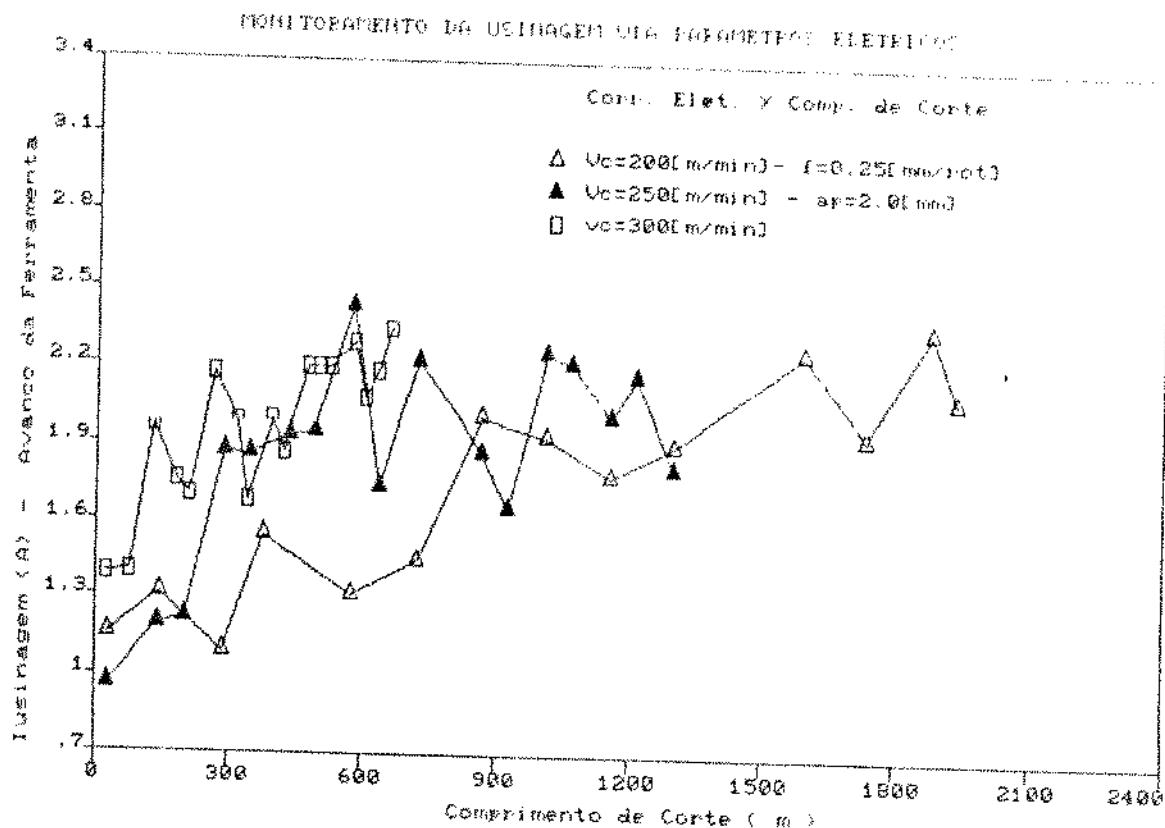


Fig. 5.8- Corrente de Usinagem do Servo-Motor de Avanço versus Comprimento de Corte para Três Velocidades de Corte distintas.

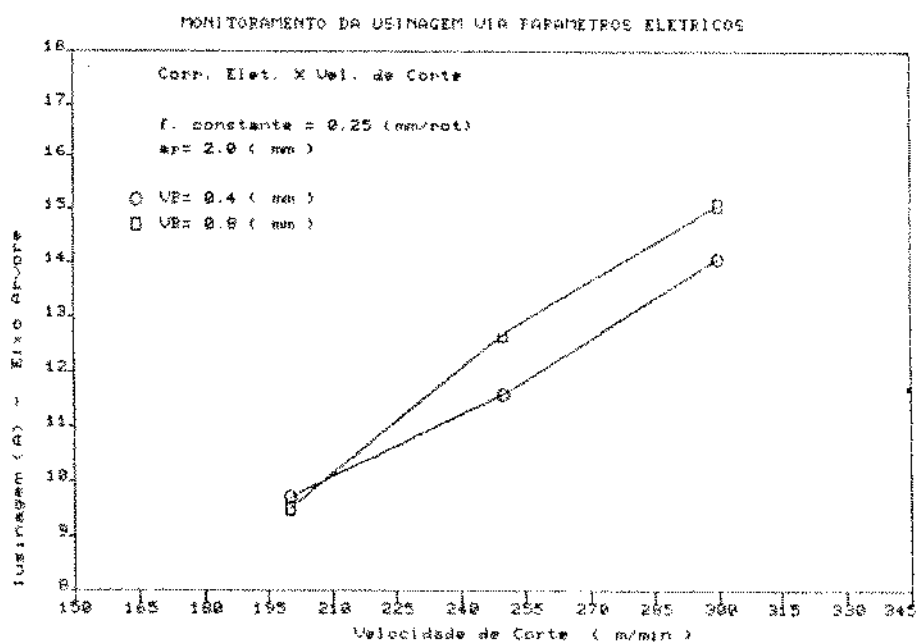


Fig. 5.9- Corrente da Armadura do motor Principal versus a Velocidade de Corte para Dois Desgastes frontais da Ferramenta.

Nota-se que, neste caso, a corrente também será tanto mais sensível ao desgaste quanto maior for a velocidade de corte. Para velocidade de corte igual a 200 m/min não houve crescimento da corrente quando o desgaste frontal passou de 0,4 para 0,8 mm, enquanto que, com as velocidades 250 e 300 m/min, houve um crescimento de cerca de 1 A na corrente para a mesma faixa de desgaste utilizado no ensaio anterior. Conclui-se que, também nesse caso, a corrente não deve ser usada como parâmetro de estabelecimento do fim da vida da ferramenta, pelos mesmos motivos descritos anteriormente.

V-2-1- INFLUÊNCIA DO DESGASTE DE CRATERA NA CORRENTE DA ARMADURA DO MOTOR PRINCIPAL

Analisando os gráficos que relacionam a corrente de armadura do motor principal com o comprimento de corte, tanto para velocidade constante (fig.5.3) como para o avanço da ferramenta constante (fig. 5.7), percebemos que no início da usinagem o sinal de corrente apresenta uma alta taxa de crescimento, reduzindo-a durante aproximadamente meia vida da ferramenta, em que a corrente permanece quase constante. Essa taxa de crescimento aumenta novamente no final da vida da mesma.

Por observações feitas durante a fase de medição do desgaste da ferramenta, pôde-se constatar a presença de desgaste de cratera na superfície de saída da ferramenta, o qual poderia ter sido a causa da redução da taxa de crescimento da corrente na fase intermediária da vida da ferramenta. Esse desgaste reduz a força de corte e conseqüentemente a potência elétrica exigida pela máquina, devido ao aumento do ângulo efetivo de saída da ferramenta, conforme ficou visto no capítulo 3º deste trabalho.

Para minimizar a influência do desgaste de cratera na ferramenta e verificar o comportamento da corrente elétrica apenas com relação ao desgaste frontal, foi proposto acelerar artificialmente tal desgaste em vários níveis crescentes e monitorar a corrente nessas condições. Os resultados podem ser vistos na figura 5.10. Vê-se que, quando existe apenas desgaste frontal, a taxa de crescimento da corrente permanece praticamente constante, conforme a reta de regressão da figura 5.10, com coeficiente de correlação de 96,7 %, não havendo aquele período em que a corrente permanece constante. Esses resultados comprovam a teoria acima descrita, mostrando que o desgaste de cratera é o responsável pela estabilização dos valores de corrente na fase intermediária da vida da ferramenta.

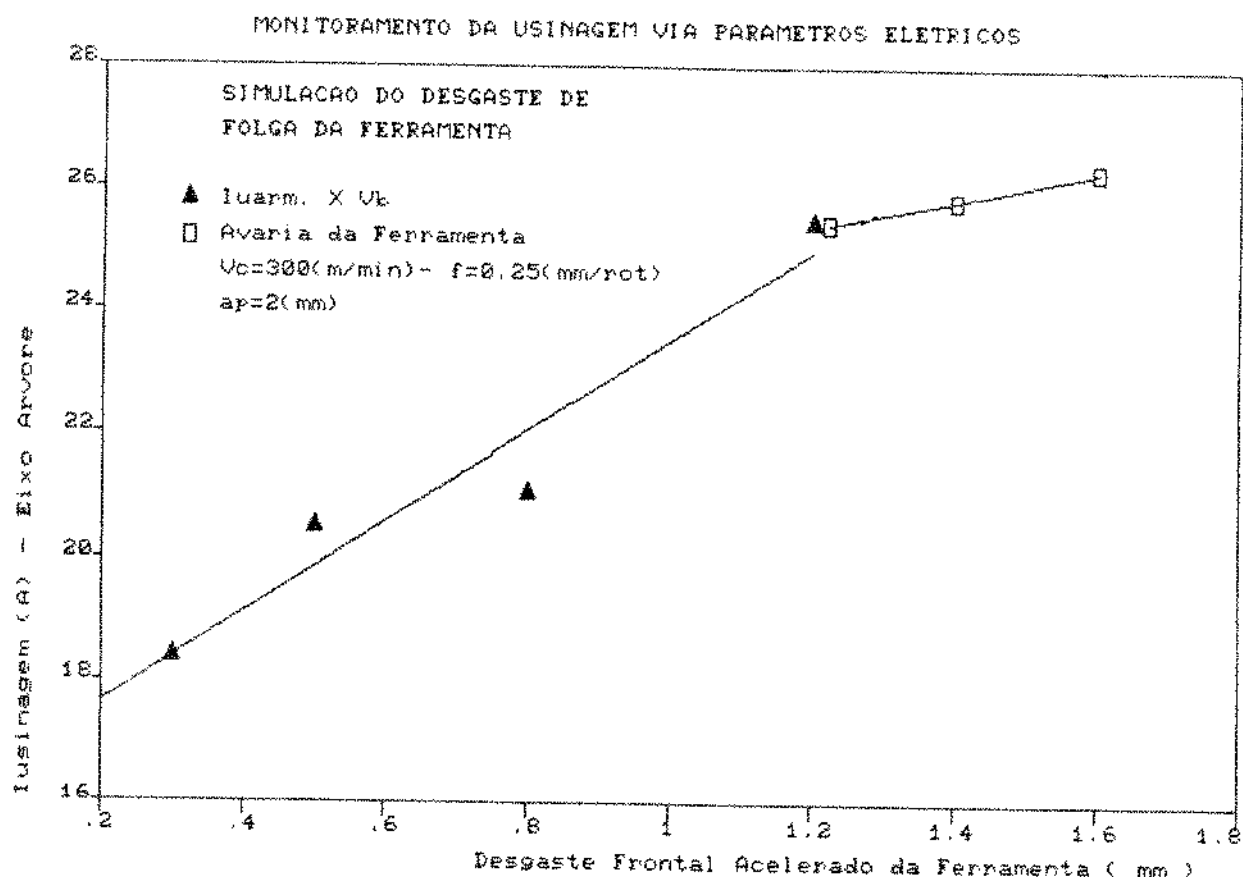


Fig. 5.10 - Correlação entre a Corrente de Armadura do Motor de Acionamento do Eixo-Árvore da Máquina versus Desgaste Frontal Acelerado da Ferramenta.

V-3- OPERAÇÃO DE ACABAMENTO NO TORNEAMENTO

Em operações de desbaste no torneamento, procura-se trabalhar com parâmetros de corte que possibilitem alta taxa de remoção de cavaco, não havendo preocupação com o acabamento da peça. Nessas condições, o desgaste admissível da ferramenta é sensivelmente maior quando comparado com a operação de acabamento. Assim, como os desgastes são menores, o acréscimo de potência e conseqüentemente da corrente elétrica do motor no fim da vida da ferramenta também deve ser menor. Procurou-se, porém, testar uma condição de usinagem típica de operação de acabamento em que $V_c = 300$ (m/min); $f = 0.18$ (mm/rot) e $a_p = 0.7$ (mm) e verificar a sensibilidade da corrente.

Nenhuma variação da corrente de armadura foi observada com relação ao comprimento de corte, como pode ser visto na figura 5.11, mas somente dispersão em torno de uma média, como, aliás, era de se esperar. As figuras 5.12 e 5.13 mostram a variação da rugosidade em função do comprimento de corte. Pode-se ver que, apesar de a corrente não ter crescido, a rugosidade superficial da peça atingiu valores que determinariam a troca da ferramenta.

Esses resultados vêm reafirmar a conclusão retirada dos itens anteriores, e que a corrente do motor principal não é um bom parâmetro para monitoramento do torneamento, quando o desgaste da ferramenta ainda é pequeno.

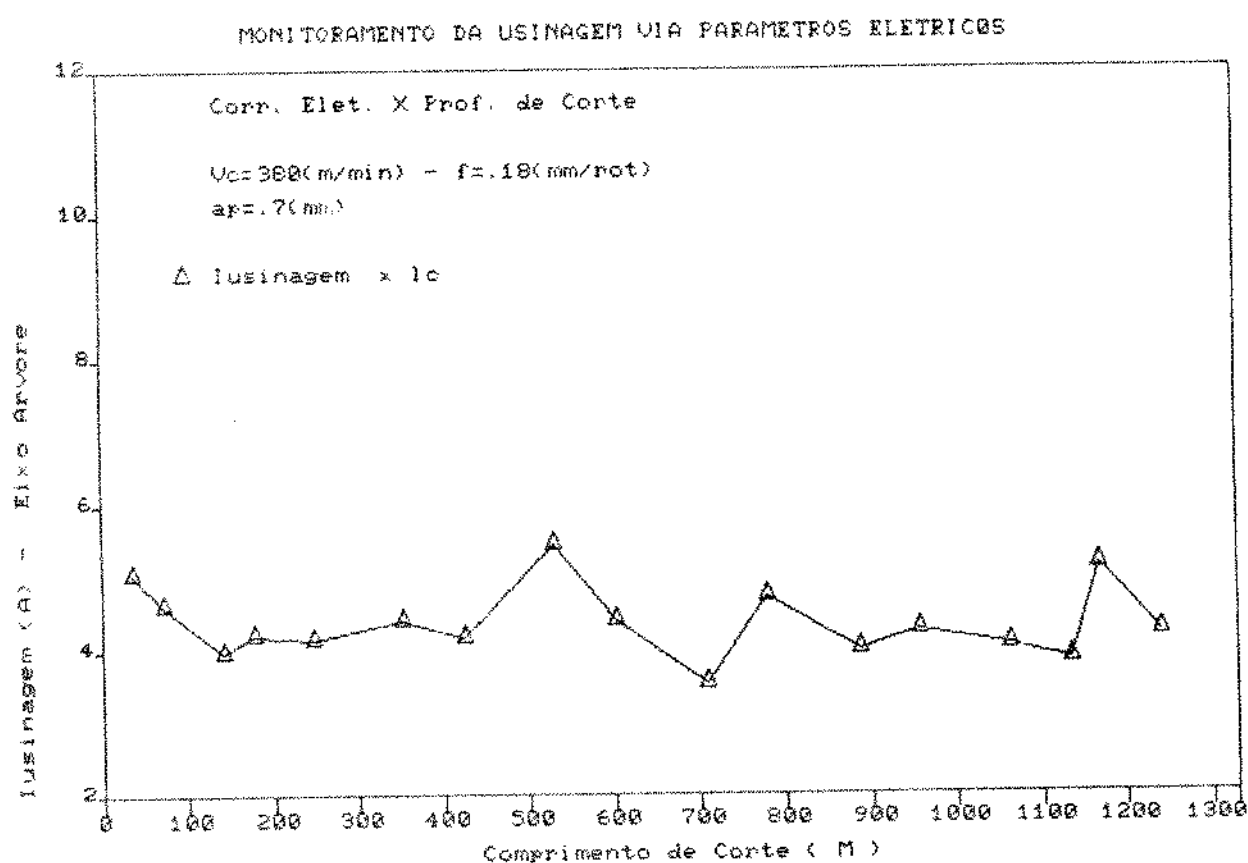


Fig. 5.11 - Correlação entre a Corrente de Armadura do Motor de Acionamento do Eixo-Arvore da Máquina versus Comprimento de Corte para operação de Acabamento.

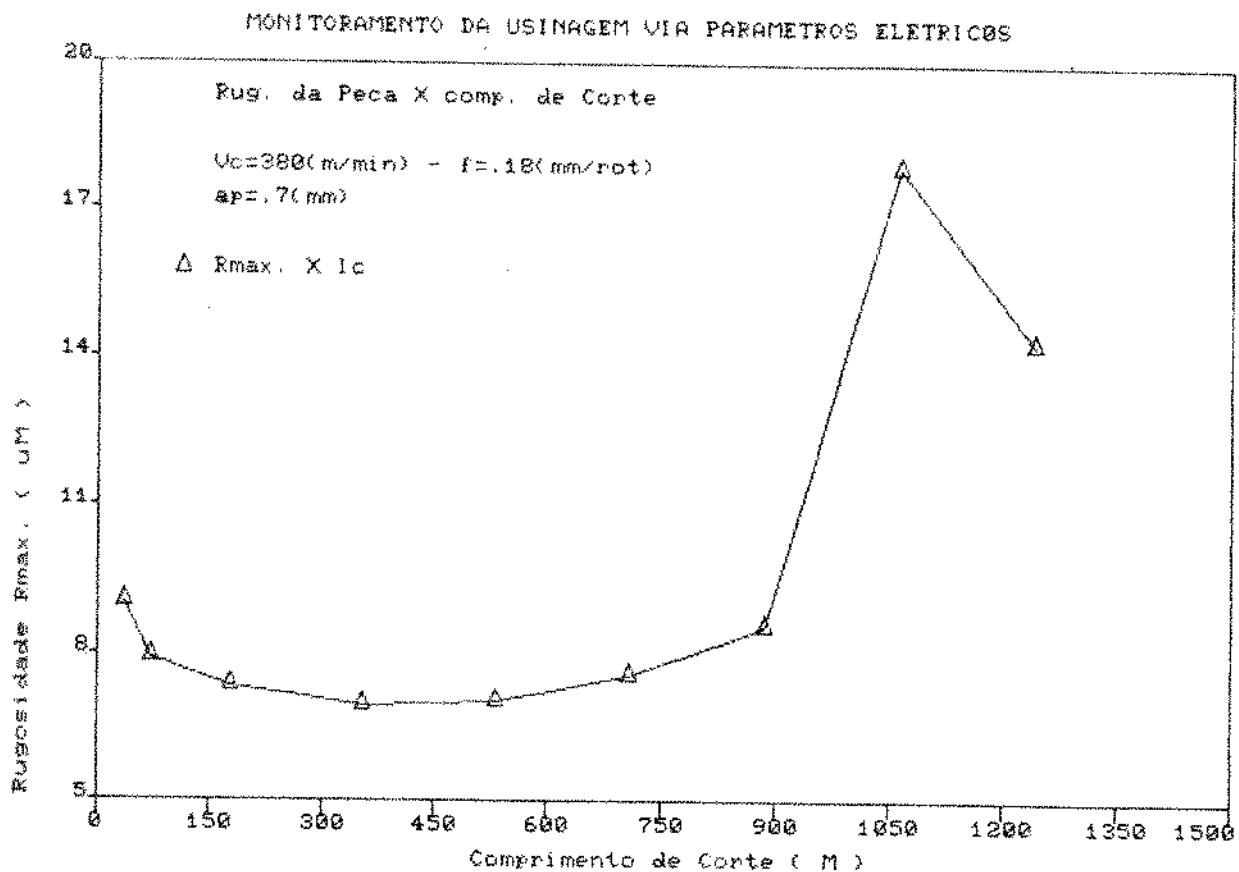


Fig. 5.12 - Rugosidade Máxima da Peça versus Comprimento de Corte para operação Acabamento.

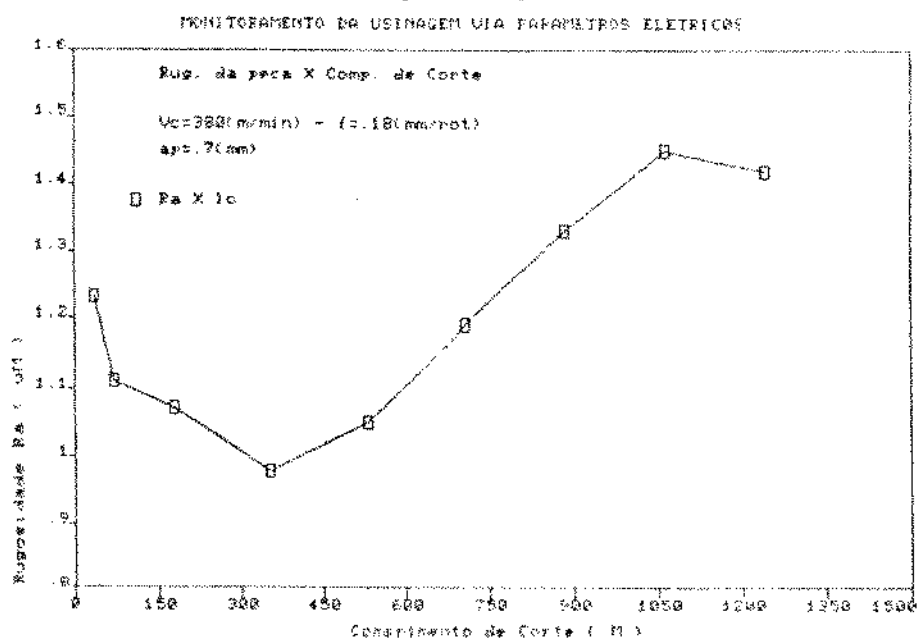


Fig. 5.13 - Rugosidade da Peça versus Comprimento de Corte para operação Acabamento.

V-4- MONITORAMENTO DE AVARIAS NA FERRAMENTA

Os resultados obtidos anteriormente mostraram que existe uma variação da corrente elétrica da armadura do motor de acionamento do eixo árvore da máquina quanto ao desgaste da ferramenta, mas que esta variação não é tão acentuada, pelo menos para valores de desgaste frontal (VB) até 0,8 mm. Resta verificar a possibilidade de utilização da corrente elétrica para predição da quebra da ferramenta, já que esta ocorre quando os valores de desgaste são bem altos. Para isto, foi realizado um ensaio em que se permitiu que a ferramenta atingisse a quebra, cujos resultados estão mostrados nas figuras 5.14 e 5.15. Nessas condições percebe-se que a taxa de crescimento da corrente é sensivelmente superior e permite com maior segurança a fixação de um critério para substituição da ferramenta. Além disso, nota-se que, quando ocorre a quebra, os valores de corrente caem rapidamente, facilitando ainda mais sua detecção da quebra.

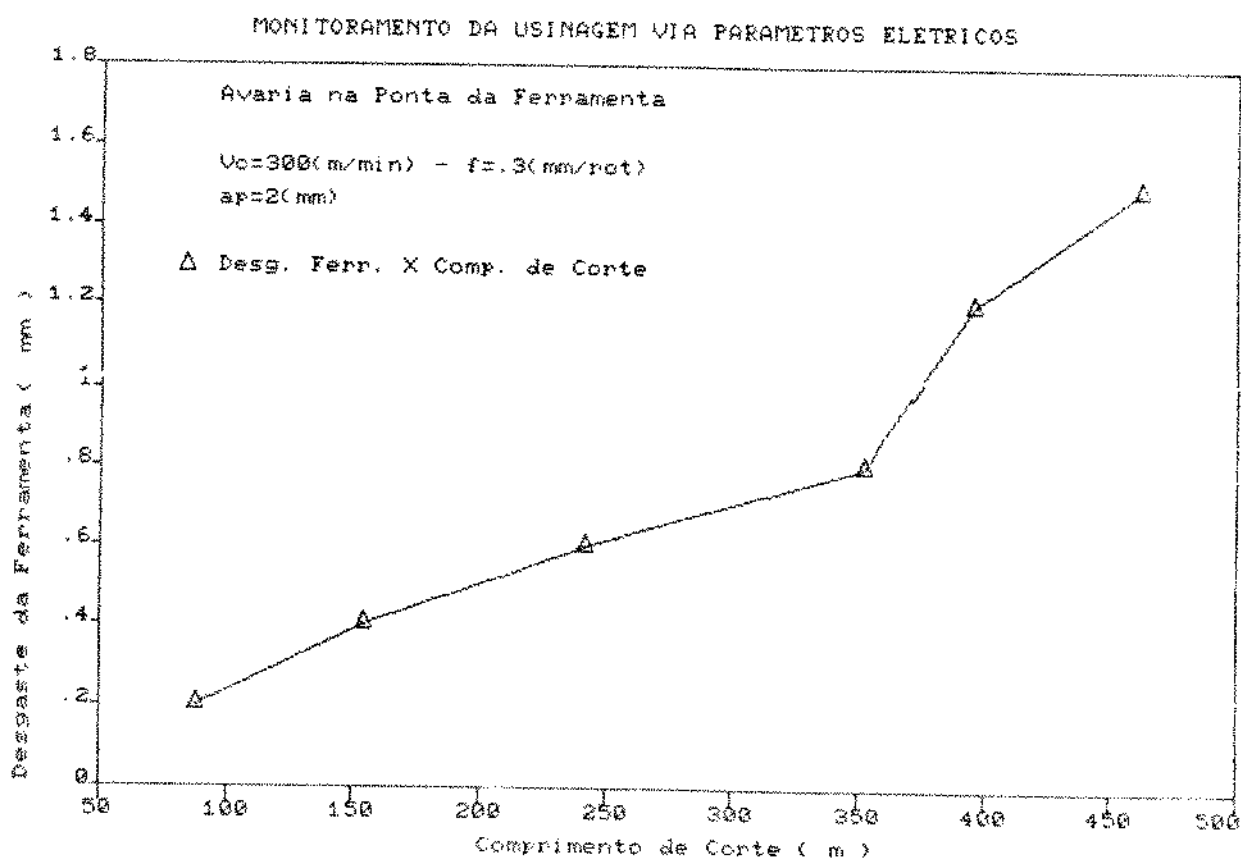


Fig. 5.14- Desgaste Frontal da Ferramenta versus Comprimento de Corte até o Limite de Quebra da Ferramenta.

MONITORAMENTO DA USINAGEM VIA PARAMETROS ELETRICOS

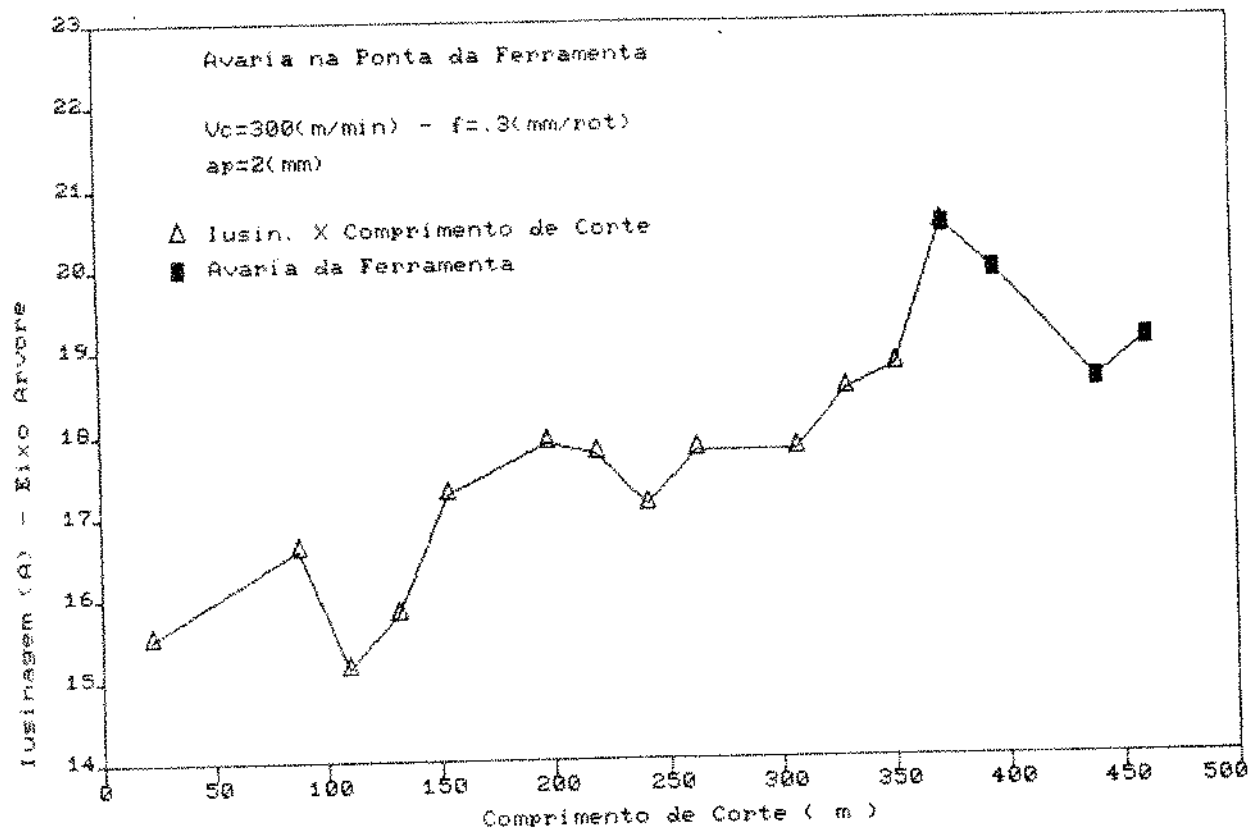


Fig. 5.15 - Correlação entre a Corrente de Armadura do Motor de Acionamento do Eixo-Árvore da Máquina versus Comprimento de Corte até o Limite de Quebra da Ferramenta.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Dado os resultados deste trabalho, podem-se tirar as seguintes conclusões para a usinagem do aço 1045 com pastilhas de metal duro:

A corrente da armadura do motor de avanço da máquina-ferramenta apresenta valores bastante instáveis, à medida que o comprimento (ou tempo) de corte cresce, impossibilitando sua utilização no monitoramento indireto do desgaste da ferramenta;

A corrente de armadura do motor principal da máquina-ferramenta cresce com o comprimento de corte, mas seu crescimento é muito pequeno, pelo menos até valores do desgaste frontal da ferramenta (VBD) de 0,8mm, fazendo com que sua utilização para monitoramento do desgaste seja inviável. Isso acontece para avanços e velocidades de corte diferentes, mas, quanto maior o avanço e/ou a velocidade, mais sensível a corrente se torna ao crescimento do comprimento de corte e, consequentemente, ao crescimento do desgaste;

Em face do exposto no item anterior, também é inviável a utilização da corrente da armadura para monitoramento de operações de torneamento em acabamento, já que nessas operações os valores admissíveis de desgaste da ferramenta são pequenos;

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

A corrente de armadura do motor principal pode ser muito útil para evitar o acontecimento da quebra da ferramenta, já que ela cresce sensivelmente pouco antes da quebra e cai logo após.

Dado o fato de que um sistema de monitoramento da corrente de armadura é simples, barato e nada intrusivo (já que nenhum sensor é colocado perto da região do corte) e que ele é útil para evitar a quebra da ferramenta, sugere-se que ele seja utilizado sempre que possível, principalmente em operações de desbaste, durante as quais se admite que o desgaste seja bem alto, mas quer se evitar a quebra da ferramenta, devido aos inconvenientes que ela traz.

CAPÍTULO VII

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Pretende-se continuar este trabalho, através das seguintes linhas de pesquisa:

Construção de um sistema de controle do processo de torneamento em desbaste, baseado no monitoramento da corrente da armadura do motor principal, que tenha duas funções, quais sejam: a) informar ao armário de controle da máquina-ferramenta o momento em que a ferramenta está prestes a se romper, a fim de que este possa interromper o processo; b) otimizar as condições de usinagem do processo, com base no número de peças usinadas por vida da ferramenta, já que é o próprio sistema que estará estabelecendo o fim da vida da mesma.

Estudo do monitoramento do processo de torneamento, utilizando-se outros métodos como emissão acústica, vibração e esforços de corte (medição por dinamômetro).

Estudo do monitoramento de outros processos de usinagem como furação, fresamento e retificação.

Construção de um sistema de controle do processo que receba informações de diversos sensores diferentes e que utilize técnicas de inteligência artificial, como redes neurais e lógica nebulosa para análise dos dados.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- 1-Majima, T., "Monitoramento do processo de corte com sensores" Máquinas e metais, jan., 1989
- 2- Stein J. L., Kyung-Chul Shin, " Current Monitoring of Field Controlled DC Spindle Drivers ." Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. Vol. 108, December 1986 pp 289 - 295.
- 3- Stein J. L., Churn - Hway Wang, " Analysis of Power Monitoring on AC Induction Drive Systems ." Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. Vol. 112, June 1990 pp 239 -248.
- 4-Agostinho,O.L., "Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões" Ed. Edgard Blucher,1977.
- 5-Tonshoff, H. K., Wulfsberg, J. P., "Developments and Trends in monitoring and control of machining process." Annals of the C. I. R. P. Vol. 37/2/87
- 6- Telles,G.N. Cupini,N. L., "IM 110 - Controle Numérico em Máquinas-Ferramenta. Curso de Pós-Graduação " , DEF-FEM-UNICAMP, Segundo Semestre de 1990.
- 7- Micheletti, G. F., " In process Tool Wear Sensors for Cutting Operations " Annals of the CIRP Vol. 25/2/76. pp 483-496.
- 8- Yoram Koren , "Adaptative Control Systems for Machining " Manufacturing Review , vol.2 ,N.1, March 1989.
- 9- Victor , H. "Computer Aided Measurement of Cutting Forces Applied to the Wear of an End Milling Cutter " Wear, vol.62, 1980 ,pp185 / 195.
- 10- Galip Ulsoy A., Yoram Koren, Rasmussen F., " Principal Developments in the Adaptative Control of Machine Tools Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. Vol. 105, June 1983 pp 107 - 112.

11- Stein J. L., Colvin D., Clever G., Wang C.H., " Evaluation of DC servo Machine Tool Feed Drives as Force Sensors" Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. Vol. 108, December 1986 pp 279 -287.

12- Tlustý, J. "A Critical Review of Sensores for Unmanned Machining". Annals of the CIRP, vol. 32/2/83.

13- A. Sampath, S. Vajpayee. "Tool Health Monitoring Using Acoustic Emission " Int. J. Prod. Res. 1987 Vol.25 N.5 pp.703-719.

14- Lee I. C., Lee K. S., Gan C. S., " On the Correlation Between Dynamic Cutting Force and Tool Wear " Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 29 N. 3 pp 295 - 303/89

15- Sadat A. B., Raman S., "Detection of tool flank wear using acoustic signature analysis ." Wear ,115 pp- 265 - 272 /1987.

16- Li Dan ,Mathew J., " Tool Wear and Failure Monitoring Techniques For Turning - A Review " Int. J. Mach. Tools Manufact Vol.30 N.4 pp.579-598/90

17- Mannam A. M., Broms S., "Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motors Power and Current Measurements " Annals of the CIRP Vol 38/1/1989.

18- Teti R. , Micheletti G. F., "Tool wear monitoring through acoustic emission " Annals of the C.I.R.P. Vol. 38/01/89. pp. 99-102.

19- Fillipe A., Ippolito R., " Cutting Force Variation (Vs time) - Chip Formation Parameters - Machinability " Annals of the CIRP Vol.21/01/72 . pp 29- 30 .

20- Ferraresi D., "Fundamentos da Usinagem dos Metais" Ed. Edgard Blucher,1977.

21- Diniz, Anselmo E., "A Rugosidade Superficial da Peça em Processo de Torneamento", Tese de Doutorado, DEF-FEM-UNICAMP, 1989.

22- LIMA, A. P. "Estratégia de Controle Adaptativo para Minimização das condições de usinagem." Tese de doutoramento, DEF-FEM-UNICAMP, 1989.

23- Cupini N. L., "Curso de Tecnologia da Usinagem". DEF-FEM-UNICAMP, Segundo Semestre de 1991.

24- Noveski O., "Determinação das Condições Economicas de Usinagem Altravés de Parâmetros Obtidos na Industria" Tese de Doutorado, DEF-FEM-UNICAMP, 1989.

25- Jiang C. Y., Zhang Y. Z. "In -process Monitoring of Tools Wear Stage by the Frequency Range Energy Method ". Annals of the CIRP Vol.36/01/87. pp 45- .

26- ISO/DIS 3685 "Tool - Life Testing With Single - Point Turning Tools" . International Organization for Standardization, 1975.

27- Catalogo SANDVIK Coromant "Ferramentas de Tornear". C-1000:2 SPA, 1986.

28- LYNX T. Eletrônica "Conversor Analógico-Digital e Digital-Analógico" Manual de Referência, 1990.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- 29- Berlok P., Ootsuka J., Sata T., Takata S., Matsushima K. "A system for monitoring the machining operation by referring to a predicted cutting torque pattern." Annals of the CIRP Vol.31/01/83.
- 30- Venuvino Rubenstein C. "Analysis of the life of controlled contact tools via flank contact temperature estimation." Annals of the C.I.R.P. Vol 33/1/1984 pp.55-60. p.55-60.
- 31-Ikezaki Y., Takeuchi Y., Sakamoto M., "Cutting force measurement of a rotating tool by means of optical data transmission". Annals of the C.I.R.P. Vol 33/1/1984 pp.61-64.
- 32-D. Cuppini, G. Derrico , G. Rutelli "Tool Wear Monitoring Based on Cutting Power Measurement " WEAR , 139 , 1990 pp. 303-311.
- 33-Ferrarezi D., "Otimização das condições de usinagem em produção seriada." Máquinas e metais, nov., 1989.
- 34-Pritschow,G., "Sensores de força e torque em máquinas-ferramenta". Máquinas e metais, maio. 1989.
- 35-Zepplelin, W., "Medição automática e correção da ferramenta em máquinas CN" Traub. GmbH. publicações da Traubomatic Ind. com. Ltda /84.
- 36- Agostinho, O. L., "Sistemas de manufatura, Tecnologia de grupo e sistemas Flexíveis de manufatura". Apostilas dos cursos de Tecnologia Mecânica, Pós-Graduação. UNICAMP..
- 37- Ren Ko T., Koren Y., " Cutting Force Model for Tool Wear Estimation " University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109.
- 38-Takata , Nakajima T. , Ahn J. H. ,Sata T. , "Tool breakage monitoring by means of fluctuations in spindle rotational speed". Annals of the CIRP Vol.36/01/87. pp 49- .

39- Hayashi S. P., Thoma, C. R., Wilder D. G., Thirly I. "Tool Break detection by monitoring ultrasonic vibrations". Annals of the CIRP Vol. 37/01/88. pp 61 - 64 .

40- Ber A., and Goldblatt M., "The influence of temperature gradient on cutting tool's life." Annals of the C.I.R.P. vol. 38/1/1989.

41- Hädeby H., Soulenius G. "Increasing availability and efficiency by monitoring the cutting process in a lathe during production with limited manpower ". Annals of the CIRP Vol.38/01/89. pp. 393-398 .

42- Thangaraj,A., and Wright, P.K., "Drill wear sensing and failure prediction for untended machining". Paper,Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 4 Num.3/4 pp429-435 /1988.

43- Byrne G. "Thermoelectric signal characteristics and average interfacial temperatures in the machining of metals under geometrically defined continuous." International Journal Machining Tools Manufacturs. Vol.27 n.2 pp.215-234 /1987.

44- "Aquisição e Conversão de Dados por Computador " EFEI/FUPAI -Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria.

45- Matsushima K., Bertok P., Sata, I., "In-Process detection of tool breakage by monitoring the spindle current of a machine tool" Papers selected from proceedings of ASME WINTER ANNUAL MEETINGS, Phoenix, Arizona, November, 1982. ASME , 1982 pp. 145-154

46- Martin K. F., Lockman H., "Force Sensing in Magnitude, Direction, and Position." Journal of Dynamic Systems Measurement, and Control. Vol.109, september 1987 pp 286 -290.

47- Emel E., Kannatey E., Asibu Jr., " Tool Failure Monitoring in Turning by Pattern Recognition Analysis of AE Signals" Journal of Engineering for Industry, may 1988, Vol. 110, pp 137 - 145.

48- Ferraresi, D., " Características de Usinagem dos Metais, para Operações de Torneamento" ABNT - P1 Nov. /86

49- Yangxue Y., Zhejun Y., Yang W., " A Multi - Sensor And Multi - model System For Cutting Process Monitoring " Dep. of Mechanical Engineering - Harbin 150006 , China.

50- Ohtani T., Fujise K., Yokogawa H., " Cutting Force Characteristics in Machining of Hardened Steel " Bull Japan Soc. of Prec. Engg., Vol. 20 N.2 (June 1986).

51- Kashimura, Y., " Study On Detection of Drill Wear and Breakage (1st Report) - Development of Monitoring System ." Bull Japan Soc. of Prec. Engg., Vol. 20 N.3 (Sept 1986).

52- Moriwaki T., " Sensing and Prediction of Cutting Tool Failure " Bull Japan Soc. of Prec. Engg., Vol. 18 N.2 (June 1984).

53- Filippi A. D., Ippolito R., " Adaptive Control in Turning : Cutting Forces and Tool Wear Relationship for P10, P20, P30 Carbides" Istituto di Tecnologia Mecànica, Politécnico di Torino, Torino, Italy.

54- Koren, Y., et. al., " Monitoring Tool Wear Through Force Measurement " University of Michigan, Ann Arbor, Michigan 48109-2125.

55- Colwell, L. V., "Tracking Tool Deterioration by Computer (During Atual Machining)" Annals of the CIRP VOL. 23/1/1974 pp 29-30.

56- Erdal E., Elijah K. A., "Acoustic Emission and force sensor fusion for monitoring the cutting process " Int. J. Mech. Sci. Vol 31 N 11/12 pp. 795-809 1989.

57- Kashou, S. Pandit, S. M. " A Data Dependent Systems Strategy of On Line Tool Wear Sensing " Journal of Engineering for Industry. 08/82 vol.104.

58- Colwell, L. V., "Real Time Computer Diagnostics(A Research Tool for Metal Cutting)" Annals of the CIRP Vol . 28/1/79.

ANEXO 1

LISTA DE SÍMBOLOS

Ia- Valor médio Quadrático da Corrente
Iarm- Corrente da Armadura do Motor
VB- Desgaste Frontal da Ferramenta
Kt- Desgaste de Cratera
D- Diâmetro da peça
K1, K2, K3 e F0- Constantes
T- Vida da Ferramenta
f- Avanço da Ferramenta
ap- Profundidade de Corte
Vc- Velocidade de Corte
y, z e x- Constantes
r, s e t- Constantes
X- Ângulo de posição da Aresta Principal de Corte
 γ - Ângulo de Saída de Cavaco
Pa- Força de Avanço
Pp- Força de Profundidade
Pu- Força Resultante de Usinagem
Pc- Força Principal de Corte
Ks e Ksl- Resistência Específica de Corte
(1 - z)- Constante
 η - Rendimento
Wm- Potência Mecânica
We- Potência Elétrica
W- Potência Útil
R- Resistência Elétrica
L- Comprimento Amostrado
Rmax- Rugosidade Máxima da Peça
Ra- Rugosidade Superficial
v- Volts
v/A- Volts/Ampere
To- Torque
n- Rotação
t- Tempo
fr- Frequência
T

ANEXO 2

ÍNDICE DE TABELAS E FIGURAS

Tab.2.1- Variáveis de Controle do Processo de Usinagem Monitoradas em Tempo Crítico e Não Crítico.	6
Tab.2.3- Comparação entre as Correntes Para a Máquina em Vazio, a Ferramenta Nova, o Corte Interrompido e a Quebra da Ferramenta.....	23
Tab.3.1- Padrões de Rugosidade para Vários Processos de Usinagem.....	39
Tab.4.1- Parâmetros de Corte para V_c Constante.....	48
Tab.4.2- Parâmetros de Corte para f Constante.....	49
Fig.2.1- Importância Econômica do Monitoramento em Processos de Fabricação.	4
Fig.2.2- Sistema de Controle Adaptativo para Máquina-Ferramenta.	7
Fig.2.2a- Restrições para Controle Adaptativo	9
Fig.2.3- Componentes Básicos do Sistema de Monitoramento	10
Fig.2.4- Correlação entre as Forças de Corte e de Avanço em relação ao Desgaste da Ferramenta....	14
Fig.2.5- Curva Característica de Controle de Rotação do Motor Elétrico com excitação Independente... ..	18
Fig.2.6- Características da Corrente de Armadura Durante a Penetração da Ferramenta na Peça.....	19
Fig.2.7- Variação do Regime Transitório da Corrente para Diferentes Rotações da Máquina.....	19
Fig.2.8a- Espectro de Frequência da Potência Elétrica do Motor e Torque do Eixo-Árvore da Máquina....	21
Fig.2.8b- Espectro de Frequência da Força de Avanço da Ferramenta e Corrente Elétrica do Motor.....	21
Fig.2.9- Níveis de Corrente para a Máquina em Vazio, a Ferramenta Nova, o Corte Intermediário e a Quebra da Ferramenta.....	22
Fig.2.10- Espectro de Frequência para a Força de Corte Dinâmica.....	25

Fig.3.1- Alguns Tipos de Desgastes em Ferramentas de Torneamento.....	31
Fig.3.2- Representação da Curva de Vida Utilizando dois Critérios Diferentes para o Fim da Vida da Ferramenta.....	33
Fig.3.3- Forças de Usinagem no Torneamento.....	34
Fig.3.4- Variação das Forças de Usinagem e dos Desgastes Frontais e de Cratéra em Função do Tempo de Corte, em Operação de Acabamento.....	36
Fig.3.5- Esquema da Rugosidade para um Comprimento Amostrado.....	37
Fig.4.1- Esquema do Sensor de Efeito "hall" e Filtro para o Sinal Médio da Corrente (Newtronic).....	41
Fig.4.2- Esquema do Redutor de Tensão (Lynx).....	42
Fig.4.3- Circuito de Alimentação dos Sensores de Corrente e Tensão Elétrica.....	42
Fig.4.4- Desenho Esquemático do Sistema de Aquisição de Dados.....	43
Fig.4.5- Corpo de Prova Utilizado nos Ensaios.....	44
Fig.4.6- Variação dos Parâmetros Elétricos do Motor para Controle da Rotação do Eixo-Árvore da Máquina.....	45
Fig.4.7- Relação Entre o Quadrado da Corrente Elétrica útil da Armadura do Motor versus a Profundidade de Corte.....	47
Fig.5.1- Corrente de Usinagem da Armadura do Motor Principal versus Comprimento de Corte.....	50
Fig.5.2- Desgaste Frontal da Ferramenta versus Comprimento de Corte para três Avanços Distintos.....	51
Fig.5.3- Corrente de Usinagem da Armadura do Motor Principal versus Comprimento de Corte para Três Avanços Distintos.....	52
Fig.5.4- Corrente de Usinagem do Servo-Motor de Avanço versus Comprimento de Corte para Três Avanços Distintos.....	52
Fig.5.5- Corrente da Armadura do Motor Principal versus o Avanço da Ferramenta para Dois Desgastes Frontais da Ferramenta.....	54

Fig.5.6-	Desgaste Frontal da Ferramenta versus Comprimento de Corte para três Velocidades de Corte Distintas.....	55
Fig.5.7-	Corrente de Usinagem da Armadura do Motor Principal versus Comprimento de Corte para Três Velocidades de Corte Distintas.....	55
Fig.5.8-	Corrente de Usinagem do Servo-Motor de Avanço versus Comprimento de Corte para Três Velocidades de Corte Distintas.....	56
Fig.5.9-	Corrente da Armadura do Motor Principal versus a Velocidade de Corte para Dois Desgastes Frontais da Ferramenta.....	56
Fig.5.10-	Correlação entre a Corrente de Armadura do Motor de Acionamento do Eixo-Árvore da Máquina versus Desgaste Frontal Acelerado da Ferramenta.....	58
Fig.5.11-	Correlação entre a Corrente de Armadura do Motor de Acionamento do Eixo-Árvore da Máquina versus Comprimento de Corte para Operação de Acabamento.....	59
Fig.5.12-	Rugosidade Máxima da Peça versus Comprimento de Corte para Operação de Acabamento.....	60
Fig.5.13-	Rugosidade da peça versus Comprimento de Corte para Operação de Acabamento.....	60
Fig.5.14-	Desgaste Frontal da Ferramenta versus Comprimento de Corte até o Limite de Quebra da Ferramenta.....	61
Fig.5.15-	Correlação entre a Corrente de Armadura do Motor de Acionamento do Eixo-Árvore da Máquina versus Comprimento de Corte até o Limite de Quebra da Ferramenta.....	62

APÊNDICE 1

TABELAS DE DADOS DOS EXPERIMENTOS

MONITORAMENTO DA USINAGEM VIA PARAMETROS ELETRICOS								
OPERACAO DE DESBASTE NO TORNEAMENTO					ENSAJO:		DESB12	
FERRAMENTA: TNMM 160404 S1P			MATERIAL: SAE 1045 DIAMETRO: 46.00		CONDICOES DE USINAGEM		f= 0.30 ap= 2.00 Vc= 250.00	
NUMERO DE PECAS USINADAS	Iarm.[A] MOTOR PRINCIPAL	Varm.[V] MOTOR PRINCIPAL	Iarm.[A] SERVO MOTOR AVANCO	Warm.[KW] DE CORTE MOTOR PRINCIPAL	(Iuarm) MOTOR PRINCIPAL (A)	(Iuarm) SERVO MOTOR AVANCO (A)	DESGASTE DA PONTA DA FERRAM. (mm)	COMPRIM. DE CORTE (m)
0	7.01	394.58	2.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	19.47	393.51	4.05	4.90	12.47	1.45	*	24.09
3	20.79	394.82	4.05	5.44	13.78	1.44	*	72.26
5	21.03	395.21	4.36	5.54	14.02	1.75	0.20	120.43
7	21.45	394.04	4.73	5.69	14.44	2.12	*	168.60
8	21.39	393.75	4.98	5.66	14.38	2.37	*	192.68
10	21.49	394.53	4.99	5.72	14.49	2.38	0.40	240.86
12	22.00	394.04	4.89	5.90	14.99	2.28	*	289.03
13	21.87	393.75	5.23	5.85	14.87	2.63	*	313.11
14	21.73	393.16	4.80	5.78	14.73	2.20	*	337.20
15	21.86	394.68	4.97	5.86	14.85	2.36	0.60	361.28
17	22.05	393.75	5.26	5.92	15.04	2.66	*	409.45
18	22.00	394.63	5.03	5.92	14.99	2.43	*	433.54
19	21.84	393.85	4.95	5.84	14.83	2.34	*	457.63
20	22.06	394.97	5.29	5.95	15.05	2.68	0.80	481.71
22	22.80	394.92	5.25	6.24	15.80	2.64	*	529.88
25	22.59	395.26	5.14	6.17	15.59	2.53	1.00	602.14
OBSERVACOES: SEM CRATERA								

MONITORAMENTO DA USINAGEM VIA PARAMETROS ELETRICOS								
OPERACAO DE DEBASTE NO TORNEAMENTO					ENSAIO:		DESB21	
FERRAMENTA: TNMM 160404 S1P			MATERIAL: SAE 1045 DIAMETRO: 46.00		CONDICOES DE USINAGEM		f= 0.25 ap= 2.00 Vc= 250.00	
NUMERO DE PECAS USINADAS	Iarm.[A] MOTOR PRINCIPAL	Varm.[V] MOTOR PRINCIPAL	Iarm.[A] SERVO MOTOR AVANCO	Warm.[KW] DE CORTE MOTOR PRINCIPAL	(Iuarm) MOTOR PRINCIPAL (A)	(Iuarm) SERVO MOTOR AVANCO (A)	DESGASTE DA PONTA FERRAM. (mm)	COMPRIM. DE CORTE (m)
0	7.21	393.85	2.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	17.96	391.75	3.57	4.20	10.76	0.96	*	28.90
5	17.75	394.09	3.81	4.16	10.54	1.19	0.10	144.51
7	17.94	392.63	3.84	4.21	10.73	1.22	*	202.32
10	18.11	394.82	4.48	4.31	10.90	1.87	0.30	289.03
12	18.66	394.43	4.47	4.52	11.46	1.86	*	346.83
15	18.71	394.68	4.55	4.54	11.50	1.93	0.40	433.54
17	19.28	394.48	4.57	4.77	12.07	1.95	*	491.35
20	18.67	395.26	5.04	4.54	11.46	2.43	0.55	578.05
22	19.23	393.85	4.35	4.74	12.03	1.73	*	635.86
25	18.89	394.78	4.84	4.62	11.68	2.22	0.60	722.57
30	19.01	394.58	4.49	4.66	11.80	1.87	0.65	867.08
32	19.52	393.07	4.26	4.83	12.31	1.65	*	924.88
35	18.81	395.95	4.86	4.61	11.61	2.25	0.70	1011.59
37	19.81	393.60	4.82	4.96	12.60	2.21	*	1069.40
40	19.55	393.16	4.61	4.85	12.34	2.00	*	1156.11
42	20.28	394.38	4.78	5.16	13.07	2.16	*	1213.91
45	19.63	394.53	4.42	4.91	12.43	1.81	0.80	1300.62
OBSERVACOES: CRATERA APOS 20 PECAS								

OPERACAO DE DESBASTE NO TORNEAMENTO ENSAIO: DESB36

```
f=      0.35
ap=     2.00
Vc=    250.00
```

[illegible]

OBSERVACOES: SEM CRATERA

MONITORAMENTO DA USINAGEM VIA PARAMETROS ELETRICOS

OPERACAO DE DESBASTE NO TORNEAMENTO

ENSAIO:

DESB45

FERRAMENTA: TNMM 160404
S1P

MATERIAL: SAE 1045
DIAMETRO: 42.00

CONDICOES
DE
USINAGEM

f= 0.25
ap= 2.00
Vc= 300.00

NUMERO DE PECAS USINADAS	Iarm.[A] MOTOR PRINCIPAL	Varm.[V] MOTOR PRINCIPAL	Iarm.[A] SERVO MOTOR AVANCO	Warm.[KW] DE CORTE MOTOR PRINCIPAL	(Iuarm) MOTOR PRINCIPAL (A)	(Iuarm) SERVO MOTOR AVANCO (A)	DESGASTE DA PONTA DE FERRAM. (mm)	COMPRIM. DE CORTE (m)
0	8.89	393.90	2.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	23.97	395.65	3.93	5.98	15.08	1.70	*	26.39
3	23.56	394.68	4.10	5.80	14.67	1.87	*	79.17
5	23.88	394.97	4.31	5.93	14.99	2.08	0.40	131.95
7	24.66	395.17	4.45	6.24	15.77	2.22	0.60	184.73
8	24.14	395.36	4.35	6.04	15.24	2.12	*	211.12
10	24.57	394.34	4.48	6.19	15.68	2.25	0.70	263.89
12	24.44	395.12	4.28	6.16	15.55	2.06	*	316.67
13	23.79	395.65	4.28	5.91	14.90	2.05	*	343.06
14	24.50	395.46	4.12	6.19	15.61	1.89	*	369.45
15	24.41	395.21	4.30	6.14	15.52	2.08	0.80	395.84
17	24.67	394.78	3.89	6.24	15.78	1.66	*	448.62
18	24.42	394.87	4.16	6.14	15.53	1.93	*	475.01
19	24.10	395.02	4.46	6.02	15.21	2.23	*	501.40
20	24.26	395.41	4.48	6.09	15.37	2.25	0.90	527.79
22	24.95	395.61	4.49	6.37	16.06	2.27	*	580.57
24	24.40	395.31	4.34	6.14	15.51	2.11	*	633.35
25	24.95	395.17	4.55	6.36	16.06	2.32	1.00	659.73

OBSERVACOES: CRATERA APOS 10 PECAS

MONITORAMENTO DA USINAGEM VIA PARAMETROS ELETRICOS								
OPERACAO DE DESBASTE NO TORNEAMENTO					ENSAIO:		DESB54	
FERRAMENTA: TNMM 160404 S1P			MATERIAL: SAE 1045 DIAMETRO: 46.00		CONDICOES DE USINAGEM		f= 0.25 ap= 2.00 Vc= 200.00	
NUMERO DE PECAS USINADAS	Iarm.[A] MOTOR PRINCIPAL	Varm.[V] MOTOR PRINCIPAL	Iarm.[A] SERVO MOTOR AVANCO	Warm.[KW] DE CORTE MOTOR PRINCIPAL	(Iuarm) MOTOR PRINCIPAL (A)	(Iuarm) SERVO MOTOR AVANCO (A)	DESGASTE DA PONTA DA FERRAM. (mm)	COMPRIM. DE CORTE (m)
0	4.29	393.65	2.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	14.18	392.38	3.88	3.48	8.89	1.15	*	28.90
10	14.17	391.85	3.81	3.47	8.87	1.09	0.08	289.03
13	14.18	391.99	4.26	3.48	8.89	1.54	*	375.73
20	14.55	393.65	4.03	3.64	9.26	1.31	0.10	578.05
25	14.68	392.68	4.17	3.68	9.39	1.45	0.20	722.57
30	15.03	394.04	4.72	3.84	9.74	2.00	0.35	867.08
35	14.83	393.80	4.66	3.76	9.54	1.93	0.40	1011.59
40	14.94	393.07	4.51	3.79	9.65	1.78	0.50	1156.11
45	15.18	394.24	4.63	3.90	9.88	1.90	0.55	1300.62
55	14.87	392.43	4.98	3.75	9.58	2.26	0.62	1589.65
60	14.38	393.12	4.66	3.57	9.08	1.94	*	1734.16
65	15.14	393.36	5.08	3.87	9.84	2.35	0.80	1878.67
OBSERVACOES: CRATERA APOS 30 PECAS								

MONITORAMENTO DA USINAGEM VIA PARAMETROS ELETRICOS								
OPERACAO DE DESBASTE NO TORNEAMENTO					ENSAIO:		DES863	
FERRAMENTA: TNMM 160404 S1P			MATERIAL: SAE 1045 DIAMETRO: 42.00		CONDICOES DE USINAGEM		f= 0.20 ap= 2.00 Vc= 250.00	
NUMERO DE PECAS USINADAS	Iarm.[A] MOTOR PRINCIPAL	Varm.[V] MOTOR PRINCIPAL	Iarm.[A] SERVO MOTOR AVANCO	Warm.[KW] DE CORTE MOTOR PRINCIPAL	(Iuarm) MOTOR PRINCIPAL (A)	(Iuarm) SERVO MOTOR AVANCO (A)	DESGASTE DA PONTA FERRAM. (mm)	COMPRIM. DE CORTE (m)
0	7.42	395.70	2.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	16.87	396.58	4.01	3.75	9.45	1.28	*	32.99
5	17.19	395.12	4.03	3.85	9.77	1.29	0.10	164.93
11	16.62	396.00	4.36	3.64	9.19	1.63	0.15	362.85
15	17.15	395.22	3.75	3.84	9.73	1.01	0.20	494.80
25	17.08	396.39	4.63	3.83	9.65	1.89	0.25	824.67
30	17.44	393.21	4.18	3.92	10.02	1.45	0.30	989.60
35	17.68	395.75	4.71	4.06	10.25	1.97	0.35	1154.54
40	17.46	396.09	4.75	3.98	10.04	2.02	0.40	1319.47
47	17.40	394.82	4.61	3.93	9.98	1.88	*	1550.38
50	17.51	394.82	4.74	3.98	10.09	2.01	0.45	1649.34
55	17.47	395.41	3.92	3.97	10.05	1.18	0.50	1814.27
59	17.42	395.80	4.53	3.96	10.00	1.80	0.60	1946.22
65	17.17	394.92	4.17	3.84	9.75	1.44	0.65	2144.14
68	16.75	394.24	4.37	3.67	9.33	1.63	0.67	2243.10
70	16.76	395.31	4.39	3.69	9.34	1.66	0.70	2309.07
75	16.88	395.41	4.19	3.74	9.46	1.46	0.80	2474.00
80	17.29	394.09	4.65	3.88	9.87	1.92	1.00	2638.94
OBSERVACOES: CRATERA APOS 35 PECAS								

MONITORAMENTO DA USINAGEM VIA PARAMETROS ELETRICOS								
OPERACAO DE DESBASTE NO TORNEAMENTO					ENSAIO: DESB75			
FERRAMENTA: TNM 160404 S1P			MATERIAL: SAE 1045 DIAMETRO: 42.00		CONDICOES DE USINAGEM		f= 0.25 ap= 2.00 Vc= 300.00	
NUMERO DE PECAS USINADAS	Iarm.[A] MOTOR PRINCIPAL	Varm.[V] MOTOR PRINCIPAL	Iarm.[A] SERVO MOTOR AVANCO	Warm.[KW] DE CORTE MOTOR PRINCIPAL	(Iuarm) MOTOR PRINCIPAL (A)	(Iuarm) SERVO MOTOR AVANCO (A)	DESGASTE DA PONTA DA FERRAM. (mm)	COMPRIM. DE CORTE (m)
0	9.06	394.92	2.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	23.03	395.36	3.91	5.53	13.96	1.39	*	26.39
3	22.86	395.41	3.92	5.46	13.80	1.40	*	79.17
5	23.34	394.87	4.49	5.64	14.28	1.97	0.50	131.95
7	23.81	395.36	4.28	5.84	14.75	1.76	*	184.73
8	23.96	395.46	4.22	5.89	14.89	1.70	*	211.12
10	24.12	395.02	4.69	5.95	15.05	2.17	0.65	263.89
12	23.82	395.46	4.50	5.84	14.76	1.98	*	316.67
13	24.11	394.43	4.20	5.93	15.05	1.68	*	343.06
15	23.93	395.85	4.51	5.89	14.87	1.99	0.80	395.84
16	24.17	393.75	4.39	5.94	15.10	1.87	*	422.23
18	24.43	395.26	4.61	6.08	15.37	2.09	*	475.01
19	24.47	394.78	4.71	6.08	15.41	2.19	*	501.40
20	25.19	394.43	4.71	6.36	16.12	2.19	0.95	527.79
22	25.07	393.75	4.80	6.29	16.01	2.29	*	580.57
23	24.89	394.63	4.59	6.24	15.83	2.07	*	606.96
24	24.48	394.29	4.70	6.07	15.42	2.18	*	633.35
25	25.04	395.61	4.86	6.33	15.98	2.34	1.20	659.73
OBSERVACOES: CRATERA APÓS 15 PECAS								

OPERACAO DE DESBASTE NO TORNEAMENTO ENSAIO: DESBASTE

```
f=      0.25
ap=      2.00
Uc=    300.00
```

[illegible]

1 OBSERVACOES: PEQUENA CRATERA APOS 15 PECAS

MONITORAMENTO DA USINAGEM VIA PARAMETROS ELETRICOS								
OPERACAO DE ACABAMENTO NO TORNEAMENTO					ENSAIO: ACAB31			
FERRAMENTA: SNMG 120412 MF-GC425			MATERIAL: SAE 1045 DIAMETRO: 40.60		CONDICOES DE USINAGEM		f= 0.18 ap= 0.70 Vc= 300.00	
NUMERO DE PECAS USINADAS	Iarm.[A] MOTOR PRINCIPAL	Varm.[V] MOTOR PRINCIPAL	Iarm.[A] SERVO MOTOR AVANCO	Warm.[KW] DE CORTE MOTOR PRINCIPAL	(Iuarm) MOTOR PRINCIPAL (A)	(Vuarm) SERVO MOTOR AVANCO (A)	Rugosidade de Maxima Rmax (um)	COMPRIM. DE CORTE (m)
0	11.80	393.65	2.55	0.00	0.00	0.00	*	0.00
1	16.86	395.12	3.16	2.01	5.05	0.61	9.03	35.43
2	16.42	396.97	2.92	1.87	4.61	0.37	7.09	70.86
4	15.77	395.95	2.93	1.60	3.96	0.38	*	141.72
5	16.01	395.51	3.02	1.68	4.20	0.47	7.33	177.15
7	15.94	396.14	3.10	1.67	4.14	0.54	*	248.01
10	16.22	395.22	2.97	1.76	4.41	0.42	6.93	354.30
12	16.00	396.63	3.67	1.70	4.19	1.11	*	425.16
15	17.27	396.44	3.23	2.20	5.46	0.68	7.09	531.45
17	16.20	394.53	2.98	1.75	4.40	0.43	*	602.31
20	15.32	395.26	2.82	1.41	3.52	0.27	7.57	708.60
22	16.55	395.46	3.08	1.90	4.75	0.52	*	779.46
25	15.79	394.48	3.09	1.58	3.99	0.54	8.53	885.75
27	16.07	395.65	2.94	1.71	4.27	0.39	*	956.61
30	15.85	395.07	3.04	1.62	4.05	0.48	17.90	1062.91
32	15.65	395.36	2.80	1.54	3.85	0.25	*	1133.77
33	16.97	395.46	2.98	2.07	5.17	0.42	*	1169.20
35	16.05	396.78	3.15	1.72	4.25	0.60	14.27	1240.06
OBSERVACOES: TRES LEITURAS DE Rmax								

MONITORAMENTO DA USINAGEM VIA PARAMETROS ELETRICOS								
OPERACAO DE ACABAMENTO NO TORNEAMENTO					ENSAIO:		ACAB32	
FERRAMENTA: SNMG 120412 MF-GC425			MATERIAL: SAE 1045 DIAMETRO: 40.60		CONDICOES DE USINAGEM		f= 0.18 ap= 0.70 Vc= 300.00	
NUMERO DE PECAS USINADAS	Iarm.[A] MOTOR PRINCIPAL	Uarm.[V] MOTOR PRINCIPAL	Iarm.[A] SERVO MOTOR AVANCO	Warm.[KW] DE CORTE MOTOR PRINCIPAL	(Iuarm) MOTOR PRINCIPAL (A)	(Iuarm) SERVO MOTOR AVANCO (A)	Rugosidade de Ra (um)	COMPRIM. DE CORTE (m)
0	11.80	393.65	2.55	0.00	0.00	0.00	*	0.00
1	16.86	395.12	3.16	2.01	5.05	0.61	1.23	35.43
2	16.42	396.97	2.92	1.87	4.61	0.37	1.11	70.86
4	15.77	395.95	2.93	1.60	3.96	0.38	*	141.72
5	16.01	395.51	3.02	1.68	4.20	0.47	1.07	177.15
7	15.94	396.14	3.10	1.67	4.14	0.54	*	248.01
10	16.22	395.22	2.97	1.76	4.41	0.42	0.98	354.30
12	16.00	396.63	3.67	1.70	4.19	1.11	*	425.16
15	17.27	396.44	3.23	2.20	5.46	0.68	1.05	531.45
17	16.20	394.53	2.98	1.75	4.40	0.43	*	602.31
20	15.32	395.26	2.82	1.41	3.52	0.27	1.19	708.60
22	16.55	395.46	3.08	1.90	4.75	0.52	*	779.46
25	15.79	394.48	3.09	1.58	3.99	0.54	1.33	885.75
27	16.07	395.65	2.94	1.71	4.27	0.39	*	956.61
30	15.85	395.07	3.04	1.62	4.05	0.48	1.45	1062.91
32	15.65	395.36	2.80	1.54	3.85	0.25	*	1138.77
33	16.97	395.46	2.98	2.07	5.17	0.42	*	1169.20
35	16.05	396.78	3.15	1.72	4.25	0.60	1.42	1240.06
OBSERVACOES: TRES LEITURAS DE Ra								

APÊNDICE 2

"SOFTWARE" PARA OBTENÇÃO DOS DADOS

O crescente desenvolvimento da área de informática tem permitido que sistemas de aquisição de dados possam ser monitorados via microcomputador, oferecendo confiabilidade e rapidez de respostas.

Existem várias linguagens de programação que permitem aos usuários manter o controle de tais sistemas em função do planejamento do experimento, seja no controle da frequência de amostragem do sinal, seja ainda na determinação do intervalo de tempo útil de amostragem em função de limites mínimos e/ou máximos do sinal sensoreado.

A linguagem escolhida para desenvolvimento do "software" de comunicação e controle entre os sinais analógicos externos de interesse foi o Pascal versão 5.0. Esta linguagem de programação se destaca por ser de alto nível e altamente estruturada, além de possuir comandos gráficos que satisfazem às necessidades do projeto.

O microcomputador é constituído de placas controladoras, como controladora de unidades de discos, com interface serial e paralela, adaptadora de vídeo e placas de extensão, como de extensão de memória, de conversão analógico-digital etc. Estas placas possuem endereços fixos e pré-definidos, função do projeto do "hardware", que permitem serem elas acessadas de forma conveniente.

O programa de conversão A/D deste trabalho utiliza a placa em sua configuração padrão, com endereço base codificado em 896 decimal, (0380 hexadecimal) ou (11.1000.0000 binário).

Por conveniência, o endereçamento das ramificações de interesse da placa são referenciados ao endereço base, como por exemplo base + 0, base + 1 etc, o que permite a simples troca de configuração pela substituição do valor do endereço base da mesma.

O princípio básico do funcionamento da placa de conversão A/D, está relacionado com a troca de informações entre o estado de um byte, como endereçamento, leitura e transferência de dados etc. Mais informações podem ser vistas no manual de referência do fabricante ou no programa a seguir, onde procuramos torná-lo auto-explicativo. [28]

Ao inicializar a conversão de dados, faz-se necessário a inicialização de alguns registradores da placa. Assim, o programa de controle deverá realizar a seguinte rotina:

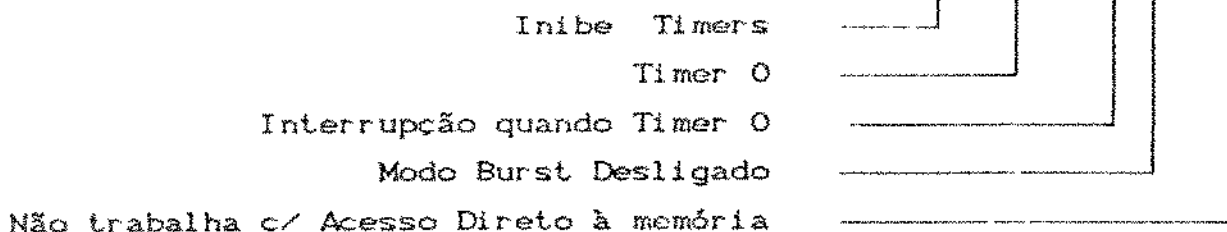
PROGRAMAR O MODO ZERO DA PLACA

Esta inicialização se preocupa em zerar o registrador de modo da placa, ou seja:

```
=====
R.B                               Rotina EscreveRegSecundario
=====
Procedure EscreveRegSecundario (EndReg, Dado: byte);
begin
    (End. Base + 4) = [11.1000.0100]
    Port [CadEnd]   := EndReg; ----- = 3
    Port [CadDado]  := Dado;  ----- = 0
end;                (End. Base + 5) = [11.1000.0101]
```

No endereço secundario da CAD 12/36 igual a 3, temos o registrador de modo da mesma que deverá ser zerado. A linha 5 do programa principal (P.P) executa esta operação utilizando o procedimento (RB).

Assim, no endereço secundário (- - - -.0 0 1 1) teremos o seguinte byte de dados:----- (x 0 0 0 . 0 0 0 0)



PROGRAMAÇÃO DA MEMÓRIA DE CANAIS

Neste programa pretende-se sensorear os sinais de corrente e tensão da armadura do motor principal e também a corrente do servo motor de avanço. Desta forma foram programados três canais para aquisição dos respectivos sinais, quais sejam: canal 0, 1 e 2.

A programação é processada em um byte, onde cada bit ou conjunto de bits exercem uma função específica de controle da placa, quais sejam:

(0) - Unipolar

(1) - Bipolar

Ganho 1 (1 1 1) = 112 Dec.

Ganho 2 (1 1 0) = 96 Dec.

Ganho 5 (1 0 1) = 80 dec.

Ganho 100 (0 1 1) = 48 dec.

Canal 0 (0 0 0 0)

Canal 1 (0 0 0 1)

Canal 15 (1 1 1 1)

Para polaridade bipolar a conversão é de -10/ganho à +10/ganho volts , e para polaridade unipolar a conversão é de 0 à +10/ganho volts.

Recomenda-se o uso da seguinte tabela:

Ganho	Faixa do sinal de Entrada	
	Unipolar	Bipolar
1	0 a 10 V	- 10 a 10 V
2	0 a 5 V	-5 a 5 V
5	0 a 2 V	-2 a 2 V
100	0 a 100 mV	-100 a 100 mV

A programação da memória de canais é processada segundo a linha 7 do (P.P) e utiliza os procedimentos (R.F), (R.B) e (R.C) vistos a seguir .

R.F Rotina ProgramaMemoriaCanais

Procedure ProgramaMemoriaCanais; (para programar o ganho)

begin

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

Da rotina (R.B), temos:

Procedure EscreveRegSecundario (EndReg, Dado: byte);

begin (End. Base + 4) = [11.1000.0100]

Port [CadEnd] := EndReg; (End. Base + 5) = SecLimite := (0000.0000)

Port [CadDado] := Dado; (End. Base + 6) = \$f = (0000.1111)

end; (End. Base + 5) = [11.1000.0101]

Para programar os canais 0,1 e 2 usamos a (P.C) , onde por exemplo, na memória 0 temos o canal 0 polaridade bipolar e ganho 1.

```

=====
R.C          Rotina  EscreveMemCanais
=====

```

```

Procedure EscreveMemCanais (Posicao, Dado: byte);
begin
    _____ = 1
    EscreveRegSecundario (SecPonteiro, Posicao); < Endereco dos
Canais >
    EscreveRegSecundario (SecMemoria, Dado); < Polaridade, Canal e
Ganho correspondente > _____ = 4
end;

```

```

_____ Posição
EscreveMemCanais (0, Bipolar + G1 + 0); < memoria 0 com canal 0,
bipolar e ganho 1 > _____ Dado

```

```

EscreveRegSecundario (SecPonteiro, Posicao); < Endereco da Memoria de
Canais >

```

```

Procedure EscreveRegSecundario (EndReg, Dado: byte);
begin
    _____ (End. Base + 4 ) = [11.1000.0100]
    Port [CadEnd] := EndReg;= SecPonteiro = 1:= ( 0000.0001 )
    Port [CadDado] := Dado de Posição _____ 0:= ( 0000.0000 )
end; _____ (End. Base + 5 ) = [11.1000.0101]

```

```

EscreveRegSecundario (SecMemoria, Dado); < Polaridade, Canal e
ganho correspondente >
end;

```

```

Procedure EscreveRegSecundario (EndReg, Dado: byte);
begin
    _____ (End. Base + 4 ) = [11.1000.0100]
    Port [CadEnd] := EndReg;= SecMemoria = 4 := ( 0000.0100 )
    Port [CadDado] := Dado;= Bipolar + G1 + 0 := ( 1111.0000 )
end; _____ (End. Base + 5 ) = [11.1000.0101]

```

†

Onde:

Dado := (1 111 0000)

Bipolar (80) (1000.0000)

Ganho 1 (112) (0111.0000)

Canal 0 (0000.0000)



EscreveMemCanais (1, Bipolar + G1 + 1); (memoria 1 com canal 1, bipolar e ganho 1)

EscreveRegSecundario (SecPonteiro, Posicao); (Endereco da Memória de Canais)

```

Procedure EscreveRegSecundario (EndReg, Dado: byte);
begin
    (End. Base + 4 ) = [11.1000.0100]
    Port [CadEnd] := EndReg;= SecPonteiro = 1:= ( 0000.0001 )
    Port [CadDado] := Dado de Posição 1:= ( 0000.0001 )
end;
    (End. Base + 5 ) = [11.1000.0101]

```

EscreveRegSecundario (SecMemoria, Dado); (Polaridade, Canal e Ganho correspondente).

end;

```

Procedure EscreveRegSecundario (EndReg, Dado: byte);
begin
    (End. Base + 4 ) = [11.1000.0100]
    Port [CadEnd] := EndReg;= SecMemoria = 4 := ( 0000.0100 )
    Port [CadDado] := Dado;= Bipolar + G1 + 1 := ( 1111.0001 )
end;
    (End. Base + 5 ) = [11.1000.0101]

```

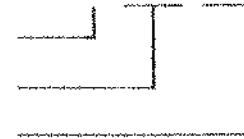
Onde:

Dado := (1 111 0001)

Bipolar (80) (1000.0000)

Ganho 1 (112) (0111.0000)

Canal 1 (0000.0001)



EscreveMemCanais (2, Bipolar + G1 + 2); (memoria 2 com canal 2, bipolar e ganho 1)

end;

Resumiendo tenemos:

Byte de Endereço	Byte de Memória de Canais c/ ganho e Polaridade	Canal
(0000.0000)	(1111.0000)	0
(0000.0001)	(1111.0001)	1
(0000.0010)	(1111.0010)	2

AUTO CALIBRAÇÃO DO CONVERSOR A/D

Esta é uma característica própria do conversor, que garante por exemplo a não linearidade máxima de meio bit menos significativo por toda sua vida operacional, dentre outras. A auto calibração é obtida escrevendo qualquer dado no endereço secundário (6) e aguardar cerca de 0,4 segundos. A linha 6 do (P.P) processa essa auto calibração, utilizando os procedimentos (R.B) e (R.D).

R.D Rotina AutoCalibração

Procedure AutoCalibracao:

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

```

Procedure EscreveRegSecundario (EndReg, Dado: byte);
begin
    (End. Base + 4) = [11.1000.0100]
    Port [CadEnd] := EndReg;= SecAutCal = 6 := ( 0000.0110 )
    Port [CadDado] := Dado;= _____ 0 := ( 0000.0000 )
end;
    (End. Base + 5) = [11.1000.0101]

```

LIMPEZA DA FIFO

A linha 8 do (P.P) opera sobre a limpeza da FIFO utilizando a rotina (R.E). Nesse caso é recomendado fazer a leitura de 16 bytes A e B da mesma.

R.E

Rotina LimpaFIFO

```
Procedure LimpaFIFO;
  Var i, Dado: integer;
begin
  for i := 1 to 16 do
  begin
    Dado := Port [ByteB];
    Dado := Port [ByteA];
  end;
end;
```

A linha 17 do (P.P) se destina ao dispararo do sistema de conversão dos dados. O mesmo utiliza a rotina (R.H).

R.H

Rotina Trigger

```
Procedure Trigger;
begin
  repeat
  until keypressed;
  k := 1;
  delay(1000);
end;
```

A linha 18 do (P.P) processa a conversão dos dados utilizando o procedimento (R.I), e também a função Leconv de conversão na função(R.G).

A resolução de aquisição é de 12 bits, que se divide em 2 bytes A e B. Assim, os códigos que representam os níveis de tensão são:

RESOLUÇÃO 12 BITS

TENSÃO ENTRADA	BINARIO		CÓDIGO LEITURA
	BYTE B	BYTE A	
-10	0000.0000	0000.0000	0
⋮	⋮	⋮	⋮
+10	1111.1111	1111.0000	4.096

$$1 \text{ NÍVEL} = 20 / 4096 \text{ Volt} = 4.88 \text{ (mV)}.$$

Neste programa , a variável de interesse foi definida como tconv.

tconv := (leconv(I) * 20)/(4096 * Ganho) Volts
--

Exemplo: (Unipolar, Ganho 1)

Binário	Nível	Tensão
0000.0000.0000	0	0 (V)
1000.1101.0111	2263	5,5249 (V)
1111.1111.1111	4096	10,0000 (V)

R.I

Rotina ColetaDados

```

=====
Procedure ColetaDados;
Begin
  repeat
    tconv [K,I] :=(leconv (I) * 20.0 /(4096));
    tconv [K,I] := tconv [K,I] * 10;
    write(tconv [K,I] :10 :4);
    write(1st,tconv [K,I] :10 :4);
    if I > Ncanal then
      begin
        writeln;
        write(1st);
        I := 0;
        K := K + 1;
        delay(1000);
      end;

    until K > Nconv;
  end;
=====

```

R.G

Function LeConv

```

=====
function LeConv(Cn: byte): integer;
begin
  _____ = 2 ( Pede Conversão )
  EscreveRegSecundario (SecComAD, Cn);
  repeat
    _____( End. Base + 3 )
    until (Port[CADStatus] and 1) <> 0; < A Conversão termina quando
o byte de leitura, de endereço Base + 3 obtiver um dado igual a 1.>
    LeConv:= (Port[ByteB] shl 8 + Port[ByteA]) div 16;
    < Byte A deve ser lido primeiro >
  end;
=====

```

A inicialização do programa com definições de constantes e variáveis assim como a listagem do programa principal podem ser vistos a seguir.

Program TeseDur;

PLACA CAD12/36

Programação básica da placa e leitura por polling.

Este programa está escrito na linguagem Turbo Pascal 5.0 e utiliza a placa na sua CONFIGURAÇÃO PADRÃO (vide Manual do Usuário e de Referência).[28]

Neste exemplo, a placa é lida no modo simples (não burst) pela UCP. Neste caso, o programa envia o comando de conversão e espera seu término.

Uses Dos.

Crt,

Declaração de Constantes

Const

EndBase = \$380; (Endereço base da placa CAD12/36)

SecLimite = 0; (End. secundário da CAD12/36 - Reg. de Limite).

SecPonteiro = 1; (End. secundário da CAD12/36 - Ponteiro de Memória).

SecComAD = 2; (End. secundário da CAD12/36 - Comando Conv. A/D)

SecRM = 3; (End. secundário da CAD12/36 - Reg. de Modo).

SecMemoria = 4; (End. secundário da CAD12/36- Escrita na Memória).

SecAutoCal = 6; (End. secundário da CAD12/36 - AutoCalibração)

G1 = 7*16; (constantes para programar o ganho)

G2 = 6*16;

G5 = 5*16;

G100 = 3*16;

Bipolar = \$80; (polaridade)

Unipolar = \$00;

Nconv = 10;

Ncanal = 2; (Número do último canal)

Declaracao de Variaveis

```

=====
Var CadCtr0   : word;      ( Reg. Contador 0 da CAD12/36 )
    CadCtr1   : word;      ( Reg. Contador 1 da CAD12/36 )
    CadCtr2   : word;      ( Reg. Contador 2 da CAD12/36 )
    CadModo   : word;      ( Reg. de Modo do Timer       )
    CadStatus: word;      ( Reg. Estado da CAD12/36       )
    ByteA     : word;      ( Reg. Byte A do conversor A/D )
    ByteB     : word;      ( Reg. Byte B do conversor A/D )
    CadEnd    : word;      ( Registrador de Endereço       )
    CadDado   : word;      ( Reg. dado de escr. memória   )

```

```

    I , K : integer;
tconv: Array [0..Nconv,0..Ncanal] of real;
xnum : String[4];

```

Rotina IniciaEnderecoHardware

```

=====
Procedure IniciaEnderecoHardware;
begin
    CadCtr0   := EndBase;
    CadCtr1   := EndBase + 1;
    CadCtr2   := EndBase + 2;
    CadModo   := EndBase + 3;
    CadStatus := EndBase + 3;
    ByteA     := EndBase + 4;
    ByteB     := EndBase + 5;
    CadEnd    := EndBase + 4;
    CadDado   := EndBase + 5;
end;

```

Rotina Arquivo Em Disco

=====

PROCEDURE ARQUIVO; .

TYPE ARQ1= FILE OF REAL;

VAR

ARQ: ARQ1;

ARQT: TEXT;

MATSTR: ARRAY[1..NCONV,0..NCANAL] OF STRING[10];

NOMEARQ: STRING[20];

BEGIN

NOMEARQ:= 'A: PECA' + XNUM + '.DAT';

ASSIGN(ARQ,NOMEARQ);

REWRITE(ARQ);

FOR K := 1 TO NCONV DO

BEGIN

FOR I:= 0 TO NCANAL DO

BEGIN

STRCTCONV(K,I):10:4,MATSTR(K,I));

WRITE(ARQ,MATSTR(K,I));

END;

WRITELN(ARQ);

END;

CLOSE(ARQ);

END;

=====

Rotina Número da Peça

=====

Procedure NUMPECA;

begin

ClrScr;

WriteLn;

Write(' QUAL O NUMERO DA PECA ENSAIADA? ');

Read(xnum);

WriteLn(1st);

writeLn(1st) ' ARQ. DE DADOS OPERACAO DE DESBASTE';

writeLn(1st);

writeLn(1st), ' Iarm. Varm. Iarm. ');

E. Árvore E. Árvore Avanço

WriteLn(1st);

end;

P.P. Programa Principal

```

1- begin
2- numpeca;
3- clrscr;
4- IniciaEnderecoHardware;          ( Determina os enderecos de I/O da
                                     placa CAD12/36 )
5- EscreveRegSecundario (SecRM, 0); ( Zera Registrador de Modo da
                                     CAD12/36 )
6- AutoCalibracao;                  ( Comando de Autocalibração do
                                     Conversor A/D )
7- ProgramaMemoriaCanais;           ( Programa a memória de canais )
8- LimpaFIFO;                        ( Limpa a memória FIFO da CAD12/36 )
9- I:= 0;
10- Window(27,1,80,8);
11- GotoXY(1,2);
12- WRITELNC '          CNC0)      CNC1)      CNC2)      ');
13- WRITELNC '          PNC08)     PNC09)     PNC11)     ');
14- Writeln('          Iarm.       Varm.       Iarm.     ');
15- Writeln('          E. Árvore   E. Árvore   Avanço   ');
16- window (29,8,80,15);
17- Trigger;
18- ColetaDados;
19- Arquivo;
20- end.

```