

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

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR JOÃO EXPEDITO DE

LIMA E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM _____

Anselmo Eduardo Diniz
ORIENTADOR

**MONITORAMENTO DO CORTE DE DENTES DE ENGRENAGEM
COM FERRAMENTA HOB VIA CORRENTE ELÉTRICA
DO MOTOR DA MÁQUINA**

Autor: João Expedito de Lima

Orientador: Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MONITORAMENTO DO CORTE DE DENTES DE ENGRENAGEM
COM FERRAMENTA HOB VIA CORRENTE ELÉTRICA DO
MOTOR DA MÁQUINA**

Autor: João Expedito de Lima

Orientador: Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

Curso: Engenharia Mecânica

Unidade: Faculdade de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Materiais e Fabricação

Trabalho apresentado à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 05 maio de 1995

S.P. - Brasil

9518401



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	
	UNICAMP
	L 628m
V.	Ex.
TEMPO S.	25 957
PROC.	433,95
C	☐
D	☒
PRECO	R\$ 11,00
DATA	21/10/95
N.º CPD	

CM-00078447-6

FICHA CATALOGRAFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA CENTRAL - UNICAMP

Lima, Joao Expedito de

L628m Monitoramento de corte de dentes de engrenagem com ferramenta HOB via corrente eletrica do motor da maquina / Joao Expedito de Lima. - - Campinas, SP : [s.n.], 1995.

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz.

Dissertacao (mestrado) Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecanica.

1. Maquinas-ferramenta - Monitoramento. 2. Engrenagens.
3. Correntes eletricas. 4* Ferramenta HOB. I. Diniz, Anselmo Eduardo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecanica. III. Titulo.

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

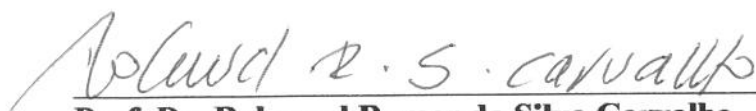
**MONITORAMENTO DO CORTE DE DENTES DE ENGRENAGEM
COM FERRAMENTA HOB VIA CORRENTE ELÉTRICA DO
MOTOR DA MÁQUINA**

Autor: João Expedito de Lima

Orientador: Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz


Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz


Prof. Dr. Sérgio Tonini Button


Prof. Dr. Roberval Rymer da Silva Carvalho


Engº Prof. Antonio Carlos dos Santos Rodrigues (Equipamentos Clark)

Dedicatória:

Dedico este trabalho a memória de minha Mãe, ao meu Pai pela força e luta, a minha esposa Solange e a minha filha Mariana pelo amor e carinho.

A Deus pela presença constante.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, pela sua força como orientador e amigo

Ao Eng. Antonio Carlos dos Santos Rodrigues (Gerente do Departamento Power Shift) pela oportunidade de desenvolvimento desse trabalho dentro da empresa Equipamentos Clark Ltda. de Valinhos.

Ao Eng. Júlio Cesar Lataro e demais companheiros da empresa (Equipamentos Clark Ltda.) pelo auxílio no dia a dia durante os ensaios.

Ao Eng. Niederauer da UNICAMP, pela colaboração

Aos alunos, professores e funcionários do DEF pela amizade e colaboração dispensadas no dia a dia.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO.....	02
1.1 Porque Monitorar?.....	02

CAPÍTULO 2

MONITORAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM.....	05
2.1 Alguns Métodos de Monitoramento Direto do Processo de Usinagem	07
2.1.1 Óptico.....	07
2.1.2 Radioatividade.....	07
2.1.3 Resistência Elétrica na Junção Peça/Ferramenta.....	08
2.1.4 Distância Ferramenta/Peça.....	08
2.1.5 Dimensão da Peça Usinada.....	09
2.2 Componentes Básicos de um Sistema Indireto de Monitoramento e Controle de Processo.....	09
2.3 Alguns Métodos Indiretos de Monitoramento de Desgaste e Quebra da Ferramenta.....	11
2.3.1 Método da Força de Usinagem.....	11
2.3.2 Método da Emissão Acústica.....	13
2.3.3 Método da Vibração.....	14
2.3.4 Método da Temperatura de Corte.....	16
2.4 Monitoramento Via Parâmetros Elétricos do Motor da Máquina-Ferramenta	16
2.4.1 Motores Elétricos.....	16
2.4.1.1 Motores Elétricos de Corrente Alternada (CA).....	17
2.4.1.2 Motores de Corrente Contínua (CC).....	18
2.4.1.3 Motores CA com Variação Contínua de Rotação.....	20
2.4.2 Os Parâmetros Elétricos e os Desgastes da Ferramenta.....	21

CAPÍTULO 3

O CORTE DE DENTES DE ENGRENAGENS.....	25
3.1 Engrenagens.....	25
3.2 Método de Fabricação de Engrenagens.....	27
3.2.1 Corte de Engrenagens com Cortadores HOB.....	28
3.2.2 Corte de Engrenagens com Cortador Shaper.....	31
3.2.3 Acabamento das Engrenagens.....	33
3.3 Desgaste e Vida do Cortadores HOB.....	34
3.3.1 Desgaste da Ferramenta.....	34
3.3.1.1 Desgaste e Avarias que Sofrem os Cortadores HOB.....	37

CAPÍTULO 4

MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	41
4.1 Desenvolvimento dos Ensaios e Critério de Fim de Vida.....	45
4.2 Aquisição de Dados.....	46
4.3 Experimentos Realizados na Máquina Convencional (PA 300).....	48
4.3.1 Máquina, Material e Ferramentas.....	49
4.3.2 Desenvolvimento dos Ensaios.....	51
4.4 Experimentos Realizados na Máquina CNC (PE 300).....	55
4.4.1 Máquina, Material e Ferramentas.....	58
4.4.2 Desenvolvimento dos Ensaios.....	59

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
5.1 Ensaios Realizados na Máquina Convencional (PA 300).....	60
5.2 Ensaios Realizados na Máquina CNC (PE 300).....	65
5.2.1 Análise do Sinal de Acionamento.....	69
5.2.2 Análise do Sinal Proveniente do Sensor de Efeito Hall.....	72

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES.....	73
-----------------	----

CAPÍTULO 7

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
BIBLIOGRAFIA.....	76

RESUMO

LIMA, J. E., Monitoramento do Corte de Dentes de Engrenagem com Ferramenta HOB Via Corrente Elétrica do Motor da Máquina, 80 p., Tese de (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas 1995.

Este trabalho trata do monitoramento da corrente elétrica do motor da máquina-ferramenta à nível de chão de fábrica, aplicado no corte de dentes de engrenagem com cortador HOB, com objetivo de verificar a existência ou não de alguma relação entre o desgaste do cortador e a corrente consumida pelo motor da máquina. Havendo essa relação estudar a viabilidade de se determinar o momento de troca do cortador a partir de análise dos parâmetros elétricos.

Esse trabalho foi dividido em duas etapas:

-) Monitoramento de uma máquina cortadora de engrenagem convencional.
-) Monitoramento de uma máquina cortadora de engrenagem CNC.

Os resultados provaram que a corrente elétrica é um bom parâmetro no auxílio da determinação do momento de fim da vida da ferramenta, principalmente quando a máquina CNC é usada.

Abstract

LIMA, J. E., Monitoring the Gear Cutting with HOB tool Through Electrical Current of the Machine, 80 p., Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas 1995.

This work is about the monitoring of the electrical current of the machine tool motor in production floor, used in cutting of gear teeth with HOB tools, aiming to verify the relationship between the cutter wear and electrical current. Based on this, the purpose is to check the feasibility of determining the moment to replace the tool using the value of the motor electrical current.

This work was carried out in two different machines:

-) Convencional gear cutting machine tool.
-) CNC gear cutting machine tool.

The results proved that the electrical current is a good parameter to help the determination of the moment of the end of tool life, mainly when the CNC machine is used.

Lista de Figuras

2.1 - Componentes básicos de um sistema de monitoramento	10
2.2 - Esquema de um motor de corrente alternada [CA]	18
2.3 - Curva de corrente de rotação do motor elétrico com excitação independente	19
2.4 - Esquema de um motor de corrente contínua	20
2.5 - Motores CA com variação contínua de rotação	20
2.6 - Níveis de corrente para máquina em vazio, ferramenta nova, corte intermediário, e a quebra da ferramenta	23
3.1.a - Esquema de pares de engrenagens de dentes retos	26
3.1.b - Esquema de pares de engrenagens de dentes helicoidais	26
3.2 - Par de engrenagens cônica de dentes retos	26
3.3 - Par de engrenagem hipoidais	27
3.4.a - Ferramenta HOB	29
3.4.b - Movimentos HOB x peça (HOB-SHIFT)	29
3.5 - Cortes progressivos realizados pela ferramenta HOB	30
3.6 - Cortador de engrenagem tipo Fellows	31
3.7 - Esquema de funcionamento de uma máquina cortadora de engrenagem tipo Fellows	32
3.8 - Ferramenta de acabamento Shaving	33
3.9 - Cortador HOB maciço	36
3.10 - Cortador HOB montado	37
3.11 - Desgastes da ferramenta HOB	38
3.12 - Dente avariado condena toda a faixa de dentes A que ele pertence	39
3.13 - Sistema de afiação do cortador HOB	40
4.1 - Montagem das peças para o corte	43
4.2 - Comportamento da corrente (usinando e inoperante)	44
4.3 - Comportamento do desvio padrão (usinando e inoperante)	44
4.4 - Circuito do sensor de efeito Hall	47
4.5 - Desenho esquemático da montagem experimental	48

4.6 - Filtro de frequência passa baixa 10 Hz (Pfauter PA300)	49
4.7 - Máquina cortadora de engrenagem (sistema de sincronismo ou indexação)	49
4.8 - Desenho esquemático do sistema de aquisição de dados	55
4.9 - Esquema do filtro passa baixa 10 Hz (Pfauter PE300)	57
5.1 - (Ensaio1) - Corrente do motor principal x número de peças (máq. convencional)	60
5.2 - (Ensaio2) - Corrente do motor principal x número de peças (máq. convencional)	61
5.3 - (Ensaio3) - Corrente do motor principal x número de peças (máq. convencional)	61
5.4 - (Ensaio4) - Corrente do motor principal x número de peças (máq. convencional)	62
5.5 - (Ensaio5) - Corrente do motor principal x número de peças (máq. convencional)	62
5.6 - (Ensaio6) - Corrente do motor principal x número de peças (máq. convencional)	63
5.7 - (Ensaio1) - Sinal do acionamento x número de peças (máquina CNC)	66
5.8 - (Ensaio2) - Sinal do acionamento x número de peças (máquina CNC)	66
5.9 - (Ensaio3) - Sinal do acionamento x número de peças (máquina CNC)	67
5.10 - (Ensaio1) - Sinal do sensor de efeito Hall x número de peças (máquina CNC)	67
5.11 - (Ensaio2) - Sinal do sensor de efeito Hall x número de peças (máquina CNC)	68
5.12 - (Ensaio3) - Sinal do sensor de efeito Hall x número de peças (máquina CNC)	68

Lista de Tabelas

2.1 - Árvore da família de motores elétricos	17
--	----

Lista de símbolos e de siglas utilizadas.

A/D	Analógico Digital
a_p	Largura de Usinagem [mm] (NB 6162)
b	Largura de Corte
C	Capacitância
CA	Corrente Alternada
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
CC	Corrente Contínua
D	Diâmetro da Peça
DP	Desvio Padrão da Amostra
EA	Emissão Acústica
f	Avanço [mm/volta]
F_c	Força Principal de Corte
h	Espessura de Corte
IA	Valor Médio Quadrático da Corrente
K_t	Desgaste de Cratera
K₁, K₂, F₀	Constantes
l_c	Comprimento de Corte [mm]
n	Rotação
η	Rendimento
RMS	Raiz Quadrada da Média
t	Tempo
T_o	Torque
v_c	Velocidade de Corte [m/min]
V/A	Volts/Ampere
VB	Desgaste de Flanco [mm]
W	Potência Útil
W_{el}	Potência Elétrica
W_{mec}	Potência Mecânica

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1) Porque Monitorar?

O processo de evolução da indústria atualmente tende para uma modernização dos métodos de produção, tecnologia e produtividade, com uso intensivo da automação.

A visão de competitividade a nível mundial faz com que os produtos precisem ter qualidade e baixo custo, para terem condições de competir no mercado, partindo para novos rumos, novas visões e sistemas produtivos, fazendo com que o refugio seja uma coisa ultrapassada.

Dada toda essa evolução tecnológica e a necessidade de produtos de baixo custo e com qualidade, o monitoramento do processo de usinagem, mais especificamente o monitoramento visando estabelecer automaticamente o momento de troca da ferramenta em tempo real, se torna um aspecto muito importante a ser estudado, dando condições ideais para a troca da ferramenta e consequentemente um melhor aproveitamento da mesma, evitando danos à ferramenta, peça e máquina-ferramenta [4,5,7].

Ferramentas com alto custo, (principalmente as com novos materiais como CBN, pastilhas com cobertura de diamante, etc) e o desenvolvimento de novas máquinas C.N.C., tendem a minimizar a participação do homem no processo e demandam um método mais adequado e eficiente para a troca da ferramenta.

O objetivo principal é atingir um estágio de manufatura totalmente automatizada, controlando o processo através dos Controles Adaptativos [12]. Tais sistemas quando aplicados à usinagem, visam não somente substituir a ferramenta automaticamente, mas também adaptar o processo às condições que foram julgadas melhores.

Um sistema de controle adaptativo pode ser:

- (ACC) Controle Adaptativo por Restrição, que tem por objetivo o aumento da produtividade através da medição em processo, isto é, pela utilização de restrições do processo e da máquina-ferramenta, tais como torque, avanço, potência, rugosidade superficial da peça, para um melhor aproveitamento da máquina-ferramenta e obtenção de uma boa qualidade na peça.

- (ACO) Controle Adaptativo Otimizado que é um sistema de controle no qual a produtividade ótima da máquina-ferramenta é obtida através da medição em processo e ajuste dos parâmetros em operação, com a finalidade de se obter mínimos custos ou tempos de fabricação.

Dentro dessa visão, o objetivo desse trabalho é estudar a viabilidade de se monitorar o desgaste da ferramenta de corte de engrenagens do tipo caracol (cortador HOB de engrenagens), em condições de chão de fábrica, monitorando-se os parâmetros elétricos do motor da máquina-ferramenta (mais especificamente correntes elétricas) e verificando a existência ou não de alguma relação entre o desgaste da ferramenta e tais parâmetros.

Esse processo de usinagem foi escolhido devido ao alto custo de sua ferramenta. É fundamental que ferramentas caras sejam utilizadas de uma maneira otimizada.

Este trabalho foi dividido em duas etapas:

Na primeira etapa foi monitorado a corrente elétrica de um motor de C.C. (corrente contínua) de uma máquina cortadora de engrenagens convencional, na qual existe um motor que chamamos de principal, o qual está indexado às principais funções da máquina, ou seja a movimentação da ferramenta Hob e o sincronismo ferramenta x peça

Na segunda etapa o sistema de medição da corrente do motor foi colocado em uma máquina cortadora de engrenagens C.N.C. e foram monitorados dois canais, o canal (0) sinal de acionamento do C.N.C. e o canal (3) corrente de alimentação do motor C.A. (corrente alternada), exclusivo para a movimentação do cortador HOB.

O monitoramento dos parâmetros elétricos foi escolhido pois as máquinas encontram-se no processo produtivo e os sensores foram instalados numa região não agressiva do processo de corte, proporcionando uma fácil instalação, não sendo intrusivos, sendo barato, de fácil manipulação e não atrapalhando o andamento produção, que não pode ser incomodada por nenhum sensor que seja colocado perto da região de corte.

Este trabalho está dividido em sete capítulos, quais sejam:

Capítulo 1 - Introdução

Capítulo 2 - Monitoramento do Processo de Usinagem

Capítulo 3 - O Corte de Dentes de Engrenagem

Capítulo 4 - Materiais, Equipamentos e Procedimentos Experimentais

Capítulo 5 - Resultados e Discussões

Capítulo 6 - Conclusões

Capítulo 7 - Sugestões para Trabalhos Futuros.

CAPÍTULO 2

MONITORAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM

No processo de usinagem, uma das grandes dificuldades é se determinar o momento exato de afiação ou troca da ferramenta. Geralmente a decisão do momento dessa troca é feita pelo operador, que a faz com critérios subjetivos, com isso deixando a dúvida se a troca foi feita corretamente. A troca de ferramenta antes ou depois do momento ideal implica em perdas com relação a custos, tempo ou qualidade.

Com o aumento da tecnologia das máquinas-ferramentas, a troca automática das ferramentas passou a fazer parte integrante do processo produtivo [4]. Ferramentas caras requerem um sistema lógico de tomada de decisão, principalmente do momento de troca da ferramenta.

Um sistema de monitoramento e controle acompanha um processo produtivo (usinagem) em tempo real, com o objetivo de se obter um sistema mais flexível e com menos paradas e com uma utilização mais lógica da ferramenta[38].

Os sistemas de monitoramento automático do processo classificam-se em 2 categorias:

-) Sistema de monitoramento direto - consiste na medição do parâmetro desejado. É executado diretamente sobre a peça ou a ferramenta ou a interface dos dois, sendo que nesse tipo de monitoramento o processo de usinagem necessita ser interrompido para se processar o sensoramento

A medição é executada diretamente sobre a grandeza a ser monitorada e não sofre interferência de outros parâmetros. Basicamente são monitoramentos do tipo óptico do desgaste da ferramenta, grandezas do processo ou da distância ferramenta/peça.

-) Sistema de monitoramento indireto - é o monitoramento cuja medição é feita por meio de outro parâmetro envolvido no processo em tempo real, que pode ser correlacionado com o parâmetro que se deseja realmente medir.

Quando se monitora o desgaste de uma ferramenta visando estabelecer o fim de vida da ferramenta, tem-se o problema que em geral não somente o desgaste da ferramenta influencia o parâmetro monitorado (no caso do monitoramento indireto), mas diversos outros fatores como: velocidade de corte, largura de usinagem, avanço e material da ferramenta ou da peça [16]. Os principais métodos indiretos de monitoramento são: parâmetros elétricos do motor da máquina, temperatura, vibração, emissão acústica e força.

Os sistemas de monitoramento necessitam das seguintes características para sua utilização no chão de fábrica.

-) Confiabilidade
-) Não serem intrusivos
-) Serem econômicos
-) O parâmetro medido não deve ser influenciado por outros fatores como ruídos, vibração, variação de parâmetros.

Um dos fatores importantes para se monitorar além do desgaste é o monitoramento do momento de quebra da ferramenta, pois uma detecção momentos antes da quebra da ferramenta pode evitá-la e assim evitar danos à pastilha, ao porta-ferramenta, à peça e à máquina-ferramenta.

2.1) Alguns Métodos de Monitoramento Direto do Processo de Usinagem.

2.1.1) Óptico:

Pode se dizer que uma ferramenta gasta reflete mais luz que uma ferramenta nova. Dentre os vários métodos de monitoramento ópticos pode-se destacar aquele em que a zona de desgaste é iluminada utilizando-se um feixe de laser, visualizada por uma câmera e então analisada [17]. Esse método pode ser utilizado para outros tipos de desgastes, além do desgaste de flanco. Esse processo não pode ser realizado em tempo real, pois o processo tem que ser interrompido para que a câmera possa "enxergar" a ferramenta.

2.1.2) Radioatividade

Sensores radioativos podem ser utilizados para se medir volume de material desgastado. Esse método consiste em analisar partículas radioativas que são colocadas na ferramenta. A medida que a ferramenta vai se desgastando, essas partículas são extraídas da ferramenta e transportados junto com os cavacos para fora da zona de usinagem [20,21], resultando num decaimento radioativo na zona de usinagem, que pode ser medida através de técnicas convenientes.

Sua aplicação é bem restrita pois a radioatividade apresenta riscos para o operador e para o ambiente.

2.1.3) Resistência Elétrica na Junção Peça/Ferramenta

A área de contato entre a peça e a ferramenta tende a aumentar com o aumento do desgaste da ferramenta e assim a resistência à passagem de corrente elétrica diminui [15]. Para se detectar este fenômeno coloca-se uma película fina condutora de eletricidade junto ao flanco da ferramenta. A medida que a ferramenta se desgasta, a resistência à passagem de corrente através dessa película diminui.

A diferença da medida inicial com a medida instantânea é então relacionada ao desgaste. Apesar de aparente facilidade de aplicação e lógica do relacionamento entre as duas grandezas, existe complicações como temperatura e força de usinagem que mascaram os resultados.

2.1.4) Distância Ferramenta/Peça

A medida que a ferramenta se desgasta a distância entre um ponto fixo da ferramenta e a peça usinada diminui, devido ao crescimento da dimensão da peça causada pelo desgaste (usinagem externa). Essa medida pode ser feita através de um micrômetro eletrônico [25], que mede constantemente a distância entre a posição fixa da ferramenta e a peça.

Neste tipo de monitoramento a dificuldade está em se controlar alguns fenômenos que acontecem como expansão térmica da ferramenta, irregularidades na superfície usinada, vibração entre peça e ferramenta e a falta de precisão da máquina ferramenta

2.1.5) Dimensão da Peça Usinada

Esse tipo de monitoramento consiste em um sensoramento da medida da dimensão da peça, feito através de apalpadores, através de feixes laser [4,19] ou sensores eletromagnéticos [22], que fazem a medição da peça. Esse processo tem como objetivo verificar o desgaste da ferramenta que será percebido nas dimensões da peça conforme o desgaste for acontecendo, mas não consegue prevenir uma quebra súbita da ferramenta.

2.2) Componentes Básicos de um Sistema Indireto de Monitoramento e Controle de Processo.

Geralmente o desgaste e a quebra da ferramenta podem ser monitorados de maneira indireta, medindo-se um outro parâmetro em tempo real (força, emissão acústica, parâmetros elétricos, etc.) e relacionando-se esse parâmetro com o desgaste ou quebra da ferramenta.

Esse processo de monitoramento traz alguns inconvenientes, pois os parâmetros medidos indiretamente, na maioria das vezes, são influenciados não somente pelo desgaste e quebra da ferramenta mas por alguns fatores como: condições de usinagem, geometria da ferramenta, dureza da peça, condições da máquina-ferramenta, etc. Porém apresentam a grande vantagem de poderem monitorar e controlar o processo em tempo real. Isto faz com que os métodos indiretos sejam preferidos aos métodos diretos de monitoramento.

Os componentes básicos de um sistema de monitoramento estão mostrados na figura 2.1 [8].

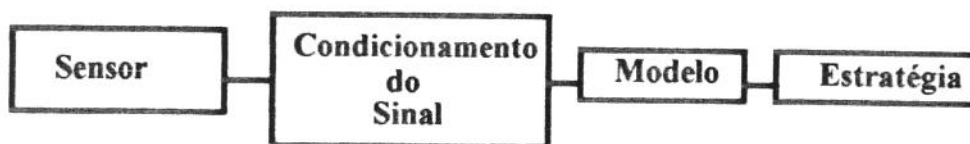


Figura 2.1 - Componentes básicos de um sistema de monitoramento [8].

Seus principais elementos são:

Sensor - é o elemento que realiza a medição do parâmetro desejado e o transforma em sinal elétrico.

As características de um sensor devem ser:

-) Não influenciar as propriedades da máquina-ferramenta
-) Não ter nenhuma influência no processo
-) Ser de fácil operação
-) Baixo Custo
-) Suportar o ambiente fabril

Os sensores podem ser: ópticos, elétricos, mecânicos, radioativos, piezoelétricos, etc.

Condicionamento do sinal - Os sinais elétricos de saída do sensor devem ser amplificados, filtrados, convertidos de analógico para digital e armazenados na memória do computador, para uma posterior análise ou para controle do processo. Esta análise pode ser feita tanto no domínio do tempo, com a finalidade de verificar o comportamento deste sinal ao longo do tempo através de parâmetros estatísticos como média, valor médio quadrático (RMS), desvio padrão, ou no domínio da frequência, através de análise espectral, onde se verifica as melhores faixas de frequência para análise do sinal [8].

Modelos - São funções matemáticas que correlacionam o parâmetro medido com o parâmetro que se quer monitorar. São de grande importância para relacionar os diversos parâmetros de corte com o parâmetro medido e com critério de fim de vida da ferramenta, no caso de sistemas que visem o estabelecimento do fim de vida da ferramenta [8].

Estratégia - A partir de informações obtidas com o monitoramento, pode-se detectar alguma falha no processo, como por exemplo desgaste ou quebra da ferramenta, sendo que o sistema pode tomar as seguintes decisões [8]:

-) Indicar alguma informação em vídeo.
-) Ativar um alarme
-) Diagnosticar o problema e sugerir solução
-) Utilização do Controle Adaptativo - o sistema adapta o processo às novas condições.
-) Parada Imediata do Processo, se alguma emergência ocorrer, como a quebra da ferramenta.

2.3) Alguns Métodos Indiretos de Monitoramento de Desgaste e Quebra da Ferramenta.

2.3.1) Método da Força de Usinagem.

É o processo indireto de monitoramento a mais tempo utilizado, que tenta correlacionar as componentes de força de usinagem com os desgastes da ferramenta. As forças de corte podem ser medidas diretamente usando dinamômetros piezoelétricos, ou podem ser medidas indiretamente através da medição do torque no eixo-árvore ou dos parâmetros elétricos dos motores da máquina-ferramenta.

Dinamômetros são aparelhos que ao serem deformados, são capazes de produzir correntes ou cargas elétricas proporcionais às forças que causaram a deformação.

Um bom dinamômetro deve possuir rigidez, sensibilidade e precisão [9].

Outras características desejáveis de um dinamômetro são [13]:

-) Ausência de sensibilidade cruzada - isto é, uma força aplicada em uma dada direção não deve causar nenhuma leitura numa direção perpendicular a ela. Geralmente os dinamômetros medem duas ou três direções.
-) Calibração linear - isto é, a curva corrente ou carga de saída versus força aplicada deve ser uma reta.

Micheletti et al. [6] concluíram que o desgaste da ferramenta varia linearmente com a força de corte, apresentando um alto grau de correlação, permitindo que o processo de usinagem possa ser monitorado em tempo real.

Existem alguns trabalhos desenvolvidos nesta área, mas não existe um consenso da melhor variável para se monitorar. Lister e Barrow [31] afirmam que o melhor parâmetro para se monitorar no processo de usinagem é a força de corte principal (F_c), que cresce com o aumento do desgaste. Já Tlustý e Andrews [34] afirmam que a força principal de corte não tem qualquer relação com o desgaste da ferramenta.

Segundo Warnecke[10], durante uma quebra da ferramenta no torneamento, há uma rápida diminuição do valor da força de avanço que permanece durante aproximadamente 20ms, e quando a ferramenta (quebrada) toca novamente a peça depois de uma rotação da mesma, há um rápido crescimento da força de avanço. Através desse comportamento da força no momento da quebra, pode-se tomar ações que impeçam a quebra ou dano que a quebra proporciona ao sistema, criando um sistema de monitoramento e controle rápido para reconhecer a quebra e interromper o processo momento antes do aumento da força, ou estabelecer um limite para o valor da força o qual atingido ou ultrapassado, interrompa o processo antes da quebra.

A correlação entre o desgaste da ferramenta e a força de corte foram pesquisadas por Burmester em 1950, Muller em 1962 e Micheletti em 1966 [6]. De acordo com estes autores, a determinação das componentes da força de usinagem é uma maneira de avaliar o comportamento das ferramentas de usinagem.

Na presença somente de desgaste de flanco as componentes da força de usinagem crescem a medida que o desgaste de flanco cresce [37,40], devido ao atrito peça-ferramenta, fazendo com que a medição dos esforços de corte seja de grande valia para o monitoramento do desgaste da ferramenta. A medida que o desgaste de cratera passa a ter uma dimensão razoável, o ângulo de saída efetivo da ferramenta aumenta, diminuindo os esforços de deformação do cavaco e, com isto, compensando a contribuição do desgaste de flanco para o aumento da força, o que faz com que os valores das componentes da força se estabilizem. O crescimento dos esforços na fase final da vida da ferramenta se dá pela excessiva deformação já causada à aresta de corte.

2.3.2) Método da Emissão Acústica (E.A.).

Essa forma de monitoramento, que há muito é utilizada na ciência dos materiais para estudo de fadiga e fratura, tem se mostrado de grande utilidade em termos de pesquisas laboratoriais e em alguns estudos em chão de fábrica [32], no monitoramento da usinagem. Suas principais características são:

- Sensor simples, barato e pequeno
- Não sofre influência de ruídos externos e vibrações mecânicas, isto por captar sinais de alta frequência .
- As fontes de emissão acústica estão diretamente relacionadas com o processo de corte.

A emissão acústica pode ser definida como ondas de tensão elástica geradas como resultado da liberação rápida da energia de deformação dentro do material, resultante de um rearranjo de sua estrutura interna provocados por estímulos externos [23]. Essas ondas deslocam-se através do material tanto da peça como da ferramenta, podendo esse sinal ser captado por um sensor piezoelétrico geralmente fixado no porta-ferramenta. Após a sua captação, o sinal é amplificado, filtrado e analisado através de osciloscópio, voltímetro RMS, gravador de sinal ou analisador de frequência, e é comparado com os

valores pré-estabelecidos, possibilitando um acompanhamento da vida da ferramenta através do desgaste crescente ou quebra da ferramenta.

As fontes de geração de emissão acústica no processo de usinagem são a deformação e ruptura do cavaco, atrito cavaco-ferramenta e ferramenta-peça. A faixa de frequência do sinal gerado é bem alta (50kHz a 1 MHz).

Os sinais de emissão acústica podem ser classificados como contínuo (continuous type) ou de pico (burst type) [24].

Os sinais de tipo contínuo estão associados à deformação plástica do material da peça e do cavaco, enquanto os sinais de picos estão associados ao crescimento de trincas nos materiais, quebra do cavaco e o lascamento e quebra da ferramenta [28].

Estudos comprovam que o monitoramento via emissão acústica é mais viável para operações que retiram pouco material (acabamento) pois é um sistema de monitoramento de extrema sensibilidade [29]. O nível de amplitude do sinal de emissão acústica aumenta proporcionalmente ao desgaste de flanco, principalmente em algumas faixas de frequências

2.3.3) Método da Vibração.

Os sinais de vibração de vários processos de usinagem tem sido estudados, para sua possível aplicação em sistema de monitoramento em tempo real. A faixa de frequência para o estudo do monitoramento da vibração está entre 0 e 20000Hz, mas a maioria dos pesquisadores limitam esta faixa em 8000Hz.

Os sinais de vibração dos processos de usinagem dos metais contém informações muito úteis e apresentam boas possibilidades para a determinação dos problemas críticos de usinagem, incluindo desgaste da ferramenta.

O monitoramento da vibração da máquina-ferramenta já vem sendo utilizado com a finalidade de se determinar uma linha racional de manutenção de seus elementos estruturais. A partir disso, colocou-se a possibilidade de se realizar estudos do

monitoramento via vibração no processo da usinagem, com o objetivo de determinação do desgaste e vida da ferramenta. A grande dificuldade deste procedimento é a identificação e isolamento da faixa de frequência de vibração que realmente interessa ao processo de desgaste e quebra da ferramenta, isso porque o processo da usinagem induz a vibrações que não são pertinentes ao processo de desgaste e quebra da ferramenta.

Podemos dividir as fontes de vibrações no processo de usinagem em dois tipos [13]:

- a) Vibração forçada
- b) Vibração auto-excitada

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

A amplitude vibracional devido à vibração forçada pode ser reduzida por [35]:

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

Dentre os fatores que geram a vibração forçada podemos citar:

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

Vibração auto-excitada acontece quando mais energia é absorvida do que desprendida durante um ciclo simples. Para induzir essa vibração basta apenas a ferramenta se chocar ou encontrar uma pequena incrustação dura do material. Outros

fatores responsáveis pela vibração auto-excitada, são o atrito peça-ferramenta e ferramenta-cavaco e a própria formação de cavaco.

Como se pode ver a partir das definições dos dois tipos de vibração, aquela que interessa ao monitoramento do processo de desgaste da ferramenta é a vibração auto-excitada, na qual está contida toda a vibração originária do contato ferramenta-peça.

Para o estudo da vibração é importante que se conheça a influência das condições de usinagem e do processo na estabilidade do sistema, a fim de que se utilize métodos de condicionamento de sinais que filtrem estas influências. É importante que se conheça a influência do desgaste na vibração, mas também é importante conhecer a influência dos parâmetros citados acima, pois a variação de alguns desses fatores pode mascarar os resultados.

2.3.4) Método da Temperatura de Corte.

A temperatura de corte na interface peça-ferramenta pode ser sensoreada indiretamente com a utilização de termopares. Solaja e Vukelja (1983) e Colwell (1975), [4] encontraram uma correlação entre o desgaste da ferramenta e o campo de variação da temperatura. Modelos teóricos também tem sido desenvolvidos com a finalidade de prever o crescimento da temperatura na interface ferramenta-peça devido ao desgaste.

2.4) Monitoramento Via Parâmetros Elétricos do Motor da Máquina-Ferramenta.

2.4.1) Motores Elétricos.

O acionamento de máquinas e equipamentos mecânicos feitos por motores elétricos é um assunto de suma importância econômica dentro da indústria [41]. Sendo assim sua seleção e utilização são aspectos importantes de se conhecer e aplicar.

Os motores podem ser de corrente contínua (C.C.) ou de corrente alternada (C.A.).
A tabela 2.1 mostra a classificação destes tipos de motores.[41]

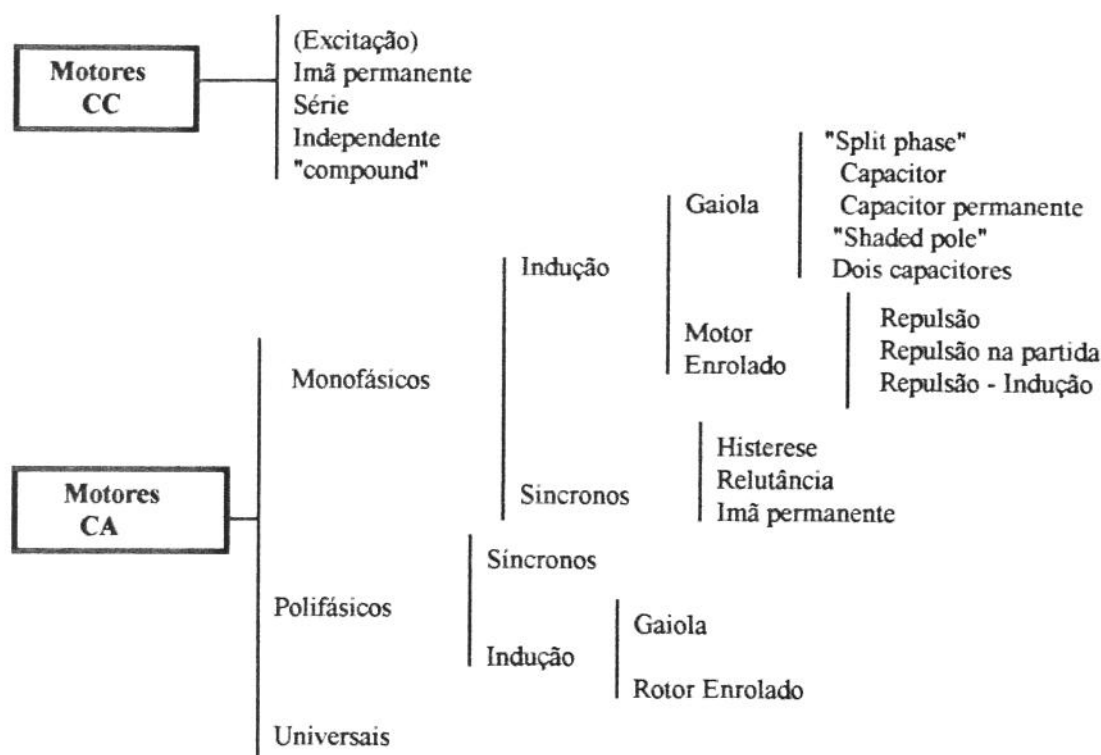


Tabela 2.1 - Árvore da família de motores elétricos (41)

2.4.1.1) Motores Elétricos de Corrente Alternada (CA)

São motores de baixo custo de aquisição e manutenção e largamente utilizados, que possuem uma rotação fixa. Geralmente esses motores são monofásicos ou trifásicos.

- Monofásicos - geralmente são de uso doméstico, possuindo pequenas potências.
- Trifásicos - são bastante utilizados na indústria (tornos convencionais, furadeiras), sendo que a mudança de rotação do eixo da máquina é feita através da troca de polias ou engrenagens de um redutor conectado ao eixo de saída do motor (conforme mostra o esquema da figura 2.2), já que o motor gira somente em uma rotação.

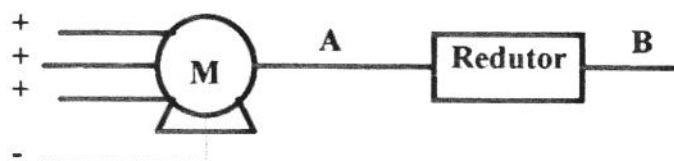


Figura 2.2 - Esquema de um motor trifásico de corrente alternada [41].

No ponto **A** da figura tem-se a rotação fixa. Essa rotação depende da frequência da rede em que está instalado e obviamente da capacidade do motor. Geralmente a frequência é de 60Hz. No ponto **B** a rotação é variada através da variação da redução

2.4.1.2) Motores de Corrente Contínua (CC)

Uma característica muito importante dos motores de corrente contínua quando aplicados em máquinas-ferramenta é a possibilidade de variação contínua da rotação, o que possibilita a obtenção de velocidade de corte constante, mesmo quando o diâmetro usinado varia.

Motores elétricos de corrente contínua com excitação independente de campo e de armadura, possuem duas faixas distintas de variação de rotação [14,41]. O controle da velocidade de rotação de seus eixos pode ser obtido pela variação da tensão de armadura e/ou pela variação da corrente de campo (excitação), conforme mostra a figura 2.3.

A velocidade do motor é proporcional à variação linear da tensão de armadura, mantendo a corrente de campo com seu valor nominal, até que se atinja uma rotação limite chamada rotação base (figura 2.3). Nesta faixa de rotação, o motor fornece potência linearmente proporcional à rotação da máquina.

Para rotações acima da rotação base, o controle de rotação é feito pela variação da corrente de campo ou de excitação, mantendo-se constante a tensão nominal da armadura e, conseqüentemente, a potência elétrica até o limite da rotação do motor.

Em máquinas-ferramentas, para que se evite que os resultados do monitoramento do desgaste da ferramenta via parâmetros elétricos sejam mascarados por uma variação

destinada a variar a rotação da máquina, necessita-se a priori saber quais são os valores destes parâmetros para cada rotação utilizada quando a máquina roda em vazio (sem corte), a fim de que, descontados estes, possa-se ter os valores de corrente e tensão realmente destinados ao corte.

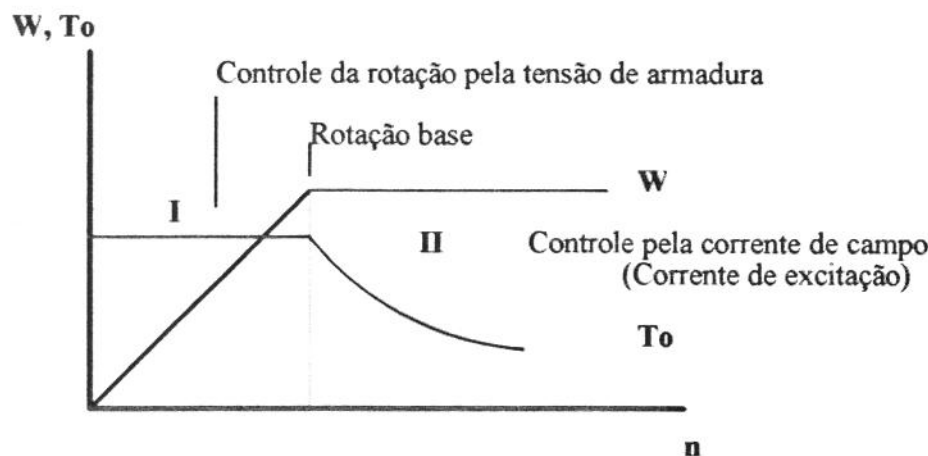


Figura 2.3 - Curva de controle de rotação do motor elétrico com excitação independente [14].

Pode se ver na figura 2.3 [14] que na região (I) o aumento da rotação é proporcional ao aumento da tensão de armadura até a rotação base. A partir desta a tensão de armadura permanece constante e a variação da rotação é feita pela variação da corrente de campo ou corrente de excitação. Quando a corrente de campo (ou de excitação) tende a zero, a rotação tende a infinito.

A flexibilidade que pode ser obtida dos motores de corrente contínua, com seus vários tipos de excitações, associadas à relativa simplicidade dos modernos conversores de corrente contínua, acaba por determinar uma decisiva vantagem destes motores sobre as máquinas de corrente alternada, sempre que altos conjugados ou ampla variação de velocidades são desejáveis. Entretanto, algumas desvantagens devem ser apontadas.

Para uma mesma potência, os motores de corrente contínua são maiores e mais caros que os motores CA de indução e, devido à presença do comutador, existe uma necessidade de manutenção frequente.

A figura 2.4 mostra um esquema de um motor de corrente contínua com a presença de um tacogerador que acompanha a rotação do eixo. Quando existe alguma interferência (no caso desgaste ou quebra da ferramenta), impedindo que o eixo gire na rotação constante, o tacogerador comanda o acionamento do motor que imediatamente aumenta a corrente e consequentemente aumenta novamente a rotação mantendo-a constante, como programada.

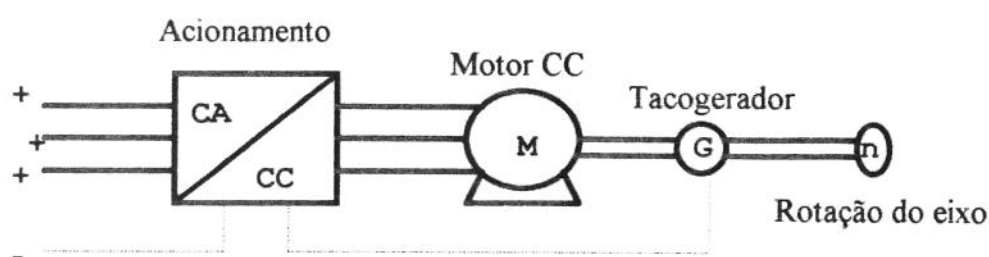


Figura 2.4 - Esquema de um motor de corrente contínua

2.4.1.3) Motores CA com variação contínua de rotação.

Devido aos motores de corrente contínua usados em larga escala nas máquinas C.N.C. serem de alto custo de aquisição [41], manutenções frequente e caras, nos últimos anos a maioria destas máquinas está utilizando motores de corrente alternada (CA) com variação contínua da rotação, que é realizada através da variação da frequência, como mostra a figura 2.5.

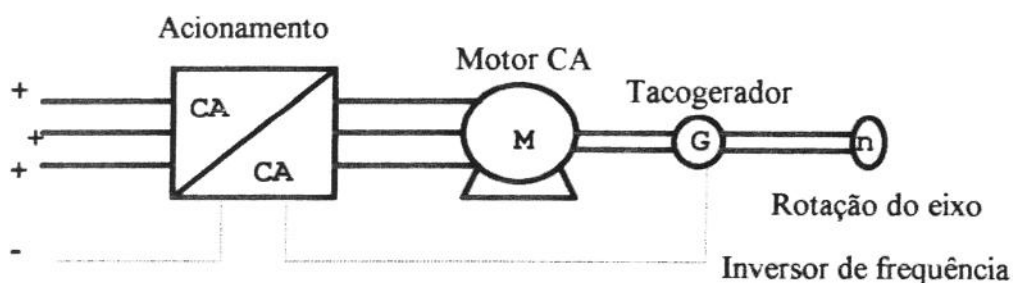


Figura 2.5 - Motores CA com variação contínua de rotação.

O princípio de funcionamento é semelhante ao motor de corrente contínua. O tacogerador, percebendo a necessidade de aumento da rotação, aciona o inversor de frequência que aumenta a frequência, o que gera um aumento da rotação do motor, numa faixa que depende de sua capacidade.

2.4.2) Os Parâmetros Elétricos e os Desgastes da Ferramenta

O monitoramento via parâmetros elétricos é um processo de monitoramento no qual sensoreia-se a corrente elétrica e/ou a tensão do motor de acionamento da máquina-ferramenta, com o objetivo de correlacionar o desgaste da ferramenta com a variação de tais parâmetros, a fim de reconhecer o momento de quebra ou de troca da ferramenta.

A potência ou corrente elétrica consumidas pelos motores de acionamento da máquina-ferramenta, são proporcionais à potência mecânica consumida pelo processo.

Pode-se dizer que medir parâmetros elétricos é medir indiretamente os esforços de corte [9, 27]. Tem-se que:

$$W_{el} = W_{mec.} / \eta$$

$$R.I^2 = K_s.b.h.v_c / \eta$$

Onde:

W_{el} = Potência Elétrica

b = Largura de Corte

W_{mec} = Potência Mecânica

h = Espessura de Corte

R = Resistência Elétrica

v_c = Velocidade de Corte

I = Corrente Elétrica

η = Rendimento da Máquina Operatriz

K_s = Força Principal de Corte/Unidade de área

Mantendo-se constantes **b**, **h**, **η** e **v_c**, tem-se que **RI²** (parâmetros elétricos) é proporcional à força de corte/unidade de área.

O monitoramento via parâmetros elétricos, devido à sua simplicidade, baixo custo e não intrusividade, já tem várias aplicações industriais como por exemplo: sistema de monitoramento e controle do torque pela Cincinnati Milacron e controle adaptativo do avanço pela Mazak, ambos com controle adaptativo com restrição da potência de corte [22].

Dan [39] desenvolveu o modelo matemático mostrado a seguir, que correlaciona a corrente elétrica do motor principal com o desgaste de flanco da ferramenta.

$$I_A = K_2 (K_1 (V_B) F_o) * D/2$$

Onde:

I_A = Valor Médio Quadrático da Corrente.

D = Diâmetro da Peça

V_B = Desgaste na Superfície de Folga da Ferramenta.

K_1, K_2 e F_o = Constantes

No ensaio proposto por Dan [39], o sinal de corrente foi amplificado e retificado, sendo que o critério de fim de vida foi estabelecido quando o nível de corrente ultrapassava um valor pré-estabelecido através de ensaios.

Dan [39] e alguns pesquisadores [14,42], concluíram que a sensibilidade da corrente elétrica ao crescimento dos desgastes não é tão boa quanto a de outros sistemas de monitoramento de desgaste da ferramenta, mas é muito boa quanto à sensibilidade à quebra, sendo um bom parâmetro para ser usado no torneamento de desbaste.

Stein J.L. e Shin K.C.[14] apresentaram um trabalho sobre monitoramento da corrente elétrica de campo controlado de máquinas com motor CC. A variação da corrente mostrou-se sensível à variação do torque e consequentemente ao desgaste e quebra da ferramenta. Eles verificaram que a variação da corrente de armadura é proporcional a variação de torque do eixo-árvore e consequentemente da força de usinagem na operação de torneamento.

Mannam M. A. et. al. [27] desenvolveram um trabalho verificando a variação tanto da corrente como da potência elétrica do motor com relação ao desgaste, quebra e vibração da ferramenta. Alguns de seus resultados estão mostrados na figura 2.6 [27] que apresenta diversos níveis de corrente para diferentes estágios de desgaste da ferramenta. Nota-se que a diferença entre os valores de corrente para o corte com uma ferramenta afiada e um corte intermediário não é muito grande, mas a diferença entre os valores para o corte intermediário e o momento de quebra é bem notável. Sendo assim, pode-se definir um valor de corrente pouco abaixo do valor onde ocorre a quebra da ferramenta com consequente ganho de custo e tempo.

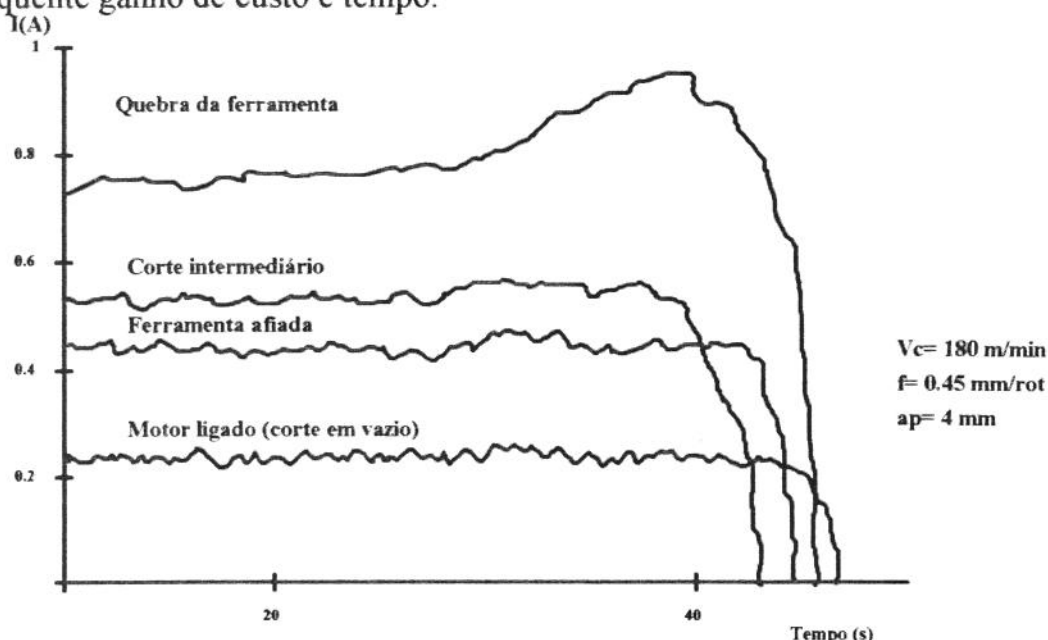


Figura 2.6 - Níveis de corrente para a máquina em vazio, ferramenta nova, corte intermediário e a quebra da ferramenta.[27].

Pode-se destacar também o trabalho de monitoramento via parâmetros elétricos em torneamento realizado por Braga [43], que procurou relacionar o desgaste da ferramenta (pastilha de metal duro sem cobertura) com os parâmetros elétricos do motor da máquina-ferramenta (corrente de armadura do motor principal - tensão do motor principal - corrente do servo motor de avanço), em um torno CNC de 30 HP de potência com motor CC. Ele concluiu que :

- A corrente de armadura do motor principal mostrou-se confiável para se estabelecer o fim de vida da ferramenta para operações de torneamento em desbaste, pois a preocupação com o acabamento e a tolerância não existe e sim a preocupação com a quebra da ferramenta e isso pode ser facilmente detectado por esse parâmetro.

- O acompanhamento dos valores dos parâmetros elétricos da máquina-ferramenta pode ser feito em tempo real de uma maneira muito simples e barata e por isso a sua utilização em um sistema de controle automático do processo é bastante viável.

- O crescimento dos valores de corrente com o aumento do desgaste de flanco (ou do comprimento de corte) é mais sensível para altos valores de avanço e velocidade de corte.

CAPÍTULO 3

O CORTE DE DENTES DE ENGRENAGENS.

3.1) Engrenagens.

Pode-se dizer que a engrenagem é uma das peças mecânicas mais importantes quando se trata de transmissão de movimentos. É um elemento de máquina que transmite o movimento através dos dentes ao longo de sua periferia [3,33]. As superfícies de contato dos dentes das engrenagens são curvadas a fim de transmitir o movimento enquanto rodam entre si.

As engrenagens atualmente, na sua maioria, possuem dentes com perfil evolvente ou próximo deste, devido à sua simplicidade, à facilidade de reprodução do movimento e porque permite variações nas distâncias entre centros das engrenagens conjugadas. Os dentes de uma engrenagem são padronizados a fim de se obter engrenamento entre si.

Engrenagens cilíndricas retas (figura 3.1a) [33] são mais fáceis e econômicas para fabricar e são montadas em eixos paralelos entre si.

A engrenagem helicoidal (figura 3.1b) [33] possui dentes ao longo da hélice num cilindro, são mais caras que as cilíndricas retas, porém são mais resistentes e mais silenciosas, pois os dentes engrenam gradualmente e mais dentes se engrenam ao mesmo tempo. Elas podem ser montadas em eixos paralelos ou não.



Figura 3.1 - Esquema de pares de engrenagens retas (a) e helicoidais (b) [33].

As engrenagens cônicas operam em eixos que apresentam entre si qualquer ângulo que for necessário, embora seja mais comum o ângulo reto. A engrenagem cônica de dentes retos (figura 3.2) [33] é a mais comum, mas existem também as de dentes curvos. Existem outros tipos de engrenagem cônica como a engrenagem cônica espiral.

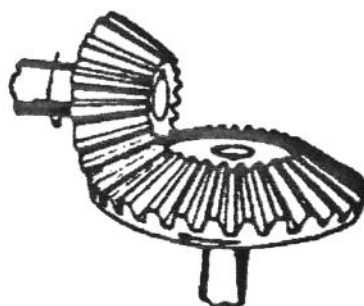


Figura 3.2 - Par de engrenagem cônica de dentes retos [33].

Engrenagens hipoidais [33] parecem engrenagens cônicas, mas seus eixos não se interceptam (figura 3.3). São silenciosas e resistentes, sendo que a aplicação mais comum é nos eixos traseiros de veículos.



Figura 3.3 - Par de engrenagens hipoidais [33].

3.2) Métodos de Fabricação de Engrenagens

As engrenagens podem ser produzidas por fundição, por moldagem, por forjamento, por corte com maçarico ou por usinagem [33,30,18]. Podem ser fundidas em areia ou em moldes permanentes. Engrenagens de ferro fundido são ásperas, imprecisas e de baixa resistência, porém engrenagens de grandes portes podem ser obtidas com custo relativamente baixo. Muitas engrenagens pequenas, para serviços leves, são fundidas sob pressão em ligas de zinco, estanho, alumínio e cobre, com alto grau de precisão e acabamento.

Quando forjadas, as engrenagens podem ser produzidas a quente e a frio com precisão relativamente boa. Engrenagens de latão ou alumínio podem ser obtidas cortando no comprimento necessário, barras extrudadas.

Grandes engrenagens podem ser produzidas com sucesso cortando chapas grossas com maçarico, conseguindo-se manter tolerâncias muito pequenas.

Muitas vezes a usinagem é o método mais econômico para se produzir a engrenagem e elas são usinadas pelo fato de ser o único meio de se obter alto grau de precisão ou de se processar um material duro, conforme exigido pelos precisos

mecanismos modernos, tais como motores de combustão interna, transmissões de veículos, máquinas-ferramenta etc..

Os processos de usinagem de engrenagens podem ser divididos em 3 tipos, quais sejam:

-) Corte por formação ou formato, no qual se usa um cortador que possui a mesma forma do vão do dente a ser cortado. O cortador pode ser de simples corte, como uma plaina, ou cortador rotativo, como uma fresa comum ou uma brocha.
-) Corte com gabarito ou chapelona, é o método no qual a ferramenta com movimentos alternativos é guiada por um padrão numa máquina chamada plaina para engrenagens. É um método muito demorado e tem sido utilizado tão somente para engrenagens grandes e com dentes grossos.
-) Corte por geração, no qual o perfil de corte da ferramenta é igual ao do dente da engrenagem. O cortador e a peça rolam entre si como se estivessem engrenados, a fim de desenvolver a forma do dente. São deste tipo os dois principais processos de corte de dentes em produção em lotes, que são o corte com cortador HOB e com cortador SHAPER, que estão descritos a seguir.

3.2.1) Corte de Engrenagens com Cortador HOB

No que diz respeito à produção de engrenagens em grandes quantidades, tanto de dentes retos quanto de dentes helicoidais [3,36], o processo mais rápido e econômico é o processo de corte com a ferramenta HOB ou fresa caracol. A ferramenta gira e corta como fresa e seus dentes ficam numa hélice como um parafuso sem-fim. A figura 3.4a mostra uma fresa caracol e a figura 3.4b mostra o esquema de movimentos do cortador e da peça [11]. Durante o corte, a ferramenta HOB fica sincronizada com a peça. Esse sincronismo é feito mecanicamente através da montagem de um jogo de engrenagens, antes do início do corte (máquinas convencionais), ou eletronicamente (máquinas C.N.C.). As rotações da peça e da ferramenta são sincronizadas, sendo que essa rotação

depende do número de entradas do cortador que é utilizado. Conforme vai se aumentando o número de entradas, aumenta-se a rotação. O aumento da rotação é feito mecanicamente ou eletronicamente.

No processo de corte de engrenagens de dentes retos com cortador HOB, o eixo de rotação do cortador forma um ângulo de aproximadamente 90° com o eixo da peça. Já para o corte de engrenagens helicoidais, gira-se o cortador de um ângulo igual ao ângulo de inclinação dos dentes da engrenagem.

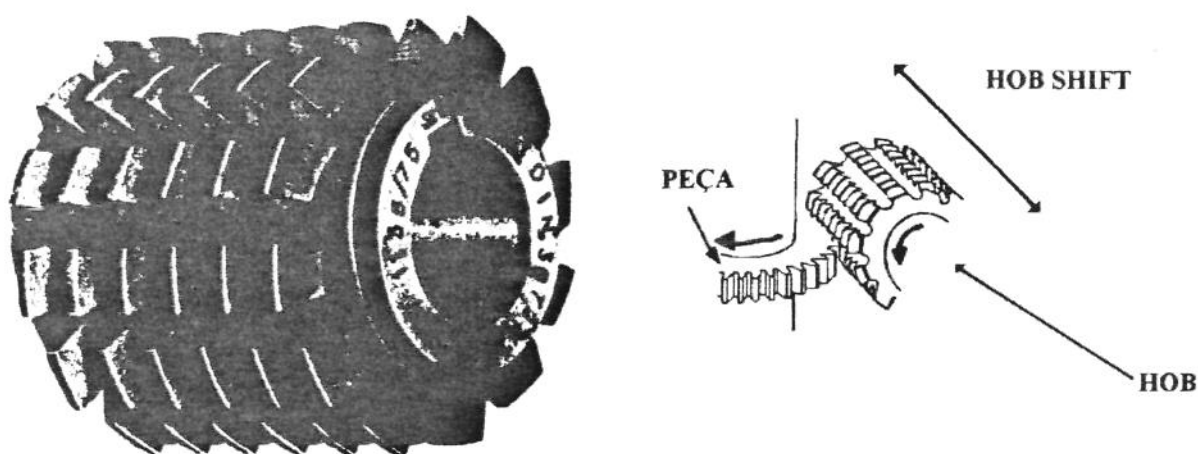


Figura 3.4. a-Ferramenta HOB [11]

b-Movimentos HOBxpeça (HOB-shift)[11]

Durante o processo de corte de engrenagens pelo processo HOB, pode-se dizer que existem duas formas de se trabalhar com o cortador, dependendo da máquina utilizada para o corte da engrenagem [1]. As máquinas-ferramenta mais novas possuem um recurso chamado HOB-SHIFT (figura 3.4b) no qual programa-se o avanço que a ferramenta vai dar no sentido axial ou seja o HOB-SHIFT. Se durante o corte de uma engrenagem, três ou quatro dentes do cortador HOB são solicitados para cortá-la, a próxima peça a ser cortada irá solicitar outros dentes, e dependendo do passo programado do HOB-SHIFT um ou mais dentes do corte anterior são solicitados.

Durante o corte da engrenagem, o cortador fica travado do início ao fim da operação. O movimento HOB-SHIFT é realizado quando a máquina termina o ciclo de corte, entre uma peça e outra.

Nas máquinas cortadoras de engrenagens C.N.C. o recurso do HOB-SHIFT é bastante utilizado, mas muitas vezes sem parâmetro algum de programação. O mesmo acontece com mais frequência nas máquinas convencionais que possuem esse recurso. É usual cortar-se diferentes tipos de peças, com diferentes parâmetros de usinagem utilizando-se o mesmo passo do HOB-SHIFT. Já as máquinas cortadoras de engrenagens muito antigas, que não possuem esse recurso, trabalham com o cortador travado, até o momento que o operador decide quando o dente está desgastado e troca o local de corte do cortador.

O cortador HOB executa cortes progressivos [2] para cada vão de dentes. A figura 3.5 mostra a ação provocada pelos dentes do cortador em cada vão de dentes da peça.

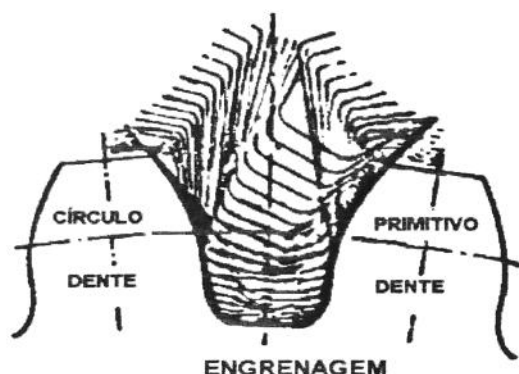


Figura 3.5 - Cortes progressivos realizados pela ferramenta HOB [2].

3.2.2) Corte de Engrenagem com Cortador Shaper.

O corte de engrenagens pelo processo ("Shaper" ou "Fellows") [3,33], é um processo em que a engrenagem é cortada por uma ferramenta (figura 3.6), que realiza movimentos alternativos (figura 3.7).

Os dentes do cortador de engrenagens tipo pinhão (figura 3.6), tem perfil evolvente em qualquer seção normal ao eixo e são detalonados para alívio dos flancos, no diâmetro maior e na raiz. A face do cortador é côncava para prover o ângulo de corte. A afiação é feita retificando-se a face do cortador, sendo que o diâmetro externo torna-se menor a cada afiação, porém os dentes mantêm o perfil evolvente e o passo diametral.

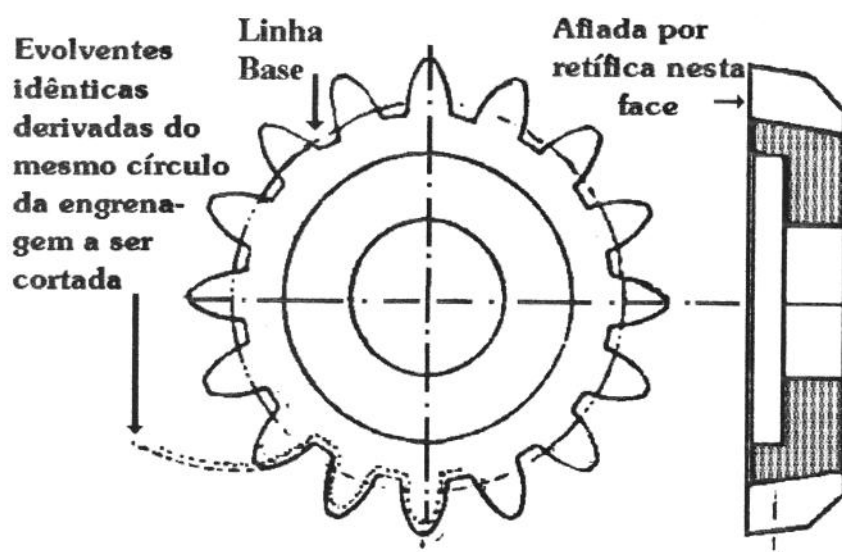


Figura 3.6 - Cortador de engrenagens tipo Fellows [3].

Em termos de produção esse processo de corte de engrenagens, é muito utilizado quando não se consegue utilizar o cortador Hob, isto é, quando não existe saída na peça para utilização do cortador HOB (caso de engrenagem com um escalonamento ao seu lado). Por exemplo, se uma peça é formada por duas engrenagens com número de dentes, formato de dente e diâmetro diferentes, normalmente corta-se uma engrenagem pelo

processo HOB e outra pelo processo Fellows, isso dependendo como será atuação do HOB durante o corte.

O cortador Fellows é montado na extremidade inferior de um fuso vertical que possui movimentos alternativos (figura 3.7), o cortador gira enquanto é sujeito a movimentos alternativos verticais. Para corte de engrenagens de dentes retos, a peça é colocada num eixo vertical abaixo e à esquerda do cortador e gira sincronizada com este, através de engrenagens intercambiáveis de divisão que acoplam os eixos do cortador e da peça.

A obtenção de uma engrenagem helicoidal é feita através do uso de guia helicoidal. Assim, o movimento do cortador dentro da peça segue a hélice desejada no dente. Os demais movimentos são iguais ao do corte de engrenagens com dentes retos.

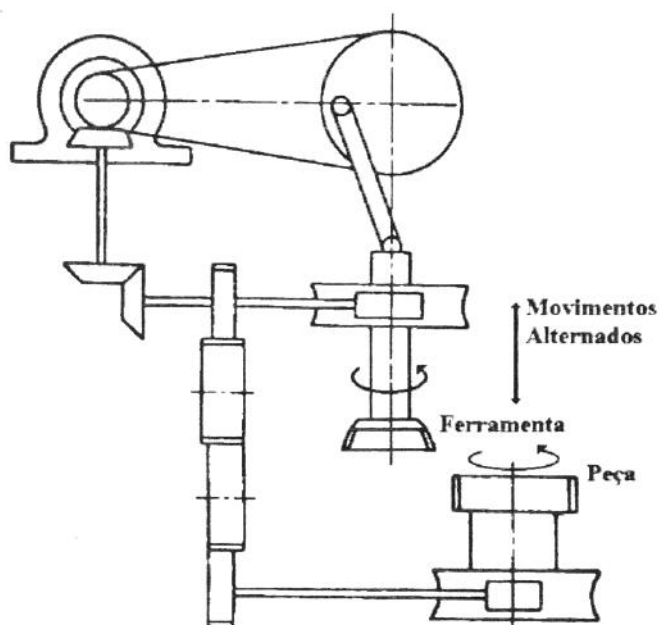


Figura 3.7 - Esquema de funcionamento de uma máquina cortadora de engrenagens tipo Fellows[3].

3.2.3) Acabamento das Engrenagens

Após o corte da engrenagem pelo processo HOB, ou pelo processo Fellow, a superfície do dente da engrenagem fica constituída de minúsculos planos em consequência da atuação do cortador. Essa superfície é satisfatória para algumas utilizações da engrenagem, mas na maioria dos casos a utilização das engrenagens requer alto grau de precisão e resistência.

As operações de acabamento são executadas para obter-se engrenagens precisas, silenciosas, de funcionamento suave e seguras. Incluem-se no processo de acabamento, as operações de SHAVING [3,33] e brunimento para engrenagens moles, que ainda não sofreram tratamento térmico. Retificações e lapidações são usadas para engrenagens duras, temperadas.

No processo SHAVING, a engrenagem é girada e pressionada contra um cortador em forma de engrenagem ou cremalheria (figura 3.8), e que contém canaletas na superfície dos dentes.

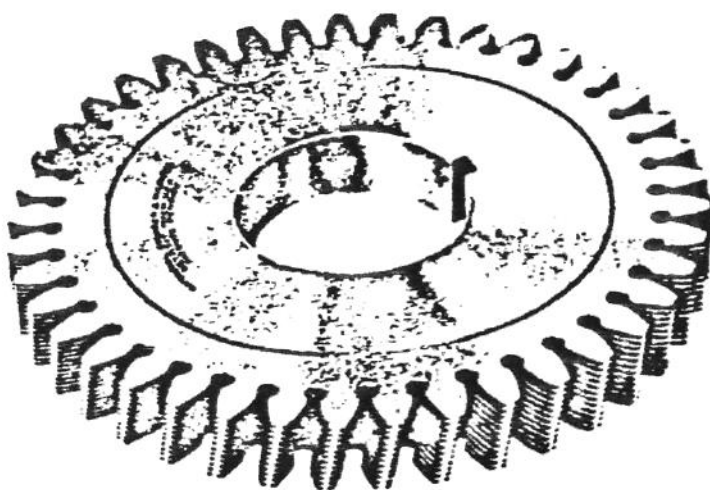


Figura 3.8 - Ferramenta de acabamento SHAVING [3].

As arestas destas canaletas são afiadas e removem pequenos cavacos da face dos dentes da engrenagem. O perfil do dente do cortador é retificado com precisão e, com isso, reproduz a forma precisa no dente da engrenagem.

Os cortadores "SHAVERS" podem ser fabricados para arredondar ligeiramente os dentes das engrenagens a fim de localizar o contato entre dentes no centro, distante das extremidades.

A peça é fixada entre pontas, erguida contra o cortador e movimentada alternadamente, enquanto é girada numa direção e depois em outra.

O processo de corte de acabamento por SHAVING é rápido e de baixo custo, sendo o processo mais viável para acabamento de engrenagens em grande produção. Cada cortador, assim como o cortador HOB, é fabricado para determinado passo diametral e forma de dente e, portanto, é necessária grande produção para se ter um processo de baixo custo.

3.3) Desgaste e Vida do Cortador HOB

3.3.1) Desgastes da Ferramenta.

Nos últimos anos, as ferramentas de corte de usinagem, vem passando por constantes evoluções, tanto no desenvolvimento de novos materiais [26] (CBN, diamante), como na evolução das ferramentas já existentes, deixando-as mais adequadas para o meio em que trabalha, quanto à resistência ao desgaste, à deformação plástica e à tenacidade.

A ferramenta de metal duro [26] evoluiu bastante nos últimos anos, principalmente no que diz respeito ao desenvolvimento de novos materiais de coberturas (TiN-Nitreto de Titânio, Al_2O_3 -Óxido de Alumínio, TiC-Carboneto de Titânio), procurando principalmente obter uma combinação de núcleo tenaz e cobertura, onde realmente existe

o contato do cavaco com a ferramenta e da ferramenta com a peça, mais resistente ao desgaste.

As ferramentas de aço rápido, que em alguns casos não podem ser substituídas pelo metal duro, também tem apresentado desenvolvimentos, principalmente utilizando camadas de cobertura de nitreto ou carbonitreto de titânio.

Esse é o caso dos cortadores HOB. Por serem ferramentas de alto custo de compra e afiação, é necessário que sejam utilizadas de uma maneira ótima. Hoje a maioria dos cortadores HOB possuem cobertura de TiN, o que lhes possibilita uma vida muito maior do que as ferramentas descobertas.

Existem dificuldades em se desenvolver um cortador HOB de metal duro especialmente pelo seu formato. Alguns cortadores são maciços (figura 3.9) e existem pesquisas com cortadores montados com apenas a região dos dentes de aço rápido com cobertura de titânio (figura 3.10), e seu miolo de aço sem cobertura.

Uma das grandes preocupações dos fabricantes de engrenagens que utilizam o cortador HOB, é a sua utilização máxima devido ao fato de ser uma ferramenta cara. Para isso é necessário que a substituição da ferramenta seja realizada baseada em um critério confiável de fim de sua vida e que toda extensão da ferramenta seja utilizada para o corte.

Uma utilização mais lógica do recurso HOB-SHIFT [1] (nas máquinas em que sejam viáveis) e um treinamento mais adequado para o operador, devem melhorar o aproveitamento do cortador.

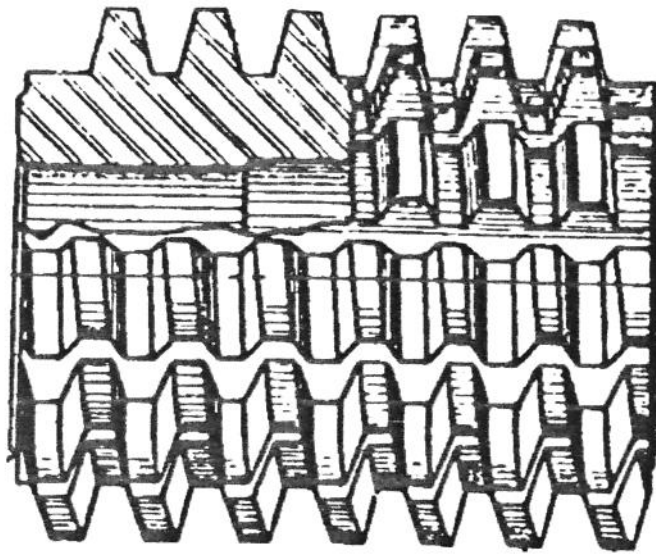


Figura 3.9 - Cortador HOB maciço [36].

O número de peças cortadas pela ferramenta HOB com cobertura diminui bruscamente a partir do momento que ele sofre a primeira afiação, onde retira-se a camada de nitreto de titânio da superfície de saída do cortador [3,36], e a medida que o cortador vai sendo afiado, o número de peças usinadas também vai diminuindo, mas de uma forma mais compassada.

Dependendo da correta utilização do HOB, ele pode chegar a sofrer muitas afiações até que esteja sem condições de corte, isto se não ocorrer nenhum tipo de dano ao cortador como quebra, lascamento etc.

Existem alguns estudos no sentido de "retitanizar" o cortador HOB. Neste caso após cada afiação o cortador passaria por um novo processo de cobertura com nitreto de titânio.

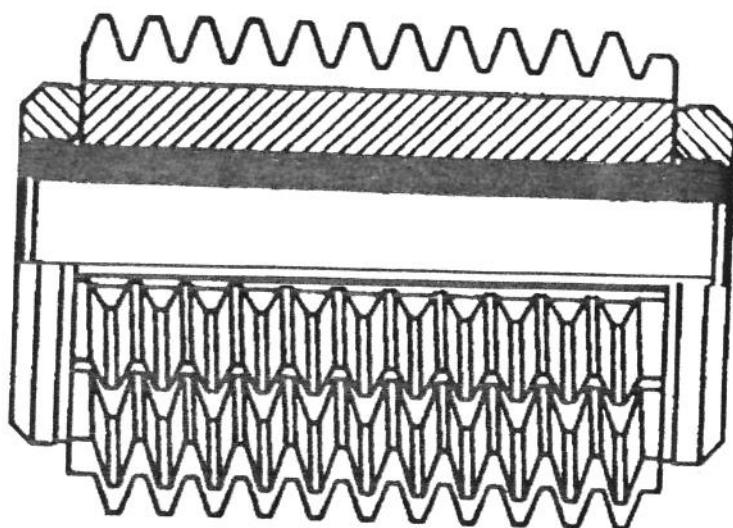
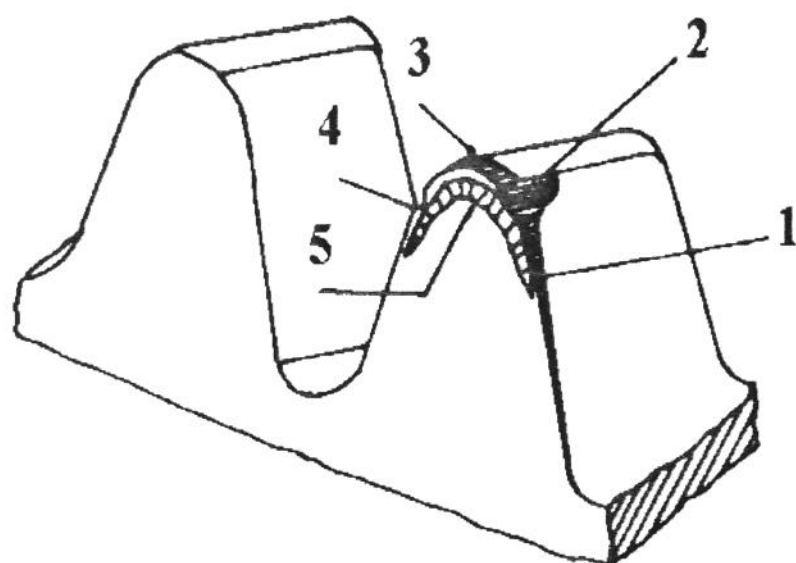


Figura 3.10 - Cortador HOB montado [36].

3.3.1.1) Desgastes e Avarias que Sofrem os Cortadores HOB

Quando o cortador é novo (ainda com cobertura), seus dentes sofrem principalmente desgaste de flanco (figura 3.11), sendo que a queima da aresta de corte é o principal critério de troca do cortador [19,36,1,18]. O desgaste de cratera praticamente não existe, pois a superfície de saída está com a cobertura de titânio [3]. Quando o cortador já passou por algumas afiações, observa-se que a queima da aresta de corte é bem nítida, como no cortador novo e também tem-se a formação bem visível de cratera na superfície de saída (figura 3.11). Isto é devido ao fato de que quando se afia o cortador, retifica-se a superfície de saída do cortador, retirando-se a cobertura desta superfície.



- 1-Desgaste de flanco
(parte inferior)**
- 2-Desgaste de flanco
(lateral)**
- 3-Desgaste periférico
(parte arredondada)**
- 4-Lascamento do dente**
- 5-Desgaste de cratera**

Figura 3.11 - Desgastes da ferramenta HOB [36].

As quebras de dentes do cortador HOB são muito comuns, principalmente quando ocorrem falhas na montagem, ou quando o operador permite um desgaste excessivo do dente. Quando isso ocorre geralmente o cortador continua a ser utilizado, exceto na faixa de dentes que sofreu a falha (figura 3.12).

Como já visto acima, pode-se definir 2 tipos principais de desgaste do cortador HOB:

Desgaste de flanco - causado pelo atrito da peça com a superfície de folga da ferramenta.

Desgaste de cratera - praticamente só acontece nos cortadores já afiados. Ocorre na superfície de saída, causado principalmente pelo atrito do cavaco com esta superfície do dente do cortador.

Esses dois tipos de desgastes são utilizados pelos operadores para determinar o fim de vida da ferramenta. É lógico que o operador não tem maneiras objetivas de determinar com precisão tais desgastes e, por isso, procede a troca com critérios subjetivos o que gera desperdício de ferramentas. Isto é crítico, principalmente em ferramentas caras, como é o caso do HOB, onde é necessário se ter métodos mais precisos para

determinação do fim da vida da ferramenta. Este trabalho procura contribuir neste sentido.

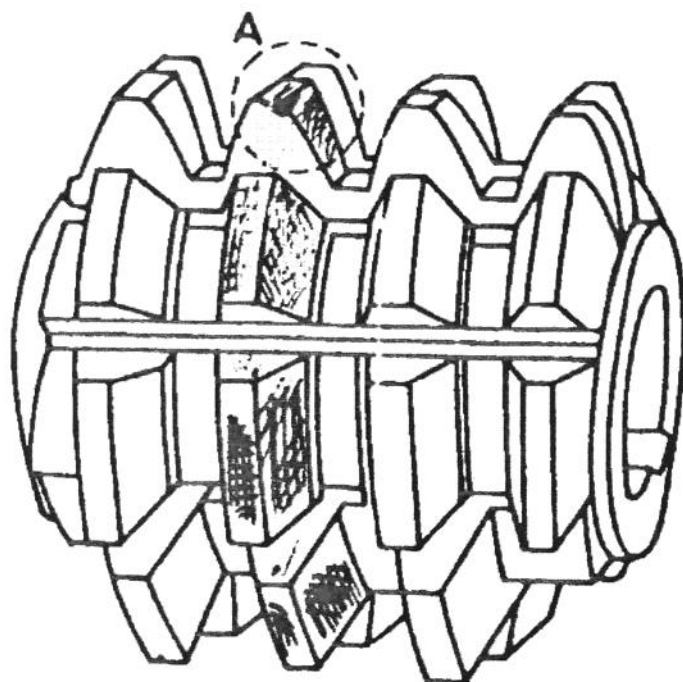


Figura 3.12 - Dente avariado condena toda a faixa de dentes A que ele pertence[1].

A figura 3.13, mostra o sistema de afiação da ferramenta HOB, que consiste basicamente de um rebolo que retifica a superfície de saída do cortador. É muito importante que a ferramenta possua um desgaste uniforme e sem quebra ou lascamento, pois a afiação é feita de um forma uniforme. Se um dente estiver mais desgastado ou quebrado, quando for ser afiado, para conseguir-se uma afiação uniforme retirar-se-á material além do necessário de outros dentes. Por isso, algumas vezes, o procedimento adotado é o de condenar essa faixa de dentes, mas o mais correto seria conseguir-se o desgaste sempre uniforme em todos os dentes. Isso pode ser conseguido através de uma utilização lógica do HOB-shift.

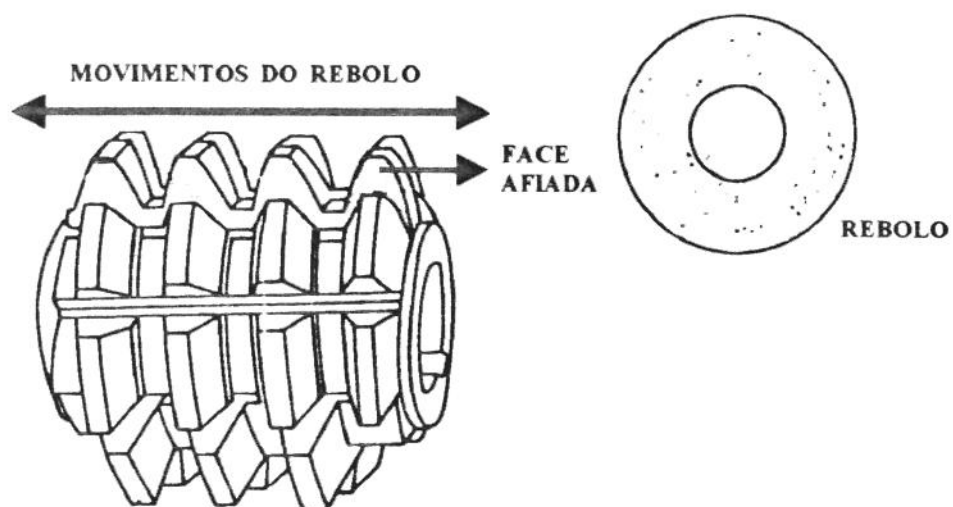


Figura 3.13 - Sistema de afiação do cortador HOB [36].

CAPÍTULO 4

MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios foram realizados na empresa Equipamentos Clark Ltda, que é especializada na produção de transmissões para veículos automotivos. Apesar de todo respaldo e colaboração recebida dos profissionais da empresa, existem grandes dificuldades para se trabalhar com esse tipo de experimento a nível de chão de fábrica, pois a preocupação da empresa é produzir. Dentro desse espírito, procurou-se não atrapalhar o andamento da produção durante o período de desenvolvimento desse trabalho.

Dentro das inúmeras dificuldades que encontrou-se para se monitorar a ferramenta HOB a nível de chão de fábrica, pode-se citar:

-) As máquinas monitoradas trabalham em turnos de revezamentos (3 turnos) e como é interessante que o pesquisador esteja ao lado da máquina, operando o sistema de monitoramento, muitas vezes se perdia o início do corte com uma determinada ferramenta e outras vezes, começava-se a monitorar uma ferramenta mas era impossível se permanecer na fábrica e acompanhar o fim de sua vida.

-) Nem sempre a ferramenta é trocada durante o lote, pois a empresa trabalha com lotes pequenos e a vida da ferramenta muitas vezes era maior que o tamanho do lote.

-) Muitas vezes quando se terminava um lote de peças, a ferramenta não atingia seu fim de vida. Mesmo assim, essas ferramentas eram afiadas para que no próximo lote estivessem em condições ideais de corte (afiadas), pois durante a afiação dessa ferramentas retira-se pouco material. Isso é feito com intuito de evitar problemas de trocas ou quebras inesperadas durante o corte desse próximo lote. Mas, desse modo fica impossível acompanhar o fim de vida da ferramenta com o sistema de monitoramento.

Os experimentos foram divididos em duas etapas distintas:

-) Na primeira etapa do trabalho os experimentos foram realizados em uma máquina-ferramenta cortadora de engrenagens convencional (PFAUTER PA300) que utiliza um motor de corrente contínua (que aqui chamamos de principal), que é praticamente responsável por todo o sistema de sincronismo e funcionamento da máquina.

-) Na segunda etapa os ensaios foram feitos em uma máquina cortadora de engrenagens C.N.C. (PFAUTER PE300) que utiliza um motor de corrente alternada exclusivo de movimentação do cortador HOB.

O objetivo comum para os dois ensaios foi monitorar o processo a partir da ferramenta nova (afiada), acompanhar a existência ou não de alguma relação entre a corrente monitorada e o desgaste da ferramenta e analisar os métodos utilizados pelos operadores para a troca da ferramenta em comparação com os resultados monitorados.

Ensaio preliminares foram realizados com o objetivo de se calibrar o sistema, monitorando-se os sinais quando a máquina estava inoperante (ferramenta fazendo todo o ciclo de corte em vazio) e quando estava cortando (retirando material), isso tanto para máquina convencional como para a C.N.C.. Isso foi feito através das comparações dos valores indicados pelo osciloscópio, pelo voltímetro do painel da máquina, por um alicate amperimétrico, por um voltímetro manual com os valores indicados no computador.

Após essa calibração, mediu-se os tempos de usinagem de cada peça, e para cada peça monitorou-se 3 momentos do seu corte (figura 4.1), tomando-se o cuidado para não monitorar quando o cortador estava na interface das duas peças (em geral 2 peças são fixadas na máquina) (figura 4.1). Quando as montagens eram feitas com uma só peça, utilizou-se dos mesmos critérios.

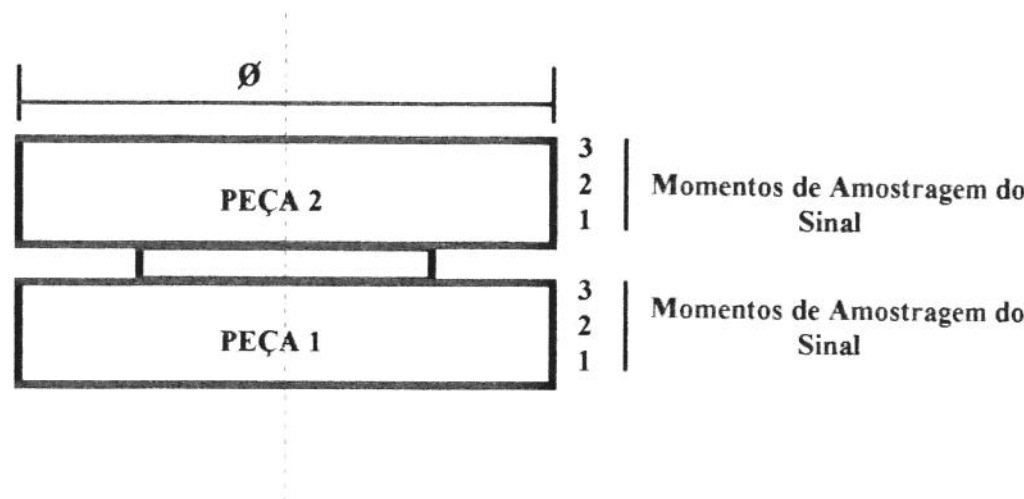


Figura 4.1 - Montagem das peças para o corte

Nas máquinas convencionais, geralmente as engrenagens são cortadas em duas condições, desbaste e acabamento. No desbaste cerca de 95% do material é retirado e o restante 5% é retirado no acabamento. Monitorou-se alguns cortes durante o desbaste e acabamento e notou-se que no acabamento, os valores da corrente são pouco diferentes dos valores obtidos com a máquina em vazio (sem corte), conforme mostra a figura 4.2. Então decidiu-se monitorar apenas o desbaste.

O desvio padrão dos valores de corrente obtidos em uma medição (em cada medição eram digitalizados 120 pontos do sinal - 120 valores de corrente) também foi analisado e, nesta primeira fase de teste, notou-se que ele não possui variação entre o momento do movimento em vazio e quando se está cortando a peça em desbaste, como mostra a figura 4.3.

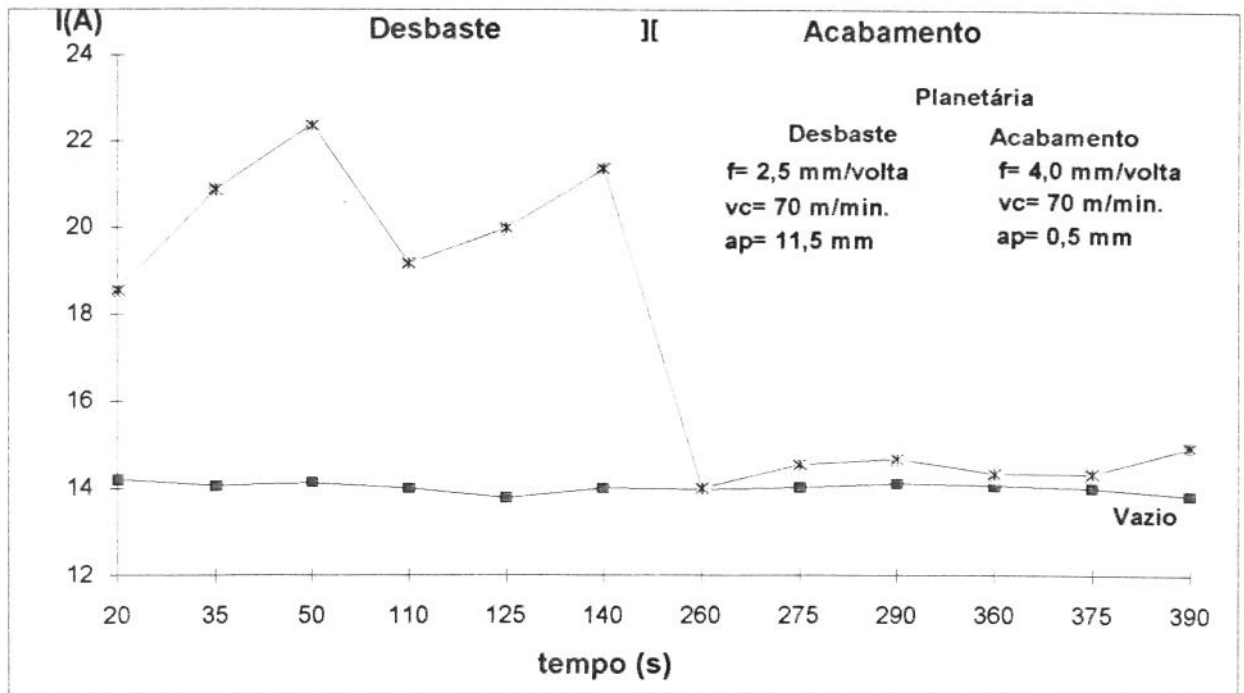


Figura 4.2 - Comportamento da corrente (usinando e inoperante)

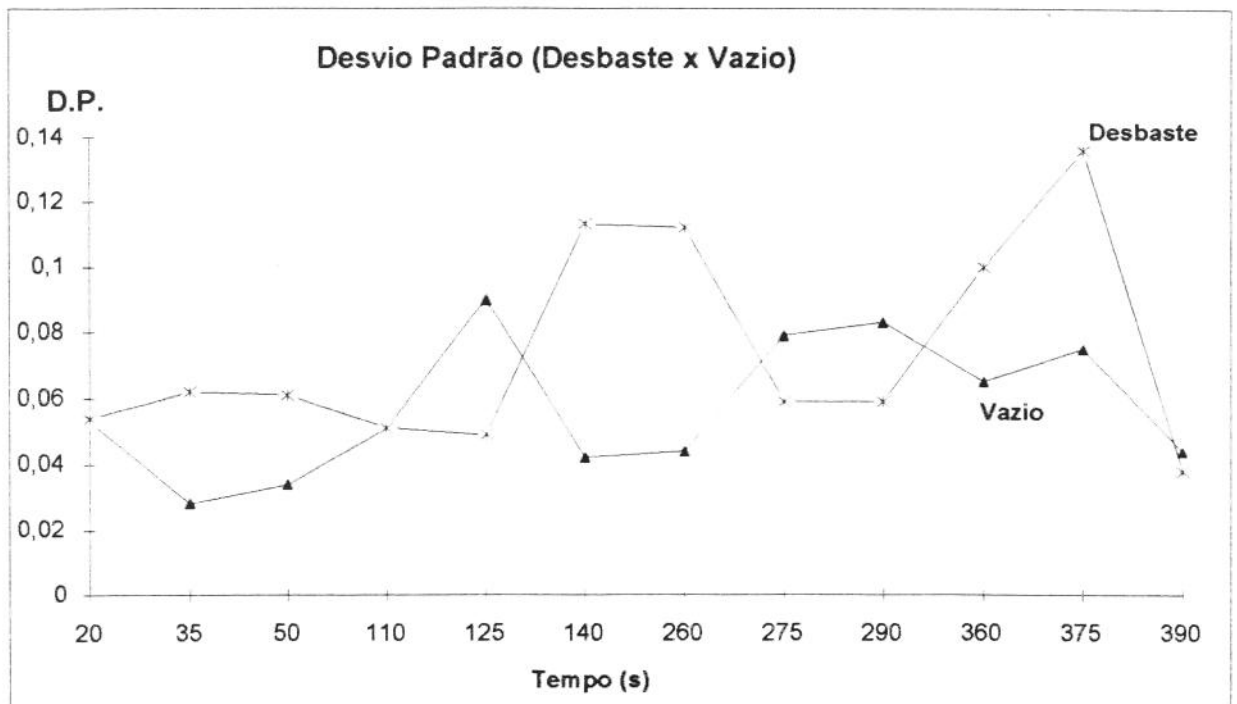


Figura 4.3 - Comportamento do Desvio Padrão (Usinando e Inoperante)

Como pode ser visto na figura 4.3, o desvio padrão apresenta resultados aleatórios, não sendo um bom parâmetro para ser analisado.

4.1) Desenvolvimento dos Ensaios e Critério de Fim de Vida

Como já foi visto no item 3.2.1, existem duas formas de se trabalhar com o cortador HOB - travado ou hob shift. Para os ensaios deste trabalho, utilizou-se o cortador travado, para que durante o corte de um lote de peças fosse possível monitorar uma ou mais vidas da ferramenta. Esse método de travamento do cortador dificilmente é utilizado a nível de produção. Em alguns casos, porém, como quando a ferramenta possui uma faixa de dentes quebrados ou quando a máquina não possui o recurso do hob shift, ele é utilizado.

Neste trabalho ele foi utilizado para que o desgaste de uma região do cortador fosse acelerado, a fim de que a vida da faixa de dentes em contato com a peça fosse menor e assim se facilitasse o monitoramento do processo. É lógico que, se o tipo de monitoramento realizado neste trabalho se mostrar viável para monitorar a vida da ferramenta com o cortador travado, também será viável quando se utilizar o sistema HOB-SHIFT.

As condições de usinagem sempre foram mantidas, desde a primeira peça, até o momento em que o operador decidisse pela troca do local de corte da ferramenta ou pela troca da mesma (que era considerado o fim de um ensaio).

O critério de fim de vida do cortador utilizado pelos operadores é o aspecto visual do desgaste. O critério utilizado para se determinar o fim de vida da ferramenta nova (com cobertura) e quando a ferramenta já passou por uma ou mais afiações, são bem diferentes. Quando a ferramenta é nova, observa-se que a aresta de corte vai perdendo sua cor característica dourada (nitreto de titânio) e vai se formando alguns pontos prateados (aço rápido), além de um aspecto de queima da aresta de corte.

Após a primeira afiação, quando a superfície da saída já não possui mais camada de cobertura, a queima da aresta de corte e a formação de cratera são bem nítidas. Quando o operador vai analisar o desgaste do cortador ele observa toda a periferia do cortador, pois os desgastes são bem diferentes de um dente para outro, sendo que alguns dentes podem ter condições de corte e outros já estarem no fim de vida. O operador fica bastante atento principalmente no desgaste de cratera, para não chegar ao ponto de se unir com o desgaste de flanco e quebrar o dente.

É lógico que esse procedimento é passível de muitos erros. Assim, algumas vezes, o pesquisador solicitava ao operador que continuasse a cortar com aquela ferramenta por mais uma ou duas peças após sua decisão de substituí-la.

Após a retirada do cortador da máquina, analisou-se os desgastes utilizando-se uma lupa (aumento de 8 x), apenas para fazer-se uma análise visual do desgaste, sendo praticamente impossível fazer medidas da largura da cratera. Porém mediu-se as profundidades através de um dispositivo que acopla um relógio comparador.

4.2) Aquisição de Dados

Os sinais elétricos do motor são sinais analógicos e eram convertidos em sinais digitais para que fossem armazenados pelo computador, para posterior análise dos dados com ganho de tempo e confiabilidade.

Os sinais de corrente elétrica foram obtidos através da utilização de 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. Assim, tem-se uma tensão proporcional à corrente que se quer monitorar na saída do sensor, que pode ser medida via computador.

O esquema do sensor pode ser visto na figura 4.4. O sensor de efeito "Hall" necessita ser alimentado com tensão de +/- 9V.

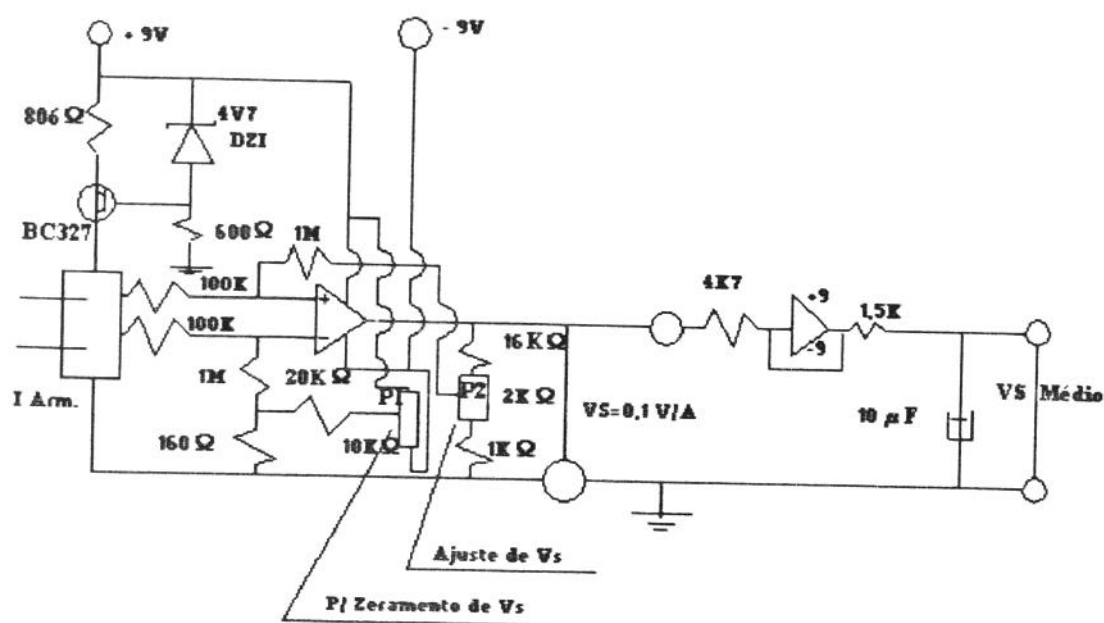


Figura 4.4 - Circuito Elétrico do Sensor de Efeito "Hall" (Newtronic).

Os sinais foram convertidos de analógicos para digitais utilizando-se uma placa de aquisição de dados CAD 12/36 (Lynx) [44], que permite a leitura de até 16 canais sendo que para seu funcionamento necessita de um programa específico para ser comandada. No caso foi utilizado um programa (AQUIS) desenvolvido na linguagem C, que facilita o registro no computador dos parâmetros da amostragem do sinal (número de pontos, frequência de amostragem, etc.)

Essa placa possui várias maneiras de aquisição ou operação. Foi utilizado a leitura por interrupção permitindo uma velocidade de aquisição dos dados compatível com o desejado. Os dados ao serem coletados são armazenados diretamente na memória. Foi utilizado apenas um canal (0) da placa de aquisição. Cada amostragem do sinal continha 120 pontos amostrados a uma frequência de 20 Hz. Assim, cada amostragem continha 6 segundos do processo. O programa (AQUIS) já fornece a média e o desvio padrão destes 120 pontos.

Os sinais, antes de serem armazenados, passaram por um filtro passa baixa com frequência de corte de 10 Hz, isso pelo fato do sinal monitorado conter muito ruído.

Depois de coletados e armazenados, posteriormente esses dados foram processados e analisados de maneira adequada.

4.3) Experimentos Realizados na Máquina Convencional (PA 300)

Para essa primeira etapa os ensaios foram realizados em uma máquina-ferramenta convencional cortadora de engrenagens (PA 300), em operação de desbaste, onde monitorou-se a corrente elétrica do motor principal (CC).

A montagem experimental utilizada está mostrada na figura 4.5.

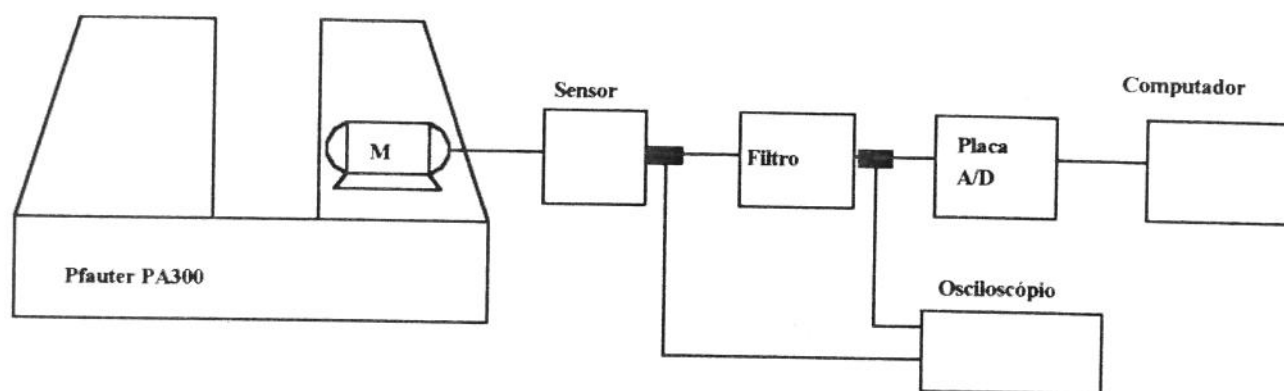


Figura 4.5 - Desenho esquemático da montagem experimental.

O osciloscópio foi utilizado para o acompanhamento instantâneo do sinal, bem como seu comportamento antes e depois da filtragem.

A figura 4.6 mostra um esquema do filtro passa-baixa utilizado na montagem.

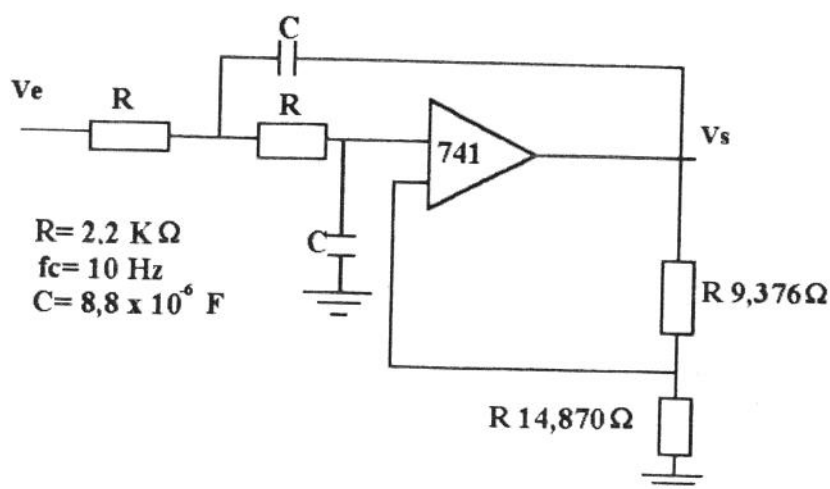


Figura 4.6 - Filtro de frequência passa-baixa (10 Hz).

4.3.1) Máquina, Material e Ferramentas.

Os ensaios foram realizados na máquina-ferramenta cortadora de engrenagens (PA300), com motor de corrente contínua (15 HP), motor esse que aciona o funcionamento e o sincronismo da máquina, como mostra a figura 4.7.

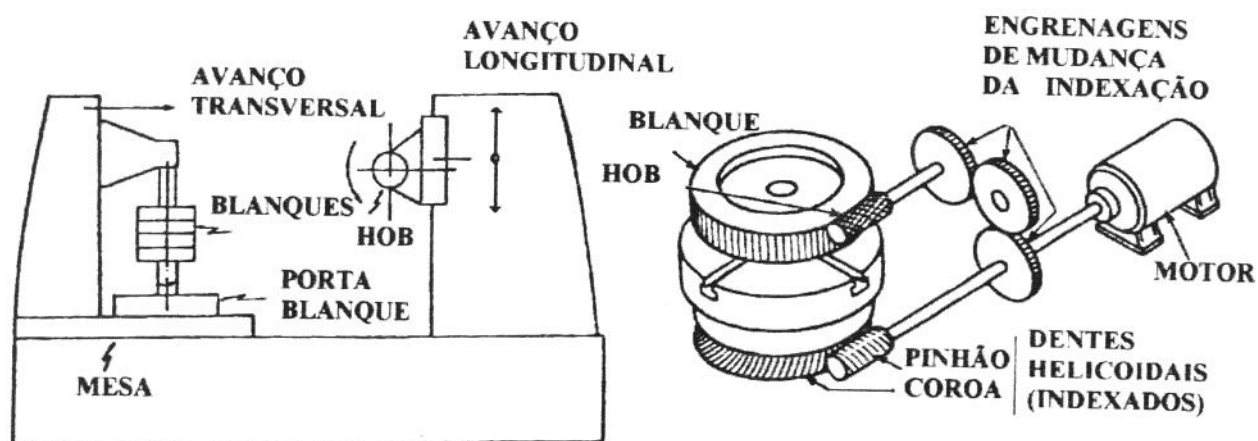


Figura 4.7 - Máquina cortadora de engrenagens (Sistema de sincronismo ou indexação da máquina) [3].

O material das engrenagens monitoradas é o aço ABNT 8620 normalizado, com dureza em torno de 190 HB. A empresa trabalha com o sistema de célula de manufatura com lotes considerados pequenos, sendo que cada tipo de ferramenta basicamente é utilizada em um único tipo de peças. Na sua maioria as ferramentas são de aço rápido com cobertura de nitreto de titânio, mas já afiadas, tendo portanto camada de cobertura somente na superfície de folga dos dentes.

4.3.2) Desenvolvimento dos Ensaios

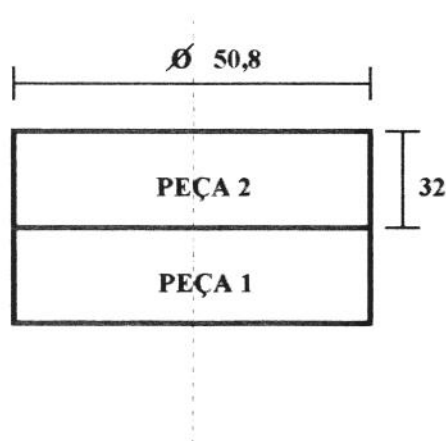
Na máquina-ferramenta cortadora de engrenagens convencional, foram realizados 6 ensaios. As condições de cada ensaio estão mostradas a seguir.

Ensaio 1)

Ferramenta 18470 173-9	Condições de Usinagem
Número de afiações 7	f = 4,0 mm/volta
Número de entradas 1	v_c = 70 m/min.
Operação 20 (desbaste)	a_p = 5,9 mm
Peça Engrenagem satélite (17 dentes)	RPM = 220
	Cortador-travado
	Corte-em um lance (desbaste)
	OBS: Amostragem do sinal em 3 momentos: 30, 45 e 60 segundos após o início do corte de cada peça.

Montagem e Dimensões da Peça

- 2 peças colocadas em cada fixação.

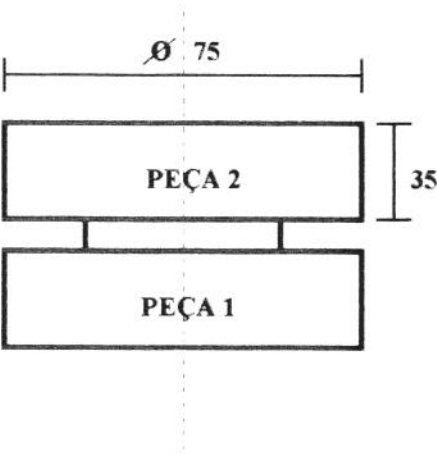


Ensaio 2)

Ferramenta 18470 172-7 SIT 85	Condições de Usinagem
Número de afiações 2	f = 2,0 mm/volta
Número de entradas 1	vc = 70 m/min.
Operação 20 (desbaste)	ap = 11,5 mm
Peça Engrenagem planetária (12 dentes)	RPM = 220
	Cortador-travado
	Corte-em dois lances (desbaste e acabamento)
	OBS: Amostragem do sinal em 3 momentos: 20, 35, 50 segundos após o início do corte de cada peça.

Montagem e Dimensões da Peça

- 2 peças colocadas em cada fixação.

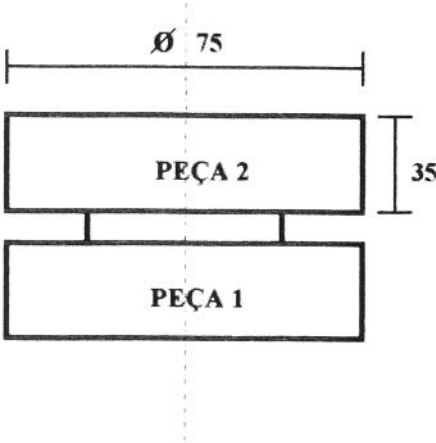


Ensaio 3)

Ferramenta 18470 172-7 AIT 81	Condições de Usinagem
Número de afiações 2	f = 2,5 mm/volta
Número de entradas 1	vc = 70 m/min.
Operação 20 (desbaste)	ap = 11,5 mm
Peça Engrenagem planetária (12 dentes)	RPM = 220
	Cortador -travado
	Corte -em dois lances (desbaste e acabamento)
	OBS: Amostragem do sinal em 3 momentos: 20, 35 e 50 segundos após o início do corte de cada peça.

Montagem e Dimensões da Peça

- 2 peças colocadas em cada fixação.

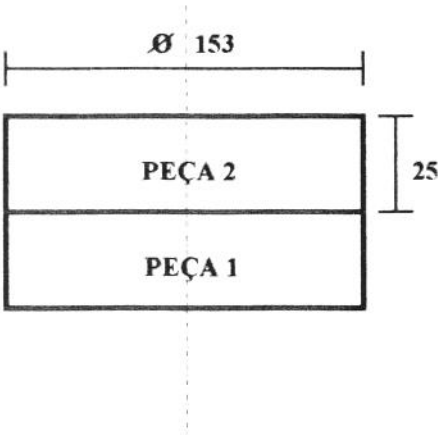


Os Ensaios 4, 5, 6 foram feitos com o mesmo cortador e mesmas condições de usinagem, mudando-se apenas o local de corte.

Ferramenta 18.470 0230 -5 SIT 25	Condições de Usinagem
Número de afiações 14	f = 3,0 mm/volta
Número de entradas 1	v_c = 70 m/min.
Operação 20 (desbaste)	a_p = 8,5 mm
Peça Engrenagem louca da ré (35 dentes)	RPM = 170
	Cortador-travado
	Corte-em dois lances (desbaste e acabamento)
	OBS: Amostragem do sinal em 3 momentos: 20, 35 50 segundos após o início do corte de cada peça.

Montagem e Dimensões da Peça

- 2 peças colocadas em cada fixação



4.4) Experimentos Realizados na Máquina Cortadora de Engrenagens C.N.C. (PE 300).

Para essa segunda etapa dos ensaios, quase todo o procedimento de monitoramento aplicado na primeira etapa (máquina convencional) foi aplicado. Alguns detalhes utilizados nestes ensaios e que não foram utilizados na primeira etapa serão citados.

Os ensaios foram realizados em uma máquina-ferramenta cortadora de engrenagens Pfauter (PE300 C.N.C.) que realiza a operação de corte da engrenagem, normalmente em um único ciclo de corte (desbaste). A máquina possui vários motores de acionamento de várias partes, sendo que existe um motor exclusivo de movimentação do cortador HOB muito interessante para se monitorar. Esta é a razão da escolha desta máquina. Procurou-se uma máquina onde o motor tivesse menos tarefas a realizar e assim pudesse ser sensível à variação da corrente causada pelo desgaste da ferramenta.

Utilizou-se dois canais da placa A/D, sendo que no canal 0 monitorou-se o sinal do comando numérico e no canal 3 monitorou-se a corrente de alimentação do motor. O esquema da instrumentação está mostrado na figura 4.8.

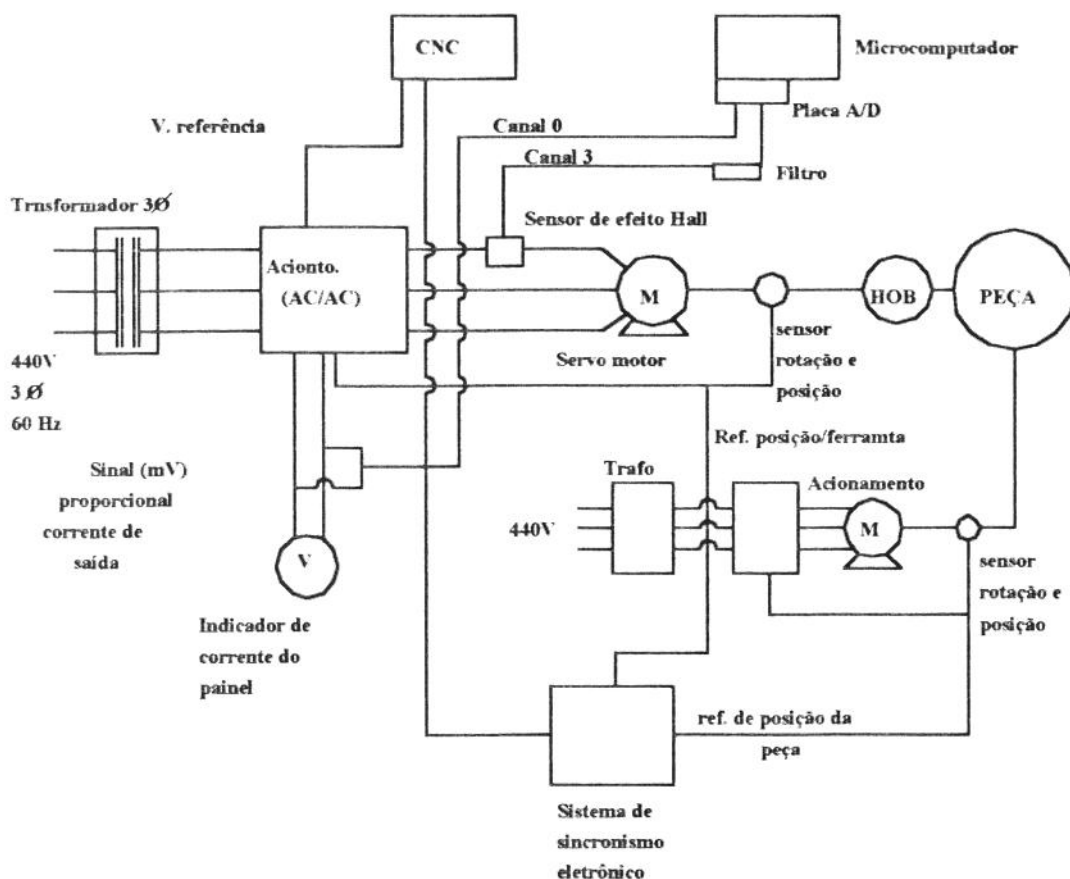


Figura 4.8 - Desenho esquemático do sistema de aquisição de dados.

O sinal que entra no canal 0 da placa A/D (figura 4.8) tem uma tensão proporcional à corrente de saída do acionamento. É um sinal puro, sem influência de ruídos, pois é esse sinal que indica para o comando do C.N.C. a estabilidade dos parâmetros de corte programados. O controle dos parâmetros é feito através do sensor de rotação e posição (figura 4.8), onde tem-se o controle da rotação que influencia diretamente todos os parâmetros de corte programados. Esse sinal também pode ser visto ou analisado no painel da máquina. Os engenheiros de processo da companhia trabalham com esse parâmetro para determinarem as condições de usinagem e elaboração da folha de processo.

No canal 3 monitorou-se o RMS da corrente de alimentação do motor (figura 4.8) com auxílio do sensor de efeito Hall. Utilizou-se também um osciloscópio para um acompanhamento instantâneo do comportamento do sinal e um filtro de frequência (passa

baixa de 10 Hz), devido a presença de ruídos. O esquema do filtro está mostrado na figura 4.9.

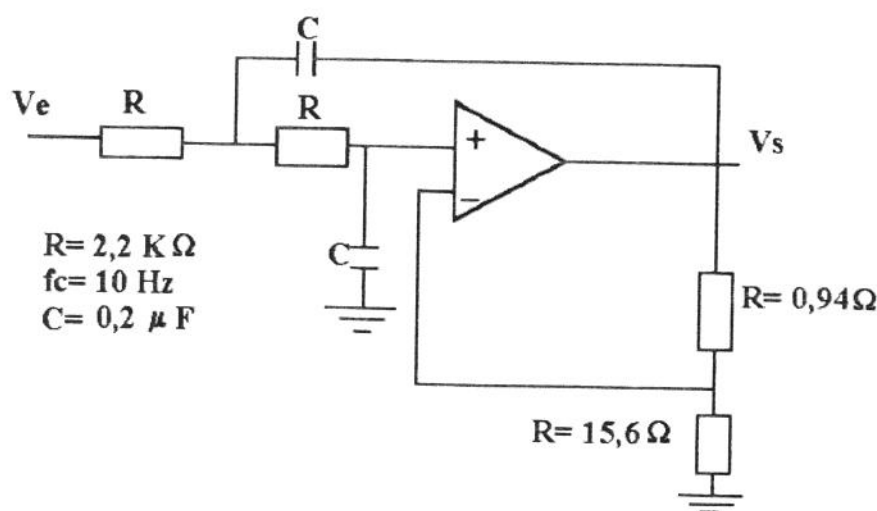


Figura 4.9 - Esquema do filtro passa baixa (Pfafter PE 300)

Foram realizados vários ensaios com a finalidade de se calibrar (zerar) o sistema, quando a máquina estava inoperante e quando estava cortando. Isso foi feito monitorando-se os dois canais (0 e 3). Foram comparados e zerados os valores indicados pelo osciloscópio, voltímetro manual e os valores indicados pelo computador. Após o zeramento (calibração), mediu-se os tempos de corte e determinou-se a amostragem do sinal em 3 momentos após o início do corte da peça.

Essa máquina Pfafter PE 300 utiliza bem o recurso hob shift, isso pelo fato de ser uma máquina moderna e com mais recursos. Pode-se dizer que ela nunca trabalha com o cortador travado. Abriu-se uma exceção exclusiva para a realização dos ensaios, pelo motivo já citado anteriormente.

Outro detalhe é que a máquina geralmente realiza o processo de corte em apenas um lance (desbaste), não sendo necessário o segundo lance comum nas máquinas convencionais.

O critério de fim de vida da ferramenta é determinada pelo operador também pelo aspecto visual do cortador. Algumas vezes o operador tem um número estabelecido de peças que a ferramenta consegue cortar, mas dificilmente o operador segue esse critério, pois existe uma grande dispersão no número de peças usinadas por vida da ferramenta.

Os desgastes também foram analisados e medidos como nos ensaios da máquina convencional.

4.4.1) Máquina, Material e Ferramentas.

Essa máquina-ferramenta cortadora de engrenagens (Pfauter PE300) utilizada em uma célula da manufatura, facilitou os experimentos, pois a mesma possui um motor exclusivo de movimentação do cortador HOB, o que teoricamente deixa mais sensível o equipamento para a determinação de uma relação do desgaste com a variação da corrente, sendo que o sincronismo (ferramenta x peça), é feito eletronicamente (figura 4.8)

Outro fator que facilitou o monitoramento do processo além da máquina ser mais nova e ter um motor exclusivo de movimentação da ferramenta, é que a célula trabalha com poucos tipos de peças e com lotes considerados grandes (acima de 1000 peças).

Os ensaios realizados na Pfauter PE 300 foram utilizados com um único cortador e um único tipo de peça. O material é o mesmo aço ABNT 8620 utilizado nos ensaios realizados na máquina convencional. O cortador de aço rápido com cobertura de nitreto de titânio, também já tendo as superfícies de saída dos dentes sofrido afiação (sem cobertura).

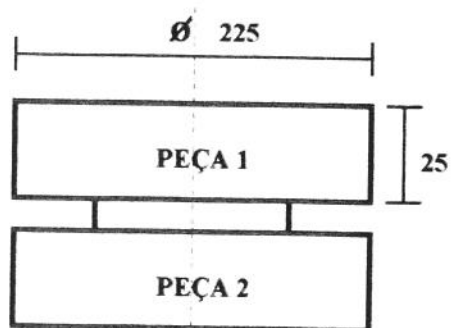
4.4.2) Desenvolvimento dos Ensaio.

Foram monitorados três ensaios com as mesmas condições de usinagem, tipo de peça e cortador, apenas variando a faixa de dentes do cortador utilizada.

Ferramenta 18.470 0291-5	Condições de Usinagem
Número de afiações 4	f = 2,54 mm/volta
Número de entradas 1	vc = 68 m/min.
Operação 20 (desbaste)	ap = 10,3 mm
Peça Engrenagem da ré (42 dentes)	RPM = 196
	Cortador -travado
	Corte -em um lance (desbaste)
	OBS: Amostragem do sinal em 3 momentos: 30, 80, 100 segundos após o início do corte da peça.

Montagem e Dimensões da Peça

- 2 peças colocadas em cada fixação.



CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como citado no capítulo 4, os ensaios foram realizados em duas máquinas diferentes. A primeira máquina utilizada foi uma cortadora de dentes tipo "HOB" convencional (Pfauter PA300). Seis ensaios foram realizados nela, com diferentes condições de usinagem e, depois, devido a alguns resultados não satisfatórios, outros ensaios foram realizados em uma cortadora de dentes CNC. A seguir estão mostrados e discutidos os diversos resultados destes ensaios.

5.1) Ensaios Realizados na Máquina Convencional (Pfauter PA300)

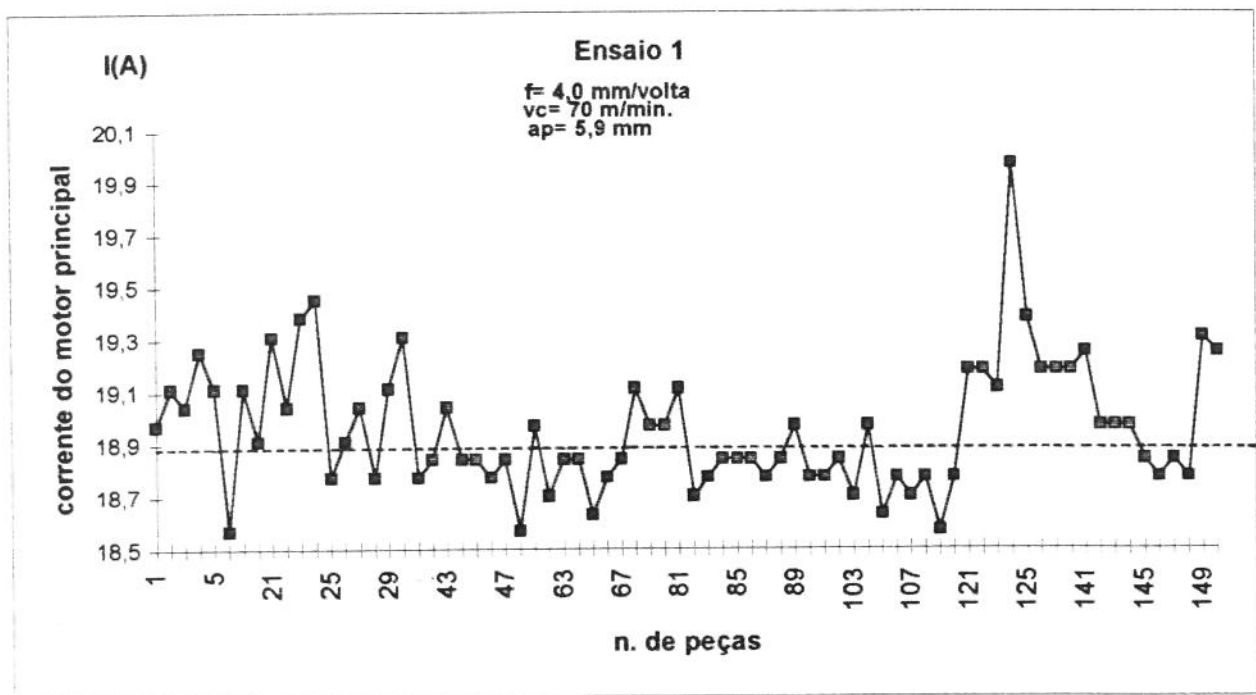


Figura 5.1 - Corrente do Motor Principal x Número de Peças (Máquina Convencional)

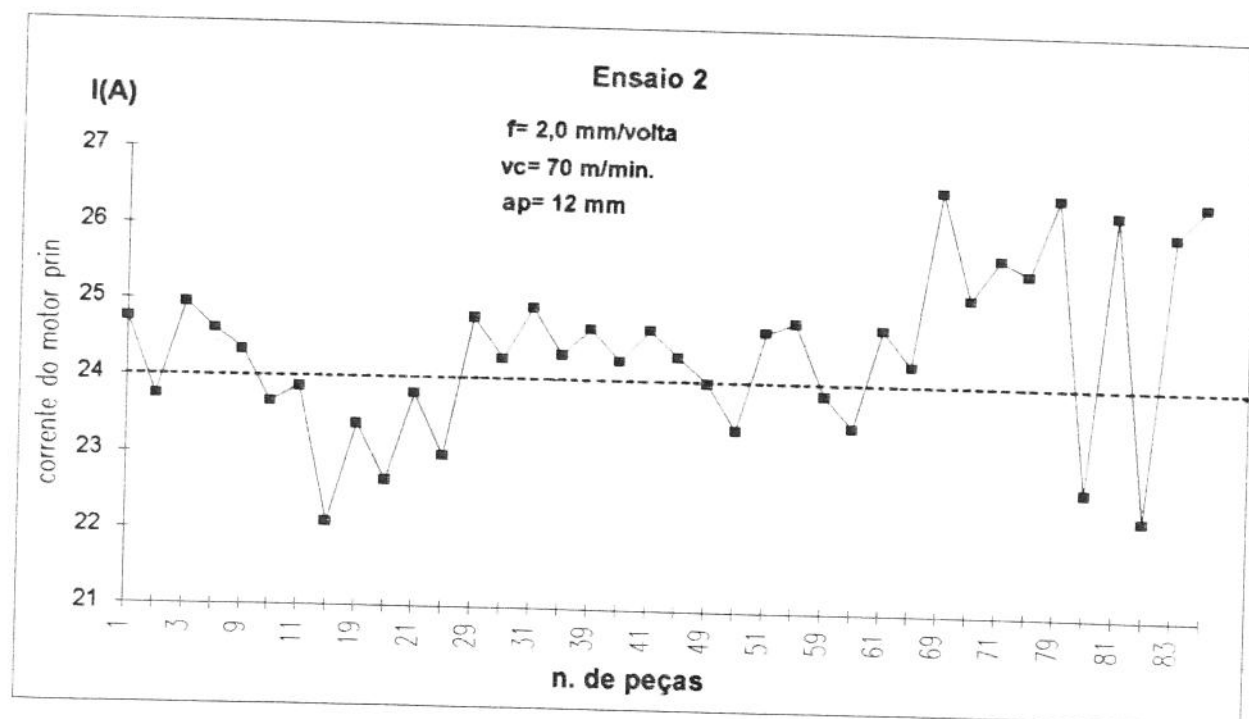


Figura 5.2 - Corrente do Motor Principal x Número de Peças (Máquina Convencional)

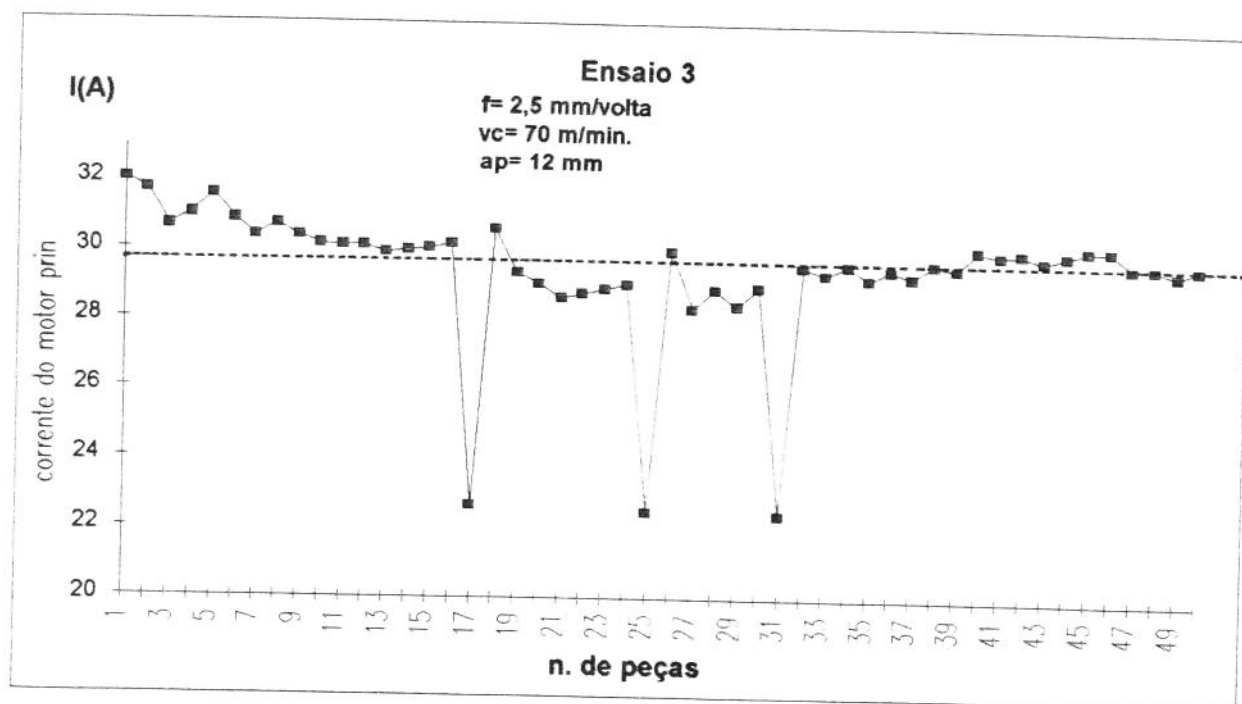


Figura 5.3 - Corrente do Motor Principal x Número de Peças (Máquina Convencional)

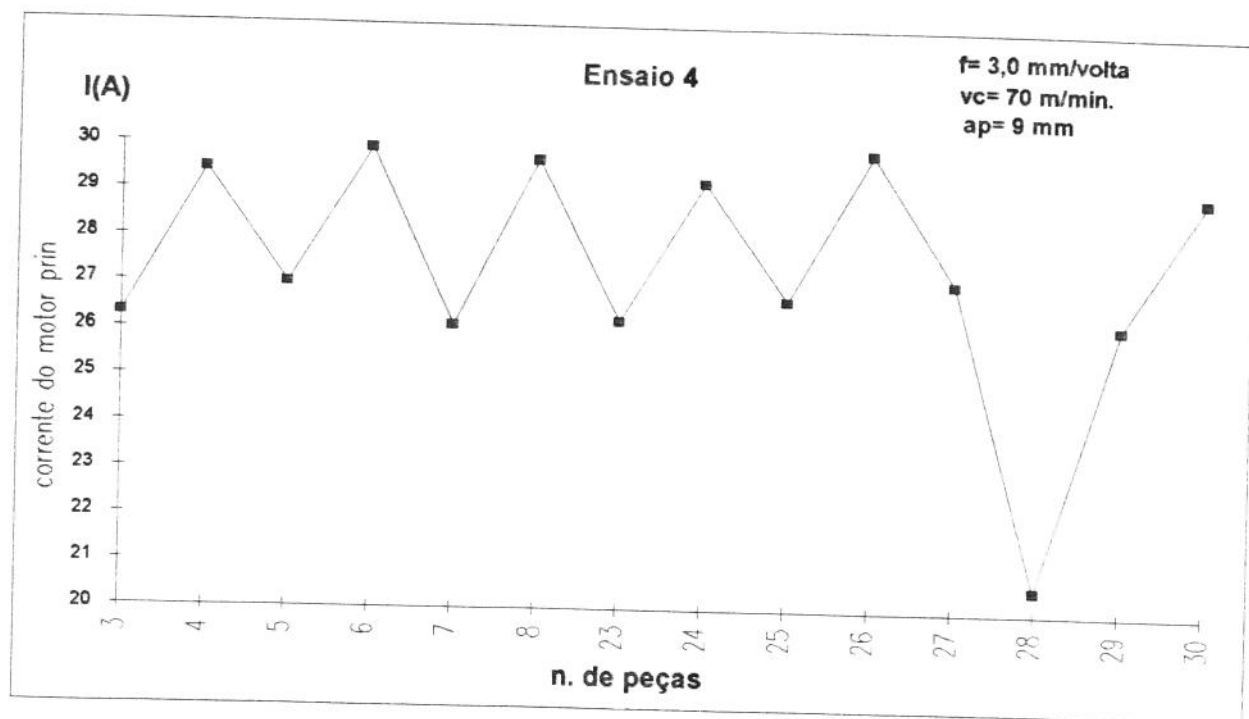


Figura 5.4 - Corrente do Motor Principal x Número de Peças (Máquina Convencional)

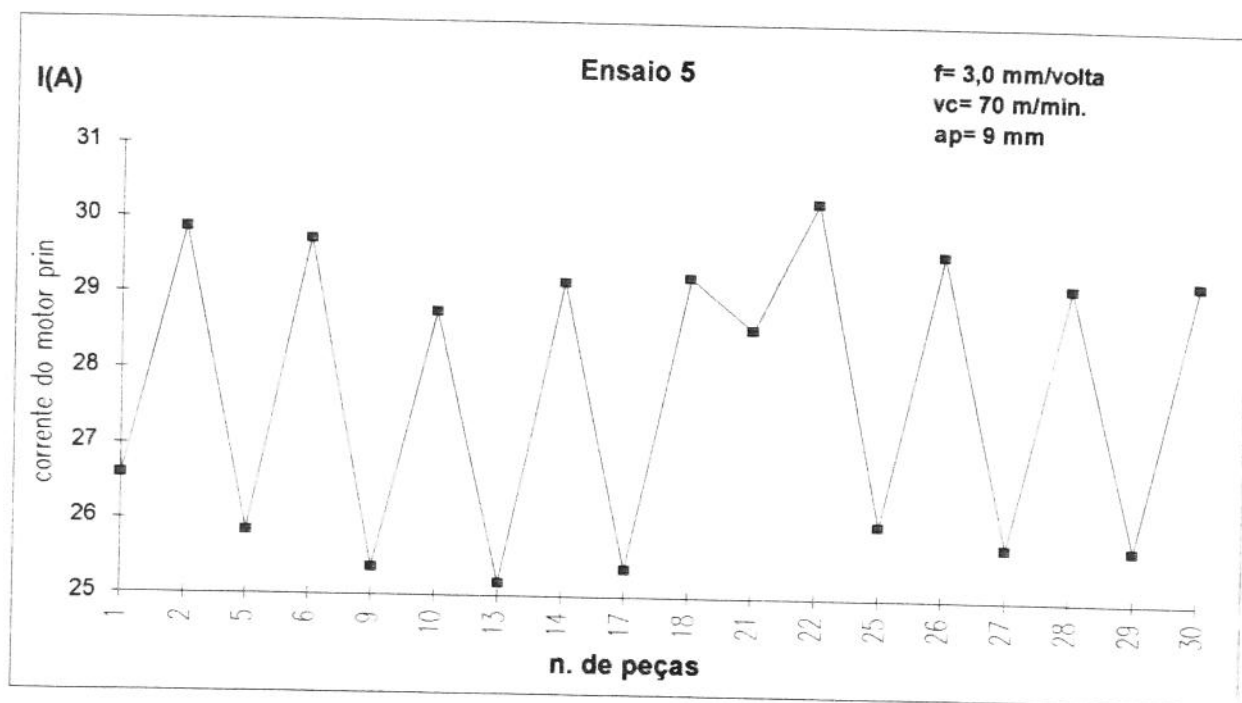


Figura 5.5 - Corrente do Motor Principal x Número de Peças (Máquina Convencional)

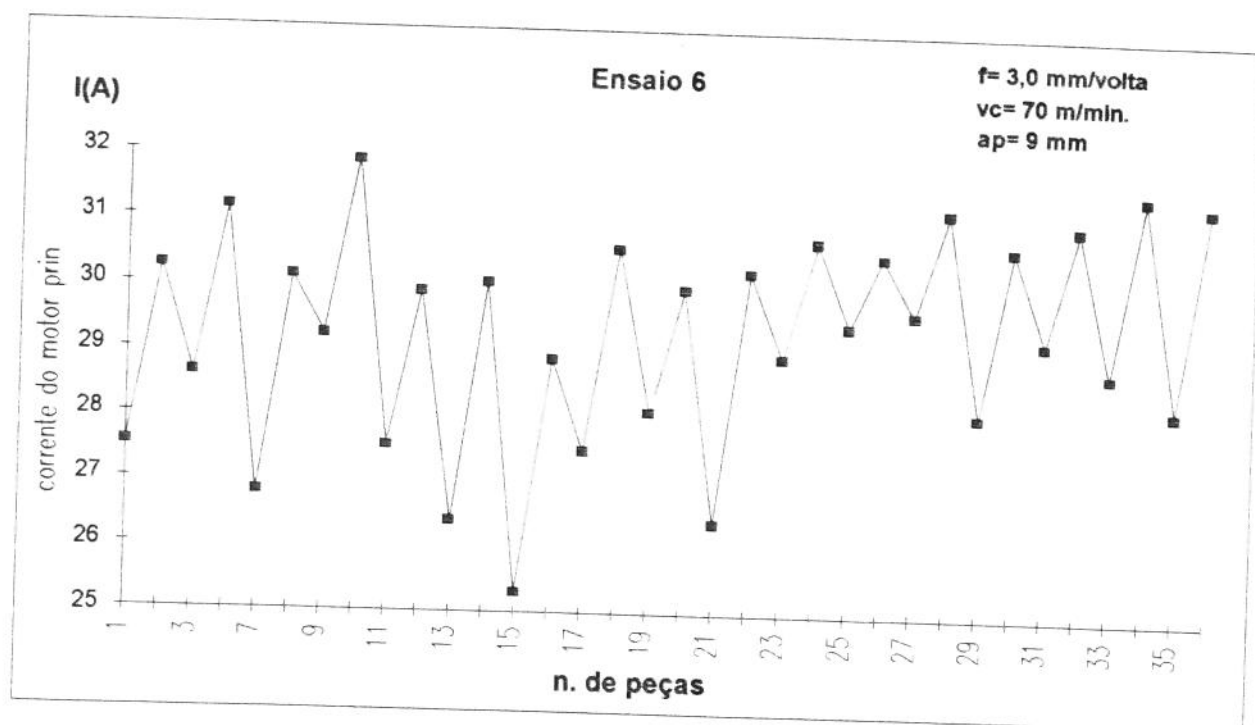


Figura 5.6 - Corrente do Motor Principal x Número de Peças (Máquina Convencional)

As figuras 5.1 a 5.6 mostram as curvas de corrente do motor principal contra o número de peças usinadas por uma ferramenta, para os 6 ensaios realizados. Há que se lembrar que as peças usinadas nos ensaios são do mesmo material e muito semelhantes, já que todas elas pertencem a mesma família de peças, classificadas segundo os procedimentos da "Tecnologia de Grupo". Ainda deve ser lembrado que a amostragem do sinal de corrente foi realizada em três momentos durante o corte de cada peça, mas que somente a terceira amostragem de cada peça foi levada em conta nestas figuras, pois é neste momento que se garante que todo o cortador está dentro da peça.

Alguns pontos a serem comentados são:

- Há sempre uma variação no valor da corrente entre uma peça e a peça seguinte, em todos os gráficos. As peças eram fixadas na máquina em duplas, isto é, a peça 1 foi fixada abaixo da peça 2, a peça 3 abaixo da 4 e assim sucessivamente. Isto causou esta diferença de valores, pois não se conseguiu garantir que o cortador estivesse na mesma posição em relação à peça para os dois cortes (da peça fixada inferiormente e da peça

fixada acima dela). Assim, como a medida que o cortador vai entrando na peça, o volume de cavaco removido cresce até um ponto máximo e, a partir de um determinado ponto, o volume de cavaco removido passa a decrescer, até o cortador sair da peça. Uma pequena diferença no momento da amostragem causou esta variação do sinal.

- Com relação à influência das condições de usinagem nos valores de corrente pode-se notar que:

a) Comparando-se os ensaios 2 e 3 (figuras 5.2 e 5.3) que tem como única diferença de condição de usinagem o avanço (f), pode se notar que quando o avanço é maior ($f = 2.5$ mm/volta), o nível de corrente está em torno de 29 A e quando o avanço cai para $f = 2.0$ mm/volta (queda de 20%), o nível de corrente cai para alguma coisa na casa dos 24 A (queda de 17.2%), mostrando a forte influência do avanço na potência de corte deste tipo de processo de usinagem;

b) Comparando-se os ensaios 1 e 2 onde o produto $a_p \times f$ é aproximadamente constante ($a_p \times f \sim 24 \text{ mm}^2$) e a velocidade de corte é a mesma, vê-se que o sinal foi bem maior no ensaio 2, onde a largura de usinagem é maior e o avanço menor. Isto mostra que a influência de a_p na potência elétrica e consequentemente na força de corte, é bem maior que a de f , pois a diminuição do avanço pela metade não compensou o fato de se ter dobrado a largura de usinagem e a corrente elétrica cresceu.

- Em nenhum dos ensaios pôde se notar um crescimento dos valores de corrente com o número de peças e, portanto, com o crescimento do desgaste da ferramenta e também não se notou nenhum comportamento muito diferente da corrente no fim de vida da ferramenta, que pudesse ser utilizado para determinação do momento de troca da mesma. Isto se explica pelo fato de que o motor da máquina (que teve sua corrente sensoreada) é responsável por todos os movimentos da máquina (sincronismo e funcionamento da máquina). Assim, boa parte da potência consumida do motor não é destinada ao corte, mas a algum outro tipo de movimentação. Com isso, uma pequena variação de potência que o desgaste pudesse causar é muito pequena em relação à

potência total consumida do motor. Além disso, como as ferramentas utilizadas no corte eram recobertas com nitreto de titânio mas já reafiadas, o desgaste de cratera foi muito maior que o desgaste de flanco (a ferramenta só tem sua superfície de saída afiada, retirando a camada de cobertura desta face). Como foi visto anteriormente neste trabalho, o desgaste que tende a fazer a força de corte (e a potência de corte) crescer é o desgaste de flanco, que não cresceu substancialmente nos ensaios.

Dado o exposto acima, concluiu-se que este tipo de sensoriamento do processo não se presta ao estabelecimento do fim da vida da ferramenta, pelo menos quando a máquina utilizada é uma máquina convencional, onde somente um motor é responsável por todos os seus movimentos. Assim, decidiu-se fazer outros ensaios em uma máquina CNC, onde se tem uma maior divisão de tarefas entre os motores da máquina.

5.2) Ensaios Realizados na Máquina C.N.C. (PE300).

Nos ensaios realizados nesta máquina, dois valores de corrente foram medidos, conforme já explicado no capítulo 4 deste trabalho. O primeiro valor é aqui denominado de sinal de acionamento (a maneira de sua obtenção está explicada no capítulo 4). O segundo foi extraído diretamente da entrada do motor de acionamento do eixo-árvore, através de um sensor de efeito Hall. A seguir serão mostrados e discutidos os resultados obtidos nestes ensaios.

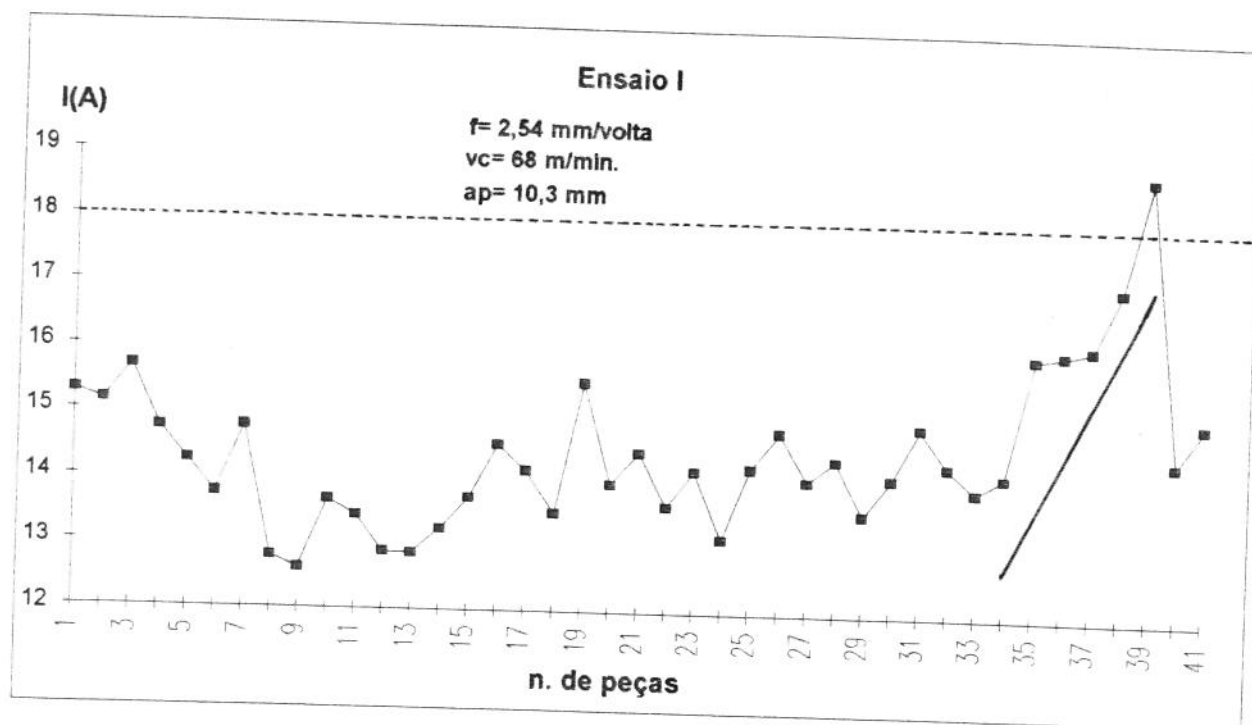


Figura 5.7 - Sinal do Acionamento do C.N.C. x Número de Peças (Máquina C.N.C.)

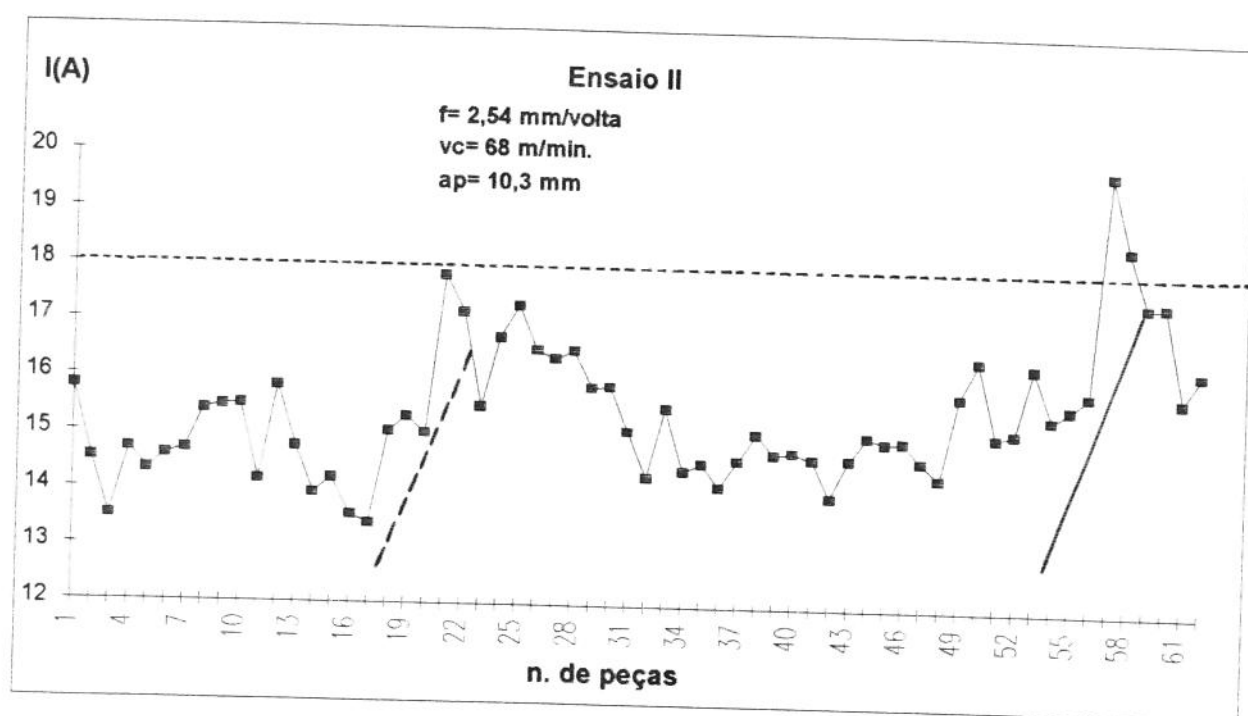


Figura 5.8 - Sinal do Acionamento do C.N.C. x Número de Peças (Máquina C.N.C.)

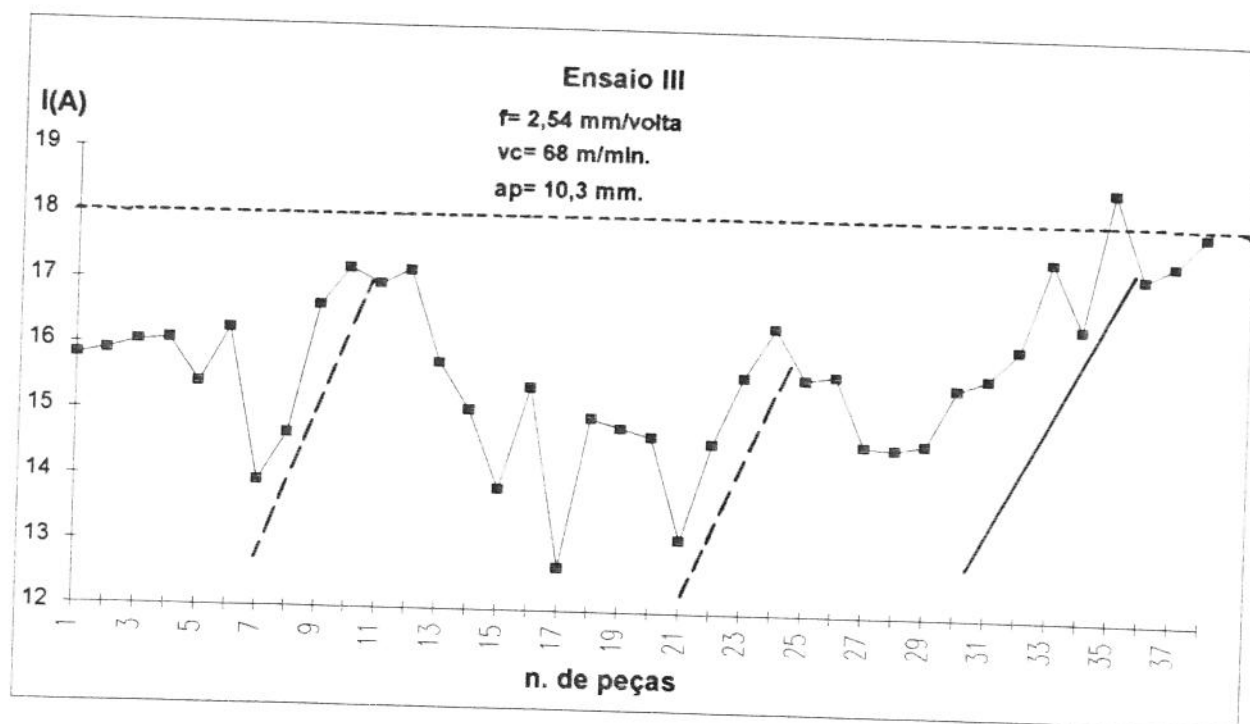


Figura 5.9 - Sinal do Acionamento do C.N.C. x Número de Peças (Máquina C.N.C.)

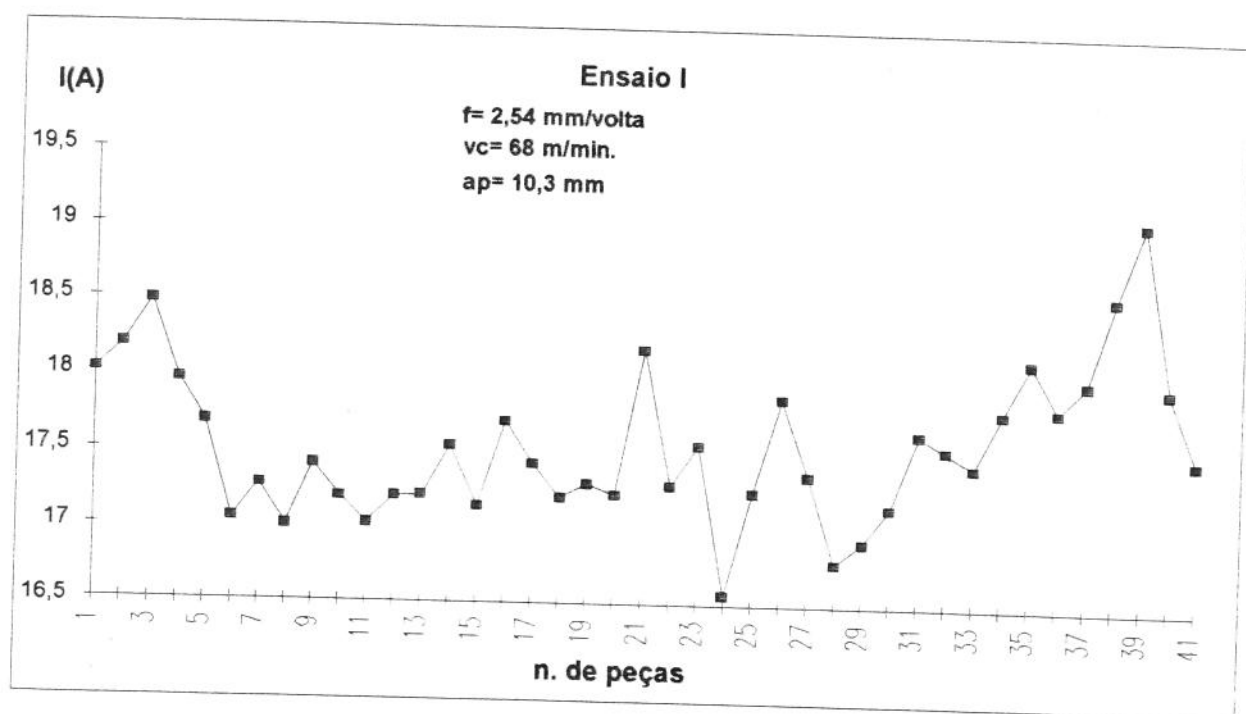


Figura 5.10 - Sinal do Sensor de Efeito Hall x Número de Peças (Máquina C.N.C.)

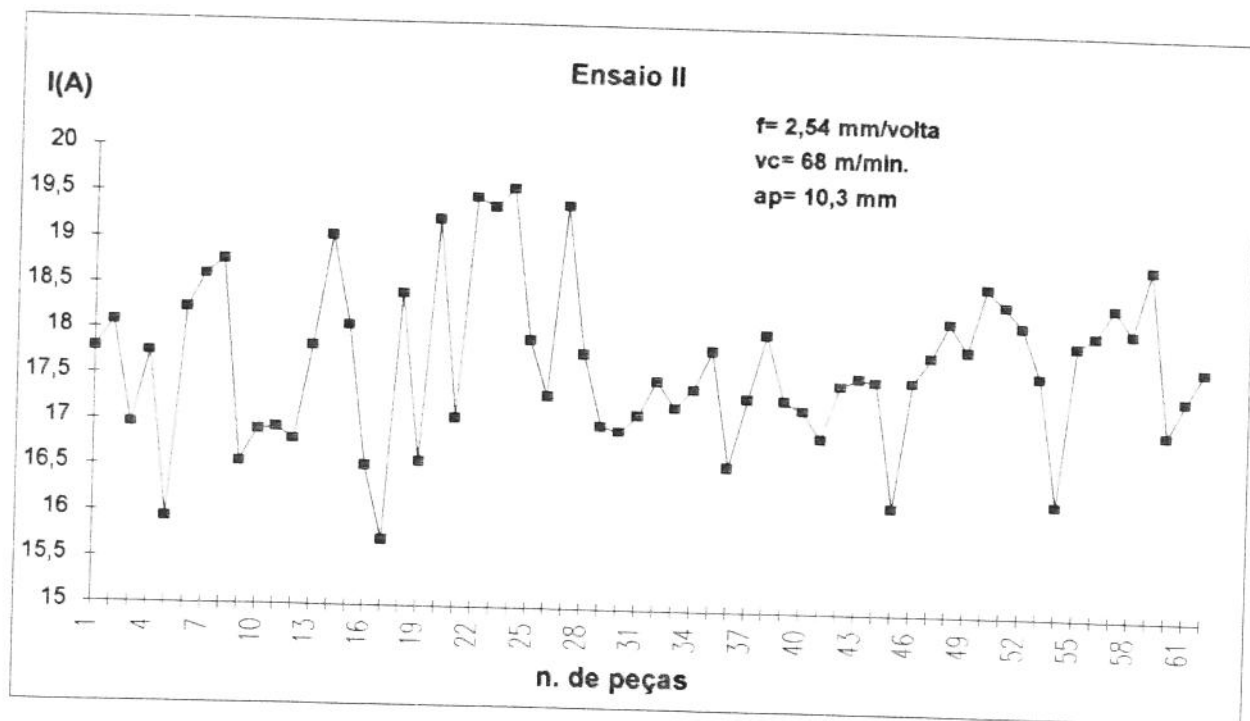


Figura 5.11 - Sinal do Sensor de Efeito Hall x Número de Peças (Máquina C.N.C.)

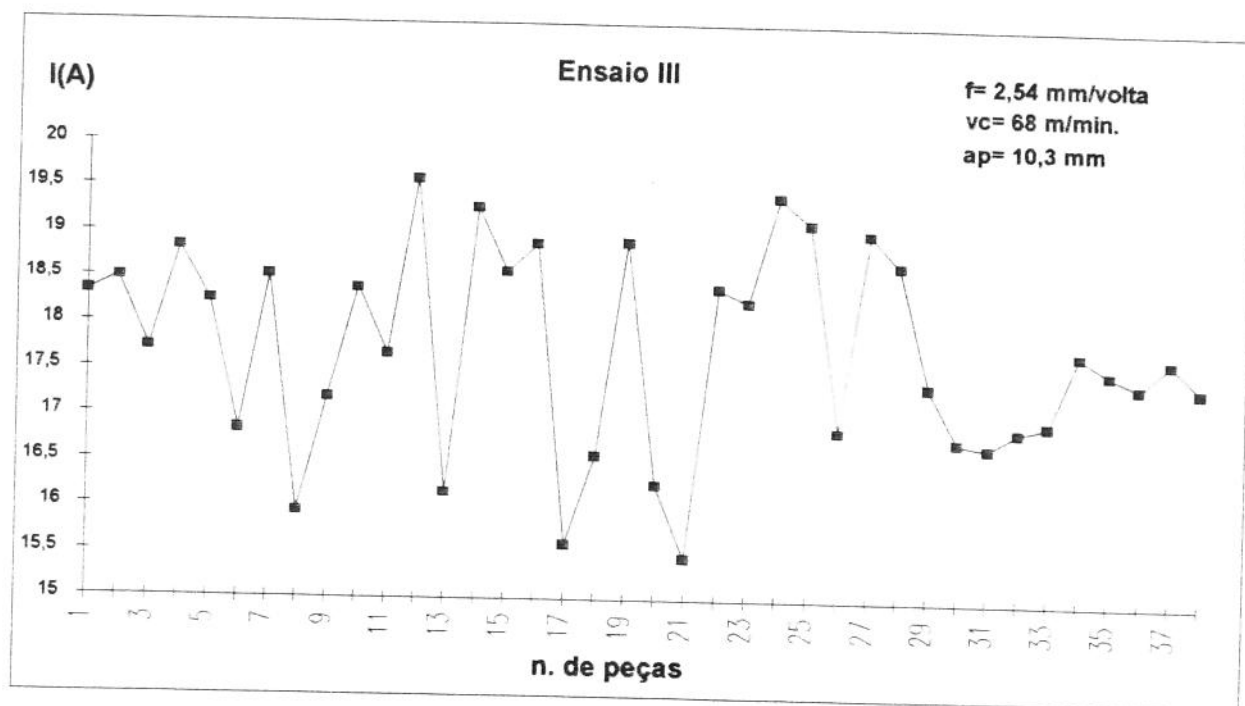


Figura 5.12 - Sinal do Sensor de Efeito Hall x Número de Peças (Máquina C.N.C.)

5.2.1) Análise do Sinal de Acionamento

As figuras 5.7, 5.8 e 5.9 mostram as curvas de corrente elétrica (sinal de acionamento) contra número de peças usinadas por uma ferramenta. Os ensaios foram realizados utilizando-se o mesmo tipo de peças com as mesmas condições de usinagem em todos eles. Cada ensaio continuava até que o operador decidisse que era o momento de trocar a ferramenta, baseado em análise visual do desgaste da mesma. Algumas vezes, o pesquisador que estava ao lado da máquina acompanhando os ensaios, solicitava ao operador que continuasse mais um pouco a cortar com aquela ferramenta, mesmo que este já achasse que era hora de substituí-la.

Nota-se nestas figuras que o valor de corrente cresce bastante quando o fim da vida da ferramenta se aproxima, mesmo que em alguns ensaios, tal valor tenha caído após uma fase de forte crescimento, provavelmente devido ao fato da ferramenta já estar bastante deteriorada. Para se estabelecer uma estratégia de substituição da ferramenta baseado no valor da corrente elétrica do sinal de acionamento, pensou-se nas seguintes hipóteses:

- ### Estabelecer um valor fixo de corrente o qual, quando ultrapassado, definiria o momento de troca da ferramenta - pode-se ver nas três figuras que o sinal somente ultrapassou 18 A momentos antes da troca da ferramenta e em nenhum outro momento. Portanto, tal valor seria confiável como valor limite de corrente elétrica em uma vida da ferramenta. Esta estratégia teria como inconveniente o fato de que, se alteradas as condições de usinagem, novo valor limite teria que ser estabelecido, o que exigiria ensaios prévios para cada nova condição de usinagem;
- ### Utilizar a inclinação da curva Corrente Elétrica X Número de Peças usinadas como parâmetro de estabelecimento do momento de troca - vê-se nas figuras que, ao aproximar-se o fim da vida da ferramenta a corrente elétrica passa a crescer mais rapidamente, aumentando a inclinação da curva citada muito rapidamente. Este procedimento não tem a desvantagem do procedimento anterior, pois, apesar de não se ter testado outras condições, tem-se certeza que este comportamento se repete em

todas as condições de usinagem passíveis de serem utilizadas, pois está relacionado com o desgaste da ferramenta. Em outras palavras, em qualquer condição de usinagem, a medida que o desgaste cresce, a taxa de desgaste (desgaste por unidade de tempo) cresce também, até chegar em um ponto em que, devido ao alto valor do desgaste, a taxa de desgaste muda seu valor rapidamente, o que é refletido nos valores de corrente elétrica, causando o aumento na inclinação da curva citada. O inconveniente deste procedimento é que, em outros momentos da vida da ferramenta, também houve um crescimento abrupto do valor da corrente (entre as peças 17 e 21 na figura 5.8 e entre as peças 7 e 10 na figura 5.9) sem que a vida da ferramenta estivesse no fim, provavelmente causado por algum ruído de origem elétrica. Este acontecimento poderia confundir a estratégia de utilização da inclinação da curva para estabelecimento do momento de fim de vida, isto é, um sistema automático que calculasse o fim da vida da ferramenta baseado na inclinação desta curva, poderia acusar tal momento muito antes de realmente ele ter acontecido, apesar dessa inclinação maior permanecer por um maior tempo quando o fim da vida da ferramenta está próximo (quando a ferramenta ainda está em meio de vida, a inclinação aumenta mas, algumas peças depois volta a cair).

Uma estratégia que provavelmente resolveria este problema seria a utilização de técnicas de redes neurais para a identificação do momento de troca da ferramenta. Tal estratégia não pôde ser testada neste trabalho, pois os experimentos não foram planejados com este intuito e ficaria muito difícil voltar para a empresa para fazer mais um lote de ensaios, depois de tê-los concluído. Mas o autor tem forte desconfiança, baseado em resultados de outros experimentos em processo de torneamento realizados pelo grupo de Monitoramento e Controle do Processo de Usinagem do DEF/FEM/UNICAMP [45], que a utilização de redes neurais resolveria totalmente o problema em questão.

Baseado somente nos resultados e análises realizadas neste trabalho, pode-se afirmar que o monitoramento do processo de corte de dentes de engrenagem com ferramenta HOB via corrente elétrica do sinal de acionamento é uma boa ferramenta para auxiliar

o operador da máquina na decisão do momento de troca da ferramenta, isto é, quando o operador verificar, analisando um amperímetro facilmente instalado na máquina, que o valor desta corrente passou a crescer rapidamente de uma peça para outra, é hora de verificar se a ferramenta ainda está em condições de uso.

Para tornar este sistema de monitoramento totalmente automatizado e independente do operador é necessário realizar-se mais experimentos utilizando a técnica de redes neurais na análise dos resultados obtidos do sinal de acionamento da máquina-ferramenta.

Um outro tipo de análise que pode ser realizada neste sinal é quanto à sua repetibilidade. As figuras 5.7, 5.8, 5.9 foram construídas baseadas em 3 lotes de fabricação de peças idênticas, sendo usinadas com o mesmo tipo de ferramenta (cortador HOB com cobertura de TiN, mas já afiado na superfície de saída) e as mesmas condições de usinagem.

Pode se ver nestas figuras que os valores dos sinais no início de corte para os três ensaios são bem próximos e que seus comportamentos no fim de vida da ferramenta também o são, exceto pelo fato de que o ensaio mostrado na figura 5.9 não apresenta queda depois de um crescimento abrupto (não ocorreu completa deterioração das arestas). Isto demonstra a repetibilidade deste tipo de monitoramento, o que o torna bastante confiável.

O número de peças usinadas por vida da ferramenta variou bastante (de 38 a 57 peças - 50% de variação). Isto reafirma a necessidade de se utilizar algum sistema de monitoramento da ferramenta, ao invés de se estabelecer seu fim de vida baseado em um número de peças determinado estatisticamente.

5.2.2) Análise do Sinal proveniente do Sensor de Efeito Hall

As figuras 5.10, 5.11, 5.12 mostram os resultados obtidos no monitoramento da corrente elétrica do motor da máquina proveniente do sensor de efeito Hall em relação ao número de peças usinadas, nos 3 ensaios realizados na máquina CNC.

Este sinal desde o início de seu monitoramento, não se mostrou confiável, pois apresentava grande variação de uma peça para outra. Para a execução dos ensaios cujos resultados estão mostrados nas figuras, um filtro passa-baixa foi colocado na saída do sensor de efeito Hall a fim de se atenuar a variação do sinal, mas mesmo assim, o sinal apresentou uma dispersão muito grande, conforme pode ser visto nas figuras. Também não se nota nenhuma variação significativa do sinal a medida que a ferramenta se aproxima do fim de sua vida, o que faz com que não se possa utilizar tal sinal para o estabelecimento do momento de troca da ferramenta. Por exemplo, enquanto na figura 5.10 o sinal cresce significativamente quando a ferramenta se aproxima do fim de sua vida, na figura 5.11 isto não acontece e na figura 5.12 o sinal do fim de vida se mostra mais baixo do que a média dos sinais obtidos durante o restante do ensaio e também com uma dispersão menor.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Dados os resultados deste trabalho, podem-se tirar as seguintes conclusões para o monitoramento do corte de dente de engrenagens com cortador HOB, usando a corrente elétrica da máquina-ferramenta:

Máquina convencional:

- Existe uma forte influência tanto do avanço (f), quanto da largura de usinagem (ap) na potência de corte deste tipo de processo de usinagem, sendo que a influência da profundidade de usinagem (ap) na corrente elétrica e consequentemente na potência de corte é bem maior que a do avanço (f).
- Para as máquinas convencionais este tipo de sensoramento do processo não se presta ao estabelecimento do fim de vida do cortador, pois existe somente um motor responsável por todos os movimentos da máquina. Com isso, uma pequena variação de potência que o desgaste pudesse causar é muito pequena em relação à potência total consumida

Máquina CNC :

- O valor da corrente elétrica do sinal do acionamento do CNC cresce bastante quando o fim de vida da ferramenta se aproxima, mesmo que em alguns ensaios, tal valor tenha caído após uma fase de forte crescimento, provavelmente devido ao fato da ferramenta já estar bastante deteriorada.
- O monitoramento do processo de corte de dentes de engrenagem com ferramenta HOB usando a corrente elétrica do sinal de acionamento é uma boa ferramenta para auxiliar o operador da máquina na decisão do momento de troca da ferramenta, isto é, quando o operador verificar, analisando um amperímetro facilmente instalado na máquina, que o valor da corrente passou a crescer rapidamente de uma peça para outra, é hora de verificar se a ferramenta ainda está em condições de uso.

- Pode-se também utilizar um valor fixo de corrente o qual, uma vez ultrapassado, indicaria automaticamente (sem a intervenção do operador) o fim da vida da ferramenta. Porém este procedimento depende de ensaios prévios em cada condição de usinagem testada, pois tal valor varia dependendo das condições de corte.
- Muito provavelmente, a utilização de técnicas de redes neurais para processamento do sinal de acionamento da CNC resolveria definitivamente o problema de estabelecimento automático do fim da vida da ferramenta. Porém este procedimento não pôde ser testado neste trabalho

CAPÍTULO 7

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para a continuação deste trabalho, tem-se:

- Utilização de técnicas de redes neurais para identificação do momento de troca do cortador usando o sinal de acionamento do CNC.
- Utilização de outras técnicas de monitoramento como emissão acústica, vibração.
- Utilização de um sistema técnicas de redes neurais que receba informações de diversos sensores diferentes.
- Treinamento de operadores de máquinas CNC cortadoras de engrenagem com cortador HOB no sentido de capacitá-los a decidir o momento de troca da ferramenta baseado no sinal de corrente elétrica mostrado em um amperímetro instalado na máquina.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Kuljanic. "METHOD FOR INCREASING TOOL LIFE IN HOBBING (MITL - HOBBING)", Annals of the CIRP vol. 38 (1), pp. 91-94 (1989).
- [2] Y. Altintas. "PREDICTION OF CUTTING FORCES AND TOOL BREAKAGE IN MILLING FROM FEED DRIVE CURRENT MEASUREMENTS", Journal of Engineering for Industry, vol. 114, pp. 386-392 (1992).
- [3] J. C. Crockett. "GEAR CUTTING PRACTICE, MACHINES AND TOOLS", The Machinery Publishing CO. LTD. (1971).
- [4] G. F. Micheletti, W. König, R. H. Victor. "IN PROCESS TOOL WEAR SENSORS FOR CUTTING OPERATIONS", Annals of the CIRP, vol. 25, pp. 483-496 (1976).
- [5] J. P. Womack, D. T. Jones, D. Roos, D. Carpenter. "A MÁQUINA QUE MUDOU O MUNDO", Editora Campos (1992).
- [6] G. F. Micheletti, A. De Filippi, R. Ippolito, "TOOL WEAR AND CUTTING FORCES IN STEEL TURNING", Proceedings of International Conference Technology, pp. 25-28 (1967).
- [7] A. Machado. "COMANDO NUMÉRICO APLICADO ÀS MÁQUINAS FERRAMENTA", Editora Icone (1990)
- [8] H. K. Tönshoff, J. P. Wulfsberg, H. J. J. Kals, W. König, van Luttervelt. "DEVELOPMENTS AND TRENDS IN MONITORING AND CONTROL OF MACHINING PROCESSES", Annals of the CIRP VOL. 37 (2), PP. 611-622 (1988).
- [9] D. Ferraresi. "FUNDAMENTOS DA USINAGEM DOS METAIS", Editora Edgard Blucher - São Paulo Brasil (1970).
- [10] G. Warnecke, A. Jenewein. "A CUTTING FORCE MODEL FOR TOOL CONDITION MONITORING WHEN TURNING WITH CERAMIC TOOLS", Proceedings of the 16th North American Manufacturing Research Conference, pp. 171-177 (1988).
- [11] M. A. S. Arıkan. "PERFORMANCE RATING OF SPUR GEAR WITH NONSTANDARD PROPORTIONS AND PROFILES", Annals of the CIRP vol. 42 (1), pp. 189-192 (1993).
- [12] Society of Manufacturing Engineers. "TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS HANDBOOK - MACHINING", 4th edition. Dearborn: one SME drive. v. 1, pp. 5-65 a 5-70 (1983).

- [13] M. C. Shaw. "METAL CUTTING PRINCIPLES", Clarendon Press Oxford, New York, USA (1986).
- [14] J. L. Stein, Kyung-Chul Shin, "CURRENT MONITORING OF FIELD CONTROLLED DC SPINDLE DRIVERS", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. Vol. 108, pp 289-295 (December 1986).
- [15] K. Uehara. "NEW ATTEMPTS FOR SHORT TIME TOOL LIFE TESTING", Annals of the CIRP, vol. 22, pp. 23,24 (1973).
- [16] C. G. Harris, J. H. Williams, A. Davies. "CONDITION MONITORING OF MACHINE TOOLS", International Journal of Production Research, vol. 27 (9), pp. 1445-1464 (1989).
- [17] J. U. Jeon, W. Kim. "OPTICAL FLANK WEAR MONITORING OF CUTTING TOOLS BY IMAGE PROCESSING", Wear vol. 127, pp. 207-217 (1988).
- [18] D. Bouzakis, "OPTIMAL SELECTION OF MACHINING DATA IN GEAR HOBGING REGARDING THE TOOL MECHANICAL STRESSES OCCURING DURING THE CUTTING PROCESS", Annals of the CIRP Vol. 37 (1), pp. 109-112 (1988).
- [19] B. Colding, A. Novak, "SENSING OF WORKPIECE DIAMETER, VIBRATION AND OUT-OF-ROUNDNESS BY LASER WAY TO AUTOMATE QUALITY CONTROL", Annals of the CIRP, vol. 30, pp. 437-476 (1981).
- [20] N. H. Cook. "TOOL WEAR SENSOR", Wear, vol. 62, pp. 49-57 (1980).
- [21] S. Jetly. "MEASUREMENT OF CUTTING TOOL WEAR ON LINE: SOME PRATICAL CONSIDERATIONS", Manufacturing Engineering, pp. 55-60 (1984).
- [22] J. L. El Gomayel, K. D. Bregget. "ON LINE TOOL WEAR SENSING FOR TURNING OPERATION", Journal of Engineering for Industry, vol. 108, pp. 44-46 (1986).
- [23] E. Kanatley-Asibu, D.A. Dornfeld. "A STUDY OF TOOL WEAR USING STATISTICAL ANALYSIS OF METAL CUTTING ACOUSTIC EMISSION", Wear vol. 76, pp. 261 268 (1981).
- [24] T. Blum. "STUDY OF ACOUSTIC EMISSION MONITORING IN METAL CUTTING", Phd Thesis, Keyo University, Tokio, Japan (1988).
- [25] H. Takeyama, Y. Doi, T. Mitsoka & H. Sekiguchi. "SENSORS OF TOOL LIFE FOR OPTIMIZATION OF MACHINING", Proceedings of the 18th IMTDR, pp. 191-208 (1967).
- [26] Catalogo SANDVIK COROMANT "Ferramentas de Tornear" - (1993/94).

- [27] M. A. Mannan, S. Broms. "MONITORING AND ADAPTATIVE CONTROL OF CUTTING PROCESS BY MEANS OF MOTOR POWER AND CURRENT MEASUREMENTS", Annals of de CIRP vol. 38 (1) pp 347-350 (1989).
- [28] T. Moriwaki, "APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION MEASUREMENT TO SENSING OF WEAR AND BREAKAGE OF CUTTING TOOL", Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, vol. 17. pp. 154-160 (1983).
- [29] I. Inasaki, S. Yonetsu. "IN PROCESS DETECTION OF CUTTING TOOL DAMAGE BY ACOUSTIC EMISSION MEASUREMENT", Proc. of 22th IMTDR, pp 261-268 (1981).
- [30] PARALLEL INVOLUTE GEARS - ISO systems of accuracy (NORMA ISO 1328) UDC 621.831/.833 (1975).
- [31] P. M. Lister, G. Barrow. "TOOL CONDITION MONITORING SYSTEM", Proc. of 26th IMTDR, pp 271-288 (1986).
- [32] Y. Kakino. "MONITORING OF METAL CUTTING AND GRINDING PROCESSES BY ACOUSTIC EMISSION", Journal of Acoustic Emission Vol. 3 (3) pp 108-116 (1984).
- [33] N. C. Gil de Oliveira. "ENGRENAGENS", Grêmio Politécnico USP (1982).
- [34] J. Thusty, G. C. Andrews. "A CRITICAL REVIEW OF SENSORS FOR UNMANNED MACHINING", Annal of the CIRP vol. 33 pp 563-572 (1983).
- [35] S. L. Jacobsen, R. Ayre. "ENGINEERING VIBRATIONS WITH APLICATIONS TO STRUTURES AND MACHINERY", MacGraw Hill, (1956)
- [36] A. Tua, "HOBBS (Manual de Corte de Engrenagens pelo Processo Hobb)", (em poder do autor)
- [37] A. De Filippi & R. Ippolito. "ADAPTIVE CONTROL IN TURNING: CUTTING FORCES AND TOOL WEAR RELATIONSHIP FOR P10, P20, P30 CARBIDES", Annals of the CIRP, vol. 27, pp 377-385 (1969).
- [38] N. Constantinides; S. Bennett. "AN INVESTIGATION OF METHODS FOR THE ON-LINE ESTIMATION OF TOLL WEAR", International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 27 (2) pp. 225-237 (1986).
- [39] L. Dan; J. Mathew. "TOOL WEAR AND FAILURE MONITORING TECHNIQUES FOR TURNING - A REVIEW", International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 30 (4) pp 579-594 (1990)

[40] T. Ohtani, K. Fujise & H. Yokogawa. "CUTTING FORCES CHARACTERISTICS IN MACHINING OF HARDENED STEEL", Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, vol. 20 (2), pp. 127-129, (1986).

[41] O. S. Lobosco; J. L. P. C. Dias. "SELEÇÃO E APLICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS" Vol. I e II (Siemens S.A.) McGraw Hill - 1989

[42] J. L. Stein & H. W. Churn. "ANALYSIS OF POWER MONITORING ON AC INDUCTION DRIVE SYSTEMS", Vol. 112, pp. 239-248 (1990).

[43] D. U. Braga. "MONITORAMENTO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO VIA PARÂMETROS DO MOTOR DA MÁQUINA", Tese de Mestrado UNICAMP (1992).

[44] CAD 12/36. "MANUAL DO USUÁRIO E DE REFERÊNCIA", Linx Eletrônica (1990).

[45] A. E. Diniz, C. M. Hara. "UTILIZAÇÃO DE REDES NEURAIS NA ANÁLISE DOS SINAIS DE VIBRAÇÃO PARA ESTABELECIMENTO DO FIM DE VIDA DA FERRAMENTA DE TORNEAMENTO", Trabalho submetido ao XIII COBEM, 1995.

Bibliografia Auxiliar

[46] H. J. Jacobs, B. Hentschel, B. Stange. "INTELLIGENCE TOOL MONITORING FOR MACHINING", International Journal of Production Research, vol. 26 (10), pp. 1579-1592 (1988).

[47] R. Galczynski, "THE EFFECT OF HOB WEAR ON THE LEVEL OF VIBRATION GENERATED IN HOBBING", International Journal of Machine Tools Design and Research Conference, vol. 24 (4), PP. 295-309 (1984)

[48] R. Galczynski, "EFFECT OF THE HOB WEAR ON THE SOUNDS EMITTED IN THE GEAR HOBBING PROCESS", Precision Engineering vol. 6, pp. 25-30 (1984).

[49] K. Uehara, F. Kiyosawa, H. Takeshita. "AUTOMATIC TOOL WEAR MONITORING IN NC TURNING", Annal of the CIRP vol. 32 pp. 563-572 (1983).

[50] H. Prashad, "EFFECT OF OPERATING PARAMETERS ON THE THRESHOLD VOLTAGES AND IMPEDANCE RESPONSE OF NON-INSULATED ROLLING ELEMENT BEARINGS UNDER THE ACTION OF ELECTRICAL CURRENTS", Wear 117 pp 223-240 (1987)

[51] R. T. Lubbem. "JUST IN TIME", McGraw Hill - 1988

[52] O. L. Agostinho. "(SISTEMAS DE MANUFATURA), (TECNOLOGIA DE GRUPO), (SISTEMAS FLEXÍVEIS DE MANUFATURA) E (RELAÇÃO

ESTRATÉGICA ENTRE INTEGRAÇÃO DE MANUFATURA E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO)", Apostilas dos cursos de Pós-Graduação UNICAMP.