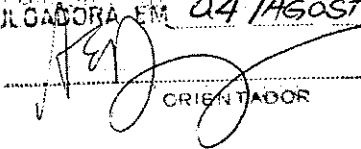


ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR JOÃO BATISTA
QUIRINO E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 04/AGOSTO/2000


ORIENTADOR

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

**CONTROLE DE VIDA DA FERRAMENTA
CARACOL - PARÂMETRO TEÓRICO**

Autor : JOÃO BATISTA QUIRINO
Orientador: ANSELMO EDUARDO DINIZ

56/00

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

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

CONTROLE DE VIDA DA FERRAMENTA CARACOL - PARÂMETRO TEÓRICO

Autor : JOÃO BATISTA QUIRINO

Orientador: ANSELMO EDUARDO DINIZ

Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração: MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

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

Campinas, 2000

S.P. - Brasil

200017483



UNIDADE BC
 N.º CHAMADA: 1/Unicamp
Q48c
 V. Ex.
 TOMBO BC/ 43079
 PROC. 16-278/00
 C ☐ D ☒
 PREC. R\$ 99,00
 DATA 24/09/00
 N.º OPD

CM-00153165-2

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

Q48c Quirino, João Batista
 Controle de vida da ferramenta caracol – parâmetro
 teórico. / João Batista Quirino.--Campinas, SP: [s.n.],
 2000.

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

1. Ferramentas. 2. Engrenagens. 3. Máquinas-
 ferramenta – Indústria. I. Diniz, Anselmo Eduardo. II.
 Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Mecânica. III. Título.

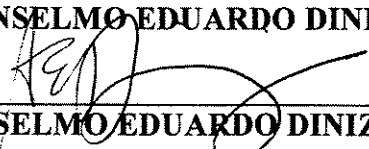
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

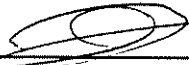
CONTROLE DE VIDA DA FERRAMENTA
CARACOL - PARÂMETRO TEÓRICO

Autor : **JOÃO BATISTA QUIRINO**

Orientador: **ANSELMO EDUARDO DINIZ**



Prof. Dr. ANSELMO EDUARDO DINIZ, Presidente
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



Prof. Dr. ANTONIO BATOCCHIO
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



Prof. Dr. JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP

Campinas, 04 de Agosto de 2000

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha querida esposa e filhos.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas as quais presto minha homenagem:

À minha esposa e filhos que aceitaram dividir com os livros a minha atenção e sempre me incentivaram.

Ao meu orientador, que me guiou para além das teorias, das filosofias e das técnicas.

A todos os colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

O homem se torna muitas vezes o que ele próprio acredita que é.

RESUMO

Quirino, J. B. , Vida da ferramenta caracol recoberto com nitreto de titânio no corte de engrenagens cilíndricas, Campinas, : Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 109 p. Dissertação de Mestrado.

O corte de dentes de engrenagem com ferramentas caracol é o processo mais utilizado para a produção de engrenagens em larga escala. Além disso, é um processo que remove uma grande quantidade de cavaco e a ferramenta que o realiza tem um alto custo, com uma afiação e cobertura também de alto custo. Porém, seu estudo no meio acadêmico é muito pobre, com poucos trabalhos versando sobre este assunto. Este trabalho procura preencher um pouco desta lacuna. O principal objetivo deste trabalho é o controle de vida da ferramenta Caracol recoberto com nitreto titânio (TiN), no corte de dentes de engrenagens cilíndricas, fornecendo um parâmetro teórico que relacione o desgaste de folga " VB_N " do cortador Caracol com o número de peças produzidas, através do volume de cavaco removido por dente do cortador " V_o ". Procura-se provar que este parâmetro é independente de características da engrenagem como módulo e número de dentes. Para isto, diversos lotes de engrenagens diferentes (porém, de mesmo material) de uma empresa da região de Campinas foram produzidos com cortadores diferentes (porém com o mesmo material) e acompanhados, a fim de que a substituição do cortador fosse realizada sempre seguindo o mesmo critério de troca ($VB_N \sim 0,20$ a $0,30$ mm). Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente provando que o fator " V_o " é uma boa estratégia de

substituição da ferramenta (fim de vida). Para sua utilização deve-se estabelecer o valor de "Vo" para um determinado par cortador–engrenagem e depois utilizá-lo em outros pares, mantendo o número de entradas do cortador, as condições de usinagem e o material do cortador e da engrenagem.

Palavras chave

- Caracol, Ferramentas para engrenagens, Fabricação de engrenagens.

ABSTRACT

Quirino, J. B. , Life of Hob tool coated with titanium nitride in manufacturing cylindrical gears, Campinas, : Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 109 p. Dissertação de Mestrado.

The cutting process of gear teeth using hob tool is the most used process in large scale production of gears. Besides, it is a process which removes a large amount of chip and which has a very expensive tool, with a very expensive sharpening and coating process. However, researches about it are very seldom. This work tries to fill part of this gap. The main objective of this work is to control the hob tool life, when it is cutting cylindrical gears. This purpose is going to be reached through the use of a theoretical parameter called volume of chip removed by each cutter tooth (V_o), which relates tool flank wear with the number of produced parts. The hob tool is made of sinterized high speed steel coated with a thin layer of titanium nitride (TiN). The final goal is to prove that this parameter is independent of the gear characteristics such module and number of teeth. Aiming this goal, several batches of different gears (with the same material) from an automotive company of Campinas region were produced with different tools (with the same material) and monitored, in order the tool replacement could be done following the same replacing criterion (flank wear ~ 0.20 to 0.30 mm). The results were statistically analyzed and it was proved that the “ V_o ” parameter is a good tool replacement strategy. For its utilization, it is necessary to

establish the “Vo” value for a given pair “gear-cutter” and later use it for other pairs, since the number of cutter threads, the cutting conditions and the tool and gear material be kept constant.

Key Words

- Hob, Tools for Gears, Gear Manufacturing, Gear Cutting

Índice

Lista de figuras	iv
Lista de tabelas	vii
Lista de fórmulas	ix
Nomenclatura	xi

Capítulo 1

Controle de vida da ferramenta caracol – Parâmetro teórico

1.1 Introdução	1
----------------	---

Capítulo 2

Conceitos fundamentais – Análise do produto

2.1 Introdução teórica	4
2.2 Tipos de engrenagens	5
2.3 Ciclo de fabricação de engrenagens cilíndricas	6
2.4 Qualidade de engrenagens	7
2.4.1 Introdução teórica	7
2.4.2 Controle do corpo da engrenagem " Blank "	8
2.4.3 Controle do dentado	10
2.4.3.1 Desvio de divisão do dentado	10
2.4.3.2 Desvio de excentricidade do diâmetro primitivo	13
2.4.3.3 Desvio de perfil evolvente	13
2.4.3.4 Desvio de passo da hélice	14
2.4.3.5 Desvio composto radial (batimento)	15

2.4.4	Controle do dentado em posição de funcionamento (par)	16
2.4.4.1	Normalizados	16
2.4.4.2	Não Normalizados	16

Capítulo 3

Conceitos fundamentais – Cortador caracol

3.1	Introdução teórica	17
3.2	Conceituação	18
3.3	Princípios de geração	19
3.4	Movimentos de avanço	21
3.4.1	Avanço axial	22
3.4.2	Avanço radial	23
3.4.3	Avanço tangencial	23
3.5	Fresadora CNC	24
3.6	Estratégia de deslocamento tangencial " shifting "	26
3.6.1	Cálculo do comprimento de " shifting " total	26
3.6.2	Cálculo do " shifting " e " sub-shifting "	28
3.7	Controle de vida	29
3.7.1	Parâmetro teórico - Fator "Vo"	30
3.8	Sistemas de corte	32
3.9	Forças de corte	34
3.10	Área da seção de corte	37
3.11	Espessura do cavaco	38
3.12	Ondulações nos flancos	39
3.13	Aplicação do cortador caracol	40
3.14	Características do cortador caracol	41
3.14.1	Forma geométrica	41
3.14.2	Tipo de cortador caracol	42
3.15	Materiais do cortador	44
3.15.1	Recobrimento	48
3.16	Desgastes	51
3.16.1	Mecanismo do desgaste de uma ferramenta	51
3.16.2	Critério de desgaste	55

3.17	Afiação	59
3.17.1	Afiação do cortador caracol	59
3.17.2	Métodos de afiação	60
3.17.3	Efeito da técnica de afiação na vida do caracol	61
3.17.4	Erros de afiação	61
3.17.4.1	Erro de radialidade dos canais	62
3.17.4.2	Erro de espaçamento entre canais	62
3.17.4.3	Erro de passo dos canais	63

Capítulo 4

Materiais, equipamentos e procedimentos experimentais

4.1	Introdução	64
4.2	Desenvolvimento dos ensaios e critério de fim de vida	65
4.3	Máquina, material e ferramenta	67
4.4	Desenvolvimento dos ensaios	70

Capítulo 5

Resultados e discussões

5.1	Análise estatística dos resultados	85
-----	------------------------------------	----

Capítulo 6

Conclusões

Capítulo 7

Sugestões para trabalhos futuros

Referências bibliográficas

Anexos

Lista de figuras

2.1	Tipos de engrenamentos - Engrenagens cilíndricas	5
2.2	Ciclo simplificado de manufatura com acabamento antes do tratamento térmico	7
2.3	Corpo da engrenagem " Blank "	9
2.4	Desvio de divisão do dentado	11
2.5	Desvio individual de passo circular	11
2.6	Desvio acumulado	12
2.7	Desvio de excentricidade	13
2.8	Desvio de perfil evolvente	14
2.9	Desvio de passo da hélice	15
2.10	Desvio composto radial	15
3.1	Família de tangentes	18
3.2	Processo de geração	18
3.3	Engrenagem e cremalheira do caracol	19
3.4	Posição relativa entre a peça e o cortador caracol	20
3.5	Movimentos de avanço	21
3.6	Avanço axial	22
3.7	Avanço radial	23
3.8	Avanço tangencial	24
3.9	Fresadora CNC	25
3.10	Regiões do cortador caracol	27
3.11	" Shifting " e " sub – shifting "	28
3.12	Perfil do dente - Engrenagem padronizada	29

3.13	Perfil do dente - Engrenagem modificada	31
3.14	Sistemas de corte " Climb " e Convencional	32
3.15	Simulação da força de corte por dente em um determinado instante de corte	35
3.16	Área da seção de corte	37
3.17	Profundidade das marcas de avanço	39
3.18	Desvio do perfil evolvente	40
3.19	Perfis possíveis de serem obtidos na usinagem com ferramenta caracol	41
3.20	Caracol integral " Blank "	42
3.21	Perfil do cortador caracol	43
3.22	Performance do processo – Máxima velocidade de corte	46
3.23	Performance do processo – Máxima espessura do cavaco	47
3.24	Micrografia da camada de TiN	49
3.25	Desgaste da aresta de corte de uma ferramenta	51
3.26	Componentes do desgaste frontal de uma ferramenta	52
3.27	Desgaste no dente do cortador recoberto com TiN	54
3.28	Desgaste no dente de um cortador caracol	55
3.29	Desgaste no flanco $VB_N \times N_{TSH}$	56
3.30	Desgaste no flanco $VB_N \times N_{TSH}$	56
3.31	Desgaste no flanco $VB_N \times f_a$	57
3.32	Desgaste no flanco $VB_N \times V_c$	58
4.1	Desgaste VB_N	66
4.2	Máquina CNC	68
4.3	Engrenagem	68
4.4	Engrenagem do contra eixo	69
4.5	Engrenagem do eixo piloto	69
4.6	Cortador caracol	70
5.1	Desgaste " $VB_N = 0,18 \text{ mm}$ "	76
5.2	Desgaste " $VB_N = 0,29 \text{ mm}$ "	77
5.3	Desgaste do cortador no momento de sua substituição versus vida da ferramenta em volume de cavaco removido	81

5.4	Dispersão da vida da ferramenta em volume de cavaco removido por dente do cortador – cortadores de uma entrada	82
5.5	Dispersão da vida da ferramenta em volume de cavaco removido por dente do cortador – cortadores de duas entradas	82
5.6	Desgaste do cortador no momento de sua substituição versus vida da ferramenta em volume de cavaco removido	83
5.7	Dispersão da vida da ferramenta em volume de cavaco removido por dente do cortador – cortadores de uma entrada	84
5.8	Distribuição normal padrão	85

Lista de tabelas

3.1	Aços (MP) para ferramentas	47
4.1	Primeiro ensaio	70
4.2	Condições de usinagem do primeiro ensaio	71
4.3	Segundo ensaio	71
4.4	Condições de usinagem do segundo ensaio	71
4.5	Terceiro ensaio	72
4.6	Condições de usinagem do terceiro ensaio	72
4.7	Quarto ensaio	72
4.8	Condições de usinagem do quarto ensaio	73
4.9	Quinto ensaio	73
4.10	Condições de usinagem do quinto ensaio	73
4.11	Sexto ensaio	74
4.12	Condições de usinagem do sexto ensaio	74
5.1	Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no primeiro ensaio	77
5.2	Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no segundo ensaio	77
5.3	Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no terceiro ensaio	78

5.4	Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no quarto ensaio	78
5.5	Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no quinto ensaio	79
5.6	Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no sexto ensaio	79
5.7	Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no ensaio com $V_c = 120 \text{ m / min}$	79
5.8	Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no ensaio com $V_c = 120 \text{ m / min}$	80
5.9	Média e desvio padrão da vida da ferramenta em volume de cavaco removido cortadores com uma entrada e velocidade de corte igual a 90 m / min	86
5.10	Unidades de desvio padrão (Z) da média do processo e porcentagem fora dos limites de controle – Cortadores com uma entrada e velocidade de corte igual a 90 m / min	86
5.11	Média e desvio padrão da vida da ferramenta em volume de cavaco removido cortadores com duas entradas e velocidade de corte igual a 90 m / min	87
5.12	Unidades de desvio padrão (Z) da média do processo e porcentagem fora dos limites de controle – Cortadores com duas entradas e velocidade de corte igual a 90 m / min	87
5.13	Média e desvio padrão da vida da ferramenta em volume de cavaco removido cortadores com uma entrada e velocidade de corte igual a 120 m / min	88
5.14	Unidades de desvio padrão (Z) da média do processo e porcentagem fora dos limites de controle – Cortadores com uma entrada e velocidade de corte igual a 120 m / min	88

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Lista de fórmulas

3.1	Passo de base	19
3.2	Relação de rotação no engrenamento	20
3.3	Relação de indexação	21
3.4	Relação de avanço	22
3.5	Relação de avanço em uma revolução da peça	23
3.6	Região de geração do perfil	27
3.7	Região de entrada	27
3.8	Região de engrenamento	27
3.9	Margem de segurança do cortador	28
3.10	Comprimento do " shifting " total	28
3.11	" Shifting "	29
3.12	" Sub - shifting "	29
3.13	Número de dentes do cortador atuantes no " shifting " total	30
3.14	Comprimento de corte usinado no " shifting " total	30
3.15	Comprimento de corte de usinagem da peça	30
3.16	Número de peças à serem produzidas	30
3.17	Número de dentes do cortador atuantes no " shifting " total	31
3.18	Volume usinado no " shifting " total	32
3.19	Volume de material removido por dente do cortador	32
3.20	Número de peças à serem produzidas	32
3.21	Força principal de corte	35
3.22	Constante característica do material SAE 8620	36
3.23	Torque	36

3.24	Potência de corte	36
3.25	Fator relativo ao módulo	38
3.26	Fator relativo ao número de dentes da peça	38
3.27	Fator relativo ao diâmetro externo do cortador	38
3.28	Fator relativo ao número de lâminas e número de entradas do cortador	38
3.29	Fator relativo à profundidade de corte e o deslocamento de perfil	38
3.30	Espessura máxima do cavaco	38
3.31	Fator relativo à espessura do cavaco	39
3.32	Avanço axial	39
3.33	Profundidade das marcas de avanço	39
3.34	Número de dentes imaginário da peça	40
3.35	Desvio do perfil evolvente	40
5.1	Unidades de desvio padrão da média do processo Z_{superior}	85
5.2	Unidades de desvio padrão da média do processo Z_{inferior}	85

Nomenclatura

α_{on}	Ângulo de pressão normal	[graus]
α_{ot}	Ângulo de pressão transversal	[graus]
β_{on}	Ângulo de hélice da peça	[graus]
γ_{on}	Ângulo de hélice do cortador	[graus]
π	Pi	
$F\beta$	Desvio de passo da hélice	[μm]
a	Número de dentes da engrenagem do conjunto de indexação	
A	Rotações por minuto do caracol	
b	Número de dentes da engrenagem do conjunto de indexação	
B	Rotações por minuto da peça	
c	Número de dentes da engrenagem do conjunto de indexação	
d	Número de dentes da engrenagem do conjunto de indexação	
D	Número de dentes das engrenagem do avanço	
e	Antilogarítimo natural	
E	Número de dentes das engrenagem do avanço	
g	Aceleração da gravidade	[m/s^2]
G	Região de geração do perfil	[mm]
h	Altura total dos dentes	[mm]
I	Relação de rotação no engrenamento	
K	Passo circunferencial	[mm]
P	Potência	[kW]
T	Torque	[Nm]

Z	Unidades de desvio padrão da média do processo	
AR	Aço rápido	
ARc	Aço rápido convencional	
Av	Área do vão do dente da peça (seção normal)	[cm ²]
Ca	Constante de avanço	
CBN	Nitreto cúbico de Boro	
cos	Cosseno	
Ci	Constante de indexação	
CNC	Controle numérico computadorizado	
Cush	Comprimento usinado no " Shifting " total	[mm]
CVD	Deposição química de vapor	
Dec	Diâmetro externo do cortador	[mm]
Dep	Diâmetro externo da peça	[mm]
fa	Avanço axial	[mm/rot]
Fa	Fator relativo à profundidade de corte e o deslocamento de perfil da peça no cálculo da espessura do cavaco	
Fc	Força principal de corte	[N]
Fd	Fator relativo ao diâmetro externo do cortador no cálculo da espessura do cavaco	
Ff	Desvio de perfil evolvente	[μm]
Fhl	Fator relativo à espessura do cavaco no cálculo do avanço axial	
fi	Desvio composto dente a dente	[μm]
Fi	Desvio composto total	[μm]
Fm	Fator relativo ao módulo no cálculo da espessura do cavaco	
F _{NT/ZO}	Fator relativo ao número de lâminas e o número de entradas do cortador no cálculo da espessura do cavaco	
fp	Desvio de divisão dente a dente	[μm]
fr	Avanço radial	[mm/rot]
Fr	Desvio de excentricidade	[μm]
ft	Avanço tangencial	[mm/rot]

Fz	Fator relativo ao número de dentes da peça no cálculo da espessura do cavaco	
Ge	Região de entrada	[mm]
G _T	Região de engrenamento	[mm]
HB	Dureza Brinell	
hf	Profundidade das marcas de avanço	[μm]
Hkw	Adendo do cortador	[mm]
hp	Desvio do perfil evolvente	[μm]
hl _{max}	Espessura máxima do cavaco	[mm]
Kc	Constante característica do material SAE 8620	
Km	Fator de vida em metros lineares por dente do cortador	[m]
Kv	" Sub – shifting "	[mm]
KT	Profundidade de cratera	[μm]
Ld	Largura dentada da peça	[mm]
Lp	Comprimento de usinagem da peça	[mm]
Lshf	Comprimento do " shifting " total	[mm]
Lsv	Margem de segurança do cortador	[mm]
Lu	Comprimento útil do cortador	[mm]
MD	Metal duro	
Mn	Módulo normal	
MP	Metalurgia do pó	
Np	Número de peças produzidas	
N _T	Número de lâminas do cortador	
N _{TSH}	Número de dentes do cortador atuando no comprimento do " shifting "	
Pb	Passo de base	[mm]
PVD	Deposição física de vapor	
rpm	Rotações por minuto	
sen	Seno	
Sh	" Shifting "	[mm]
tg	Tangente	
TiC	Carboneto de titânio	
TiAlN	Nitreto de titânio e alumínio	

VB_N	Desgaste frontal	[mm]
V_c	Velocidade de corte	[m/min]
V_o	Volume de cavaco removido por dente do cortador	[cm^3]
V_{pz}	Volume de material removido por dente do cortador	[cm^3]
V_{ush}	Volume usinado no " shifting " total	[cm^3]
Z_{ip}	Número de dentes imaginário da peça	
Z_o	Número de entradas do cortador	
Z_p	Número de dentes da peça	

Capítulo 1

Controle de vida da ferramenta caracol – Parâmetro teórico

1.1 - Introdução

O homem, desde as mais remotas civilizações, tem procurado constantemente aprimorar os seus instrumentos e métodos de trabalho, com o propósito de melhorar a performance de seu trabalho e buscando a melhoria na qualidade da vida. Da evolução histórica, nota-se a cada descoberta, a sociedade alterar o seu padrão de comportamento, caracterizando nova fase de desenvolvimento nas diversas áreas, principalmente na área tecnológica.

O avanço tecnológico verificado com a introdução da informática na engenharia, principalmente na fabricação, levou alguns países após a Segunda grande guerra a ocupar posição de destaque no mercado mundial. Com a descoberta do computador o tratamento das informações foi revolucionado, tendo reflexos diretos na organização industrial. A partir dessa descoberta, desenvolveu-se o comando numérico (CN), o qual é introduzido nas máquinas-ferramentas, aumentando a produtividade das mesmas.

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 em 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 algo ultrapassado.

Dada toda essa evolução tecnológica e a necessidade de produtos de baixo custo e com qualidade, o momento de troca da ferramenta nas máquinas "CNC" 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.

Ferramentas com alta tecnologia, novos recobrimentos e o desenvolvimento de novas máquinas "CNC", tendem a minimizar a participação do homem no processo e demandam um método mais adequado e eficiente para sua substituição com a finalidade de se obter mínimos custos e tempos de fabricação. Isto é mais crítico quando a ferramenta em questão tem alto custo e tem uma afiação cara, como é o caso da ferramenta de corte de dentes de engrenagens, chamada "caracol", que será objeto de estudo neste trabalho.

O objetivo desse trabalho é estudar a viabilidade de se ter um parâmetro teórico para a vida da ferramenta caracol no corte de engrenagens cilíndricas, através do volume de cavaco removido por dente do cortador, para um desgaste pré determinado, que não comprometa a utilização da ferramenta durante a sua vida, em condições de chão de fábrica, verificando a existência ou não de alguma relação entre o desgaste da ferramenta e tal parâmetro. Este parâmetro seria independente do módulo, do tamanho, do número de dentes ou de outras características da engrenagem, mas somente do material da peça, do material da ferramenta e das condições de usinagem utilizadas. Assim, uma vez levantado este parâmetro no corte de uma engrenagem com um conjunto específico de características, ele poderia ser utilizado para a determinação do fim de vida da ferramenta no corte de uma outra engrenagem, desde que o material da peça, o material da ferramenta e as condições de usinagem fossem mantidos. Como será visto no trabalho, propõe-se que este parâmetro seja o volume de cavaco removido por dente do cortador "Vo". Esse trabalho foi desenvolvido com cortador caracol integral, para que permitisse o recobrimento de TiN (Nitreto de Titânio), após cada afiação e máquinas "CNC", para que fosse possível monitorar o deslocamento tangencial do cortador (shifting). Depois de

desenvolvidos vários ensaios de corte de dentes de engrenagens com vários módulos e número de dentes, concluiu-se que o parâmetro “Vo” é adequado para cumprir a função que dele se esperava, isto é, ser utilizado para previsão da vida da ferramenta caracol no corte de diferentes engrenagens.

Este trabalho está dividido em sete capítulos, quais sejam :

Capítulo 1 - Introdução

Capítulo 2 - Conceitos fundamentais - Análise do produto

Capítulo 3 - Conceitos fundamentais - Cortador caracol

Capítulo 4 - Materiais, Equipamentos e procedimentos experimentais.

Capítulo 5 - Resultados e Discussões

Capítulo 6 - Conclusões

Capítulo 7 - Sugestões para trabalhos futuros, referências bibliográficas e anexos

Capítulo 2

Conceitos fundamentais – Análise do produto

2.1 – Introdução teórica

Todo trabalho que se realiza no campo da Engenharia de Fabricação passa, necessariamente, pela análise do produto a ser fabricado. Essa análise leva em conta os vários aspectos preliminares na execução, por exemplo, do roteiro de fabricação. O material do produto a ser fabricado é item fundamental, já que altera substancialmente os conceitos a serem empregados na fase de manufatura.

As engrenagens possuem um campo de aplicação muito vasto e, por isto mesmo, podem ser construídas em plástico, ferro fundido, por microfusão, aço, etc., de acordo com a aplicação a que se destinam. Para efeitos didáticos trata-se, neste trabalho, de engrenagens construídas em aço. Porém todos os conceitos geométricos que serão abordados são válidos a quaisquer delas.

Também por questões didáticas, este trabalho se atém às engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais. Essas engrenagens possuem largo campo de aplicação podendo ser de pequenas dimensões (como por exemplo para uso de relógios), até de dimensões muito elevadas da ordem de 2,0 a 2,5 m de diâmetro para emprego náutico.

Adotando-se engrenagens cilíndricas de dentes retos ou helicoidais para aplicação da indústria automobilística, exercitam-se conceitos com aplicação para todos os demais tipos de engrenagens.

2.2 – Tipos de engrenagens

A figura 2.1 , Buckingham (1985) e Stipkovic (1993) mostra os tipos de engrenagens cilíndricas e de engrenamentos, sendo as engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais o produto escolhido para ser usinado com a ferramenta tipo caracol, objeto do presente trabalho.

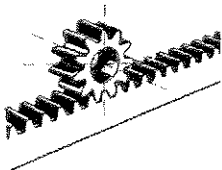
DESIGNAÇÃO		DESENHO	POSIÇÃO DE EIXO	OBSERVAÇÕES
ENGRENAGENS CILÍNDRICAS	DENTES RETOS		PARALELOS	Podem ser montadas com um ou mais pares engrenados. A relação de transmissão máxima por par não deve exceder a 1 : 8. Podem transmitir potências da ordem de 20 000 – 25 000 CV com velocidades tangenciais de até 150 – 200 m/s. Apresentam alto rendimento 95 – 99%.
	DENTES INCLINADOS (HELICOIDAL)		PARALELOS	
	CREMALHEIRA		PARALELOS	

Fig. 2.1 - Tipos de engrenamentos - Engrenagens cilíndricas

2.3 - Ciclo de fabricação de engrenagens cilíndricas

O elemento mecânico "engrenagem" possui características próprias muito importantes de serem analisadas. Por isso mesmo, tem sido tomado como referência para vários estudos, pois a tecnologia empregada na sua fabricação, assim como os conceitos relativos a esse elemento, também estão presentes em diversos outros elementos mecânicos existentes.

Por exemplo, enquanto em um conjunto bucha-eixo o princípio da intercambialidade é observado basicamente entre dois diâmetros, em uma engrenagem esse princípio é muito mais abrangente, pois cada dente de uma das "rodas dentadas" deve ser intercambiável com todos os vãos de seu par.

Para produzir engrenagens cilíndricas deve-se levar em consideração, além dos fatores técnicos relativos ao produto, também outras informações, como por exemplo, a produção mensal, uma vez que essa informação pode alterar substancialmente o roteiro de fabricação a ser adotado.

No entanto, qualquer que seja a sequência de manufatura escolhida, deve-se em primeiro lugar criar um sistema de referências capaz de conferir ao produto final todos os detalhes, exatamente de acordo com o que foi projetado. Em linhas gerais, esse sistema de referências para usinagem procura levar em conta, o máximo possível, a forma de desempenho do produto. Portanto, para engrenagens cilíndricas é razoável se ter o furo e as faces como locais de apoio e fixação, sistema de referências de manufatura geralmente adotado.

A figura 2.2 , Rodrigues, Agostinho e Lirani (1978), mostra as principais fases de manufatura de uma engrenagem cilíndrica de aço, cuja peça bruta é forjada. Este ciclo simplificado mostra fases de torneamento da peça (podendo ou não haver brochamento do furo), abertura dos dentes, acabamento dos dentes antes do tratamento térmico e a retificação final do furo e faces (que atualmente, em alguns casos, tem sido substituído pelo torneamento duro). Neste exemplo, a

engrenagem trabalha apoiada em um eixo e, por isso, necessita que o furo seja utilizado como superfície de fixação para todas as operações de corte e acabamento dos dentes e possui na face a referência axial, que por isso é utilizada como apoio nas operações de corte e acabamento dos dentes.

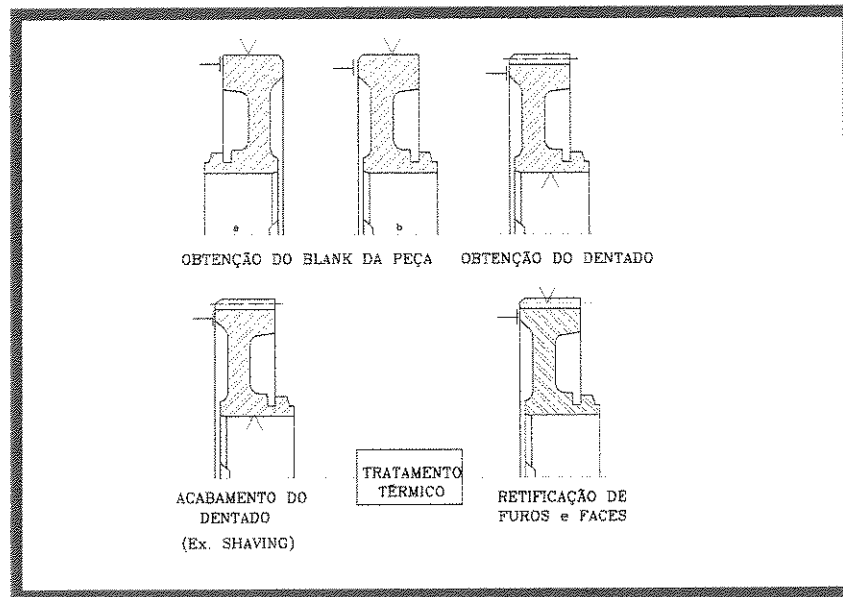


Fig. 2.2 - Ciclo simplificado de manufatura com acabamento antes do tratamento térmico

2.4 - Qualidade de engrenagens

2.4.1 – Introdução teórica

O estudo da fabricação e do controle de engrenagens dentro da Engenharia de Fabricação reveste-se de uma importância relativamente grande, visto que tais elementos, de ampla utilização prática da Engenharia Mecânica, sofrem constantes solicitações de melhoria de qualidade e processos de fabricação. Essas solicitações visam o atendimento das exigências atuais de projeto que crescem paralelamente às solicitações manifestadas no desenvolvimento das construções

mecânicas modernas.

O presente capítulo constitui-se numa iniciação ao estudo de qualidade de engrenagens. Segundo Dudley (1984), a engrenagem é de certa forma um elemento complexo no que se refere principalmente aos ajustes, pois seu funcionamento exige intercambialidade múltipla, necessita antes de ser estudada, que sejam primeiramente conhecidas sua terminologia, tipos de engrenagem, processos de fabricação, etc.

Para que se possa controlar os erros da fabricação de engrenagens é necessário acompanhar todo o processo de manufatura e funcionamento. Entende-se aqui, como processo de manufatura, todas as operações necessárias, desde a preparação do "blank" para o corte dos dentes, seguindo as operações de corte dos dentes, tratamento térmico e operações de acabamento, excetuando-se operações de controle metalográfico, que não serão abordadas. Como condição de funcionamento, entende-se a montagem da engrenagem (ou grupo de engrenagens), em disposição análoga a de funcionamento real. Dessa forma, a maneira mais racional de se estudar os erros de fabricação será através da abordagem dos seguintes tópicos :

- Controle do "blank" como corpo da engrenagem

- Controle do dentado

- Controle do dentado em posição de funcionamento (par)

2.4.2 - Controle do corpo da engrenagem "blank"

Como em todo processo de fabricação, é necessário primeiramente fixar as referências básicas, ou seja, os pontos fundamentais no funcionamento em torno dos quais se estabelece todo o sistema de cotagem da peça. Esses pontos, determinados e fixados (ditos pontos de referência) deverão ser respeitados durante todo o processo de fabricação e inspeção. Isto quer dizer que todo dispositivo necessário à usinagem e todo processo de inspeção terá obrigatoriamente que fixar suas referências nesses pontos básicos. O eixo de referência básico para a medição do "blank" da engrenagem é o próprio eixo de referência na montagem entre pontos, ou o furo interno, caso essa engrenagem venha posteriormente montada sobre o eixo, figura 2.3, Rodrigues,

Agostinho e Lirani (1978). De qualquer forma, em ambos os casos deve-se cuidar para dar referências precisas a esses pontos que posteriormente serão utilizadas na montagem da engrenagem nas máquinas de corte de dentes, juntamente com outros pontos que integram o sistema de referência, para que dessa forma sejam minimizados os erros no dentado da engrenagem. Basicamente os itens que devem ser observados no controle do "blank" de uma engrenagem são:

Paralelismo das faces

Batimento Axial (face em relação ao eixo de referência)

Batimento Radial (diâmetro externo em relação ao eixo de referência)

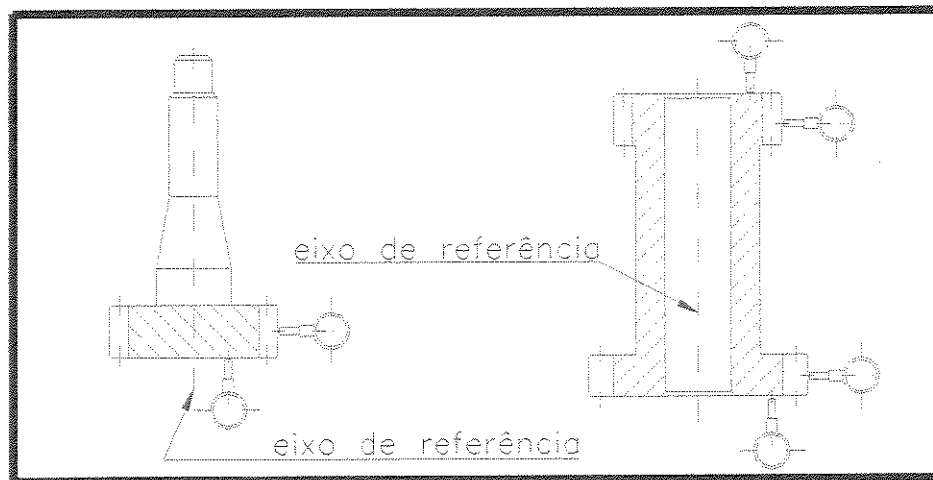


Fig. 2.3 – Corpo da engrenagem "blank"

Exemplo:

Para se cortar os dentes de uma engrenagem que posteriormente será montada sobre um eixo, é importante que se mantenha a concentricidade entre o diâmetro primitivo da engrenagem e o furo, dentro de certas tolerâncias que possibilitem boas condições de funcionamento. Assim sendo, deve-se tomar como referência de corte o diâmetro do furo que, por sua vez, deverá apresentar boa qualidade, visto que tais fatores como pequenas oscilações entre o furo e o mandril da máquina, tipo de ajuste entre o furo e o eixo de montagem final, etc., determinam a qualidade do mecanismo.

O diâmetro externo da engrenagem não apresenta uma importância decisiva no funcionamento da engrenagem. Todavia, deve-se levar em conta que na montagem deve haver folga entre o fundo dos dentes de uma das engrenagens e a cabeça dos dentes da outra.

2.4.3 - Controle do dentado

Como já citado, na fabricação de engrenagens, deve-se assegurar, além da intercambialidade da peça em si, outra intercambialidade múltipla em seu funcionamento. Portanto, os erros e os controles necessários no dentado, devem ser em grande parte correlacionados entre dentes para assegurar uma condição tal que mantenha funcionamento suave, boa relação de transmissão, ausência de atritos globais ou localizados, facilidades de lubrificação, etc. As normas mais utilizadas para estes fins são a norma DIN 3960 (1995) , DIN 3962 (1995) e AGMA (1995). Além disso, algumas empresas utilizam normas internas derivadas das principais. Todo este item 2.4.3 mostra os diversos desvios do dentado que devem ser controlados

2.4.3.1 - Desvio de divisão do dentado

Para poder definir corretamente as relações ou dimensões que ligam entre si os dentes, é preciso numerá-los. Realiza-se esta operação imaginária observando-se a engrenagem por uma superfície lateral de referência.

A numeração correspondente a cada um dos dentes é: 0, 1, 2,...,(K - 1), K, (K + 1) assinalados a partir de qualquer um dos dentes externos ou internos . A figura 2.4 , Moderow (1992) e ISO 1328 (1997), mostra alguns elementos característicos de uma engrenagem que merecem ser citados. São eles :

Flanco: é a superfície lateral de um dente , pode ser flanco esquerdo ou direito.

Passo K: é o passo compreendido entre o perfil de ordem $(K - 1)$ e o perfil homólogo K. Esse passo é circunferencial e se denomina passo direito ou esquerdo.

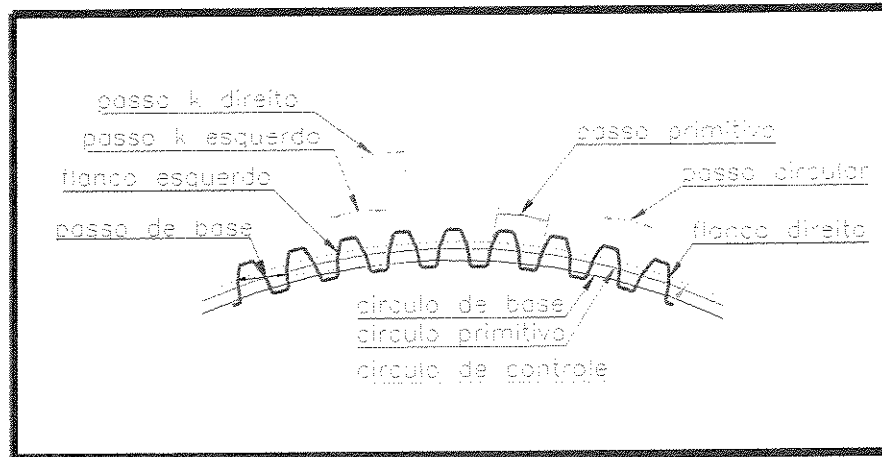


Fig. 2.4 – Desvio de divisão do dentado

Passo Primitivo: é o valor do passo circunferencial do dentado sobre o círculo primitivo.

Passo Circular: é o valor do passo circunferencial sobre um círculo qualquer

Passo de Base: é a distância entre flancos homólogos consecutivos, medido sobre uma tangente ao círculo de base.

Desvio individual de Passo Circular: é a diferença algébrica entre o passo circular efetivo ou real e o passo circular teórico ou nominal , figura 2.5, Moderow (1992) e ISO 1328 (1997).

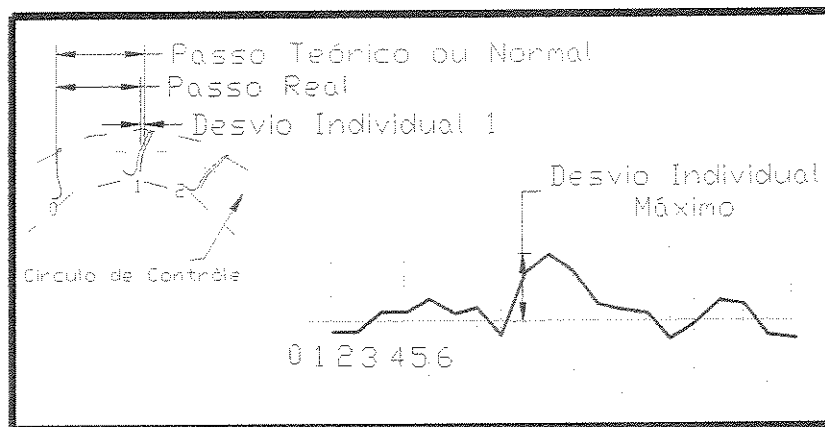


Fig. 2.5 – Desvio individual de passo circular

Obtêm-se o gráfico do desvio individual de passo circular, dividindo-se o eixo das abcissas (figura 2.5) pelo número de dentes da engrenagem (1,2,3,4,...), anotando-se sobre cada divisão o desvio individual de passo circular correspondente a cada um dos dentes. Deste gráfico pode-se deduzir o desvio individual máximo e mínimo com relação ao passo teórico. Pode-se deduzir esse desvio individual máximo e mínimo simplesmente medindo a máxima e a mínima ordenada, respectivamente, independente do sinal, posto que o desvio terá valor absoluto.

Desvio acumulado em um setor de "K" passos :é a diferença algébrica entre o comprimento medido e o comprimento teórico do arco do círculo de controle, compreendido entre dois perfis homólogos extremos, separados por um número "K" de passos circulares, figura 2.6 , Moderow (1992) e ISO 1328 (1997).

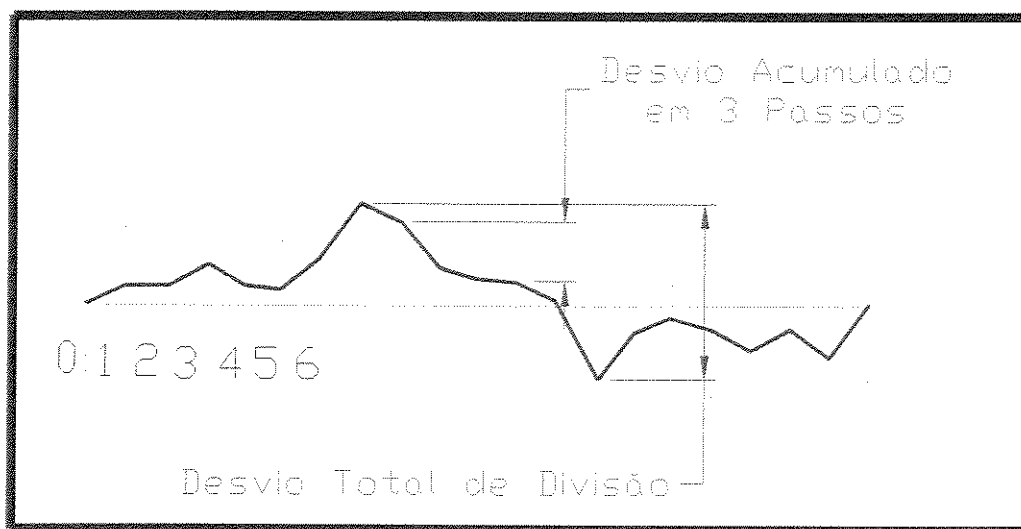


Fig. 2.6 – Desvio acumulado

O desvio acumulado sobre um setor qualquer de "K" passos pode ser determinado diretamente, a partir da curva de deslocamentos circulares, como a diferença de cota de dois perfis extremos do setor.

2.4.3.2 - Desvio de excentricidade do diâmetro primitivo

É a distância entre o eixo de referência e o eixo geométrico do dentado (diâmetro primitivo). Esse desvio dá origem a uma curva de deslocamento circular, de forma senoidal, cuja amplitude é igual ao dobro do desvio de excentricidade. O desvio de excentricidade afeta a perfeita regularidade da transmissão e é determinado medindo a oscilação total radial de um elemento de medida convenientemente posicionado nos dentes durante uma revolução completa da peça, figura 2.7, Rodrigues, Agostinho e Lirani (1978) e ISO 1328 (1997).

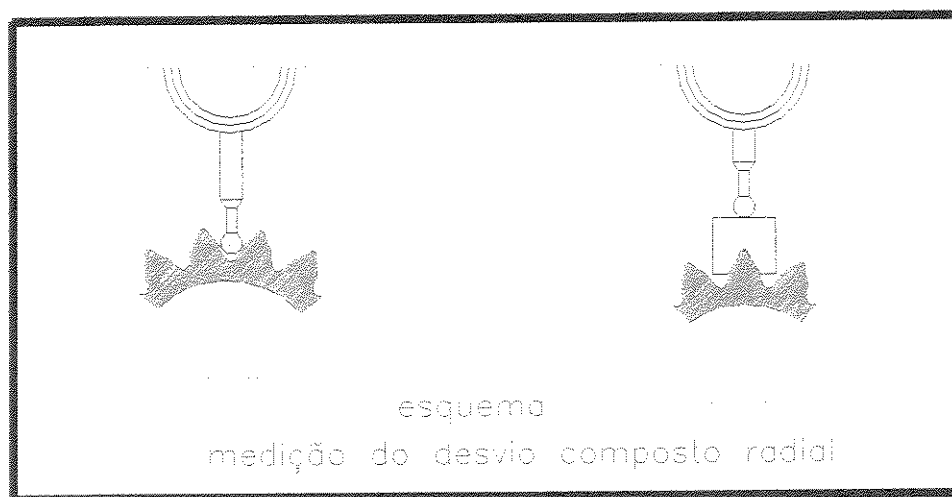


Fig. 2.7 – Desvio de excentricidade

2.4.3.3 - Desvio de perfil evolvente

Para a determinação do desvio total de perfil real, há que se limitar o perfil real obtido mediante uma máquina especial entre dois perfis de referência paralelos, que limitam com seu posicionamento tangencial as oscilações do perfil real, figura 2.8, Moderow (1992) e ISO 1328 (1997).

Denomina-se desvio total de perfil a distância entre dois perfis de referência, medida sobre sua normal comum. A região de observação é aquela compreendida entre o chanfro de cabeça e a circunferência ativa de fundo, ou seja, a zona de contato real do dente.

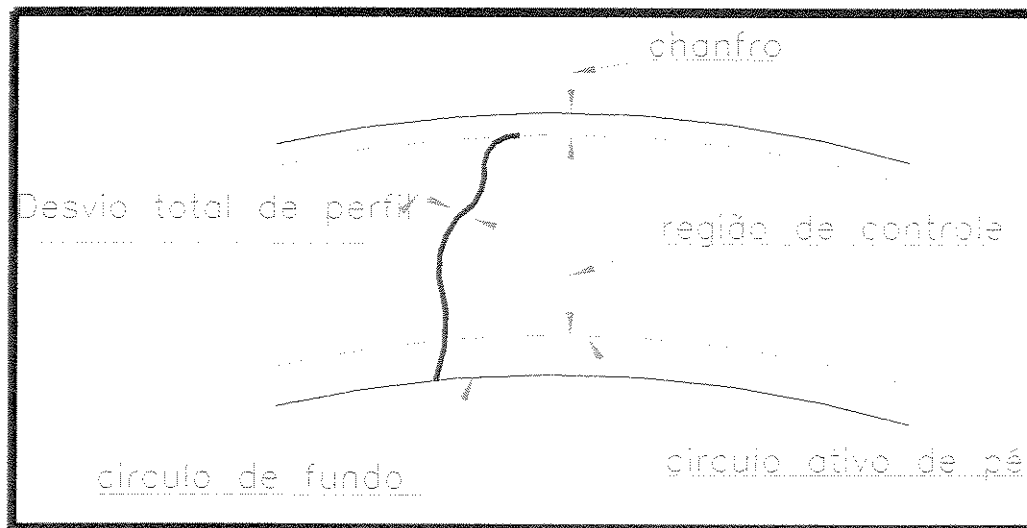


Fig. 2.8 – Desvio de perfil evolvente

2.4.3.4 - Desvio de passo da hélice

O desvio de passo da hélice é gerado pela falta de correto alinhamento relativo entre os eixos das engrenagens e os flancos dos dentes.

Nas engrenagens retas este alinhamento deve ser completamente paralelo e nas engrenagens helicoidais os flancos devem ter determinadas relações angulares com os eixos. O desvio da hélice é a soma dos desvios combinados podendo um deles ser nulo; esses são:

Desvio de inclinação do traço do flanco sobre um cilindro coaxial ao primitivo

Desvio de forma longitudinal de dente (conicidade)

Para a determinação do desvio da hélice, encerrar-se-á o traço de intersecção do plano do dente efetivo realizada por uma máquina especial com ampliação, com o já mencionado cilindro, entre dois traços de referência, figura 2.9, Moderow (1992) e ISO 1328 (1997).

O desvio da hélice será determinado sobre o comprimento total do dentado, sendo a distância entre os dois traços de referência.

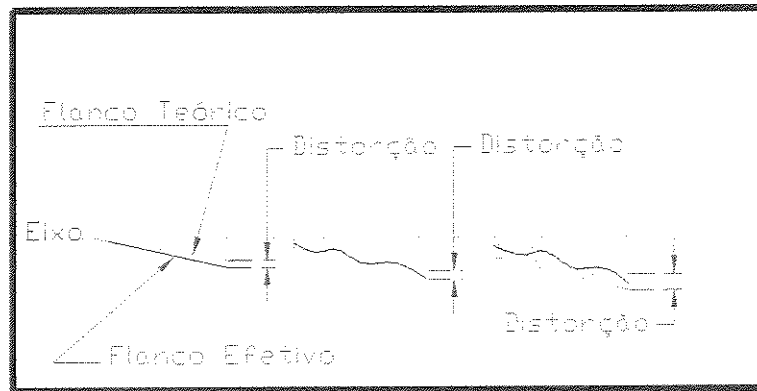


Fig. 2.9 - Desvio de passo da hélice

2.4.3.5 - Desvio composto radial (batimento)

É a soma dos desvios globais de um dentado. Pode ser feito através de um aparelho no qual se monta uma engrenagem padrão de execução perfeita e grande dureza superficial, engrenada com a peça a controlar. Um dos eixos é montado solidário com a bancada da máquina, enquanto o outro vai sobre um carro deslizante. Uma mola obriga o carro deslizante a manter as engrenagens com a pressão radial entre si. Ao colocar em funcionamento o sistema, os desvios da engrenagem a inspecionar se exteriorizam mediante oscilações do carro móvel, que podem ser colhidos em gráficos. O desvio composto radial é a amplitude total do diagrama, enquanto que o denominado salto radial é a amplitude máxima de uma oscilação, figura 2.10, Moderow (1992) e ISO 1328 (1997).

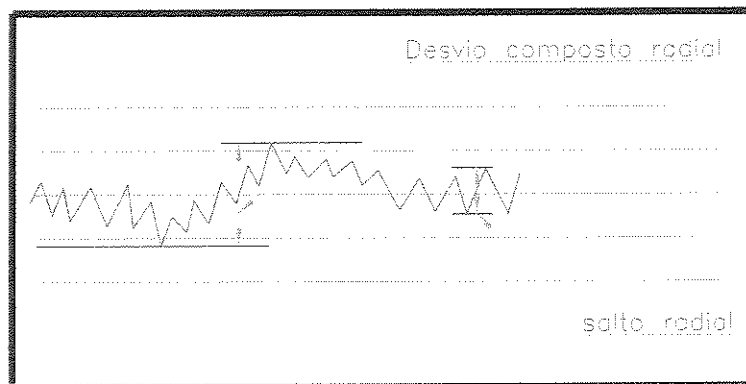


Fig. 2.10 – Desvio composto radial

2.4.4 - Controle do dentado em posição de funcionamento (par)

O controle do par de engrenagens é muito importante, pois é nesse momento que simula-se o trabalho real das engrenagens. Portanto, para se garantir uma boa qualidade, deve-se verificar os seguintes requisitos:

2.4.4.1 - Normalizados:

Distância entre centros

É a diferença entre a distância real ou efetiva e a distância teórica nominal

Paralelismo dos eixos

Os desvios de paralelismo dos eixos podem ser :

Desvio de inclinação ou perda de paralelismo, quando os dois eixos definem um plano.

Desvio do plano de situação, ou seja casos em que os eixos podem estar contidos em dois planos não paralelos.

Desvio de inclinação, ou seja, a combinação dos casos anteriores

2.4.4.2 - Não normalizados:

Folga dos flancos "Backlash"

É a menor distância entre os flancos de dois dentes conjugados, quando os flancos opostos estão em contato.

Ruído

É um sinal sonoro emitido pelo par quando em posição de funcionamento; sua análise é subjetiva.

Após o estudo dos conceitos fundamentais do produto (engrenagem cilíndrica), estudaremos no próximo capítulo os conceitos fundamentais do cortador caracol.

Capítulo 3

Conceitos fundamentais – Cortador caracol

3.1 - Introdução teórica

O avanço tecnológico e a necessidade de produção contribuíram para o surgimento de novos processos para obtenção do dentado, processos esses que se tornaram mais produtivos e de melhor qualidade que os processos por formação.

Os processos por formação foram os primeiros a serem utilizados. Nesse tipo de processo a ferramenta tem o perfil do dente e o "blank" tem apenas movimento de divisão. Este processo é realizado por fresas-módulo ou por plainas.

Os processos por geração tem como princípio fundamental o fato de que a ferramenta de corte e o "blank" representam um par engrenado "coroa / parafuso-sem-fim" associado a um movimento de corte. Naturalmente, sendo o caracol um "parafuso-sem-fim", não de contato contínuo mas sim de arestas cortantes sucessivas, não se tem a curva evolvente teórica, mas sim uma família de tangentes, como mostra a figura 3.1, catálogo Pfauter (1996).

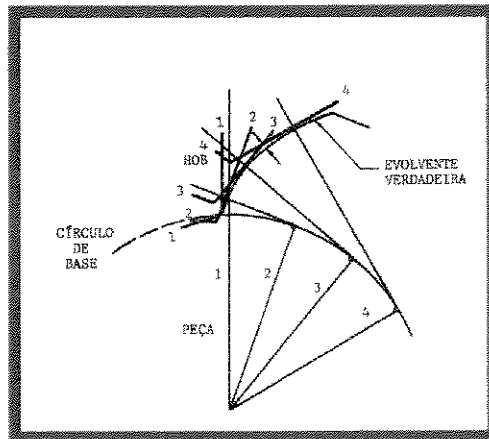


Fig. 3.1 - Família de tangentes

O perfil teórico evolvente somente seria obtido com um número infinito de arestas e, conseqüentemente, de canais no cortador caracol, o que é fisicamente impossível.

3.2 - Conceituação

Pode-se comparar o cortador caracol com uma cremalheira que tem a evolvente próxima a um raio de base infinito.

O princípio de trabalho de um cortador caracol é a geração de um perfil por rotação de um cilindro (diâmetro primitivo da peça) sobre um plano (reta primitiva da cremalheira do cortador), conforme mostra a figura 3.2 , catálogo Pfauter (1996).

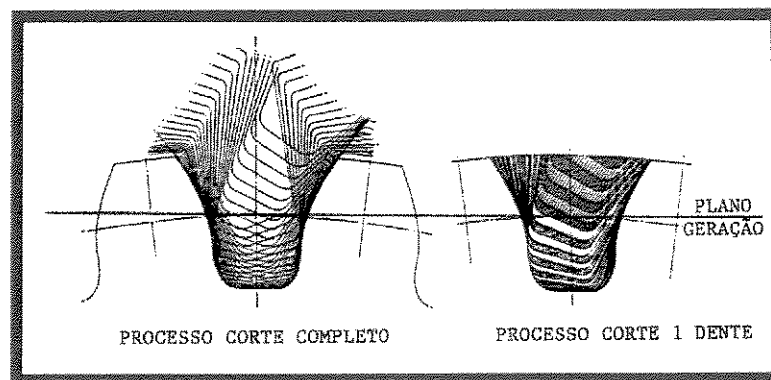


Fig. 3.2 - Processo de Geração

A relação fundamental de engrenamento entre o caracol e a peça é dada pelo passo de base, conforme mostra a figura 3.3, catálogo Pfauter (1996) que pode ser calculado pela equação 3.1.

$$P_b = M_n * \pi * \cos \alpha_{on} \quad (3.1)$$

Onde :

P_b = Passo de base

M_n = Módulo normal

α_{on} = Ângulo de pressão normal

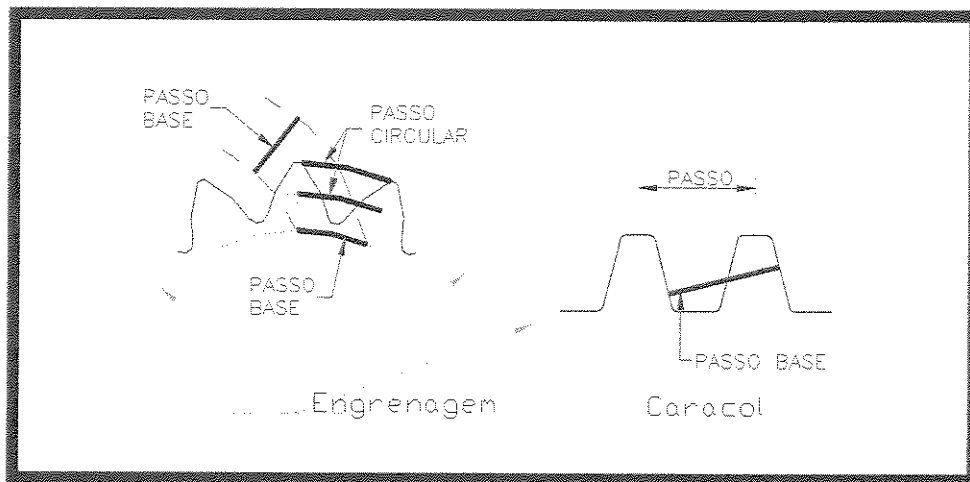


Fig. 3.3 - Engrenagem e Cremalheira do Caracol

3.3 - Princípios de geração

A geração de dentes com cortador Caracol representa um par engrenado "coroa / parafuso-sem-fim", associado a um movimento de corte, sendo a coroa a peça e o cortador o parafuso-sem-fim.

A figura 3.4, catálogo Gleason (1998) mostra a fotografia de uma máquina CNC típica para corte de dentes de engrenagens com ferramenta caracol, mostrando uma ferramenta com recobrimento de nitreto de titânio (TiN) e uma engrenagem helicoidal típica.

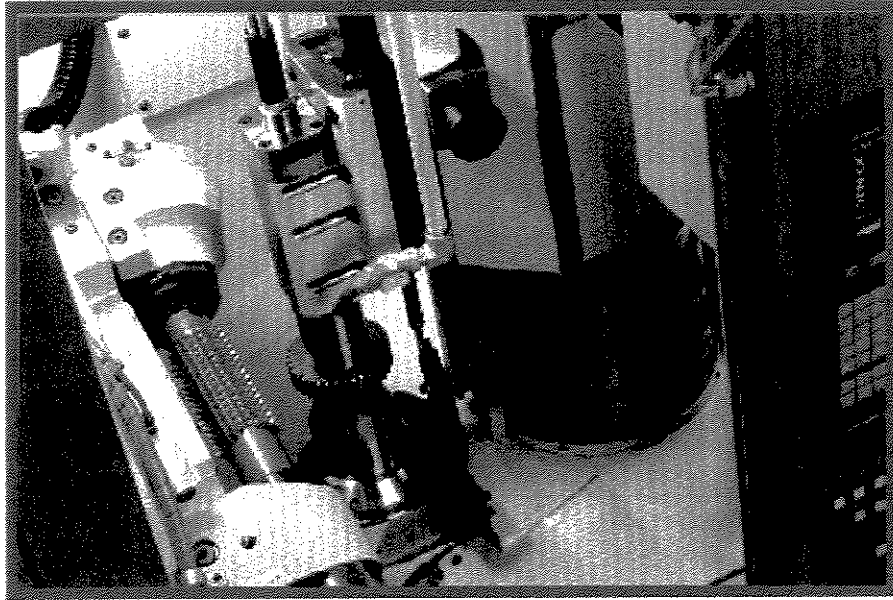


Fig. 3.4 - Posição relativa entre a peça e o cortador caracol

O Caracol gira rapidamente descendo paralelamente ao eixo da peça, enquanto esta gira lentamente satisfazendo a relação de rotação no engrenamento (I).

$$I = (Z_0 \div Z_p) = (B \div A) \quad (3.2)$$

Onde :

A = rpm do Caracol

B = rpm da peça

Z_p = Número de dentes da peça

Z_o = Número de entradas do caracol

Porém, o mecanismo não é tão simples, pois para conseguir a usinagem deve-se ter outros movimentos na máquina.

Em vista disso, cada máquina tem de projeto um conjunto de engrenagens intercambiáveis, geralmente 2 pares, para obter a relação adequada de indexação, afetado de um fator constante "Ci" (Constante de Indexação), que representa todos os elementos de transmissão construtiva e relaciona o eixo da mesa com o eixo do cortador, obviamente, passando pelo conjunto de engrenagens do indexador.

A expressão geral para cálculo da relação de indexação fica :

$$(a \div b) \times (c \div d) = (Z_0 \div Z_p) \times C_i \quad (3.3)$$

a,b,c,d = Número de dentes das engrenagens do conjunto de indexação da máquina

Z₀ = Número de entradas do cortador

Z_p = Número de dentes da peça

C_i = Constante de indexação

3.4 - Movimentos de avanço

Tem-se 3 (três) movimentos de avanço , como mostrado na figura 3.5, Rodrigues, Agostinho e Lirani (1978).

- Avanço Axial (fa)
- Avanço Radial (fr)
- Avanço Tangencial (ft)

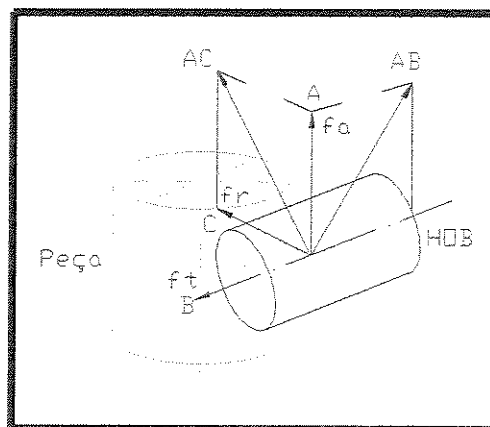


Fig. 3.5 – Movimentos de avanço

3.4.1 - Avanço axial

É o movimento do cortador na direção paralela do eixo da peça, como mostra a figura 3.6, Gimpert (1994). É o avanço principal, exceto em alguns casos particulares.

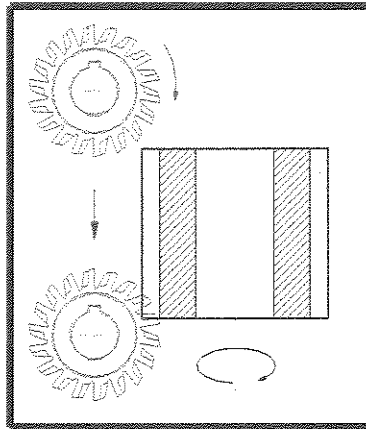


Fig. 3.6 – Avanço axial

Atualmente é rara a máquina em que o avanço não seja independente da relação de indexação e sua escolha é feita baseada na potência da máquina, na qualidade desejada (levando em consideração também a rigidez do conjunto peça-dispositivo-máquina) e vida do cortador. Seu acionamento pode ser elétrico, hidráulico ou mecânico.

Nos dois primeiros casos, sua montagem é obtida por regulação do sistema elétrico ou hidráulico. No caso de acionamento mecânico, geralmente existe um par de engrenagens substituíveis que obedecem a seguinte relação:

$$(D \div E) = (f_a \div C_a) \quad (3.4)$$

Onde :

D, E = Número de dentes das engrenagens do avanço

f_a = Avanço axial desejado

C_a = Constante de avanço

Esta constante de avanço representa o avanço da máquina quando

$$(D \div E) = 1 \quad (3.5)$$

Isto é, em função dos elementos construtivos (e não variáveis) de projeto da máquina, fisicamente ela representa a distância avançada pelo cortador numa revolução completa da peça.

3.4.2 - Avanço radial

É o movimento do cortador no sentido radial da peça. É utilizado em início de operação quando a peça não tem extremidade livre. Um uso imprescindível do avanço radial é no corte de coroas para parafuso-sem-fim, pois neste caso os dentes são necessariamente de forma circular ao longo do passo conforme mostra a figura 3.7, Gimpert (1994). Em engrenagens com extremidade livre, o avanço radial é um avanço de posicionamento, realizado antes de se iniciar o deslocamento axial.

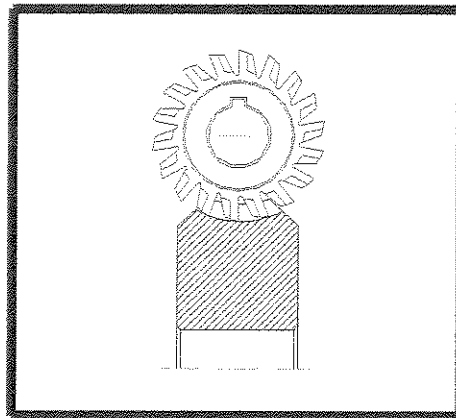


Fig. 3.7 – Avanço radial

3.4.3 - Avanço tangencial

Os cortadores caracol tem um movimento na direção do seu próprio eixo a fim de aproveitar todas as arestas de corte da ferramenta (Shifting). Para se usar totalmente o comprimento útil de corte

do caracol, após a usinagem de um determinado número de peças (geralmente a cada fixação), o caracol é deslocado tangencialmente, fazendo com que o desgaste seja uniforme na ferramenta, como mostrado na figura 3.8, Gimpert (1994).

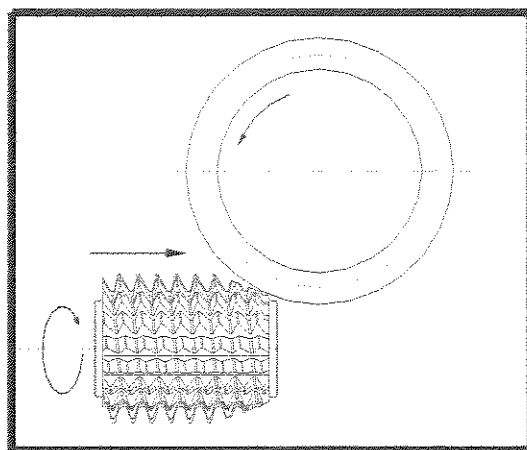


Fig. 3.8 - Avanço tangencial

3.5 – Fresadoras CNC

Atualmente a maioria das fresadoras são do tipo CNC (Computer Numeric Control), como mostra a figura 3.9, catálogo Liebherr (1996). Embora o tempo efetivo de corte não tenha sido alterado sensivelmente em relação às máquinas convencionais o tempo de preparação foi muito reduzido e a flexibilidade das máquinas aumentada nas fresadoras CNC. A aplicação de controles eletrônicos de posicionamento linear e rotacional só foi incorporado às máquinas de corte de engrenagens bem depois que nas outras máquinas-ferramenta, devido ao alto custo de reposição dessas máquinas. Geralmente um comando numérico numa máquina de corte de engrenagens controla 4 eixos:

eixo x : deslocamento radial do cortador

eixo y : deslocamento tangencial do cortador (shifting)

eixo z : deslocamento axial do cortador

eixo a : ângulo do cabeçote porta cortador

Assim , a adoção de máquinas fresadoras CNC trás os seguintes beneficios para o usuário :

- Acuracidade
- Facilidade de preparação para a usinagem de um lote
- Melhor manutenção e segurança na operação
- Informações em tempo real na tela
- Flexibilidade
- Redução de tempo máquina
- Repetibilidade
- Aumento da vida dos cortadores

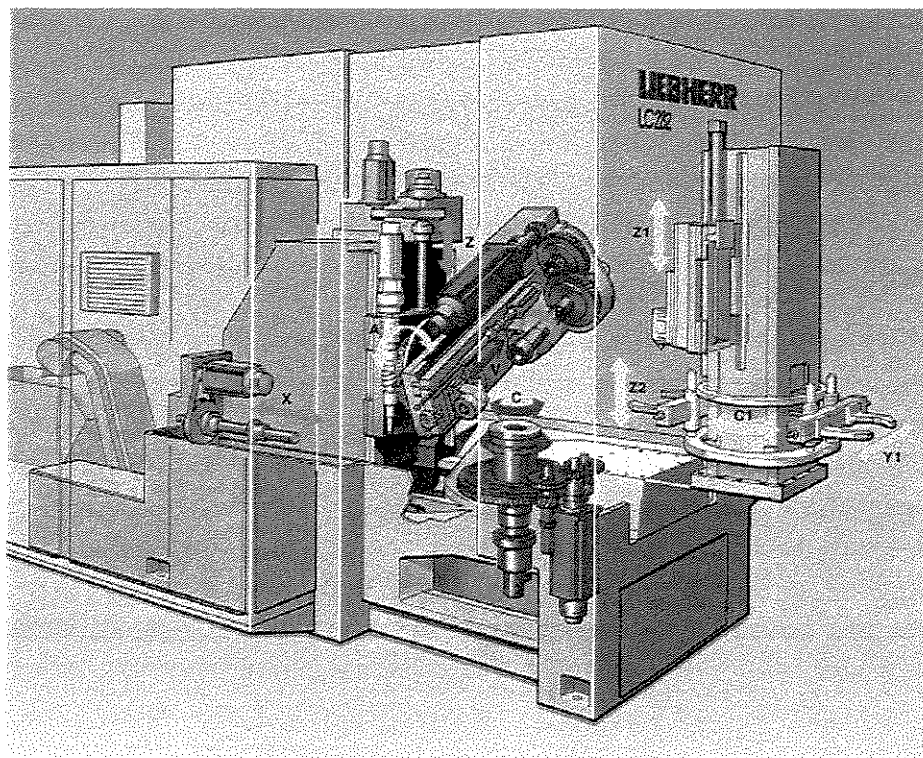


Fig. 3.9 - Fresadora CNC

3.6 - Estratégia de deslocamento tangencial "shifting "

O desgaste em ferramentas de corte nos processos de usinagem é algo inevitável, podendo apenas ser minimizado e controlado. Além de alterar as características geométricas da ferramenta e conseqüentemente da peça, o desgaste piora o desempenho geral do processo.

Num cortador caracol cada dente da ferramenta retira um volume de material diferente, de acordo com sua posição em relação à peça. Os dentes localizados na região da entrada do corte removem mais material que os dentes de saída. Para distribuir esse desgaste igualmente por toda a extensão da ferramenta o "shifting" é utilizado.

O "shifting" (Sh) nada mais é do que um deslocamento tangencial do cortador enquanto o corte não está ocorrendo, entre duas fixações de peça e é calculado em função das características do par peça-cortador. O sentido deste deslocamento deve ser contra o sentido de rotação da peça, pois isto assegura que o dente da engrenagem será sempre acabado pelo dente não desgastado da saída do corte.

Segundo Bouzakis (1995) e Sulzer (1997) uma das estratégias de "shifting" é utilizar um grande deslocamento tangencial, entre duas fixações de engrenagens e assim sucessivamente, para se ter uma ótima distribuição da temperatura no cortador caracol. Para uniformizar o desgaste na ferramenta após completado o "shifting" total, esquematizado na figura 3.10, catálogo Fette (1997), não se retorna ao ponto inicial, mas desloca-se o ponto inicial de (Kv) que é chamado de "sub-shifting", ver figura 3.11, catálogo Liebherr (1996).

3.6.1 - Cálculo do comprimento de "shifting" total

O método para cálculo do comprimento de "shifting" total (deslocamento tangencial total) é descrito a seguir. A figura 3.10 mostra as regiões de entrada do corte, geração de perfil e engrenamento total.

Tem-se que :

G = Região de geração do perfil

G_e = Região de entrada

G_T = Região de engrenamento

L_{sv} = Margem de segurança do cortador

D_{ep} = Diâmetro externo da peça

γ_{ow} = Ângulo de hélice do cortador

α_{ot} = Ângulo de pressão transversal

Hkw = Adendo do cortador

h = Altura total dos dentes

L_u = Comprimento útil do cortador

L_{shf} = Comprimento do "shifting" total

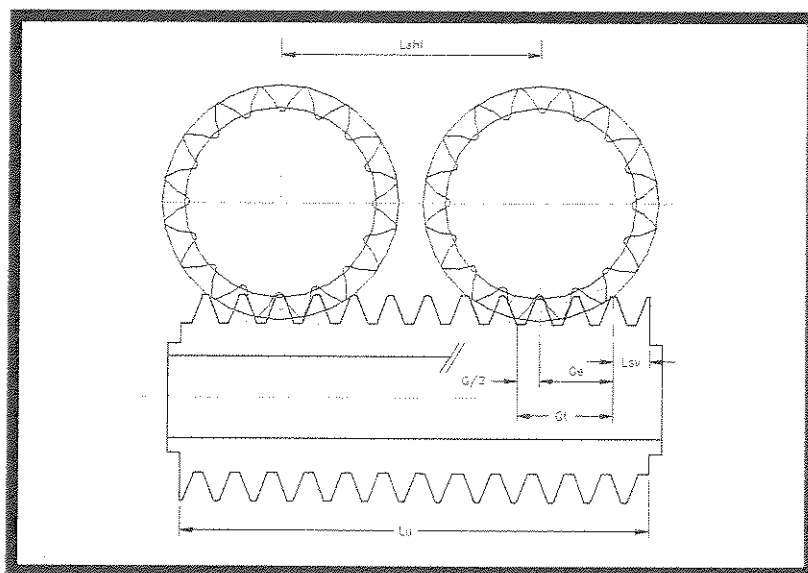


Fig. 3.10 - Regiões do cortador caracol

$$G = (2 * Hkw) \div \tan \alpha_{ot} \quad (3.6)$$

$$G_e = \sqrt{((D_{ep} - h) * h)} \quad (3.7)$$

$$G_T = G_e + (G \div 2) \quad (3.8)$$

$$L_{sv} = M_n * (\pi \div 2 + \text{tg } \alpha_{on}) \div \cos \gamma_{ow} \quad (3.9)$$

$$L_{shf} = L_n - (G_T + 1,4 * L_{sv}) \quad (3.10)$$

3.6.2 - Cálculo do "shifting" e "sub-shifting"

A estratégia de deslocamento tangencial sugerida por Bouzakis (1995) e Sulzer (1997) foi escolhida com o intuito de se obter uma melhor performance para a vida da ferramenta caracol. O método para cálculo do "shifting" e "sub-shifting" é descrito a seguir e esquematizado na figura 3.11, catálogo Liebherr (1996).

Onde :

S_h = "Shifting"

K_v = "Sub-Shifting"

N_p = Número de peças à produzir

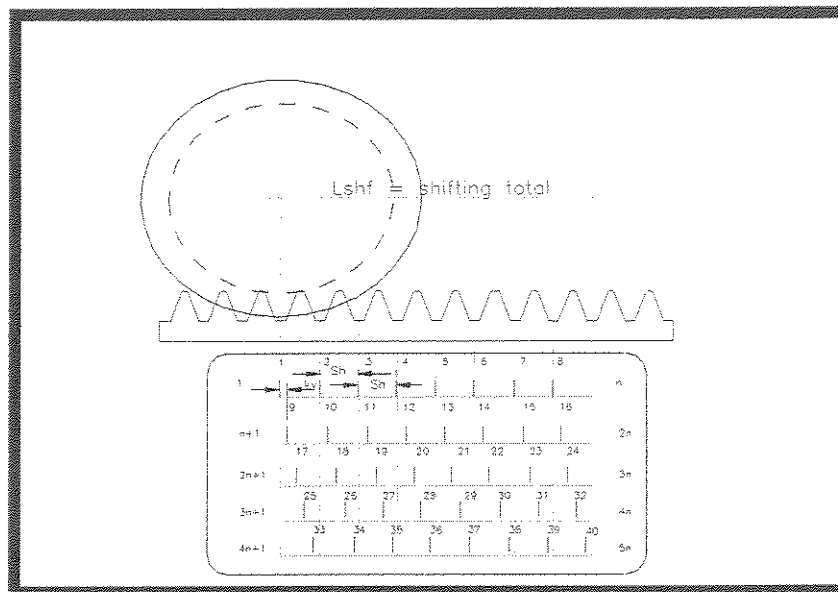


Fig. 3.11 - "Shifting" e "Sub-shifting"

$$S_h = (M_n * \pi) \div \cos \gamma_{ow} \quad (3.11)$$

$$K_v = L_{shr} \div N_p \quad (3.12)$$

3.7 - Controle de vida

No controle de vida da ferramenta caracol utiliza-se o fator chamado **Km** (método atual) desenvolvido por Venohr (1985) que é conhecido como sendo o comprimento de corte (vida) estimada em metros lineares por dente do caracol. Seu valor varia principalmente com o material do cortador, tipo de recobrimento, material da peça e velocidade de corte. Contudo, é necessário um controle rígido do operador para que o processo seja estabilizado, refinando o valor do fator **Km**. Tendo-se um valor para **Km**, pode-se estimar a vida do cortador em número de peças.

O fator **Km**, recomenda uma vida de 3 a 5 m de comprimento de corte por dente do cortador caracol fabricado em aço rápido sinterizado recoberto com nitreto de titânio (TiN), para um desgaste de 0,20 a 0,30 mm na superfície de folga, na usinagem de engrenagens padronizadas, como mostra a figura 3.12, fabricadas em aço SAE 8620 (16 Mn Cr 5).

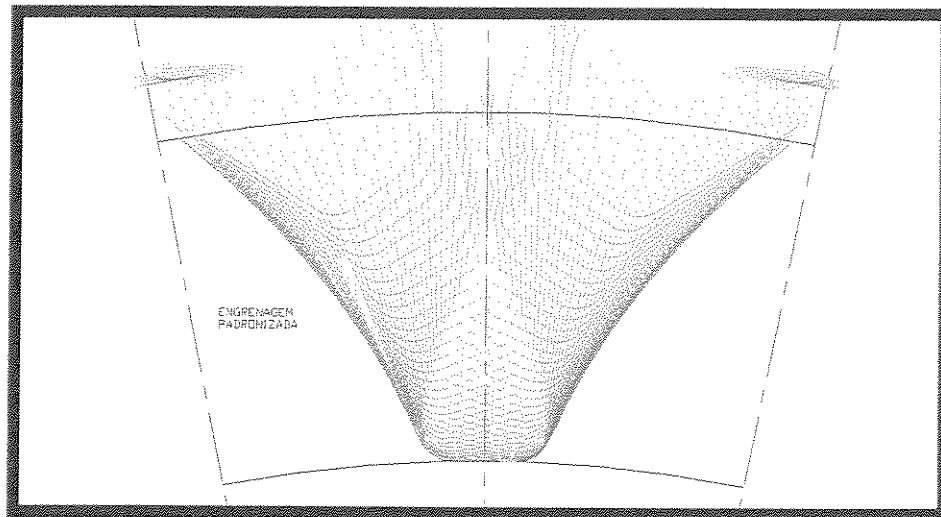


Fig. 3.12 – Perfil do dente - Engrenagem padronizada

Para o cálculo do número de peças produzidas, é necessário que se calcule alguns fatores mostrados a seguir desenvolvido por Venohr (1985), onde :

Número de dentes (N_{TSH}) atuantes no “shifting” total

$$N_{TSH} = (L_{shf} \div (M_n * \pi)) * (N_T) * \cos \gamma_{ow} \quad (3 . 13)$$

Comprimento de corte usinado (C_{ush}) no “ shifting “ total

$$C_{ush} = N_{TSH} * K_m \quad (3 . 14)$$

Número de peças (N_p) a serem produzidas por vida do cortador

$$L_p = Z_p * (L_d \div \cos \beta_{on}) \quad (3 . 15)$$

$$N_p = C_{ush} \div L_p \quad (3 . 16)$$

Onde :

N_T = Número de lâminas do cortador

L_d = Largura dentada da peça

L_p = Comprimento de corte de usinagem da peça

β_{on} = Ângulo de hélice da peça

3.7.1 - Parâmetro teórico – Fator "Vo"

A proposta do presente trabalho é a utilização de um fator "Vo" (vida em volume de cavaco removido por dente da ferramenta). Espera-se ter um fator mais estável para o processo, pois este fator utiliza o perfil real da peça durante a usinagem, quer seja ela padronizada, isto é, o adendo é igual ao módulo e a espessura circular é igual ao vão no diâmetro primitivo ou modificada, cujos dentes apresentam qualquer diferença em relação à padronizada, quer seja no ângulo de pressão, na altura dos dentes, na espessura circular ou no raio do pé do dente, ver figura 3.13.

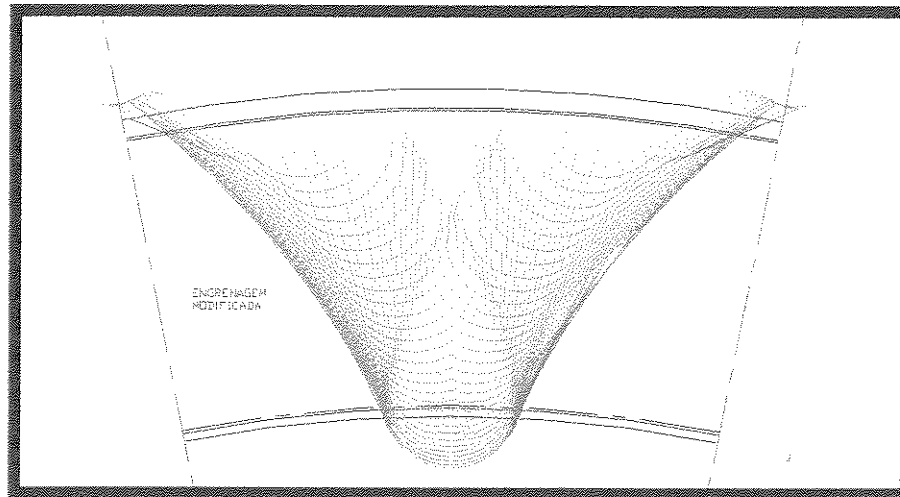


Fig. 3.13 – Perfil do dente - Engrenagem modificada

Nos casos analisados nos ensaios o volume de cavaco da engrenagem modificada é maior que o volume de cavaco da engrenagem padronizada, porém o fator **Km** (método atual) não considera esta diferença. Esta é a principal razão do presente trabalho.

O **Vo** (método proposto), é o fator sugerido para substituir o fator **Km**. Este novo fator leva em conta o volume de cavaco removido por dente do cortador caracol fabricado em aço rápido sinterizado recoberto com "TiN", para um desgaste "**VB_N**" de 0,20 a 0,30 mm na superfície de folga, na usinagem de engrenagens fabricadas em aço SAE 8620 (16 Mn Cr 5).

A influência de outros parâmetros, tais como avanço, diâmetro da ferramenta, número de entradas e outros serão abordados no item 3.16.2 chamado critério de desgaste.

Para o cálculo do número de peças produzidas é necessário que se calcule alguns fatores mostrados a seguir , onde :

Número de dentes do cortador (**N_{TSH}**) atuantes no “shifting “ total

$$N_{TSH} = (L_{shf} \div (M_n * \pi)) * (N_T) * \cos \gamma_{ow} \quad (3 . 17)$$

Volume usinado (V_{ush}) no “shifting” total

$$V_{ush} = N_{TSH} * V_o \quad (3.18)$$

Número de peças (N_p) à serem produzidas por vida do cortador

$$V_{pz} = A_v * Z_p * (L_d \div \cos \beta_{on}) \quad (3.19)$$

$$N_p = V_{ush} \div V_{pz} \quad (3.20)$$

Onde :

A_v = Área do vão do dente da peça

Assim, tendo-se o valor de "Vo", pode-se estimar o número de peças usinadas por vida do cortador. Este trabalho pretende provar que "Vo" é independente da geometria da engrenagem, isto é, uma vez estabelecido o valor de "Vo" para um determinado par cortador-engrenagem, o mesmo pode ser utilizado para qualquer outro par, desde que as características de contorno sejam mantidas.

3.8 - Sistemas de corte

Pode-se classificar o sistema de corte na geração de uma engrenagem da mesma maneira como é feito no fresamento, ou seja, discordante ou CONVENCIONAL e concordante ou “CLIMB”, conforme mostra a figura 3.14 , catálogo Fhusa (1990).

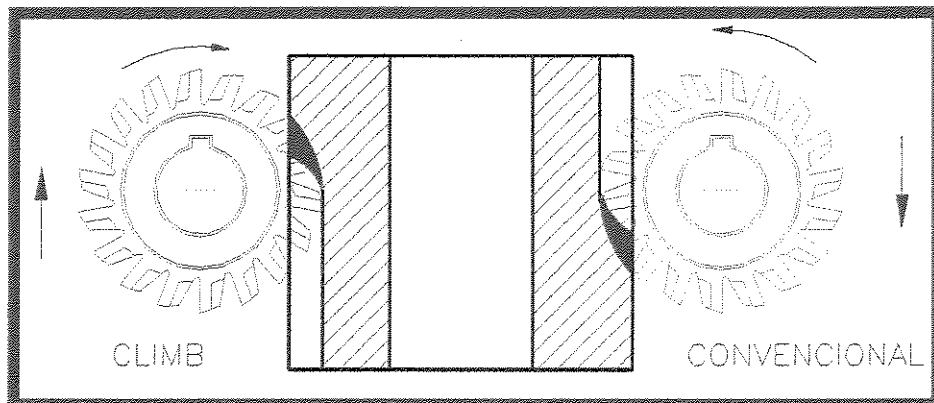


Fig. 3.14 – Sistemas de corte "Climb" e Convencional

Os termos “Climb” e Convencional originam-se do fresamento plano em fresadoras universais. Onde a mesa que prende a peça desloca-se provendo o avanço, enquanto a ferramenta gira. Na grande maioria das máquinas ferramentas de corte por geração, o avanço axial é dado pelo cabeçote da máquina. O trabalho é dito “Climb” ou Convencional de acordo com a direção do avanço em relação ao corte. No “Climb” a direção do avanço é a mesma do corte, já no Convencional as direções são opostas, conforme mostra a figura 3.14, catálogo Fhusa (1990).

A geometria do cavaco indeformado é a mesma, tanto para o “Climb” quanto para o Convencional. No método convencional o corte começa na porção fina do cavaco. Na verdade, a aresta de corte no começo apenas amassa e pressiona material previamente usinado. No método “Climb” o corte começa na porção mais espessa do cavaco, tomando toda sua largura e, assim, nenhum esmagamento das superfícies ocorre. A ferramenta encontra material suficiente para formar cavaco e depois arranca-o num simples corte.

Quando o ângulo de hélice é maior que 25 graus não há muita diferença entre os dois métodos. Para engrenagens retas, o método convencional apresenta um maior desgaste, melhorando seu desempenho no corte de engrenagens com um grande ângulo de hélice. Quando aplica-se o método “Climb” em engrenagens retas ou com pequenos ângulos de hélice, todos os dentes da ferramenta penetram no lado da peça causando uma grande remoção de material. Para ângulos de hélice grandes a maioria dos dentes penetra em superfícies já previamente usinadas reduzindo a vantagem do sistema “Climb”.

A entrada do caracol é uma região crítica no método Convencional, devido ao aumento do atrito nas superfícies de contato, tanto para engrenagens retas como helicoidais. O dente do cortador esmaga a superfície da peça produzindo desgaste e atrito. Este desgaste pode ser reduzido :

- aumentando-se o ângulo de folga
- diminuindo a força na zona crítica, ou seja, aumentando o avanço.

É bom observar que o método Convencional para desbaste geralmente produz engrenagens com erros de passo e baixa qualidade superficial. É comum se eliminar este problema fazendo o desbaste da peça pelo método Convencional e depois acabando-a no sistema “Climb”.

3.9 – Forças de corte

O processo de corte com ferramenta caracol é conhecido há apenas um século. Por um período tão longo quanto este os fenômenos deste processo tem sido estudado. No processo de corte com caracol, vários parâmetros influenciam as forças de corte, dentre eles a velocidade de corte, profundidade de usinagem, avanço, a geometria da ferramenta e a geometria da peça.

O efeito que surge no processo de corte não pode ser facilmente explicado pelo inter-relacionamento entre esses parâmetros. Somente agora na era da informática é que se pode analisar melhor este processo de corte.

A força de corte em cada face do cortador é função da área da seção de corte envolvida, Schmidhammer (1964) e no catálogo Fette (1997). O cálculo da seção de corte envolvida é de grande importância, não somente para se estimar a força de corte, mas também para se prever o desgaste e se verificar a capacidade do material de corte.

A espessura e o comprimento do cavaco são ligeiramente influenciados pela velocidade de corte e pelo avanço, dependendo muito mais da geometria e do tamanho da peça e do cortador como será mostrado no item 3.11, Hoffmeister (1979).

Pode-se observar na figura 3.15, Schmidhammer (1964) e no catálogo Fette (1997) que a força de corte cresce rapidamente no início da usinagem, isto é na entrada do cortador na peça, para depois diminuir gradativamente até o final da linha de engrenamento. Com exceção da região de entrada, a força de corte é praticamente igual para diferentes avanços. A explicação para este fenômeno é que a forma do cavaco é determinada quase exclusivamente pelo tamanho da peça e cortador. Pode ser observado também que o número de arestas de corte em um determinado instante aumenta com o aumento do avanço.

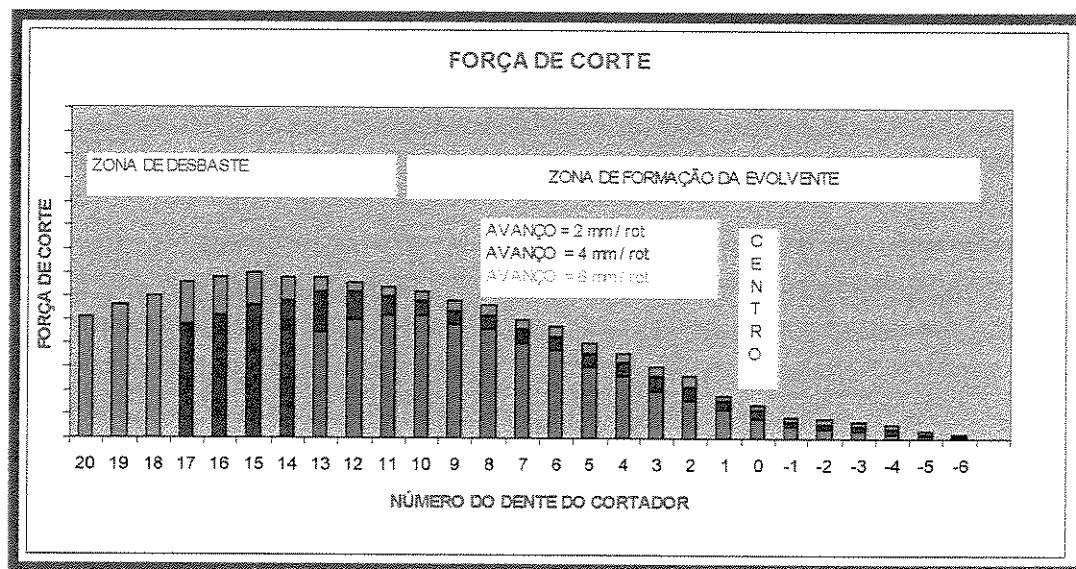


Fig.3.15 – Simulação da força de corte por dente em um determinado instante de corte

Nota-se também que no processo de corte diferentes carregamentos ocorrem em diferentes arestas de corte o que provoca um padrão não uniforme de desgaste. Para o avanço de 6 mm existem mais dentes em contato com a peça do que para o avanço de 4 mm e para este avanço existem mais dentes em contato com a peça do que para avanço de 2 mm. Isto significa que quanto maior o avanço mais dentes do cortador estão em contato com a peça. Segundo Ziegler (1966) , a velocidade de corte não tem grande influência na força de corte. Para todos os materiais testados, a força de corte permanece constante para valores de velocidade acima de 50 m/min, independentemente do processo de corte e da geometria da engrenagem. A força principal de corte depende mais das dimensões da peça do que das condições de usinagem, sendo no entanto bastante afetada pelo número de lâminas do cortador. As equações desenvolvidas pela empresa Gleason (1998) referentes aos esforços de corte são descritas abaixo:

$$F_c = (K_c * M_a^{1,3} * f_a^{0,8} * Z_o^{0,8} * HB * g) \div N_T \quad (3.21)$$

$$K_c = 2,16 - (0,0028 * HB) \quad (3.22)$$

$$T = (F_c * D_{ec}) \div 2 \quad (3.23)$$

$$P = (T * rpm) \div 9550 \quad (3.24)$$

Onde :

Dec = Diâmetro externo do cortador [mm]

Fc = Força principal de corte [N]

Kc = Constante característica do material SAE 8620

T = Torque [Nm]

P = Potência de corte [kW]

HB = Dureza Brinell

g = Aceleração da gravidade [m / s²]

fa = Avanço axial [mm / rot]

rpm = Rotações por minuto do cortador

Ziegler (1967) estudou, entre outros aspectos, os efeitos da direção do passo da hélice do cortador e da peça na força circunferencial e a relação desta força com a rotação da mesa. Se o passo da hélice do cortador e da peça são concordantes, a componente da força de corte opõe-se à rotação da mesa. Isto significa que a força de corte circunferencial comprime a mesa. Assim o parafuso-sem-fim que movimenta a mesa tem um melhor contato com a coroa não permitindo folgas.

Por outro lado, se o passo da hélice do cortador e da peça tiverem direções opostas, a componente da força de corte age no mesmo sentido da rotação da mesa. Se a força circunferencial exceder à força de atrito do par coroa / parafuso-sem-fim, o parafuso-sem-fim pode ser desengrenado saltando para o próximo dente da coroa.

3.10 - Área da seção de corte

Para se estudar o comportamento do desgaste é necessário se conhecer a área da seção de corte para cada dente do cortador, individualmente.

Segundo Ziegler (1967) a força principal de corte e a área da seção de corte são diferentes para cada dente do cortador. Isto é uma particularidade do processo de corte com ferramenta caracol, que é diferente dos outros processos, no entanto um aumento do avanço produz um aumento na espessura do cavaco imediatamente.

Na figura 3.16, catálogo Fette (1997) é plotado a área de seção de corte calculada. A área da seção de corte é sub-dividida de acordo com as arestas de corte na região superior da superfície de saída e nos flancos do cortador. Fica claro que na região de desgaste (G_e) na figura 3.10 a região superior é muito mais participativa que a dos flancos.

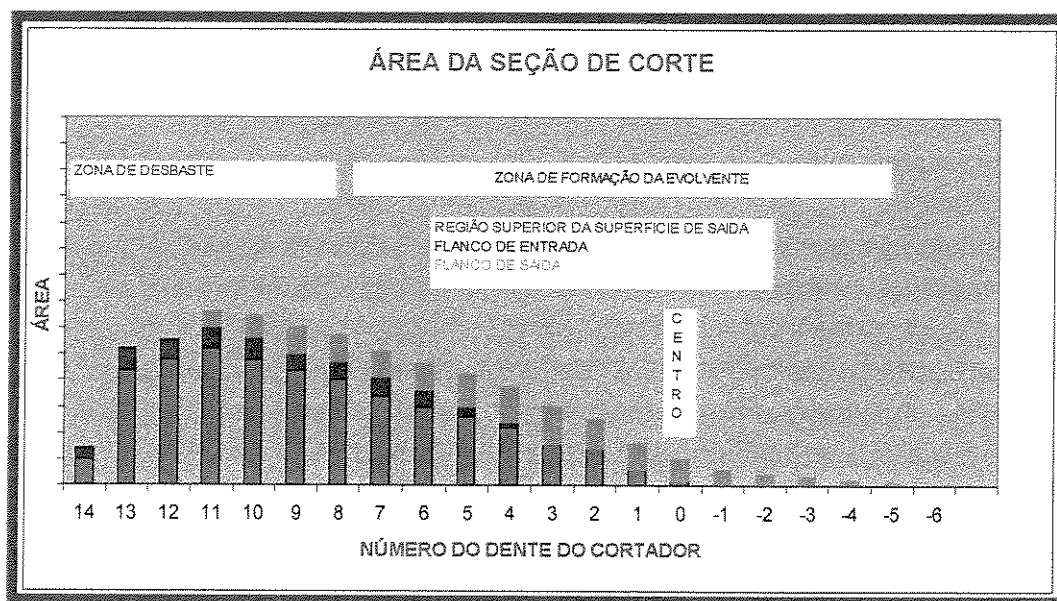


Fig. 3.16 – Área da seção de corte

3.11 – Espessura do cavaco

Hoffmeister (1979) desenvolveu uma formulação empírica que calcula a espessura máxima do cavaco (h_1), variando de 0,35 mm para engrenagens de módulo 1 e 0,10 mm para engrenagens de módulo 32, em função dos efeitos das características geométricas da engrenagem e do cortador caracol.

O cálculo da espessura do cavaco é influenciado por vários fatores que serão mostrados abaixo :

Fator relativo ao módulo

$$F_m = 0,0446 * M_n^{(-1,6145 * (10^{-2}) * \beta_{on} - 0,7730)} \quad (3.25)$$

Fator relativo ao número de dentes da peça

$$F_z = Z_p^{(-1,8102 * (10^{-2}) * \beta_{on} + 1,0607)} * e^{(0,0294 * \beta_{on})} \quad (3.26)$$

Fator relativo ao diâmetro externo do cortador

$$F_d = (D_{ec} \div 2)^{(1,6145 * (10^{-2}) * \beta_{on} + 0,4403)} \quad (3.27)$$

O efeito do ângulo de hélice em engrenagens com número de dentes menor que 120 é insignificante, sendo assim, pode ser ignorado.

Fator relativo ao número de lâminas do cortador e o número de entradas

$$F_{NT/Z_0} = (N_T \div Z_0)^{1,7162} \quad (3.28)$$

Fator relativo à profundidade de corte e o deslocamento de perfil

$$F_a = h^{-0,6243} * e^{(0,0294 * x)} \quad (3.29)$$

A espessura máxima do cavaco é calculada por :

$$h_{1_{max}} = 1,9569 \sqrt{(f_a \div (F_m * F_z * F_d * F_{NT/Z_0} * F_a))} \quad (3.30)$$

A espessura do cavaco influencia o avanço axial, como mostrado nas equações 3.31 e 3.32

$$F_{hl} = h_{l \max}^{1,9569} \quad (3.31)$$

O avanço axial pode ser calculado por :

$$fa = F_{hl} * F_m * F_z * F_d * F_{NT} / Z_0 * F_a \quad (3.32)$$

3.12 - Ondulações nos flancos

Devido à natureza do corte com ferramenta tipo caracol, marcas de avanço como mostra a figura 3.17, catálogo Fette (1997) e desvios na evolvente como mostra a figura 3.18, catálogo Fette (1997) que ocorrem nos flancos da engrenagem dependem do módulo, ângulo de pressão, ângulo de hélice, número de dentes da peça, número de lâminas, número de entradas, avanço axial e diâmetro do cortador. Torna-se necessário saber o valor desses desvios, pois o avanço deve ser reduzido na operação de acabamento de acordo com a qualidade desejada na engrenagem.

A profundidade das marcas do avanço é calculada pela equação 3.33 desenvolvida por: Hoffmeister (1966).

$$h_f = tg_{on} * [(D_{ec} \div 2) - \sqrt{((D_{ec}^2 - f_a^2) \div 4)}] \quad (3.33)$$

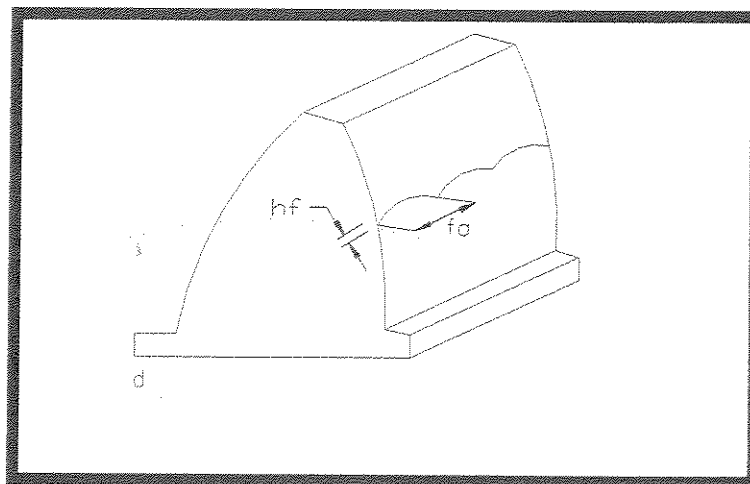


Fig. 3.17 - Profundidade das marcas de avanço

O desvio do perfil evolvente, como mostra a figura 3.18 também pode ser calculado através da equação 3.35 desenvolvida por Hoffmeister (1966).

$$Z_{ip} = Z_p \div \cos^3 \beta_{on} \quad (3.34)$$

$$h_p = (\pi^2 * Z_o^2 * M_n * \text{sen} \alpha_{on}) \div (4 * Z_{ip} * N_T^2) \quad (3.35)$$

Onde :

Z_{ip} = Número de dentes imaginário da peça

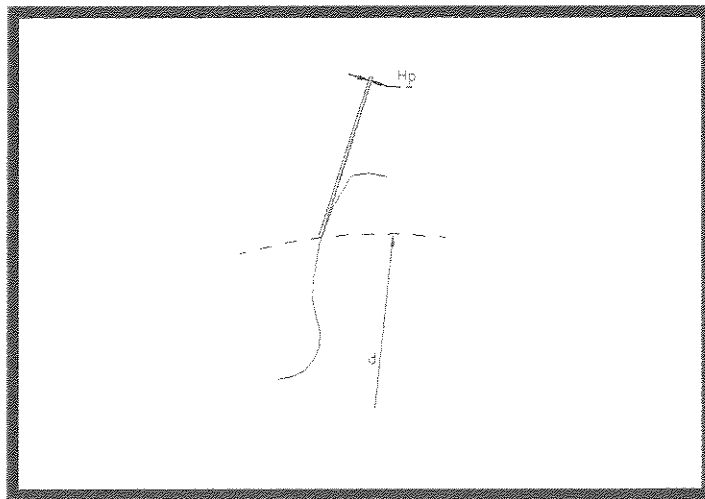


Fig. 3.18 - Desvio do perfil evolvente

3.13 - Aplicação do cortador caracol

O processo de geração com ferramenta caracol é viável quando se tem grandes quantidades de peças a serem produzidas, pois este é o processo mais rápido e econômico de se produzir engrenagens, embora sua aplicação seja limitada à engrenagens externas e estrias sem obstáculo, isto é, quando se tem espaço para entrar e sair com o cortador da peça sem danificar outras regiões da mesma.

Alguns tipos de perfis que podem ser gerados com cortador caracol podem ser visto na figura 3.19, catálogo Samputensili (1995).

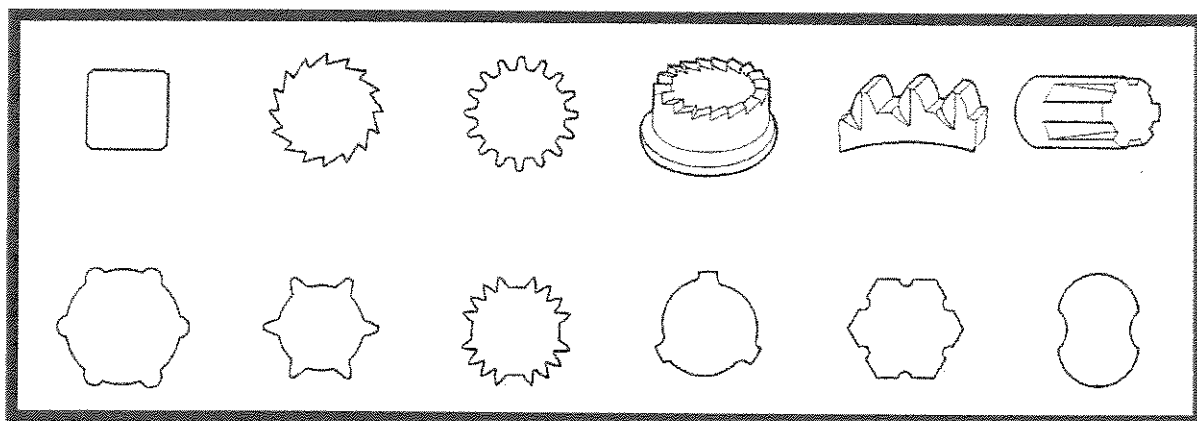


Fig. 3.19 - Perfis possíveis de serem obtidos na usinagem com ferramenta caracol

3.14 - Características do cortador caracol

As características do cortador Caracol dependem das necessidades do produto a ser gerado e da demanda de produção.

3.14.1 – Forma geométrica

Quanto à geometria de seu "blank", o caracol pode ser integral (todo o cortador é feito de um único material), ou de lâminas montáveis (o corpo é feito de um material menos nobre que o material das lâminas, que podem ser de aço rápido ou metal duro), onde se pode variar o diâmetro externo, o comprimento e o diâmetro do furo. A figura 3.20, catálogo Samputensili (1995), mostra o "blank" de um caracol integral objeto do presente trabalho.

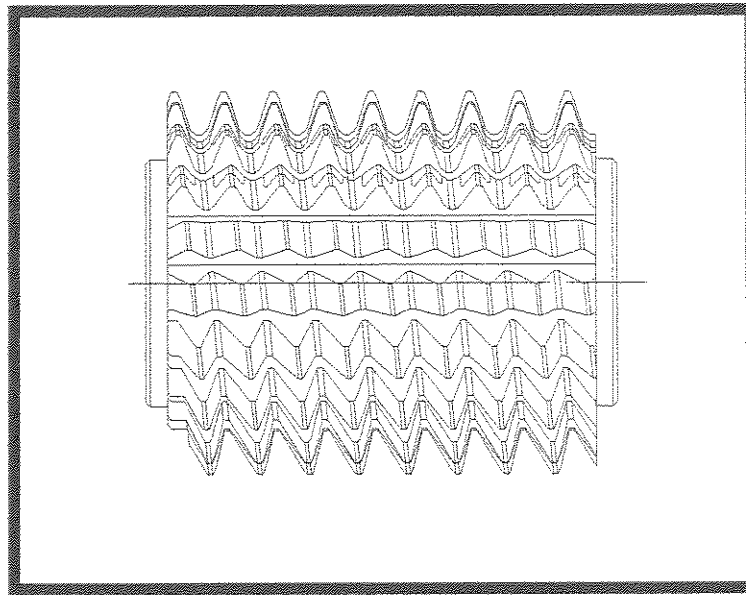


Fig. 3.20 - Caracol integral "blank"

3.14.2 - Tipo de cortador caracol

Quanto ao perfil, o cortador caracol pode ser :

Para gerar "undercut" na engrenagem

- Caracol com protuberância

Este tipo de perfil é utilizado nas operações de semi acabamento. A protuberância do caracol produzirá saída no pé dos dentes das engrenagens para uma operação posterior, que pode ser retificação ou "Shaving "

Para gerar "chanfro" na engrenagem

- Caracol "semi-topping "

O "semi-topping" é utilizado para chanfrar a cabeça dos dentes das engrenagens, evitando assim batidas nos flancos dos dentes, que poderão causar ruído durante o engrenamento.

Para gerar "raio completo" na engrenagem

- Caracol com raio total

O raio total é utilizado para minimizar tensões no pé dos dentes das engrenagens.

Para gerar "Diâmetro externo" na engrenagem

- Caracol "topping"

O caracol "topping" é utilizado quando se necessita de concentricidade entre o diâmetro primitivo e o diâmetro externo das engrenagens.

Para gerar "Modificação de evolvente" na engrenagem

- Caracol G

O caracol "G" é utilizado quando se necessita de modificações no perfil evolvente. Pode ser usado em operações de acabamento e semi-acabamento.

A figura 3.21, catálogo Samputensili (1995), mostra esquemas do que vem a ser cada um destes perfis.

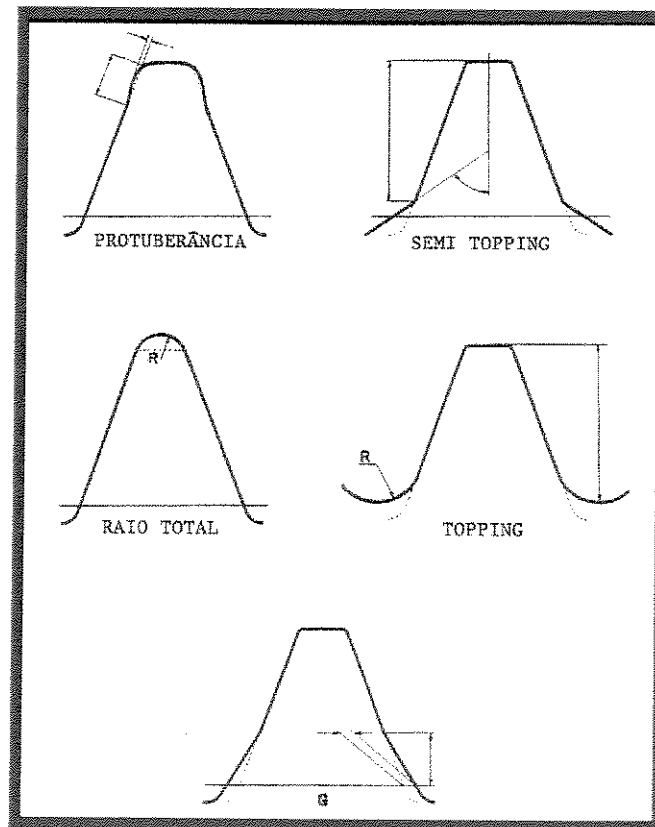


Fig. 3.21 – Perfil de cortador caracol

3.15 – Materiais do cortador

O fresamento de engrenagens consiste de um corte interrompido muito severo, que exige certas características para ser bem sucedido. A tendência geral da indústria atualmente no que tange à material de cortador caracol tem sido aperfeiçoar o aço rápido para uma dada aplicação, o que normalmente significa aumentar o seu teor de liga. A principal vantagem disso é a melhora da vida da ferramenta, que resulta em um aumento de peças produzidas por afiação em comparação com a classe de material inicialmente usada.

Atualmente, os materiais mais comuns para a fabricação de cortadores caracol são os aços rápidos. Dentre todos os materiais disponíveis, o que tem apresentado melhores resultados para aplicação em cortadores tipo caracol é o aço rápido sinterizado CPM REX 76, (ver tabela 3.1).

A micro estrutura do aço rápido recozida mostra partículas de carbeto globulizadas numa matriz ferrítica. Esses carbeto são combinações complexas do carbono com outros elementos, dando uma importante contribuição para o aumento da resistência ao desgaste e para a manutenção do corte a quente. É muito importante lembrar que a têmpera deve ser feita de tal maneira que toda a austenita seja transformada em martensita, garantindo o endurecimento total da ferramenta.

A seleção de aços rápidos para ferramentas de corte de engrenagens depende de fatores tais como

Tipo de material a ser usinado, dureza e estrutura.

Condições de trabalho

Geometria da ferramenta e da peça

Qualidade e rigidez da máquina

Aplicação de cobertura superficial e re-cobertura superficial no cortador

As propriedades físicas fundamentais a um material de ferramenta de usinagem são :

Resistência ao desgaste abrasivo

Dureza a quente

Tenacidade

As características básicas de um aço rápido segundo Dixon (1990) são:

Capacidade de ser tratado termicamente, chegando-se à altas durezas, indo de 63 a 68 Rc ou mesmo mais. A alta dureza é necessária para uma boa resistência ao desgaste.

Capacidade de manter esta alta dureza, sob elevada temperatura, isto é chamado dureza a quente. Por serem aços rápidos, eles estão sujeitos à aquecimentos consideráveis na aresta de corte, quando a mesma encontra a peça que está sendo usinada. Por isso a dureza a quente é necessária. A ferramenta após sofrer o aquecimento deve apresentar diminuição mínima da dureza.

Resistência ao impacto e ao rompimento por fratura é necessária para usinagem com corte interrompido, ou sob alta pressão. Estes são aspectos da tenacidade. Aços rápidos são notadamente mais tenazes que o metal duro (MD). Embora a alta performance do metal duro pela sua excelente estabilidade térmica, esta é confrontada com o alto custo da ferramenta e a suscetibilidade à fraturas precoces, não satisfazendo a expectativa de vida em determinadas aplicações, com isso aumentando o custo do processo produtivo.

Naturalmente em adição à estas três características, o aço rápido deve ser capaz de ser trabalhado, usinado, retificado, ou o que for necessário para a fabricação do seu produto.

A introdução bem sucedida da metalurgia do pó para a fabricação de aços rápidos há alguns anos tornou disponíveis, aos engenheiros de aplicações, materiais com níveis de resistência ao desgaste, tenacidade e dureza à quente consideravelmente melhores do que a dos aços rápidos convencionais.

Caracóis baseados na metalurgia do pó, combinados com uma cobertura altamente resistente ao desgaste (ex: TiN , TiAlN , Futura da empresa Balzers® , e outros), possibilitam um aumento na velocidade de corte em relação ao aço rápido convencional, mostrado nos testes realizados por Sulzer (1997) como mostra a figura 3.22, combinado com atrativas vidas de ferramentas.

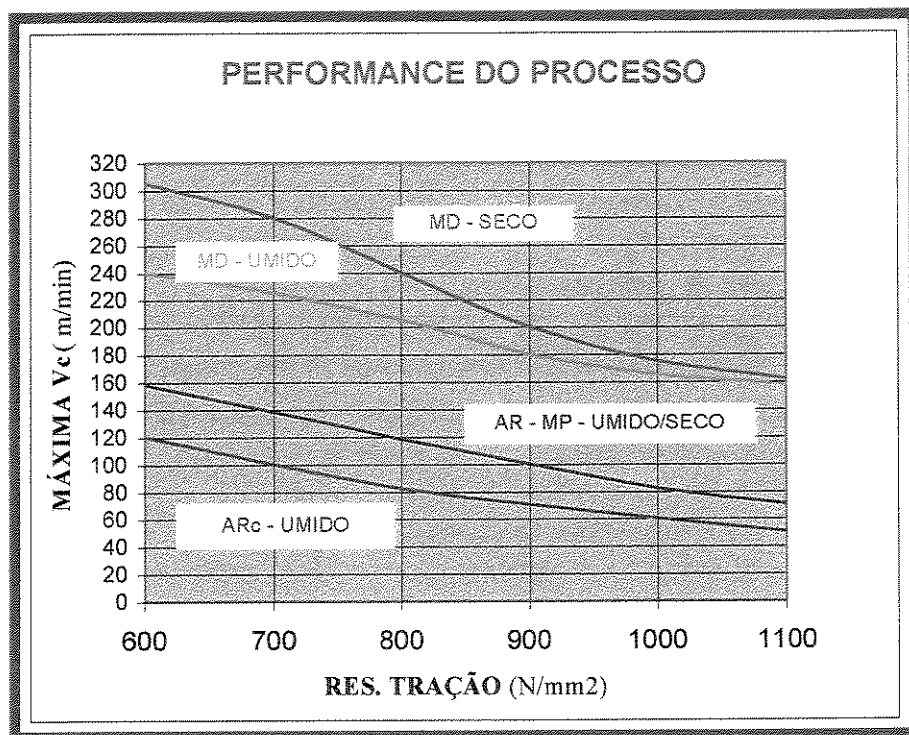


Fig. 3.22 – Performance do processo – Máxima velocidade de corte

Ao mesmo tempo, o aumento na resistência à tração do aço rápido permite consideravelmente maior carga no cavaco, superior ao metal duro, mostrado nos testes realizados por Sulzer (1997) figura 3.23, deste modo aumentando a performance do processo.

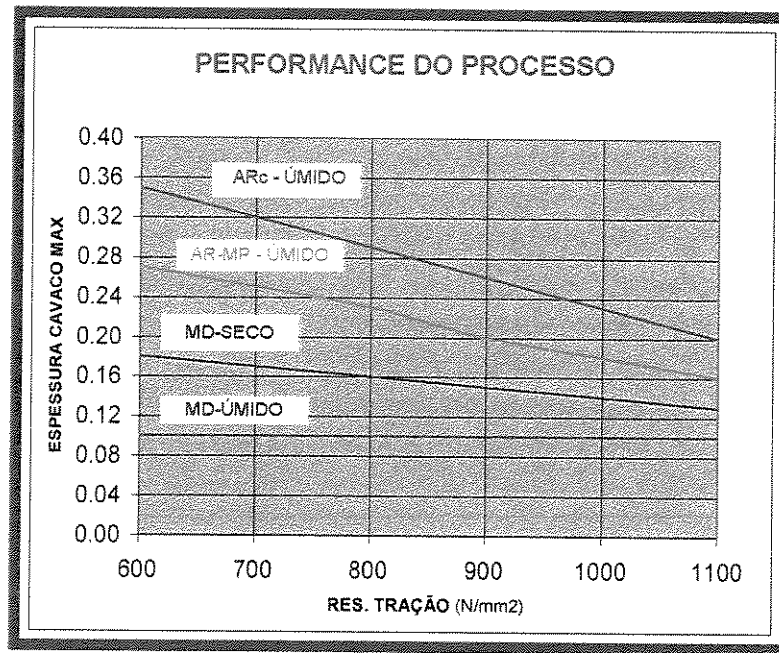


Fig. 3.23– Performance do processo – Máxima espessura do cavaco

A tabela 3.1 mostra a nomenclatura de alguns aços rápidos utilizados em caracóis em diversas normas e também seus nomes comerciais.

Tabela 3.1 Aços (M P) para ferramentas , catálogo Liebherr (1996)

AISI		DIN	JIS	EURO	NOMES COMERCIAIS		
					CRUCIBLE	ERASTEEL	HITACHI
M2	MP	1.3343	SKH 51	HS 6-5-2	CPM M2		
M3	MP	1.3344	SKH 53	HS 6-5-3	CPM M3	ASP 23	
M35	MP	1.3243		HS 6-5-2-5	CPM M35		
M3/2+8%Co	MP			HS 6-5-3-8	CPM REX45	ASP 30	HAP 40
M48	MP			HS 10-6-3-9	CPM REX76		
T15	MP	1.3202	SKH 10	HS 12-0-5-5	CPM T15		HAP T15

3.15.1 – Recobrimento

O recobrimento de ferramentas com camadas duras vem sendo perseguido há muito tempo. Na década de 60, iniciou-se o recobrimento de pastilhas de metal duro com finas camadas de carboneto de titânio (TiC) e nitreto de titânio (TiN), pelo processo de “deposição química de vapor” (CVD), que confere à ferramenta, uma resistência ao desgaste sensivelmente aumentada. Este processo porém é impossível de ser aplicado sobre ferramentas de aço rápido, pois é realizado à temperatura de 1000 °C, na qual o aço rápido perde suas propriedades mecânicas como dureza e resistência, tornando-o impróprio para o uso como ferramenta.

Por volta de 1980, foi desenvolvido simultaneamente na Europa e no Japão, o recobrimento de ferramentas com camadas de nitreto de titânio pelo processo de “deposição física de vapor” (PVD), o qual, pela baixa temperatura de operação, entre 400 °C e 500 °C, permite recobrir ferramentas de aço rápido, aços para trabalho à quente e alguns aços para trabalho à frio, sem chegar às temperaturas de revenimento destes aços, mantendo-se, assim, inalteradas suas propriedades mecânicas.

Este processo, consiste na ionização do titânio em plasma, sob vácuo, na presença de gás reativo (nitrogênio). As partículas ionizadas, aceleradas a alta energia cinética, bombardeiam a superfície da ferramenta a ser recoberta, depositando uma fina camada de cobertura, da ordem de 3 a 5 µm. É condição essencial para o êxito do processo que a superfície da ferramenta seja perfeitamente limpa, pois somente assim pode-se obter uma perfeita aderência, como se observa na micrografia da camada, mostrado na figura 3.24, catálogo Balzers (1998). Esta limpeza é tão essencial, que continua sendo feita mesmo durante o processo de revestimento, através de um bombardeamento de íons de argônio, também dissociados pelo plasma. É evidente que a velocidade de ataque (bombardeamento) será sempre inferior à velocidade de deposição.

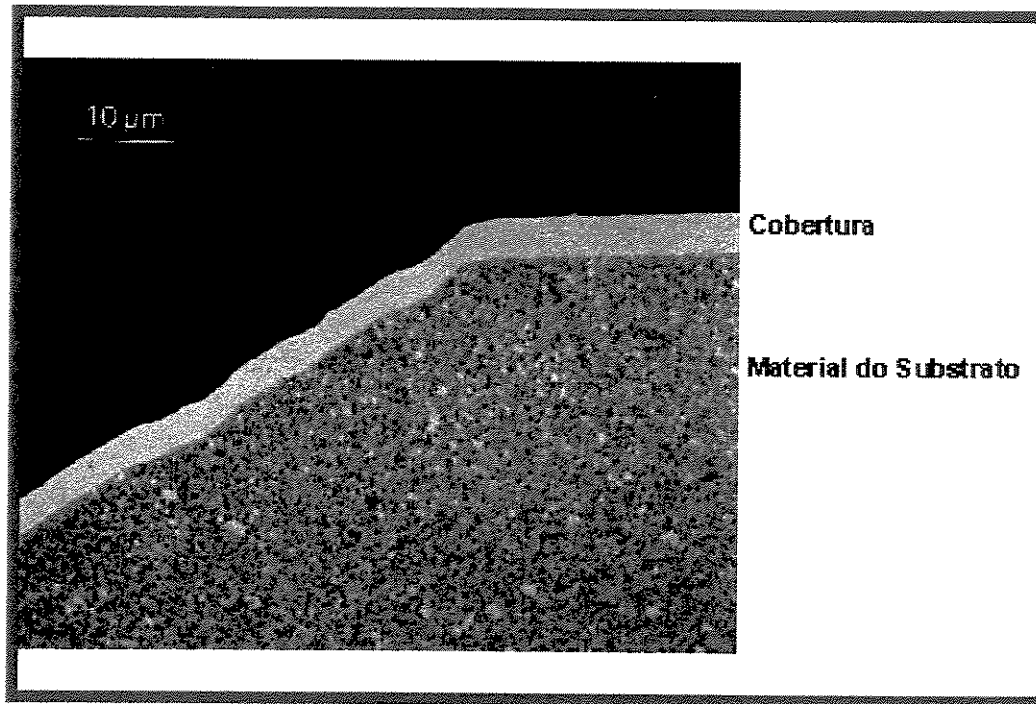


Fig. 3.24 - Micrografia da camada de TiN

A camada de cobertura (TiN) conforme Diniz, Marcondes e Coppini (1999) tem as seguintes propriedades fundamentais:

- alta dureza, de ordem de 2300 HV;
- elevada ductilidade;
- redução sensível da soldagem à frio;
- baixo coeficiente de atrito;
- quimicamente inerte e
- ótima aparência.

Segundo Hatschek (1983) a camada superficial de TiN (nitreto de titânio) de uma ferramenta recoberta só pode realizar seu trabalho se o metal base for compatível. Isto depende, em parte da sua dureza e resistência e, acima de tudo, do módulo de elasticidade do metal base. Quando a ferramenta está em serviço, deformações ocorrem na camada de TiN, gerando tensões de tração e compressão. O grau de deformação e as tensões resultantes diminuem com o aumento do módulo de elasticidade do metal base.

Quando se compara os módulos de elasticidade do TiN, TiC, TiCN, TiAlN e do aço rápido, as combinações AR-MP / TiN e AR-MP / TiAlN, são sem dúvida as mais favoráveis. No entanto, a diferença ainda presente deve ser compensada pela ductilidade do recobrimento. A ductilidade assegura que a camada de TiN / TiAlN, siga as deformações do metal base apesar de sua dureza. A dura camada de recobrimento tem apenas de 2 a 4 μm de espessura e o perigo da formação de micro-trincas é pequeno..

Com o contínuo desenvolvimento dos processos de recobrimento uma melhor adesão da camada foi conseguida conforme a empresa Balzers (1998), e nos últimos 8 anos os cortadores caracóis com TiN / TiAlN tem sido usado com sucesso para aumentar a produtividade. A melhor performance desses cortadores comparados com os convencionais pode ser utilizada de diversas maneiras, dependendo dos requisitos da produção:

- maior vida da ferramenta entre reafiações sob as mesmas condições de usinagem.
- condições de corte mais severas para uma mesma vida da ferramenta.
- ou maior vida da ferramenta sob condições de corte mais severas.

3.16 - Desgastes

3.16.1 - Mecanismo do desgaste de uma ferramenta

Uma ferramenta em trabalho está sujeita ao desgaste que pode ser medido por diversos parâmetros como mostrado na figura 3.25, Diniz, Marcondes e Coppini (1999).

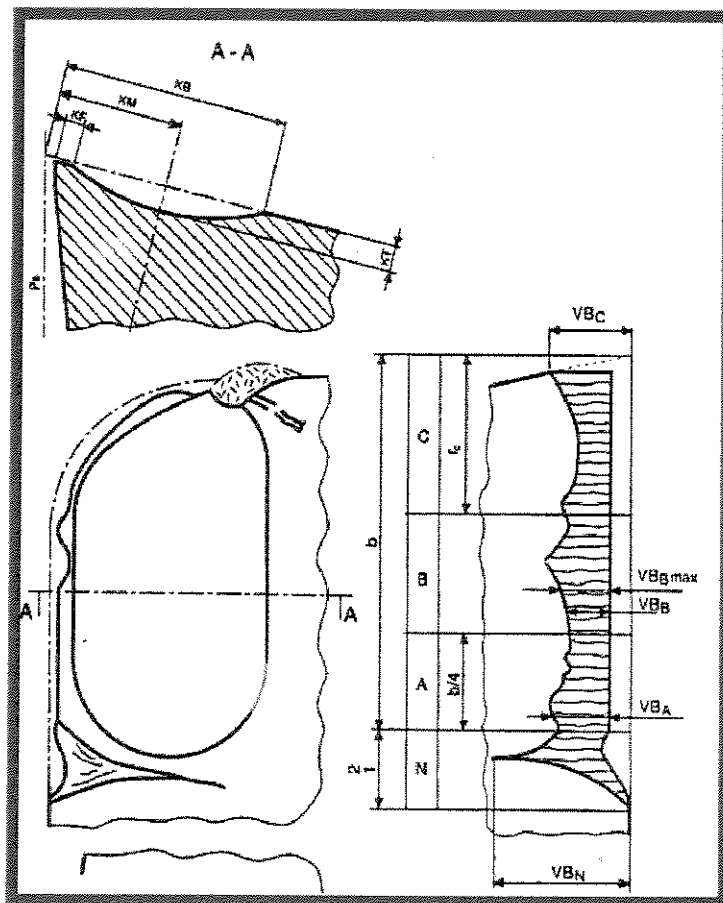


Fig. 3.25 - Desgaste da aresta de corte de uma ferramenta

Os principais desgastes são:

- O desgaste frontal (VB_N , VB_B ou VB_{BMAX}) medido na superfície de folga. Este desgaste, gerado por vários fatores que serão vistos adiante, limita a vida da ferramenta pelo

acabamento e dimensões da peça usinada e define a profundidade de reafiação e, com isso, o número de vidas da mesma.

– O desgaste de cratera ou profundidade de cratera (KT), medido na superfície de saída, é devido principalmente à adesão e transferência das micro-asperezas para o cavaco, em função das altas temperaturas desenvolvidas, além da ocorrência de difusão que altera as propriedades originais do material na superfície da saída. A figura 3.26, Brink (1997), mostra os mecanismos geradores dos desgastes da ferramenta durante a usinagem em função da velocidade e da temperatura de corte.

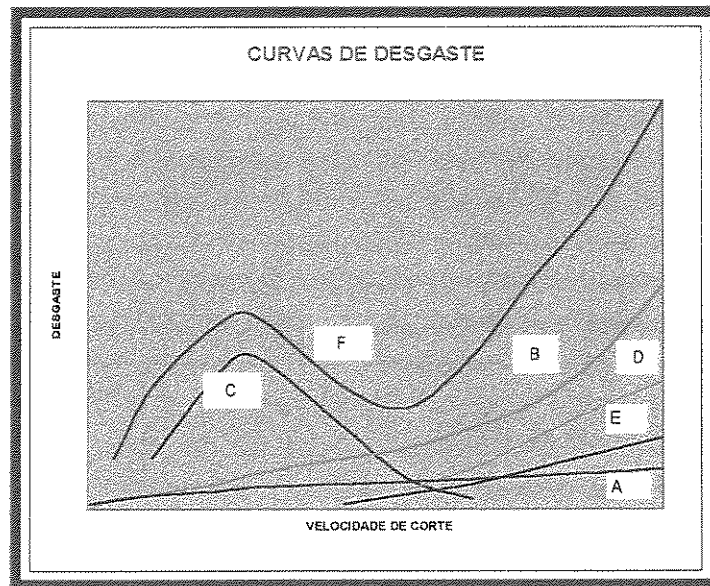


Fig. 3.26 - Componentes do desgaste frontal de uma ferramenta

Onde :

A = Deformação da aresta de corte

B = Abrasão mecânica

C = Cisalhamento da aresta postiça de corte

D = Difusão intermetálica

E = Oxidação

F = Desgaste resultante

Em baixas velocidades, partículas do cavaco, sob a pressão de corte na zona de aderência, mantém este contato sem movimento relativo um espaço de tempo suficiente para se soldarem à superfície de saída da ferramenta, formando a aresta postiça de corte. Esta, ciclicamente, aumenta gradualmente e se rompe, de forma que partes da aresta postiça cisalhada, extremamente endurecidas, removem partículas da superfície de folga da ferramenta, aumentando muito o desgaste frontal e prejudicando o acabamento superficial da peça. Esta saída de partículas da aresta postiça de corte ocorre com frequência, sendo diretamente proporcional à velocidade de corte. Com o aumento da velocidade de corte e consequentemente da temperatura, ultrapassa-se a temperatura de recristalização do material do cavaco e a partir deste ponto, este fenômeno reduz-se, pois com a formação de novos grãos no cavaco, não existe mais a possibilidade de encruamento do mesmo, que é fundamental para a formação da aresta postiça.

Em velocidades mais altas, os fatores críticos são: desgaste por abrasão, difusão e oxidação. Em ferramentas convencionais de aço rápido, o desgaste frontal normalmente é o critério determinante da vida, por ser sensivelmente maior.

O desenvolvimento do desgaste em caracóis recobertos é bem diferente do desgaste em ferramentas convencionais. Para caracóis convencionais o desgaste se desenvolve ao longo da superfície de folga, especialmente na transição entre o raio da ponta e o flanco, determinando sua vida de serviço. O desgaste na superfície de folga aumenta rapidamente no início do corte, para depois aumentar gradativamente até o limite da vida do caracol. Quando o desgaste passa do estágio normal para o progressivo, o cortador não deve ser mais usado, devendo ser reafiado .

No caso de caracóis recobertos com nitreto de titânio (TiN), devido as propriedades da camada como descrito no item 3.15.1 (Recobrimento) a vida é determinada pelo desgaste na superfície de saída do cavaco, conforme mostra a figura 3.27, sendo a região superior do dente mais afetada, como visto no item 3.10 (Área da seção de corte).

Depois que o recobrimento foi desgastado ocorre crateramento (pitting), que se expande gradativamente até que se estende de um flanco à outro, atingindo a aresta de corte, que também é desgastada. Quando esse desgaste (VB_N – ver figura 3.28) atinge 0,2 à 0,3 mm, normalmente um crateramento de 100 à 200 microns já está presente, reduzindo a qualidade da peça produzida (acabamento ruim), e aumentando o risco dessas crateras crescerem. Isto formam trincas na região superior do dente, reduzindo assim o número de vezes que o cortador pode ser reafiado. Portanto, é importante que o caracol seja retirado de serviço antes que a região superior do dente seja arrancada.

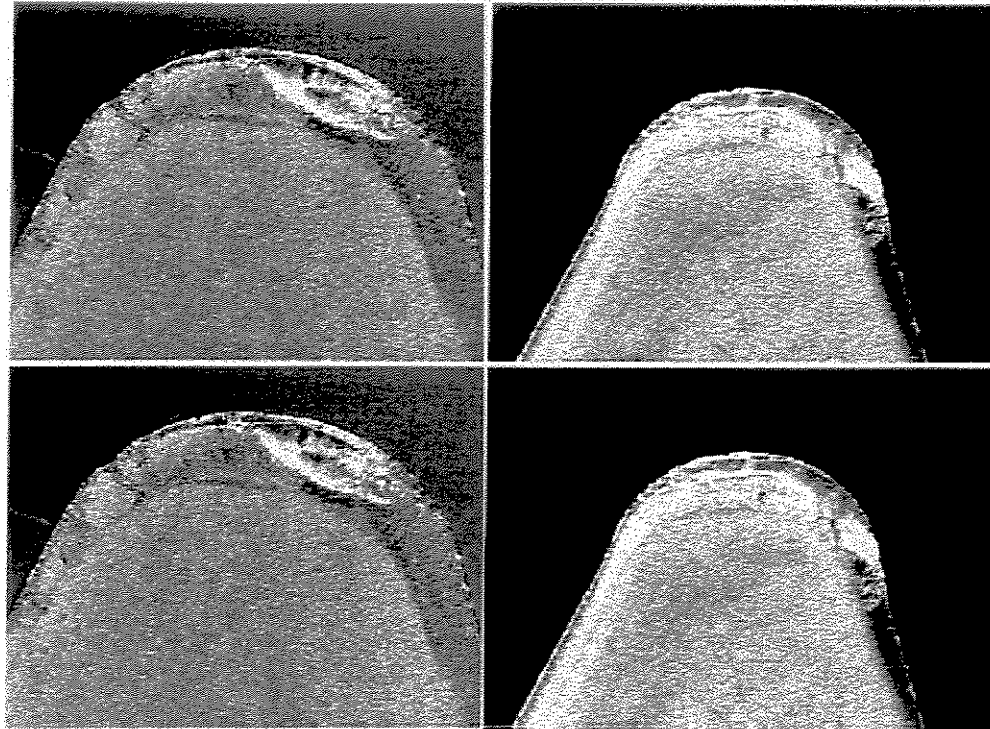


Fig. 3.27 – Desgaste no dente do cortador recoberto com TiN

3.16.2 – Critério de desgaste

No dente de um cortador caracol podemos ter desgaste nos flancos (VB_N), no contorno da aresta de corte, lascamento e crateramento, conforme pode ser visto na figura 3.28, catálogo Fette (1997), porém o desgaste predominante mostrado nas figuras 3.29 a 3.32, referem-se ao desgaste nos flancos " VB_N ".

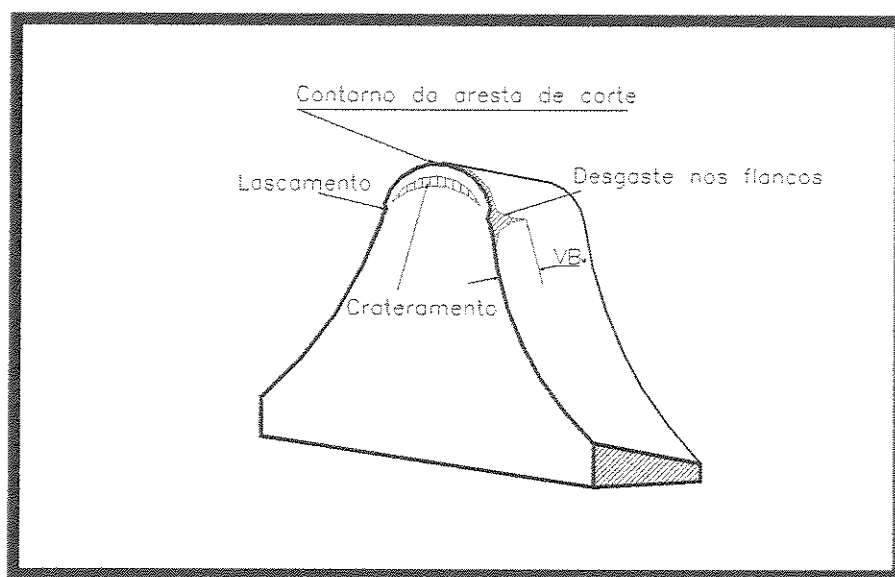


Fig. 3.28 – Desgaste no dente de um cortador caracol

A figura 3.29, catálogo Fette (1997) mostra a curva característica de desgaste de um cortador específico, onde 40 engrenagens foram usinadas numa posição específica do cortador, e a outra curva mostra a usinagem de 160 engrenagens utilizando um deslocamento tangencial ($\text{shifting} = 0,64 \text{ mm} / \text{fixação}$).

No primeiro caso, o trabalho de desbaste é sempre realizado pelos mesmos dentes, assim o desgaste máximo ocorre sempre em poucos dentes. Quando reafia-se o cortador, material é retirado dos dentes sem que esses estejam realmente desgastados. Com o deslocamento ou incremento tangencial (shifting), outros dentes do cortador movem-se em direção à área de maior carga durante cada ciclo de operação, desta maneira os dentes do cortador apresentam marcas de desgaste uniformes.

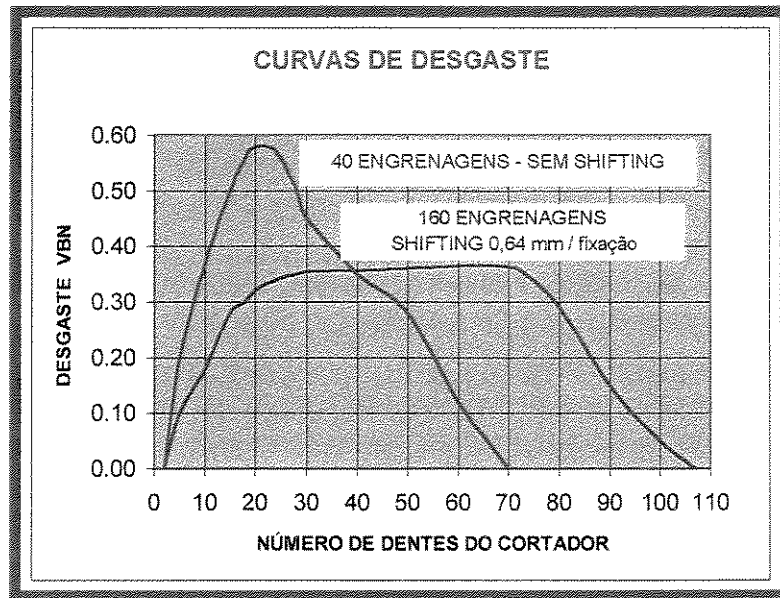


Fig. 3.29 – Desgaste no flanco $VB_N \times N_{TSH}$

O efeito das condições de corte no desgaste é particularmente interessante. As figuras 3.30 e 3.31 mostram valores de desgaste de flanco após a usinagem de 160 engrenagens com "shifting" de 0,64 mm por fixação. A dependência da largura de desgaste " VB_N ", com o avanço, é mostrado na figura 3.30, catálogo Fette (1997).

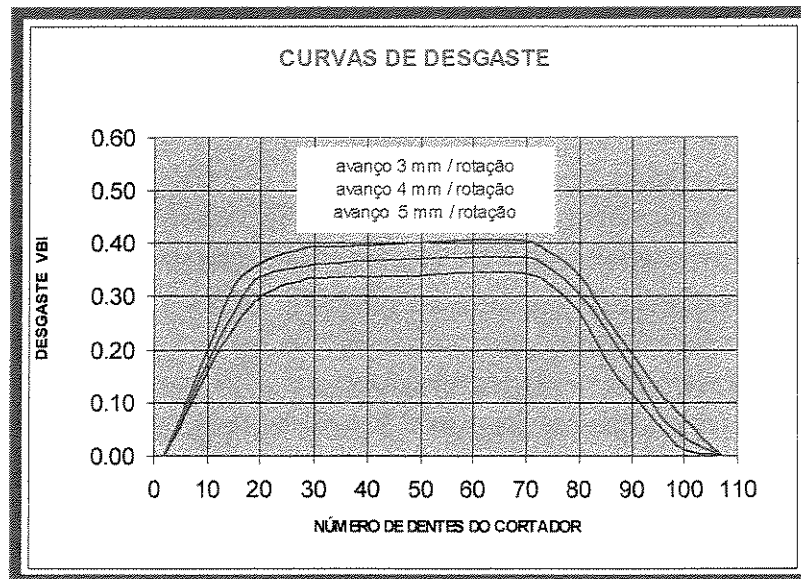


Fig.3.30 – Desgaste no flanco $VB_N \times N_{TSH}$

Com avanços pequenos a espessura do cavaco e as forças de corte são pequenas, mesmo com um número grande de entradas do cortador. Se um maior avanço é aplicado, ocorre um aumento da área de corte e assim um aumento da carga nos dentes de corte, mesmo se o número de entradas diminua. Observando-se as figuras 3.30 e 3.31, catálogo Fette (1997), pode-se ver que um aumento do avanço afeta pouco o desgaste da ferramenta. Assim, pode-se compensar a piora no desgaste do cortador pela redução do tempo de corte de uma peça causada pelo aumento do avanço. A figura 3.31 mostra a repetição dos testes por quatro vezes.

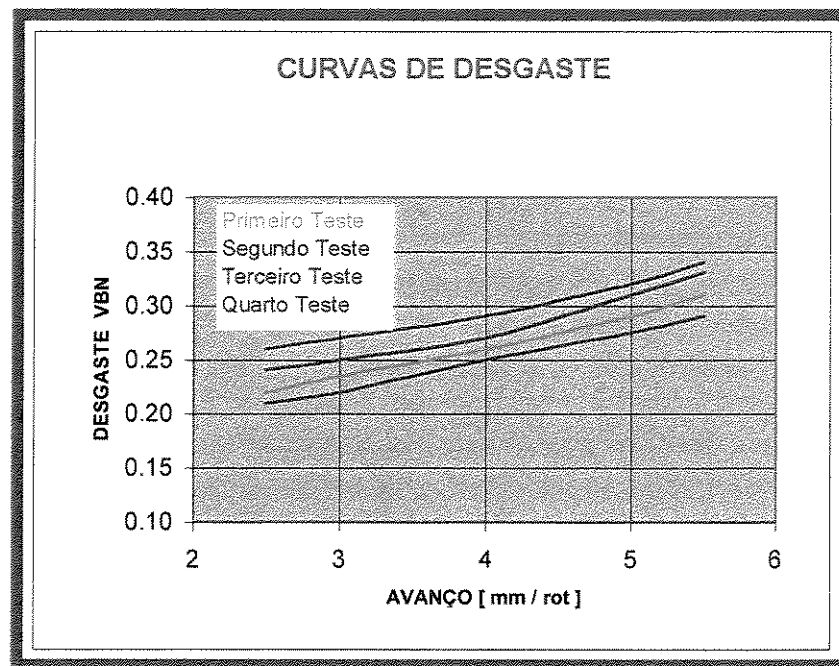


Fig.3.31 – Desgaste no flanco VB_N x f_a

Conclui-se então que o desgaste não é fator limitante para o avanço e sim para a qualidade da engrenagem e as marcas de usinagem. Em contraste, a velocidade de corte afeta muito mais no desgaste do cortador, conforme mostra a figura 3.32, onde os testes foram repetidos por três vezes.

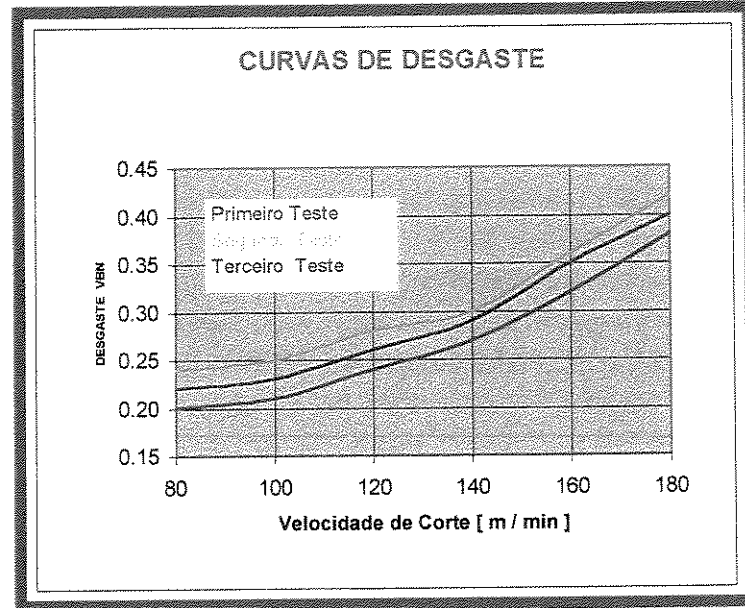


Fig. 3.32 – Desgaste no flanco VB_N x V_c

Hoffmeister (1970) classificou os efeitos do desgaste de acordo com o cortador, máquina e peça. De acordo com este autor, o diâmetro, o número de canais e o número de entradas do cortador afetam o desgaste. A estes pode-se adicionar o raio de ponta, o ângulo de folga do perfil, o ângulo da cremalheira e finalmente coisas do tipo material, projeto e passo do cortador. O desgaste também é afetado pelas condições de usinagem, tais como , velocidade de corte, avanço, profundidade, deslocamento axial , etc... A engrenagem afeta o desgaste da ferramenta pelo seu diâmetro, módulo, ângulo de hélice, largura e deslocamento do perfil. O efeito do material da peça não pode ser esquecido. Esse grande número de variáveis que compõem o processo de desgaste podem ser divididos em dois grupos :

Valores da geometria do cortador e da peça que determinam o comprimento do arco de corte e a espessura do cavaco. Crê-se que parâmetros como módulo, número de dentes, ângulo de hélice, etc. não influenciam substancialmente na vida do cortador, desde que mantidos dentro de uma determinada faixa.

Efeitos tecnológicos, tais como velocidade de corte, materiais, geometria da aresta de corte, fluido de corte, etc.

3.17 - Afição

3.17.1 - Afição de cortador caracol

Segundo Liston (1993) e Kotlyar (1994), é de fundamental importância o desenvolvimento das tecnologias para se reafiar cortadores caracóis, tais como afiação profunda e abrasivos adaptados a vários tipos de material. Assim, rebolos feitos de CBN e diamante devem ser usados em adição aos rebolos convencionais (sílica e alumina).

Em qualquer processo de usinagem a ocorrência de marcas de desgaste nas arestas de corte afeta a formação de cavaco e aumenta a força de corte, reduzindo a qualidade da peça produzida. Por isso, o desgaste deve ser removido quando atinge um certo valor. É importante que se defina este valor levando em conta os seguintes fatores :

a - Ele não pode ser muito baixo, pois isto reduziria muito a vida da ferramenta, tornando o processo anti-econômico.

b - Ele não pode ser muito alto, pois isto, além de prejudicar a qualidade da peça como já citado, gera uma grande remoção de material do cortador na afiação, e, com isso, um menor número de afiações possíveis do cortador, o que também é anti-econômico.

Todos os tipos de cortadores caracol são reafiados por rebolos abrasivos na superfície de saída e para tal alguns cuidados devem ser tomados:

- A geometria da superfície de saída deve ser produzida de acordo com o nível de qualidade do caracol.

- As tensões térmicas na reafiação devem ser contidas ao mínimo.
- A rugosidade da superfície de saída da ferramenta deve ser mínima.
- Os métodos de reafiação e dispositivos auxiliares devem ser escolhidos de tal maneira que os custos sejam os menores possíveis.

3.17.2 – Métodos de afiação

Máquinas projetadas especialmente para a afiação de cortadores caracóis estão hoje presentes no mercado. Essas máquinas possuem dispositivos indexadores automáticos e podem afiar caracóis com canais helicoidais e retos.

Segundo as empresas Samputensili (1995) e Fette (1997) fabricantes de cortadores, o rebolo em formato de pires é usado para afiação de cortador caracol. Para ferramentas de canais retos, tanto o lado reto quanto o lado cônico do rebolo podem ser usados na afiação. Contudo, o lado cônico é preferível pois obtém-se uma pressão mais uniforme entre o rebolo e o cortador. Com o lado reto o contato entre o rebolo e o cortador é pequeno nas pontas e grande no centro. Se uma remoção muito grande tem que ser feita, mais material será retirado das pontas. Para se corrigir este defeito muitas passadas devem ser dadas em cada lâmina.

O lado reto do rebolo não pode ser usado em cortadores com canais helicoidais pois uma interferência na raiz e no topo do canal pode ocorrer, resultando numa superfície de saída convexa e não radial.

O lado cônico do rebolo trabalha bem para quase todos os cortadores helicoidais, exceto aqueles que possuem grandes ângulos de hélice, tais como aqueles presentes em cortadores de múltiplas entradas. Nestes casos a interferência torna-se relevante e o rebolo deve ser dressado com uma curvatura para eliminar a interferência.

3.17.3 – Efeito da técnica de afiação na vida do caracol

Na afiação deve-se ter cuidado em evitar um calor excessivo. É possível que a quantidade de calor seja grande de tal maneira que a superfície de saída seja amolecida, gerando um aumento na taxa de desgaste. Outro perigo do calor excessivo é a propagação de trincas na base do dente que freqüentemente acarreta uma quebra da ferramenta.

Segundo a empresa Samputensili (1995), mais engrenagens podem ser usinadas entre duas afiações sucessivas quando o acabamento da superfície de saída da ferramenta é boa. O rebolo deve ser dressado antes do acabamento e deve-se permitir o faiscamento (spark out), não somente para a acuracidade como também para o acabamento superficial.

3.17.4 - Erros de afiação

Uma ferramenta de alta acuracidade numa máquina perfeitamente arranjada com bons dispositivos pode gerar uma engrenagem ruim caso o cortador seja mal afiado. Segundo Liston (1993) e Kotlyar (1994) os erros de afiação podem contribuir tanto para erros de perfil como para erros de passo, pois a ferramenta é deslocada de sua posição verdadeira, expondo as arestas de corte em diferentes planos.

Esses erros podem ser:

1. erro de radialidade dos canais
2. erro de espaçamento entre canais
3. erro de passo dos canais

3.17.4.1 – Erro de radialidade dos canais

A superfície de saída na ferramenta caracol é projetada para atuar num plano específico e qualquer variação em sua posição é considerada erro na superfície de saída. Esse erro é medido do diâmetro externo em direção à profundidade de corte.

- Erro negativo da cremalheira descreve a condição de quando muito material é removido da porção superior da superfície de saída. Cremalheira negativa diminui a profundidade de corte e aumenta o ângulo de pressão do dente do caracol. O resultado na engrenagem é um dente fino no topo e grosso na base (perfil negativo).

- Erro positivo da cremalheira ocorre quando muito material é removido da porção baixa da superfície de saída. Cremalheira positiva aumenta a profundidade de corte e reduz o ângulo de pressão. O resultado na engrenagem é um dente grosso no topo e fino na base (perfil positivo).

- Uma curvatura convexa é produzida na superfície de saída do cortador quando um dressador reto é utilizado para afiar um cortador de canais helicoidais. O resultado é um dente de engrenagem com perfil côncavo.

3.17.4.2 – Erro de espaçamento entre canais

Erro de espaçamento entre canais em cortadores caracóis é um desvio do ângulo entre canais adjacentes e não adjacentes, medido no plano de rotação. Esses erros ocorrem quando o material dos canais na afiação é removido de maneira desigual.

Cortadores afiados com espaçamento desigual dos canais não produzirão uma forma correta de evolvente. O cortador terá dentes altos e baixos que produzirão perfis desiguais.

Erros de batimento no posicionamento do cortador durante a afiação é a principal causa dos erros de espaçamento.

3.17.4.3 – Erro de passo dos canais

A tolerância do passo do canal é a variação total indicada em uma volta em torno do eixo do caracol. O controle é feito na largura total do cortador em qualquer fileira de dentes, seguindo o passo específico do canal.

Cortadores caracóis afiados com erro de passo dos canais, possuem dentes que não tem o correto perfil de corte e este é diferente em cada lado do dente. Devido ao ângulo de folga, o dente em uma extremidade do cortador será menor que na outra, fazendo o cortador cônico. Engrenagens geradas com cortadores com erro de passo do canal não terão uma forma correta de evolvente. O dente será assimétrico e em cada flanco tem-se diferentes ângulos de pressão.

Terminada a revisão bibliográfica, iniciaremos no próximo capítulo o desenvolvimento dos ensaios realizados com a ferramenta caracol.

Capítulo 4

Materiais, equipamentos e procedimentos experimentais

4.1 - Introdução

Os ensaios foram realizados em uma empresa da região de campinas, que é especializada na produção de transmissões para veículos automotivos. Quando se trabalha com experimentos no chão de fábrica existem grandes dificuldades, pois a preocupação da empresa é produzir. Dentro desse espírito, procurou-se não interferir no andamento da produção durante a realização dos testes.

Dentro de inúmeras dificuldades que encontrou-se para realizar os testes, pode-se citar :

-As máquinas trabalham em turnos de revezamento e como é interessante que o pesquisador esteja ao lado do equipamento, acompanhando a colocação e a substituição da ferramenta (fim de vida) e como isto muitas vezes não era possível, devido à diversidade dos horários em que ocorria, algumas vezes perdeu-se os testes por descuido dos operadores na retirada da ferramenta

-A ferramenta nem sempre é trocada durante o lote, pois trabalha-se com pequenos lotes e a vida da ferramenta muitas vezes era maior que o tamanho do lote, necessitando criar uma ficha de controle para se monitorar a posição de "shifting" quando do retorno da ferramenta à máquina.

Os experimentos foram realizados em máquinas cortadora de engrenagens CNC (Liebherr LC 122 , Liebherr LC 182 e Liebherr LC 282), possibilitando a monitoração do deslocamento tangencial (Shifting) do cortador caracol.

O principal objetivo dos ensaios era monitorar o desgaste, até o desgaste limite de ($VB_N = 0,20$ a $0,30$ mm), acompanhando a existência ou não de alguma relação com o volume de cavaco removido por dente do cortador caracol (V_o) independentemente das características da engrenagem (módulo, diâmetro, número de dentes, etc.). Ensaios preliminares foram realizados com o objetivo de se conhecer o número de peças produzidas com cada ferramenta para um desgaste pré determinado. Embora as máquinas permitam cortar as engrenagens em dois ciclos de corte, desbaste e acabamento, optou-se por cortar em um único ciclo visando um processo mais produtivo.

4.2 - Desenvolvimento dos ensaios e critério de fim de vida

Existem duas possibilidades de se trabalhar com o cortador caracol :

-Travado (sem movimento tangencial) ou utilizando "shifting" (movimento tangencial do cortador em relação à peça, para garantir que o cortador se desgaste de maneira homogênea em toda sua extensão).

Para os ensaios deste trabalho, utilizou-se o cortador com "shifting", que é a condição real no chão de fábrica. As condições de usinagem em cada ensaio sempre foram mantidas, desde a primeira peça, até o momento em que se decidisse pela retirada da ferramenta de serviço, para análise do desgaste no microscópio, como mostra a figura 4.1. Após cada afiação os cortadores passavam novamente pelo processo de cobertura com TiN.

O momento de fim de vida era determinado pelo pesquisador, através de medição do desgaste " VB_N " em microscópio. O desgaste era medido na região de maior influência e em alguns dentes.

Ao fim do lote de produção, a posição de "shifting" era anotada para retornar à máquina quando necessário.

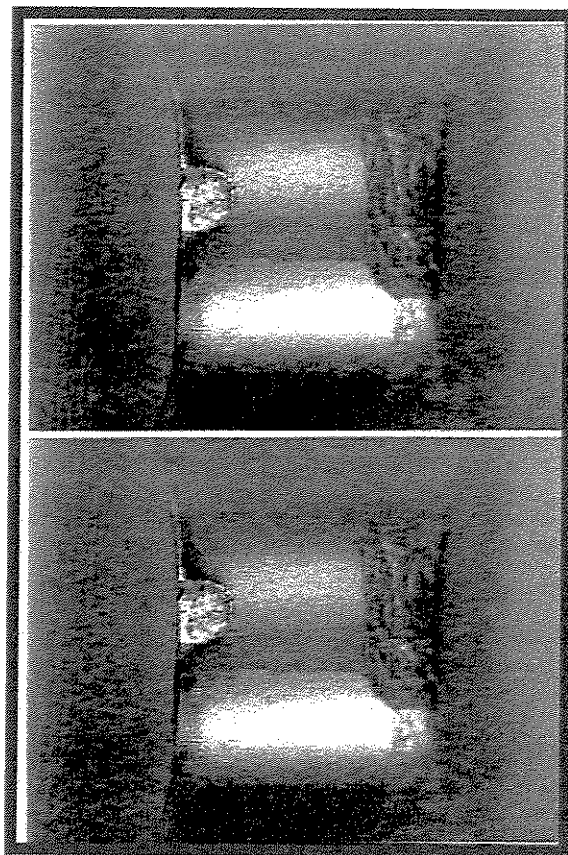


Fig. 4.1 - Desgaste " VB_N "

Quando o desgaste da ferramenta " VB_N " atingia o valor de 0,20 a 0,30 mm, a ferramenta era substituída e o ensaio era considerado como terminado. Esta faixa de desgaste foi escolhida porque ela garante que a qualidade da engrenagem cortada seja compatível com as especificações do projeto. Quando o desgaste da ferramenta ultrapassa esta faixa, corre-se o risco de se fabricar

engrenagem fora das especificações de qualidade. Além disso, valores maiores de desgaste implicam em maior volume de material da ferramenta removido na afiação e, conseqüentemente, menor número de vezes que a ferramenta pode ser reafiada. Algumas vezes ocorreu de se verificar o desgaste da ferramenta e ele estar com um valor muito próximo desta faixa ($VB_N = 0,18$ ou $0,19$ mm). Nestes casos, preferiu-se não esperar o próximo lote de produção e a ferramenta era então substituída. Ocorreu também de somente se verificar o desgaste da ferramenta quando este já estava próximo ao limite máximo da faixa ($VB_N = 0,29$ mm). Aí a ferramenta era também substituída e este resultado era computado nos ensaios. Em nenhum dos ensaios, porém, ocorreu de se ter peças rejeitadas.

Cada ensaio foi repetido seis vezes para todos os cortadores, devido à pequena dispersão das médias, analisadas no item 5.1 - Análise estatística dos resultados, o número de amostras foi suficiente.

4.3 - Máquina, Material e Ferramenta

As máquinas utilizadas eram CNC, como mostra a figura 4.2 (Liebherr LC 122, LC 182 e LC 282) utilizadas em diferentes células de manufatura, para que se pudesse monitorar o "Shifting" e ter certeza dos resultados em diferentes equipamentos e peças.

O óleo lubrificante utilizado nas máquinas CNC era integral de base mineral, tipo EP, contendo cloro e gordura animal, com viscosidade de 180 a 220 SSU a 100 °F

O material das engrenagens do ensaio era o aço SAE 8620 normalizado, com dureza 163 a 187 HB. Os ensaios primeiro e o terceiro foram realizados com engrenagens com Zp 48 e Zp 46, como mostra a figura 4.3

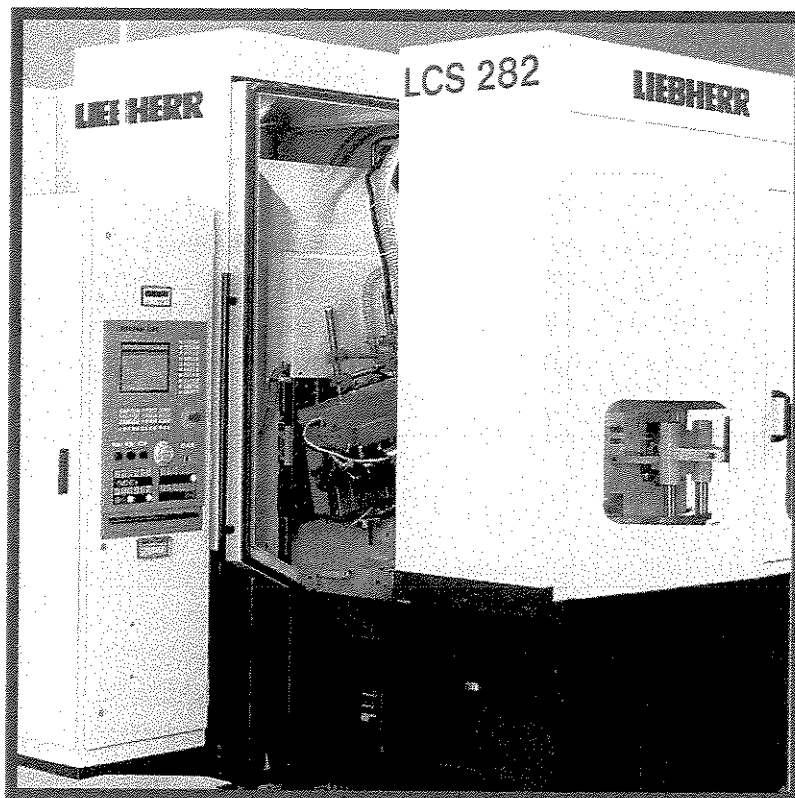


Fig. 4.2 - Máquina CNC

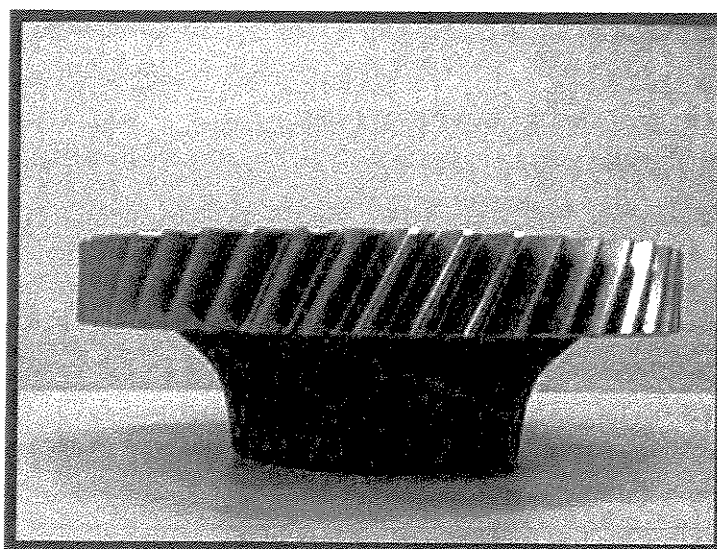


Fig. 4.3 - Engrenagem

O segundo ensaio foi realizado com a engrenagem do contra eixo com Zp 16, como mostra a figura 4.4. O quarto, quinto e sexto ensaios foram realizados com as engrenagens do eixo piloto com Zp 23, Zp 24 e Zp 28, como mostra a figura 4.5.

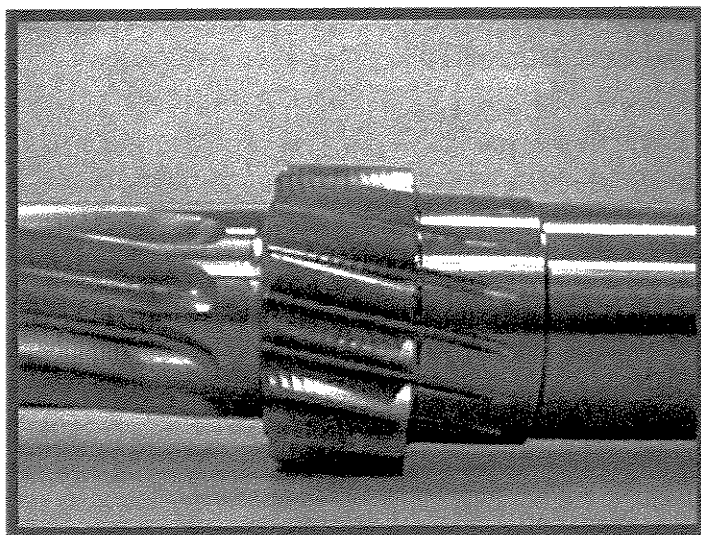


Fig. 4.4 - Engrenagem do contra eixo

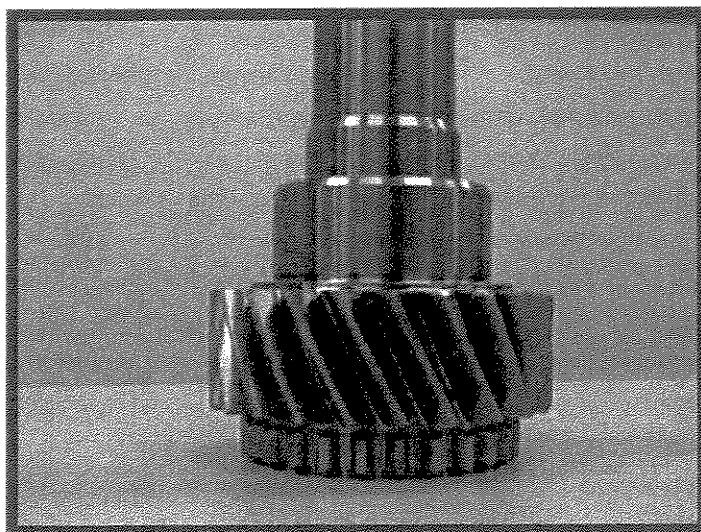


Fig. 4.5 - Engrenagem do eixo piloto

A empresa trabalha com sistema de célula de manufatura com lotes considerados pequenos, sendo que cada tipo de ferramenta basicamente é utilizada em um único tipo de peça. Os ensaios foram realizados com ferramentas de aço rápido sinterizado CPM REX 76 com cobertura de nitreto de titânio. Após cada afiação os cortadores eram recobertos, conforme mostra a figura 4.6.

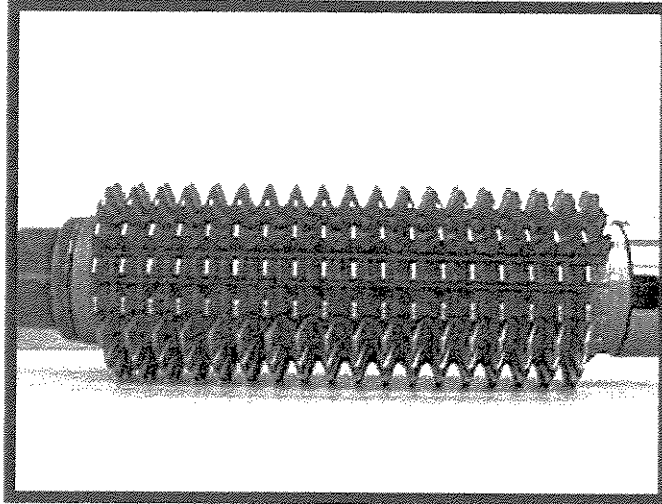


Fig. 4.6 - Cortador caracol

4.4 - Desenvolvimento dos ensaios

Foram monitorados vários ensaios com as condições de usinagem, descritas nas tabelas 4.1 a 4.12.

Tabela 4.1 - Primeiro ensaio

Caracol número		Peça Número	
18470.0435-3 c		3316196	
Módulo normal	3,650	Módulo normal	3,650
Ângulo de pressão	20	Ângulo de pressão	20
Número de lâminas	15	Ângulo de hélice	258 Direita
Número de entradas	01	Número de dentes	48

Tabela 4.2 - Condições de usinagem do primeiro ensaio

Vc	[m / min]	90	fa	[mm / rot]	3,0
Lshf	[mm]	83	h1	[mm]	0,15
Ntsh		108	Ciclo		Climb
Sh	[mm]	11,5	Número de ciclos		01
Kv	[mm]	0,20	Número de afiações		06

Tabela 4.3 - Segundo ensaio

Caracol número	18470.0819-1 b	Peça Número	3315740
Módulo normal	4,500	Módulo normal	4,500
Ângulo de pressão	20	Ângulo de pressão	20
Número de lâminas	18	Ângulo de hélice	128 Direita
Número de entradas	01	Número de dentes	16

Tabela 4.4 - Condições de usinagem do segundo ensaio

Vc	[m / min]	90	fa	[mm / rot]	3,0
Lshf	[mm]	32	h1	[mm]	0,30
Ntsh		33	Ciclo		Climb
Sh	[mm]	7,4	Número de ciclos		01
Kv	[mm]	0,10	Número de afiações		06

Tabela 4.5 - Terceiro ensaio

Caracol número		18470 0887-8 a		Peça Número		3315743	
Módulo normal		3,650		Módulo normal		3,650	
Ângulo de pressão		20		Ângulo de pressão		20	
Número de lâminas		17		Ângulo de hélice		258 Direita	
Número de entradas		01		Número de dentes		46	

Tabela 4.6 - Condições de usinagem do terceiro ensaio

Vc	[m / min]	90	fa	[mm / rot]	3,0
Lshf	[mm]	92	h1	[mm]	0,15
Ntsh		120	Ciclo		Climb
Sh	[mm]	11,5	Número de ciclos		01
Kv	[mm]	0,10	Número de afiações		06

Tabela 4.7 - Quarto ensaio

Caracol número		18470.0310-3 j		Peça Número		4301750	
Módulo normal		3,650		Módulo normal		3,650	
Ângulo de pressão		20		Ângulo de pressão		20	
Número de lâminas		18		Ângulo de hélice		258 Esquerda	
Número de entradas		02		Número de dentes		23	

Tabela 4.8 - Condições de usinagem do quarto ensaio

Vc	[m / min]	90	fa	[mm / rot]	3.0
Lshf	[mm]	48	h1	[mm]	0,33
Ntsh		75	Ciclo		Climb
Sh	[mm]	11,5	Número de ciclos		01
Kv	[mm]	0,10	Número de afiações		06

Tabela 4.9 - Quinto ensaio

Caracol número	18470 0886-6 c	Peça Número	4301485
Módulo normal	3,650	Módulo normal	3,650
Ângulo de pressão	20	Ângulo de pressão	20
Número de lâminas	18	Ângulo de hélice	258 Esquerda
Número de entradas	02	Número de dentes	24

Tabela 4.10 - Condições de usinagem do quinto ensaio

Vc	[m / min]	90	fa	[mm / rot]	3.0
Lshf	[mm]	48	h1	[mm]	0,33
Ntsh		74	Ciclo		Climb
Sh	[mm]	11,5	Número de ciclos		01
Kv	[mm]	0,10	Número de afiações		06

Tabela 4.11 - Sexto ensaio

Caracol número	18470.0997-5 a	Peça Número	4304540
Módulo normal	3,8484	Módulo normal	3,8484
Ângulo de pressão	23	Ângulo de pressão	23
Número de lâminas	18	Ângulo de hélice	238 Esquerda
Número de entradas	02	Número de dentes	28

Tabela 4.12 - Condições de usinagem do sexto ensaio

Vc	[m / min]	90	fa	[mm / rot]	3,0
Lshf	[mm]	48	h1	[mm]	0,32
Ntsh		71	Ciclo		Climb
Sh	[mm]	10,9	Número de ciclos		01
Kv	[mm]	0,10	Número de afiações		06

Há que se notar que as características das engrenagens usinadas diferem uma das outras, mas a velocidade de corte o avanço e o material da ferramenta e da peça foram mantidos constantes em todos os ensaios, até o sexto ensaio. Isto foi feito para que se pudesse verificar a influência das características da engrenagem cortada na vida do cortador, medida em volume de cavaco removido. O objetivo final foi verificar se a vida da ferramenta permanecia constante (pelo menos em termos estatísticos) com a variação das características da engrenagem e assim se poderia estabelecer um volume de cavaco removido determinado previamente que fosse utilizado para definição da vida da ferramenta de diversas engrenagens, desde que as condições de usinagem, o material da peça e o material da ferramenta fossem mantidos constantes. Para que se possa reconhecer facilmente os dados referentes a cada ensaio nas figuras do capítulo 5, vai se distinguir as engrenagens de cada ensaio pelo seu módulo (Mn), número de dentes da peça (Zp) e número de entradas do cortador (Zo).

A análise estatística dos resultados será demonstrada no item 5.1, e depois de comprovada a validade estatística da estratégia de substituição da ferramenta baseada no volume de cavaco removido nas condições de usinagem utilizadas até o sexto ensaio, decidiu-se também testá-la para os cortadores número 18470.0435-3 e 18470.0887-8, com uma entrada em outra velocidade de corte (120 m / min, ver figura 5.6 - Desgaste do cortador no momento de sua substituição versus vida da ferramenta em volume de cavaco removido).

Capítulo 5

Resultados e discussões

A figura 5.1 mostra um dente do cortador caracol com o desgaste " VB_N " = 0,18 mm e a figura 5.2 mostra o desgaste " VB_N " = 0,29 mm, que foram os desgastes extremos utilizados para a determinação da vida da ferramenta. Devido às características do processo produtivo, a faixa de desgastes que determinava o fim da vida da ferramenta e sua substituição era ampla (na maioria das vezes VB_N de 0,20 a 0,30 mm).

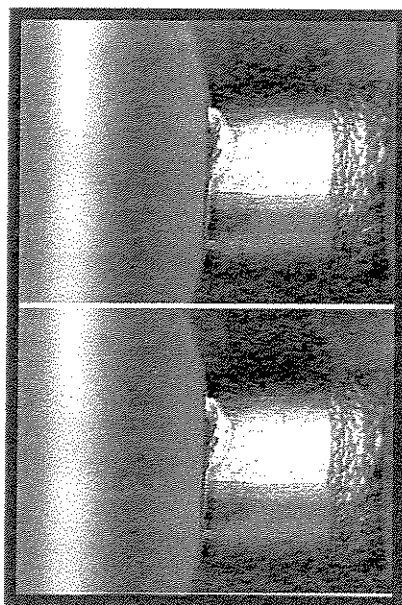


Fig. 5.1 – Desgaste " VB_N = 0,18 mm"

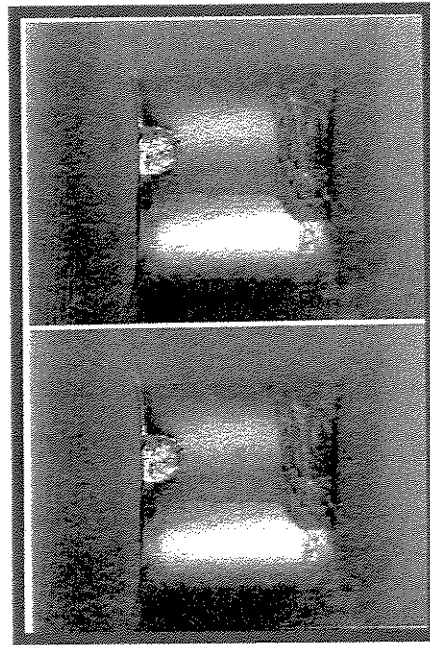


Fig. 5.2 – Desgaste " $VB_N = 0,29$ mm"

As tabelas 5.1 a 5.6 mostram os resultados obtidos do primeiro ao sexto ensaio, que foram realizados em condições de usinagem idênticas ($V_c = 90$ m/min).

Tabela 5.1 – Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no primeiro ensaio

<i>Número do cortador</i>	<i>Desgaste VB_N (mm)</i>	<i>No. peças produzidas</i>	<i>Fator V_o (cm^3)</i>
18470.0435-3 Mn 3,65 Zp 48 Zo 1	0,19	558	613,91
	0,28	580	638,12
	0,22	571	628,22
	0,25	576	633,72
	0,23	570	627,12
	0,20	566	622,72

Tabela 5.2 – Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no segundo ensaio

<i>Número do cortador</i>	<i>Desgaste VB_{λ} (mm)</i>	<i>No. peças produzidas</i>	<i>Fator V_o (cm^3)</i>
18470.0819-1	0,20	378	609,48
Mn 4,50 Zp 16 Zo 1	0,19	391	630,44
	0,28	388	625,60
	0,30	403	649,79
	0,23	398	641,73
	0,25	385	620,77

Tabela 5.3 – Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no terceiro ensaio

<i>Número do cortador</i>	<i>Desgaste VB_{λ} (mm)</i>	<i>No. peças produzidas</i>	<i>Fator V_o (cm^3)</i>
18470.0887-8	0,21	850	610,37
Mn 3,65 Zp 46 Zo 1	0,25	870	624,74
	0,23	866	621,86
	0,29	900	646,28
	0,27	880	631,92
	0,25	875	628,33

Tabela 5.4 – Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no quarto ensaio

<i>Número do cortador</i>	<i>Desgaste VB_{λ} (mm)</i>	<i>No. peças produzidas</i>	<i>Fator V_o (cm^3)</i>
18470.0310-3	0,23	420	337,85
Mn 3,65 Zp 23 Zo 2	0,18	414	333,02
	0,21	429	345,09
	0,25	425	341,87
	0,25	410	329,80
	0,23	408	328,20

Tabela 5.5 – Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no quinto ensaio

<i>Número do cortador</i>	<i>Desgaste VB_{λ} (mm)</i>	<i>No. peças produzidas</i>	<i>Fator V_o (cm^3)</i>
18470.0886-6	0,22	464	338,11
Mn 3,65 Zp 24 Zo 2	0,22	475	346,13
	0,22	456	332,28
	0,21	460	335,20
	0,24	468	341,03
	0,27	451	328,64

Tabela 5.6 – Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no sexto ensaio

<i>Número do cortador</i>	<i>Desgaste VB_{λ} (mm)</i>	<i>No. peças produzidas</i>	<i>Fator V_o (cm^3)</i>
18470.0997-5	0,20	332	315,82
Mn 3,848 Zp 28 Zo 2	0,23	354	336,75
	0,25	363	345,31
	0,27	358	340,55
	0,21	348	331,04
	0,25	360	342,46

Tabela 5.7 – Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no ensaio com $V_c = 120$ m / min

<i>Número do cortador</i>	<i>Desgaste VB_{λ} (mm)</i>	<i>No. peças produzidas</i>	<i>Fator V_o (cm^3)</i>
18470.0435-3	0,23	484	532,50
Mn 3,65 Zp 48 Zo 1	0,23	480	528,10
	0,21	475	522,60
	0,25	489	538,00
	0,22	478	525,90
	0,25	482	530,30

Tabela 5.8 – Desgaste no fim de vida, número de peças produzidas e volume de cavaco removido no ensaio com $V_c = 120 \text{ m / min}$

<i>Número do cortador</i>	<i>Desgaste VB_N (mm)</i>	<i>No. peças produzidas</i>	<i>Fator V_o (cm^3)</i>
18470.0887-8	0,22	728	522,77
Mn 3,65 Zp 46 Zo 1	0,25	732	525,64
	0,25	725	520,61
	0,23	730	524,20
	0,25	728	522,77
	0,26	736	528,51

A figura 5.3, mostra o desgaste da ferramenta " VB_N " em função do volume de cavaco por dente do cortador " V_o ", no momento de sua substituição. Alguns pontos merecem ser destacados nesta figura :

- todos os valores de volume de cavaco removido por dente do cortador quando da sua substituição se mostraram bem próximos, independentemente do tipo de engrenagem usinada. Pode-se dizer que o valor de desgaste " VB_N " utilizado como critério de substituição da ferramenta, influenciou o volume de cavaco removido, pois, principalmente para o corte de engrenagens com cortador de uma entrada, em geral tem-se valores de " V_o " maiores para " VB_N " maiores. Porém, mesmo considerando-se este fator, a variação total de " V_o " no fim de vida da ferramenta foi pequena, menos de 10% para todos os cortadores .
- O fator predominante que influenciou o volume de cavaco removido " V_o " no fim da vida da ferramenta foi o número de entradas do cortador. Pode-se ver na figura 5.3, que enquanto o " V_o " médio (o cálculo das médias está descrito nas tabelas 5.9 e 5.11) para cortadores com uma entrada foi em torno de 628 cm^3 , o " V_o " médio para cortadores com duas entradas foi de 336 cm^3 aproximadamente 54% do anterior. A relação de rotação no engrenamento é função do número de entradas do cortador caracol, dividido pelo número de dentes da peça conforme equação 3.2, Rodrigues, Agostinho e Lirani (1978). No caso de cortadores com duas entradas a rotação da peça, dobra comparada com cortadores de uma entrada, para a mesma velocidade de corte. Segundo Brink (1997) um dos fatores predominantes na

usinagem de engrenagens com cortador caracol é o desgaste por abrasão, como a rotação dobra, dobra também a velocidade de avanço, aumentando o atrito da ferramenta, o que causa o aumento na taxa de desgaste. Sendo assim, este fenômeno pode explicar a diferença de vida dos cortadores, onde o único parâmetro alterado foi o número de entradas.

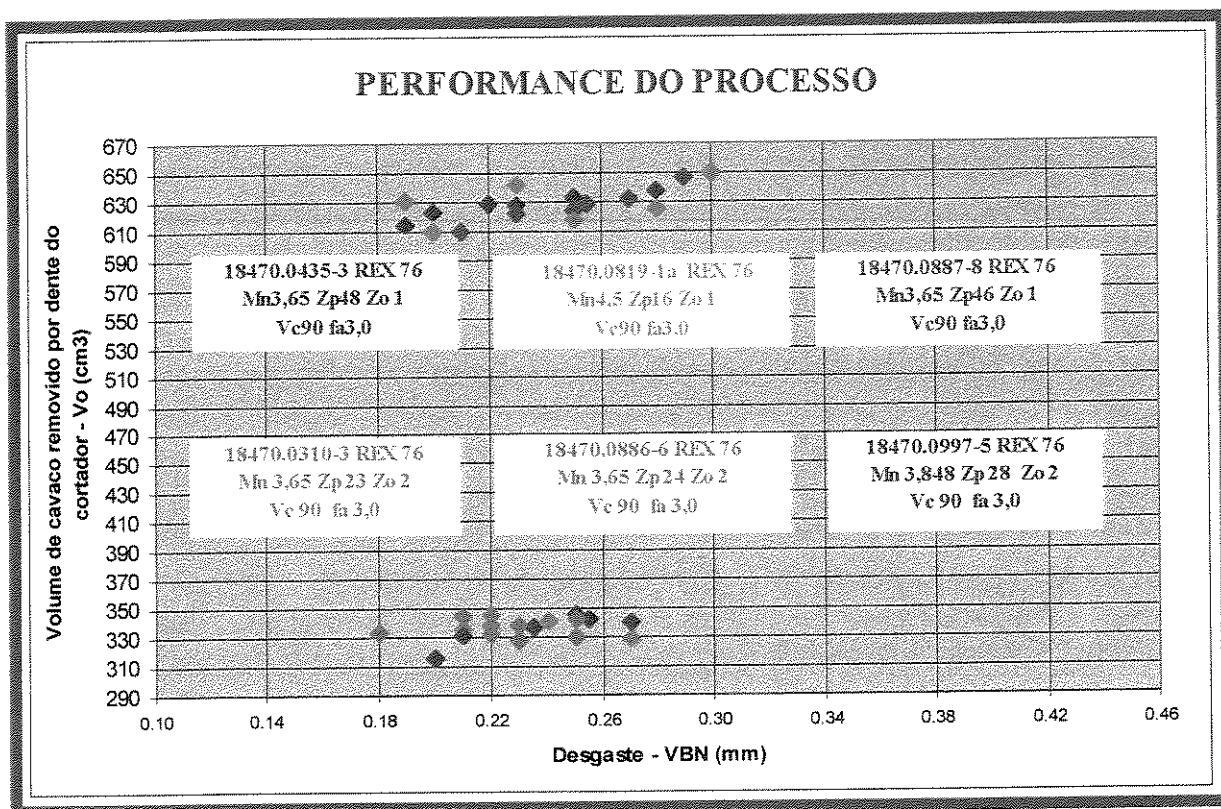


Fig. 5.3 – Desgaste do cortador no momento de sua substituição versus Vida da ferramenta em volume de cavaco removido

As figuras 5.4 e 5.5 mostram as dispersões do valor de "Vo" para cada par cortador-engrenagem. Estes valores demonstram que os valores de "Vo" estão aleatoriamente dispersos entre os diversos tipos de engrenagens, isto é, não houve tendência de, por exemplo, um tipo de engrenagem possuir valores distribuídos em uma faixa superior de "Vo" e outro em uma faixa inferior.

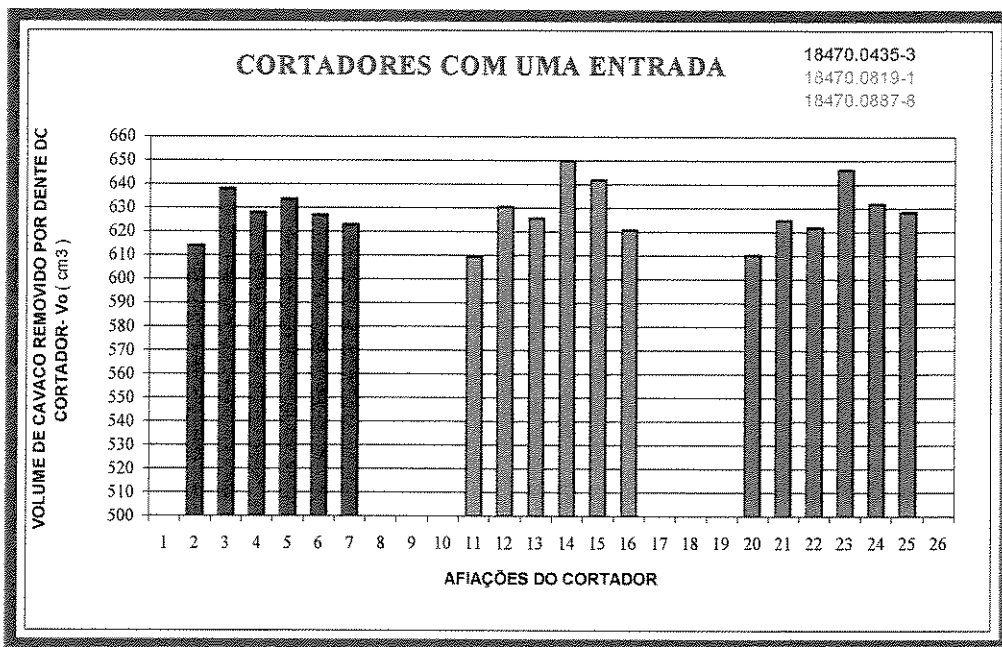


Fig. 5.4 – Dispersão da Vida da Ferramenta em Volume de Cavaco Removido por Dente do Cortador – Cortadores com uma entrada

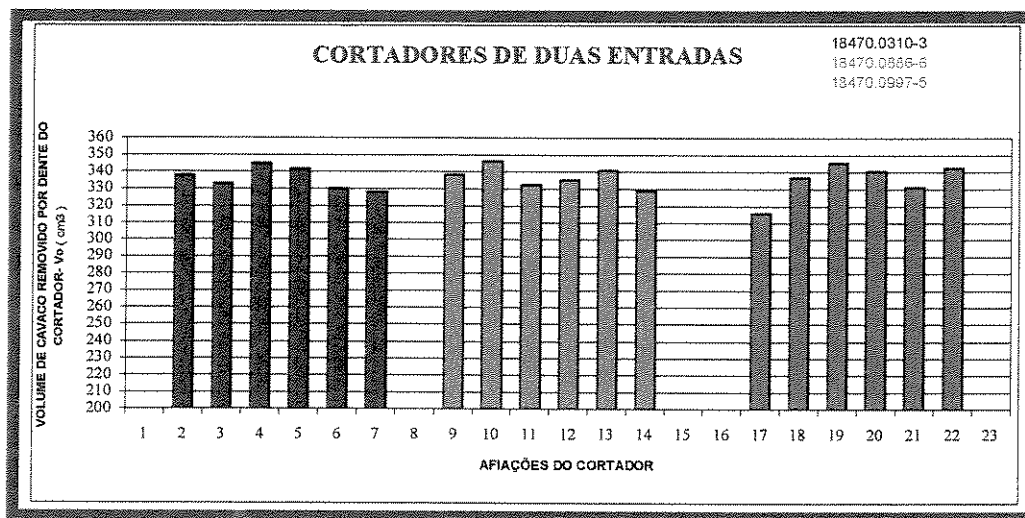


Fig. 5.5 – Dispersão da Vida da Ferramenta em Volume de Cavaco Removido por Dente do Cortador – Cortadores de duas entradas

A figura 5.6 mostra os valores de desgaste no momento da substituição da ferramenta versus a vida da ferramenta (em volume de cavaco removido "Vo") para dois pares cortador-engrenagem agora com velocidade de corte ($V_c = 120$ m/min). Os valores de "Vo" nesta figura permanecem bem próximos, independentemente do tipo de engrenagem cortada (o maior valor de "Vo" é 538 cm^3 e o menor 520 cm^3), repetindo o que já havia ocorrido com a velocidade de corte anteriormente utilizada. Comparando esta figura com a figura 5.3, vê-se a influência da velocidade de corte na vida da ferramenta. Enquanto com $V_c = 90$ m/min a vida média (o cálculo das médias está descrito nas tabelas 5.9 e 5.13) da ferramenta foi 628 cm^3 , quando a velocidade passou para 120 m/min (33 % de aumento) a vida média caiu para 526 cm^3 (16% de redução). O valor obtido é pequeno comparado a outros processos, como torneamento, fresamento e furação onde a influência da velocidade de corte na vida da ferramenta é muito maior (Diniz, Marcondes e Coppini, 1999).

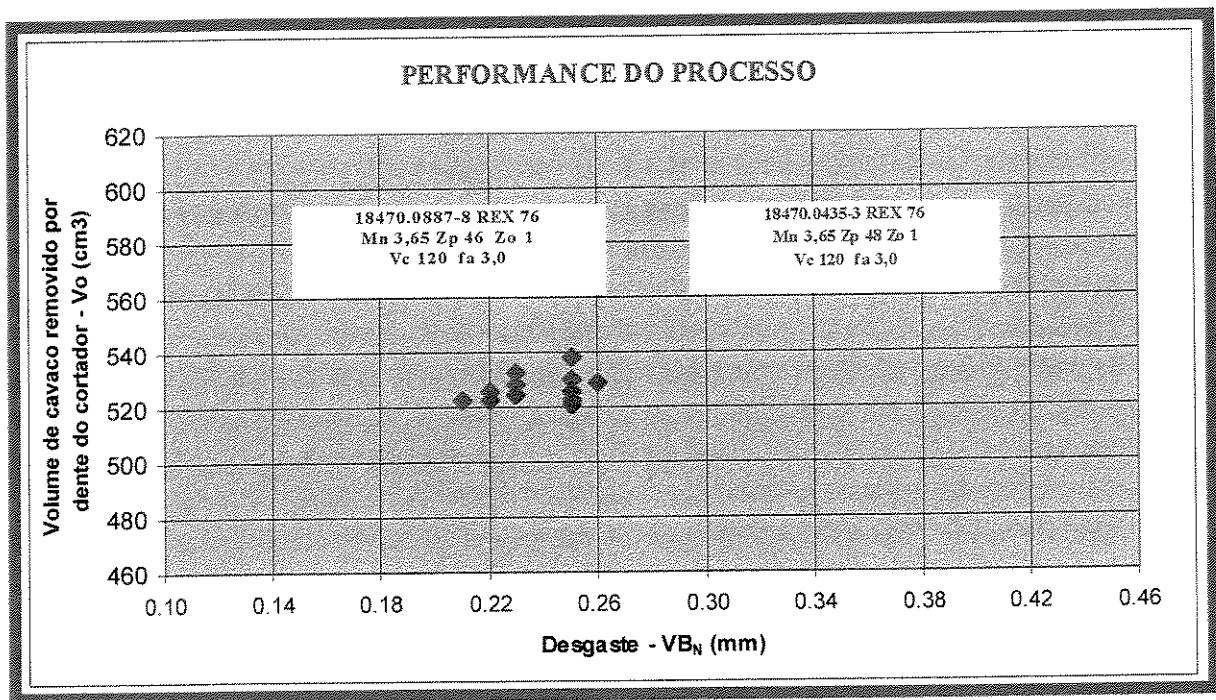


Fig. 5.6 – Desgaste do cortador no momento de sua substituição versus Vida da Ferramenta em volume de Cavaco Removido

A figura 5.7 mostra a dispersão dos valores de “Vo” para os ensaios com velocidade de corte igual a 120 m/min. Como já visto nas figuras 5.4 e 5.5, os valores de "Vo" estão aleatoriamente dispersos entre os dois tipos de engrenagens.

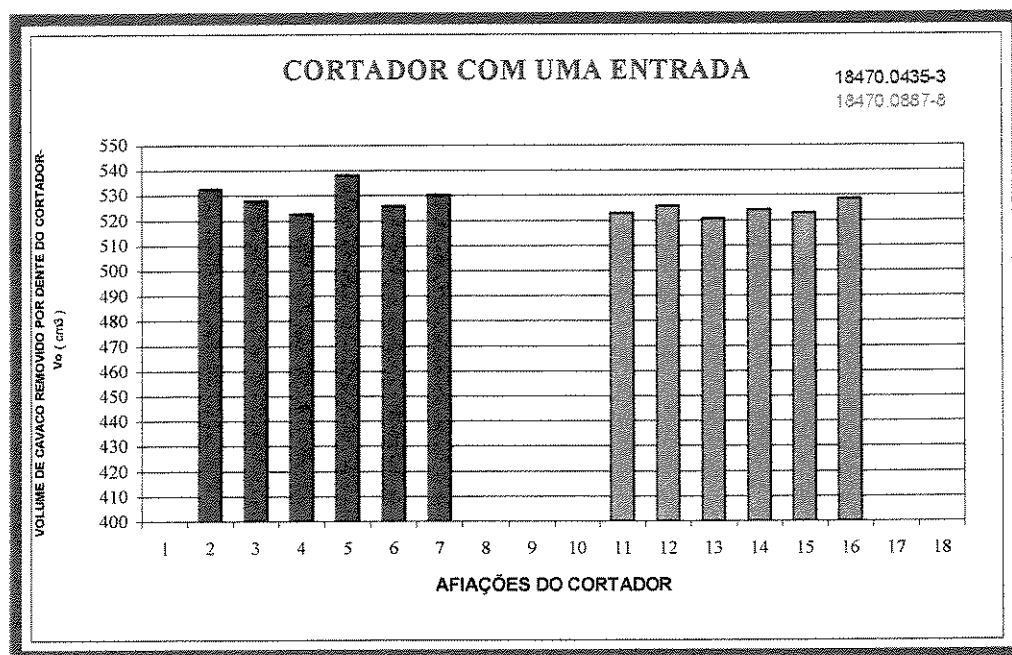


Fig. 5.7 – Dispersão da Vida da Ferramenta em Volume de Cavaco Removido por Dente do Cortador – Cortadores com uma entrada

Estes resultados apontam para o fato de que se pode ter um valor específico de volume de cavaco removido por dente do cortador como parâmetro para definição do momento de substituição da ferramenta (fim da vida), independentemente do tipo da engrenagem, desde que se mantenha constante as características geométricas do cortador, o material da peça e do cortador e as condições de usinagem. Este fato vem demonstrar o potencial desta técnica na previsão da vida da ferramenta, pois para isto necessita-se fazer testes de vida em apenas um tipo de engrenagem e depois extrapolar-se estes resultados para a usinagem de outras engrenagens dentro das características testadas (M_n , Z_o). Porém, para que se tenha certeza de que isto pode ser feito, deve-se aplicar um teste estatístico para verificar se a média de "Vo" para o corte de cada tipo de par engrenagem - cortador é estatisticamente igual à média dos outros tipos. Isto será mostrado a seguir.

5.1 – Análise estatística dos resultados

A distribuição normal é uma distribuição de frequência contínua, simétrica, e em forma de sino para dados do tipo variáveis o qual é objeto do nosso estudo. Para uma distribuição normal padrão é possível se conhecer a porcentagem (P_z) do resultado do processo, além de um particular valor de interesse, tal como um limite de especificação que está a (Z) unidades de desvio padrão da média do processo, conforme mostra a figura 5.8.

Onde Z_{inferior} e Z_{superior} é calculado por:

$$Z_{\text{superior}} = (LSE - \bar{X}) \div \sigma \quad (5.1)$$

$$Z_{\text{inferior}} = (\bar{X} - LIE) \div \sigma \quad (5.2)$$

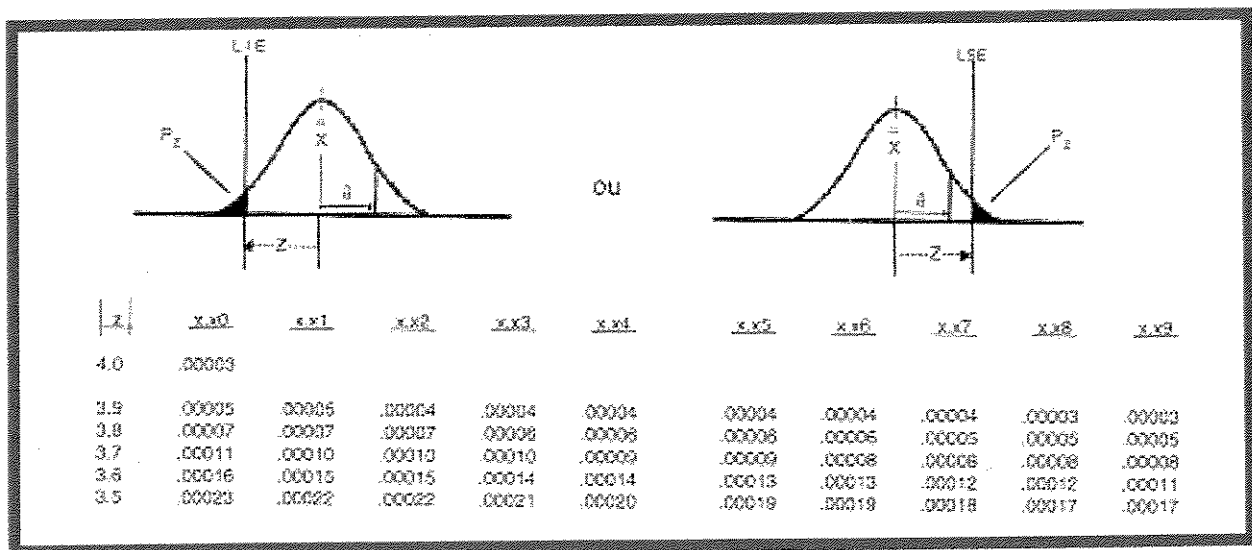


Fig. 5.8 - Distribuição normal padrão

O primeiro passo para se verificar a igualdade das médias é se verificar a normalidade da distribuição. Para isto aplicou-se o método de Kolmogorov-Smirnov (para maiores detalhes sobre este teste consultar Duncan (1974) e Montgomery (1991)). Segundo este método, para que uma determinada distribuição seja aceita como normal, seu nível de significância deve ser maior que 5 %.

Através do software Minitab® V12.22 1998, foram feitas as análises estatísticas do volume de cavaco removido por dente do cortador, para cada ferramenta. As tabelas 5.9 e 5.10 mostram os resultados destas análises estatísticas para os ensaios feitos com velocidade de corte igual a 90 m / min e cortadores com uma entrada.

Tabela 5.9 – Média e desvio padrão da vida da ferramenta em volume de cavaco removido Cortadores com uma entrada e velocidade de corte igual a 90 m/min

Número do cortador	Média (Vo - cm ³)	Desvio padrão (Vo)
18470.0435-3 (Mn 3,65 Zp 48 Zo 1)	627,30	8,47
18470.0819-1 (Mn 4,50 Zp 16 Zo 1)	629,66	14,51
18470.0887-8 (Mn 3,65 Zp 46 Zo 1)	627,25	11,87

Média das médias Vo	628,07	Desvio padrão	11,22
---------------------	--------	---------------	-------

Tabela 5.10 – Unidades de desvio padrão (Z) da média do processo e porcentagem fora dos limites de controle – Cortadores com uma entrada e velocidade de corte igual a 90 m/min

Número do cortador	Z superior	Z inferior	% acima LSE	% abaixo LIE
18470.0435-3	7,39	6,75	0,000	0,000
18470.0819-1	4,15	4,10	0,002	0,002
18470.0887-8	5,28	4,82	0,000	0,000

Os testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov mostraram um nível de significância acima de 15% para todos os cortadores, mostrando que as curvas tem distribuição normal para os cortadores de uma entrada. Através da análise de variância pode se comprovar que as médias do volume de cavaco removido por dente do cortador são iguais para todas as ferramentas.

Através dos resultados pode-se afirmar estatisticamente que 99,7% das amostras "Vo" estão dentro da especificação, utilizando para estratégia de substituição da ferramenta (fim de vida) no mínimo 3 Sigmas ($\bar{X} \pm 3\sigma$), índice comumente utilizado nas decisões de capacidade de processos industriais. Como o valor do desvio padrão é muito pequeno comparado com a média, qualquer valor de "Vo" dentro do intervalo ($628,07 \pm 3 * 11,22$), pode ser utilizado pelo operador para substituição da ferramenta, sem receio de que se tenha dano maior ao cortador ou perda da qualidade da peça e nem desperdício da vida do cortador.

As tabelas 5.11 e 5.12 mostram os resultados das análises estatísticas realizadas para os ensaios com $V_c = 90$ m/min e cortadores de duas entradas

Tabela 5.11 – Média e desvio padrão da vida da ferramenta em volume de cavaco removido - Cortadores com duas entradas e velocidade de corte igual a 90 m/min

Número do cortador	Média (Vo - cm ³)	Desvio padrão (Vo)
18470.0310-3 (Mn 3,65 Zp 23 Zo 2)	335,97	6,76
18470.0886-6 (Mn 3,65 Zp 24 Zo 2)	336,89	6,26
18470.0997-5 (Mn 3,848 Zp 28 Zo 2)	335,32	10,75

Média das médias Vo	336,06	Desvio padrão total	7,71
---------------------	--------	---------------------	------

Tabela 5.12 – Unidades de desvio padrão (Z) da média do processo e porcentagem fora dos limites de controle – Cortadores com duas entradas e velocidade de corte igual a 90 m/min

Número do cortador	Z superior	Z inferior	% acima LSE	% abaixo LIE
18470.0310-3	5,03	5,31	0,000	0,000
18470.0886-6	5,28	5,89	0,000	0,000
18470.0997-5	3,22	3,28	0,064	0,052

Os testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov mostraram um nível de significância acima de 15% para todos os cortadores, mostrando a curva ser normal também para os cortadores de duas entradas. Através da análise de variância pode se comprovar que as médias do volume de cavaco removido por dente do cortador, são iguais para todas as ferramentas.

Através dos resultados pode-se afirmar estatisticamente que 99,7% das amostras "Vo" estão dentro da especificação, utilizando para estratégia de substituição da ferramenta (fim de vida) no mínimo 3 Sigmas ($\bar{X} \pm 3\sigma$). O mesmo comentário feito anteriormente também cabe aqui, isto é, qualquer valor dentro do intervalo ($336,06 \pm 3 * 7,71$), pode ser utilizado pelo operador para substituição da ferramenta.

Tabela 5.13 – Média e desvio padrão da vida da ferramenta em volume de cavaco removido - Cortadores com uma entrada e velocidade de corte igual a 120 m/min

Número do cortador	Média (Vo - cm ³)	Desvio padrão (Vo)
18470.0435-3 (Mn 3,65 Zp 48 Zo 1)	529,56	5,37
18470.0887-8 (Mn 3,65 Zp 46 Zo 1)	524,08	2,74

Média das médias Vo	526,82	Desvio padrão total	4,97
---------------------	--------	---------------------	------

Tabela 5.14 – Unidades de desvio padrão (Z) da média do processo e porcentagem fora dos limites de controle – Cortadores com uma entrada e velocidade de corte igual a 120 m/min

Número do cortador	Z superior	Z inferior	% acima LSE	% abaixo LIE
18470.0435-3	9,38	9,22	0,00	0,00
18470.0887-8	20,4	16,08	0,00	0,00

Os testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov mostraram um nível de significância acima de 15% para todos os cortadores, mostrando a curva ser normal para os cortadores de uma entrada, com velocidade de corte igual a 120 m/min. Através da análise de variância pode se comprovar que as médias do volume de cavaco removido por dente do cortador, são iguais para as duas ferramentas.

Através dos resultados pode-se afirmar estatisticamente que 99,7 % das amostras "Vo" estão dentro da especificação, utilizando para estratégia de substituição da ferramenta (fim de vida) no mínimo 3 Sigmas ($\bar{X} \pm 3 \sigma$). O mesmo comentário feito anteriormente para a velocidade de corte 90 m/min também cabe aqui, isto é, qualquer valor dentro do intervalo ($526,82 \pm 3 * 4,97$), pode ser utilizado pelo operador para substituição da ferramenta utilizada com velocidade de 120 m/min.

Após análise dos resultados obtidos no presente trabalho, iniciaremos no próximo capítulo as conclusões.

Capítulo 6

Conclusões

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir para o processo de corte de dentes de engrenagens com cortador caracol, em condições similares às aqui utilizadas, que :

1- O parâmetro "Vo" volume de cavaco removido por dente do cortador após já ter ocorrido um dado valor de desgaste de flanco (no caso VB_N de 0,20 a 0,25 mm) é independente da geometria da peça e do cortador, excetuando-se o número de entradas do cortador.

2- A dispersão dos valores de "Vo" para diversas repetições do corte, utilizando o mesmo par cortador-engrenagem ou mesmo outros pares, é muito pequena, desde que sejam mantidas as condições de usinagem e o material da peça e do cortador.

3- O parâmetro "Vo" pode ser utilizado para estimativa do fim de vida da ferramenta caracol. Para sua utilização deve-se estabelecer o valor de "Vo" para um determinado par cortador-engrenagem e depois utilizá-lo em outros pares. Nestes outros pares, pode se ter diferentes características como módulo, número de dentes, ângulo de hélice, ângulo de pressão (dentro de uma determinada faixa), mas precisam ser mantidos o número de entradas do cortador, as condições de usinagem, o material do cortador e da engrenagem.

4- A velocidade de avanço influencia fortemente no valor de "Vo", mais do que a velocidade de corte, dentro dos parâmetros ensaiados neste trabalho.

5- O aumento da velocidade de corte diminui a vida do cortador, porém numa proporção menor do que é usual ocorrer em processos como furação, torneamento e fresamento.

Capítulo 7

Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para a continuação desta pesquisa, tem-se :

Repetição dos ensaios aqui realizados para módulos menores das engrenagens, outras velocidades , novas coberturas e outros materiais para ferramenta, como por exemplo o metal duro.

Utilização de técnicas de monitoramento do processo, como emissão acústica e vibração, com o fim de se estabelecer automaticamente o fim da vida do cortador caracol.

Treinamento de operadores de máquinas CNC cortadora de engrenagens com cortador caracol, no sentido de capacitá-los a decidir o momento da troca da ferramenta, baseado no desgaste " VB_N ".

Referências Bibliográficas

Balzers Coatings. Coatings PVD. Switzerland : Balzers Aktiengesellschaft, 1998, 125 p.

Brink, R. Manufacturing aspects for coated tools. Switzerland: Balzers Aktiengesellschaft, 1997, 78 p.

Brink, R. Applications for coated cutting tools. Switzerland : Balzers Aktiengesellschaft 1995, 63 p.

Buckingham, E. Manual of Gear Design - Spur and helical gears. New York : The Industrial Press, 1985, 165 p.

Bouzakis, K.D., Antoniadis, A. Optimizing of tangential tool shift in gear hobbing. CIRP Annals Manufacturing Technology, v 44, 1995, p. 75-78.

Diniz, A.E., Marcondes, Coppini, Tecnologia da usinagem dos materiais. São Paulo : MMeditora, 1999, 242 p.

Dixon, R.B. Gears Manufacturing – SME, Detroit, 1990.

Dudley, D.W. Handbook of practical gear design. New York, MCGRAW-HILL, 1984.

Duncan, A. J. Quality control and statistics. Richard D. Irwin Inc., Fourth Edition, 1974.

Fette Tools. Gear cutting and generating tools. Germany : Fette GmbH, 1997, 181 p.

Fhusa Tools. Hobs. Spain : Fhusa, 1990, 95 p.

Gimpert, D. Gear hobbing process. Gear Technology, Jan-Feb 1994, p. 38-44.

Gleason Machine. Hobbing machine. Rochester : Gleason Works, 1998, 128 p.

Hoffmeister, B. Cutting conditions in hobbing. Aachen : Aachen Polytechnic, 1979, Thesis.

Hoffmeister, B. About wear on hobs. Aachen : Aachen Polytechnic, 1970, Thesis.

Hoffmeister, B. General wear studies in hobbing. Aachen : Aachen Polytechnic, 1966.

International Standard. Parallel involute gears – ISO system of accuracy, USA. ISO 1328, 1997.

International Standard. Concepts and parameters associated with cylindrical gears and cylindrical gear pairs with involute teeth, Germany . DIN 3960, 1995.

International Standard . Tolerances for cylindrical gear teeth, Germany . DIN 3962, 1995.

International Standard. Tolerances for cylindrical gear teeth, Germany . DIN 3963, 1995.

Kotlyar, Y. Computerized hob inspection – part I. Gear Technology, May-Jun 1994, p.32-38.

Kotlyar, Y. Computerized hob inspection – part II. Gear Technology, Jul-Aug 1994, p.26-34.

Liebherr Machine. Hobbing machine. Kempten : Liebherr GmbH, 1996, 237 p.

Liston, K. Hob basics – Part I . Gear Technology, Set-Oct, 1993, p. 46-52.

Liston, K. Hob basics – Part II . Gear Technology, Nov-Dec, 1993, p. 18-23.

Moderow, R. Gear inspection and measurement . Gear Technology, July-Aug, 1992, p. 44-49.

Montgomery, D. C. Introduction to statistical quality control. ASQC Quality Press, Second Edition, 1991.

Pfauter Machine. Hobbing machine. Germany : Pfauter GmbH, 1996, 162 p.

Rodrigues, A.C.S., Agostinho, O.L., Lirani, J. Curso de especialização em engenharia de fabricação e Máquinas Ferramentas. São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1978.

Samputensili S.p.A.. Creatori integrali. Bologna : Samputensili S.p.A., 1995, 95 p.

Schmidthammer, A. Cutting conditions in the hobbing process. FETTE Manuals, 1997.

Schmidthammer, A. Investigation of the cutting force in hobbing. Aachen : Aachen Polytechnic, 1964.

Stipkovic, M. F. Engrenagens. São Paulo : Printon gráfica e editora Ltda, 1993, 163 p.

Sulzer, G. High speed – Dry hobbing of gears "HSC ". Manufacturing Engineering , v 119 n 5 Nov , 1997, p. 46-52.

Sulzer, G. Performance enhancement in cylindrical gear manufacture through a precise understanding of metal removal kinematics. Aachen : Aachen Polytechnic, 1973, Thesis.

Venohr, G. Hob life – Tool lives by linear meters per shift tooth. Aachen : Aachen Polytechnic, 1985, Thesis.

Ziegler, H. Study of main cutting force when hobbing spur gears. Aachen : Aachen Polytechnic, 1967, Thesis.

Ziegler, H. Cutting forces when hobbing straight and helical tooth spur gear. Aachen : Aachen Polytechnic, 1966.

Referências Bibliográficas auxiliares

- Bar, G., Pries, M. Analytical treatment of hobbing. Dresden, Ger . Mechanism & Machine Theory, v 28 n 1, Jan, 1993, p. 65-71.
- Brasimet coberturas. Revestimentos PVD. São Paulo : Brasimet Ltda, 1985, 52 p.
- Chang, S.L., Tsay, C.B., Nagata, S. General mathematical model for gears cut by CNC hobbing machines. Journal of Mechanical Design, ASME, v 119, Mar, 1997, p. 108-113.
- Hatschek, R.L. Coatings, Revolution in HSS tools, American Machinist. USA, 1983.
- Hoffmeister, B. Wear life studies and hobbing with carbide. Aachen : Aachen Polytechnic, 1968.
- International Standard. Tolerances for hobs, Germany . DIN 3968, 1995.
- Janninck, W. L. High technology hobs, Jan-Feb, 1993, p.22-26.
- Joppa, K. Study of performance in HSS hobbing, Aachen : Aachen Polytechnic, 1973.
- Joppa, K. State of the art in HSS hobbing. A practical study for increasing output in HSS hobbing, Aachen : Aachen Polytechnic, 1972, Thesis.
- Klocke, F., Kobialka, C. Reducing production costs in cylindrical gear hobbing. Gear Technology, March-Apr 2000, p.26-31.
- Kuljanic, E. Method for increasing tool life in hobbing. CIRP Annals, vol 38(1), 1989, p.91-94.
- Kusakabe, Y., Mizuta, M., Kawamoto, K. Cutting performance of (Ti,Al)N – coated gear hobs. Kobelco Technology Review n 17 , Apr 1994, p. 29-32.

Lichtenauer, G. Hobbing of spur gear and helical gear. Hurth engineering manuals, 1994.

Merrit, H.E. Gear engineering. London : Pitman, 1971, 489 p.

Nagano, K., Yonekura, M., Sakuragi, I. Entrance angle of top cutting edge in hobbing. Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu. Japan Society of Mechanical Engineers, Part C , v 59 n 557 , Jan, 1993, p. 277-282.

Pellman, M. A., Stevenson, A. Improved ion bond recoating for the gear manufacturing industry. Proceedings of the 1996 Manufacturing conference. Chicago, IL, USA. SME FC 962851996.

Pelphrey, H. Practical design of gears and gear cutting tools. Michigan Tool Company, 1985.

Phillips, R. New innovations in hobbing – part I. Gear Technology, Sept-Oct 1994, p. 16-20.

Phillips, R. New innovations in hobbing – part II. Gear Technology, Nov-Dec 1994, p. 26-30.

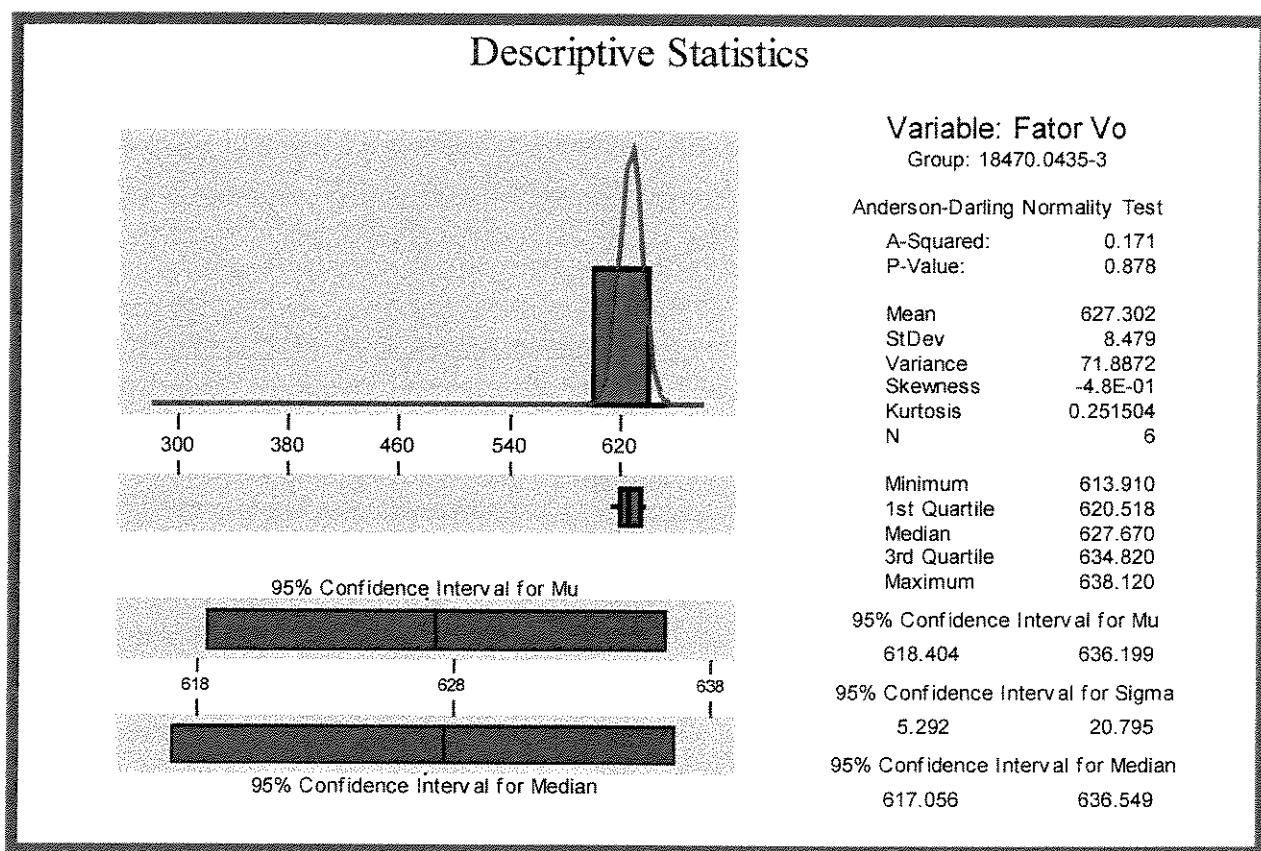
Precht, W., Kacalak, W., Czyxniowski, A. Wear and lifetime of PVD TiN coated tools. ASM Heat Treatment and Surface Conference, Dortmund, Ger. Materials Science Forum, v 163-6, pt 2 , 1994, p. 539-544.

Sulzer, G. Optimum design of hobs and use of carbide in hobbing. Aachen : Aachen Polytechnic, 1970.

Suzuki, T., Ariura, Y., Umezaki, Y. Basic study on cutting forces in gear cutting. JSME International Journal, v 36 n 4 Dec, 1993, p. 543-548.

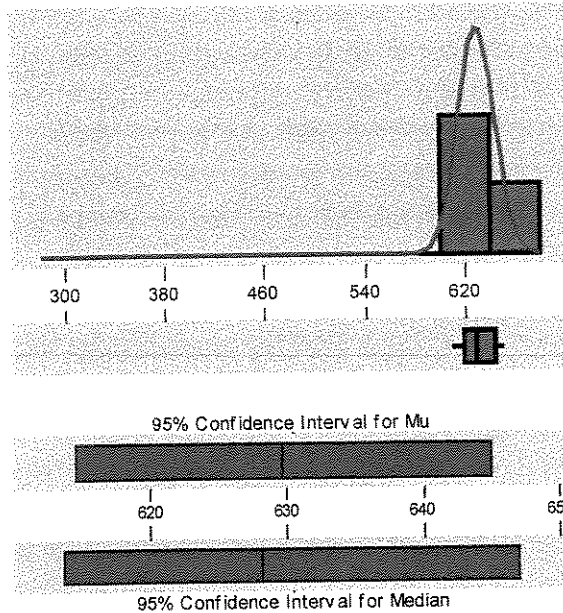
Tua, A., McElroy, B. Line of action – Concepts e calculations. Gear Technology, Jan-Feb, 1993, p. 28-30.

Anexos



UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Descriptive Statistics



Variable: Fator Vo

Group: 18470.0819-1

Anderson-Darling Normality Test

A-Squared: 0.146
P-Value: 0.928

Mean 629.668
StDev 14.510
Variance 210.535
Skewness 8.95E-02
Kurtosis -6.0E-01
N 6

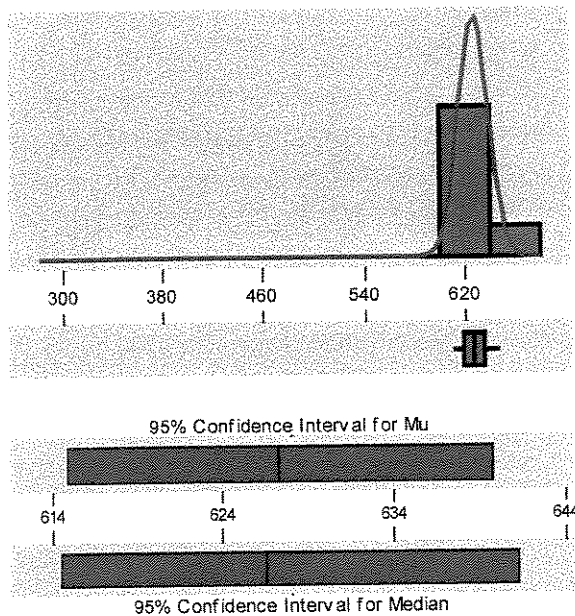
Minimum 609.480
1st Quartile 617.947
Median 628.120
3rd Quartile 643.745
Maximum 649.790

95% Confidence Interval for Mu
614.441 644.895

95% Confidence Interval for Sigma
9.057 35.587

95% Confidence Interval for Median
613.512 646.911

Descriptive Statistics



Variable: Fator Vo

Group: 18470.0887-8

Anderson-Darling Normality Test

A-Squared: 0.208
P-Value: 0.756

Mean 627.250
StDev 11.878
Variance 141.081
Skewness 0.360303
Kurtosis 1.26548
N 6

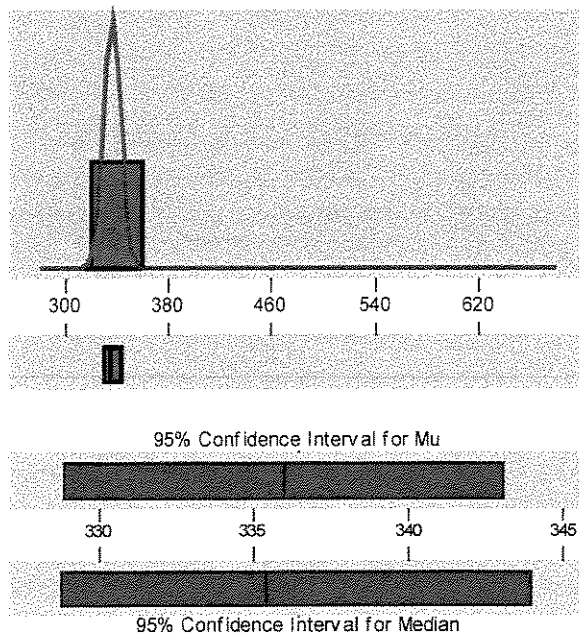
Minimum 610.370
1st Quartile 618.987
Median 626.535
3rd Quartile 635.510
Maximum 646.280

95% Confidence Interval for Mu
614.785 639.715

95% Confidence Interval for Sigma
7.414 29.131

95% Confidence Interval for Median
614.474 641.151

Descriptive Statistics



Variable: Fator Vo

Group: 18470.0310-3

Anderson-Darling Normality Test

A-Squared: 0.217
P-Value: 0.720

Mean 335.973
StDev 6.763
Variance 45.7401
Skewness 0.231525
Kurtosis -1.79700
N 6

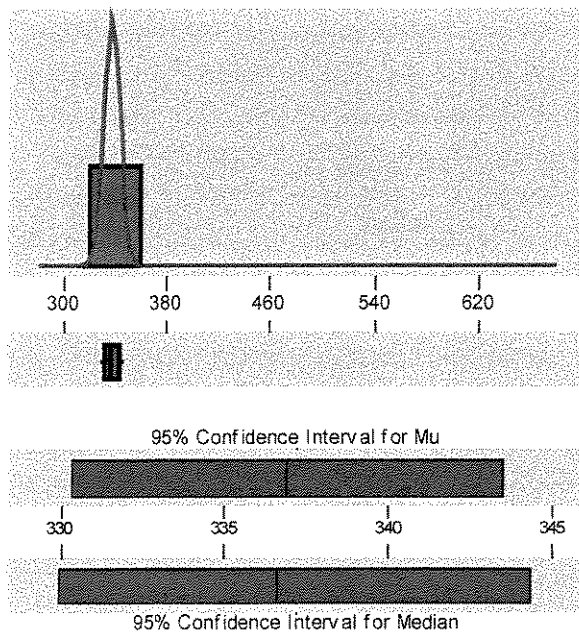
Minimum 328.200
1st Quartile 329.400
Median 335.440
3rd Quartile 342.675
Maximum 345.090

95% Confidence Interval for Mu
328.876 343.071

95% Confidence Interval for Sigma
4.222 16.587

95% Confidence Interval for Median
328.771 343.940

Descriptive Statistics



Variable: Fator Vo

Group: 18470.0886-6

Anderson-Darling Normality Test

A-Squared: 0.122
P-Value: 0.969

Mean 336.898
StDev 6.264
Variance 39.2352
Skewness 0.234916
Kurtosis -4.9E-01
N 6

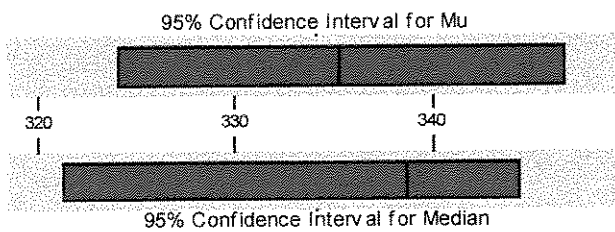
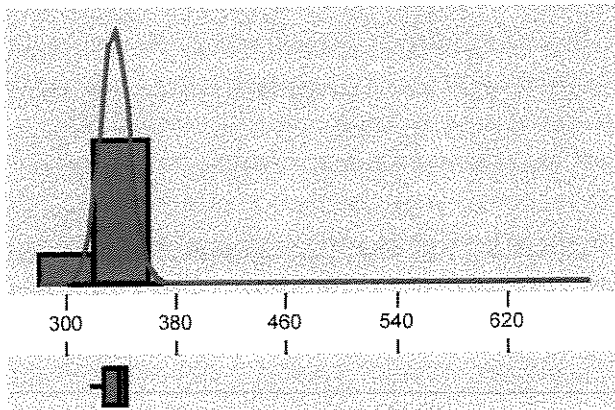
Minimum 328.640
1st Quartile 331.370
Median 336.655
3rd Quartile 342.305
Maximum 346.130

95% Confidence Interval for Mu
330.325 343.472

95% Confidence Interval for Sigma
3.910 15.363

95% Confidence Interval for Median
329.940 344.309

Descriptive Statistics



Variable: Fator Vo

Group: 18470.0997-5

Anderson-Darling Normality Test

A-Squared: 0.400
P-Value: 0.241

Mean 335.322
StDev 10.759
Variance 115.749
Skewness -1.44282
Kurtosis 2.01951
N 6

Minimum 315.820
1st Quartile 327.235
Median 338.650
3rd Quartile 343.172
Maximum 345.310

95% Confidence Interval for Mu

324.031 346.612

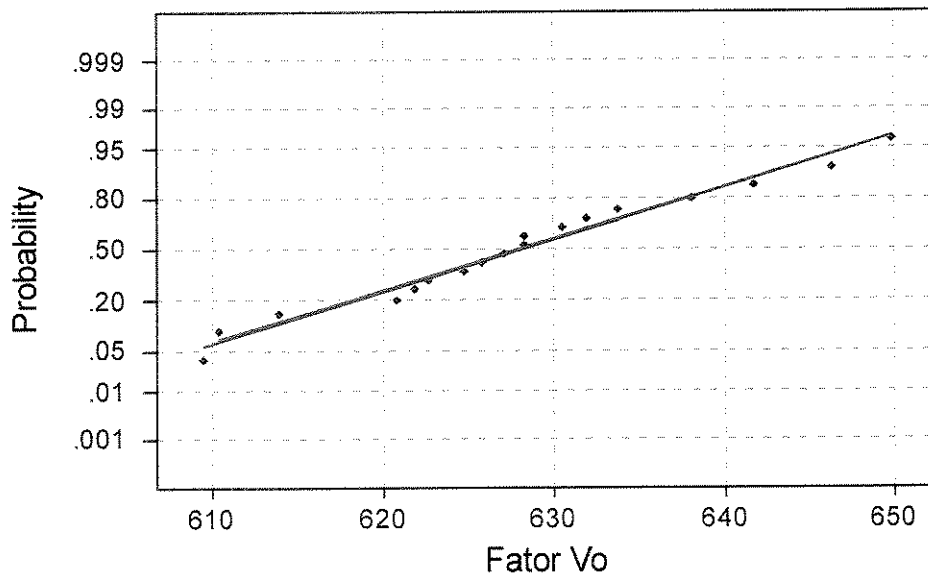
95% Confidence Interval for Sigma

6.716 26.387

95% Confidence Interval for Median

321.256 344.292

Teste de Normalidade



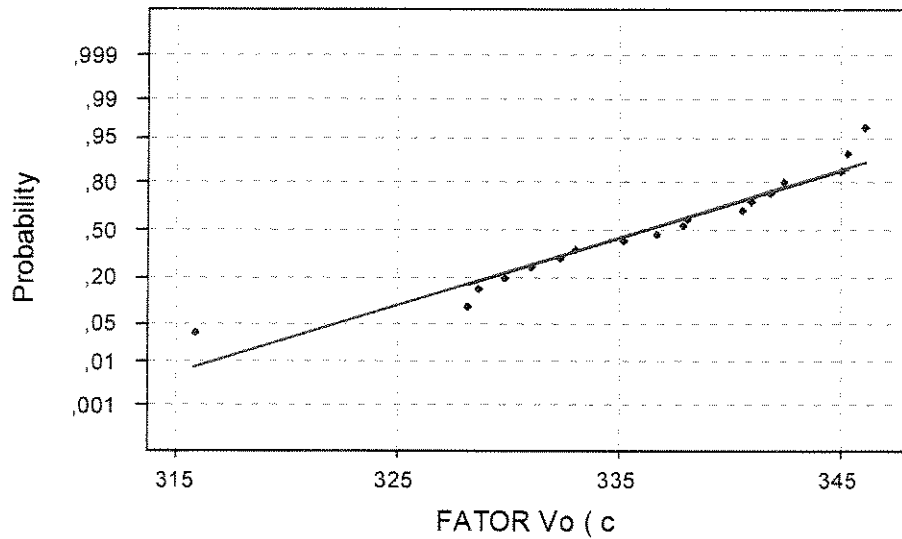
Average: 628.073
StDev: 11.2208
N: 18

Kolmogorov-Smirnov Normality Test

D+: 0.102 D-: 0.091 D: 0.102

Approximate P-Value > 0.15

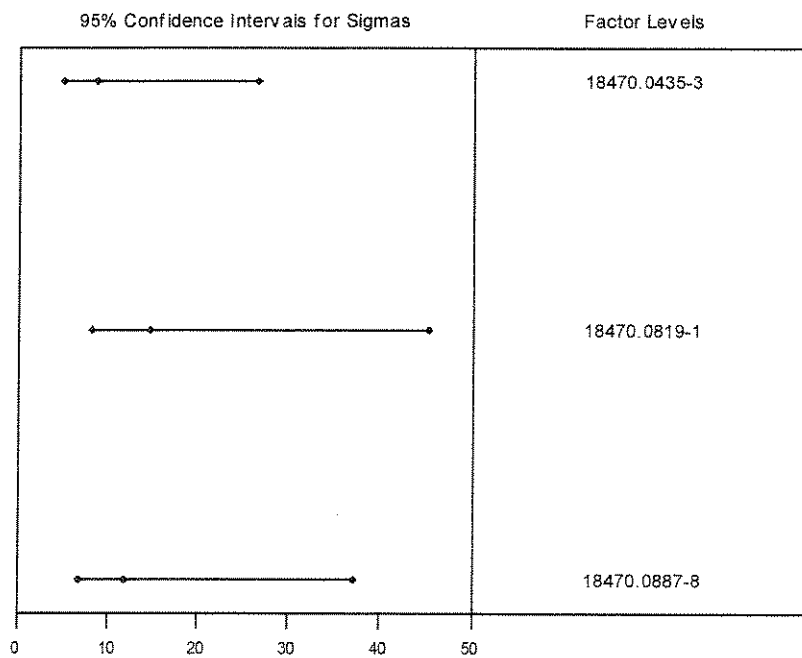
Teste de Normalidade



Average: 336,064
StDev: 7,71217
N: 18

Kolmogorov-Smirnov Normality Test
D+: 0,096 D-: 0,109 D : 0,109
Approximate P-Value > 0,15

Homogeneity of Variance Test for Fator Vo

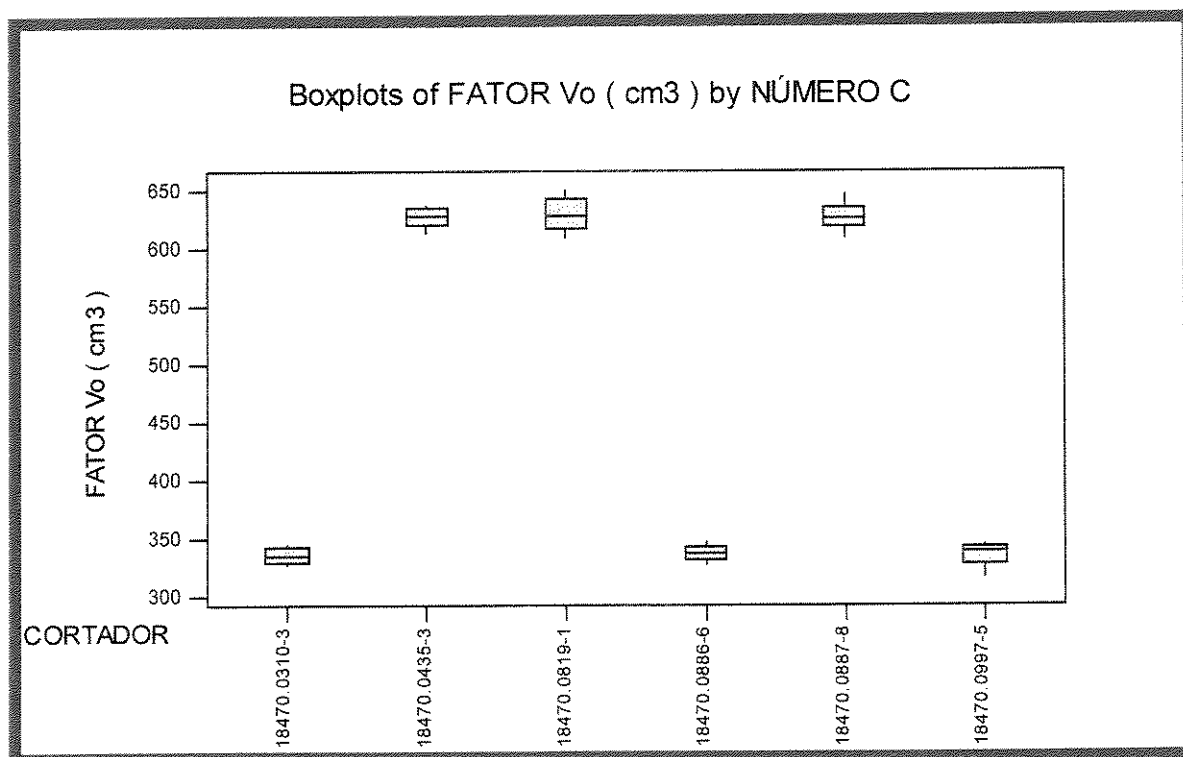
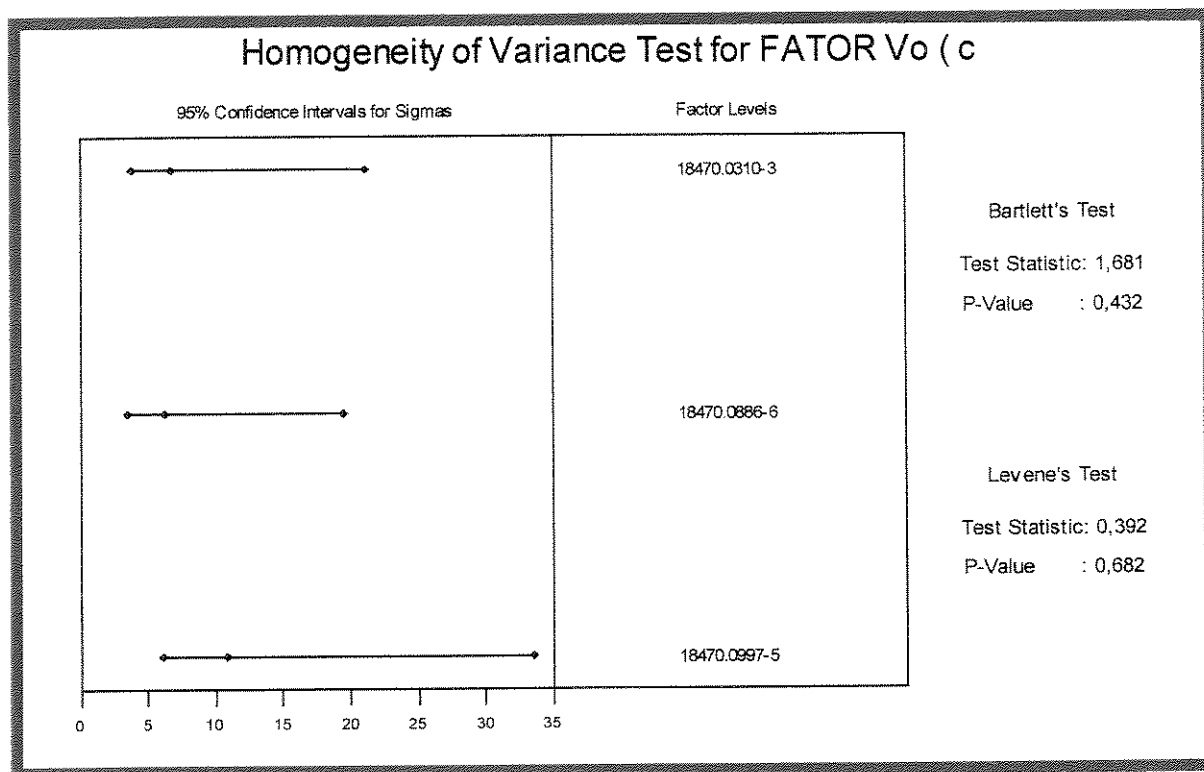


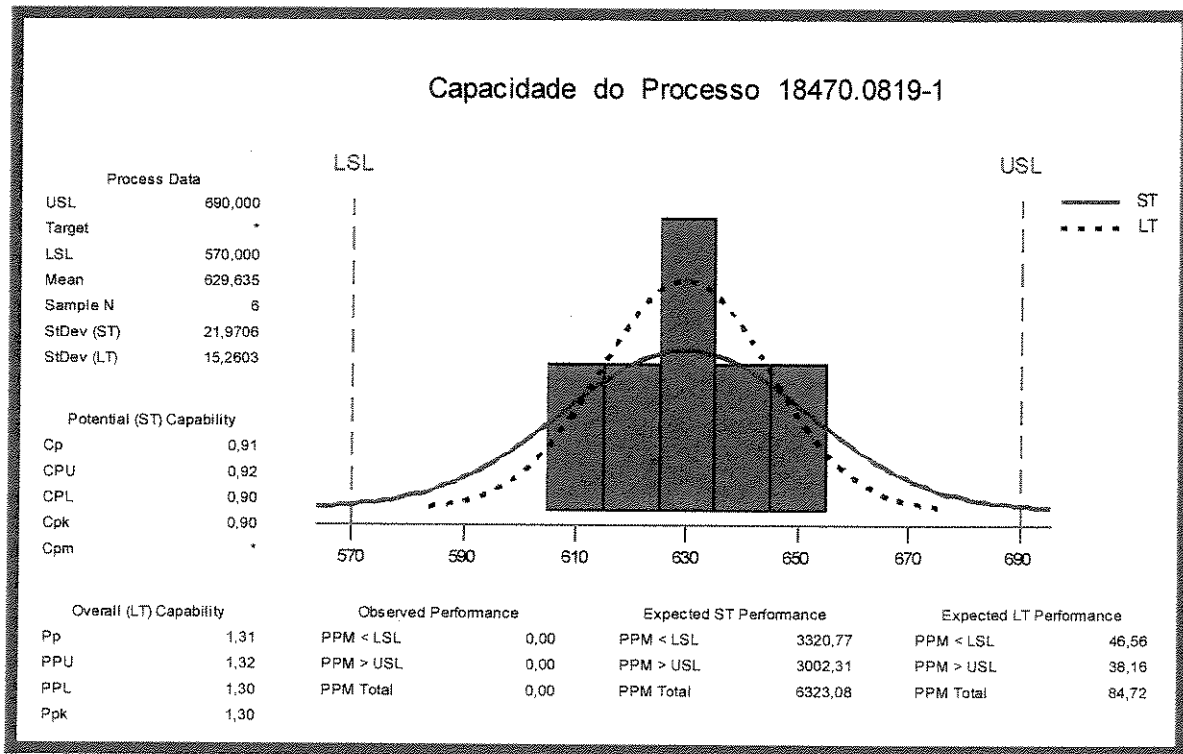
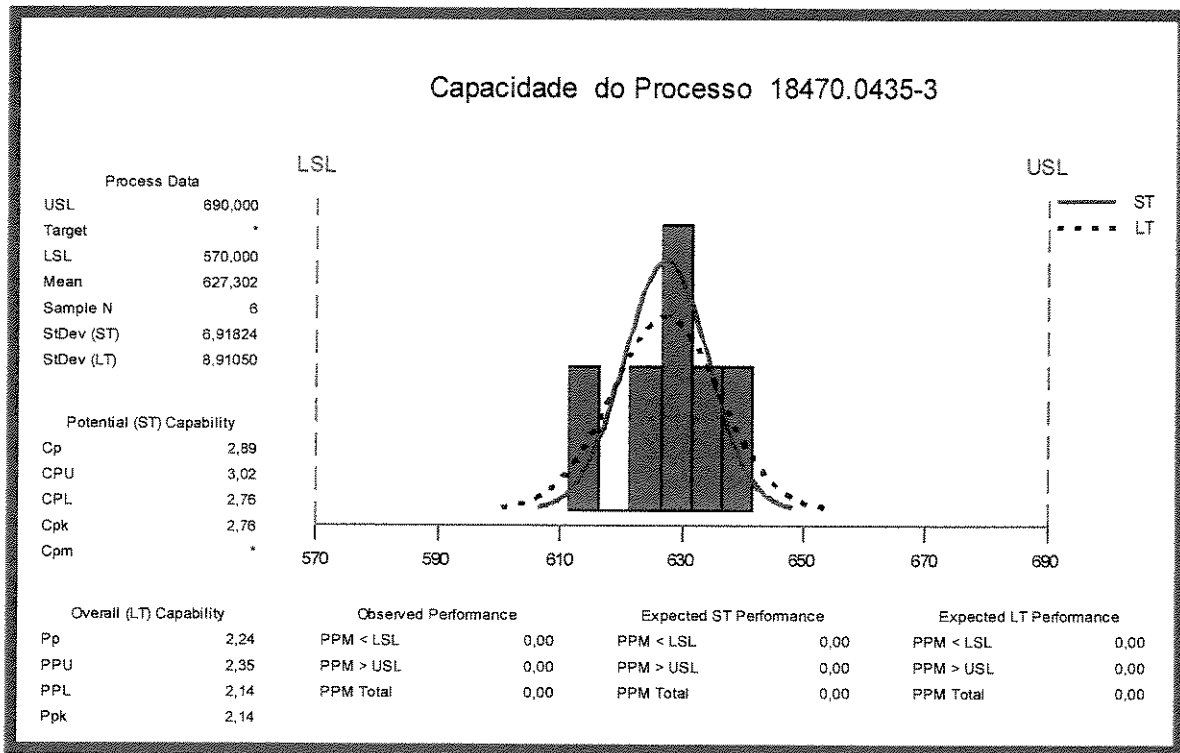
Bartlett's Test

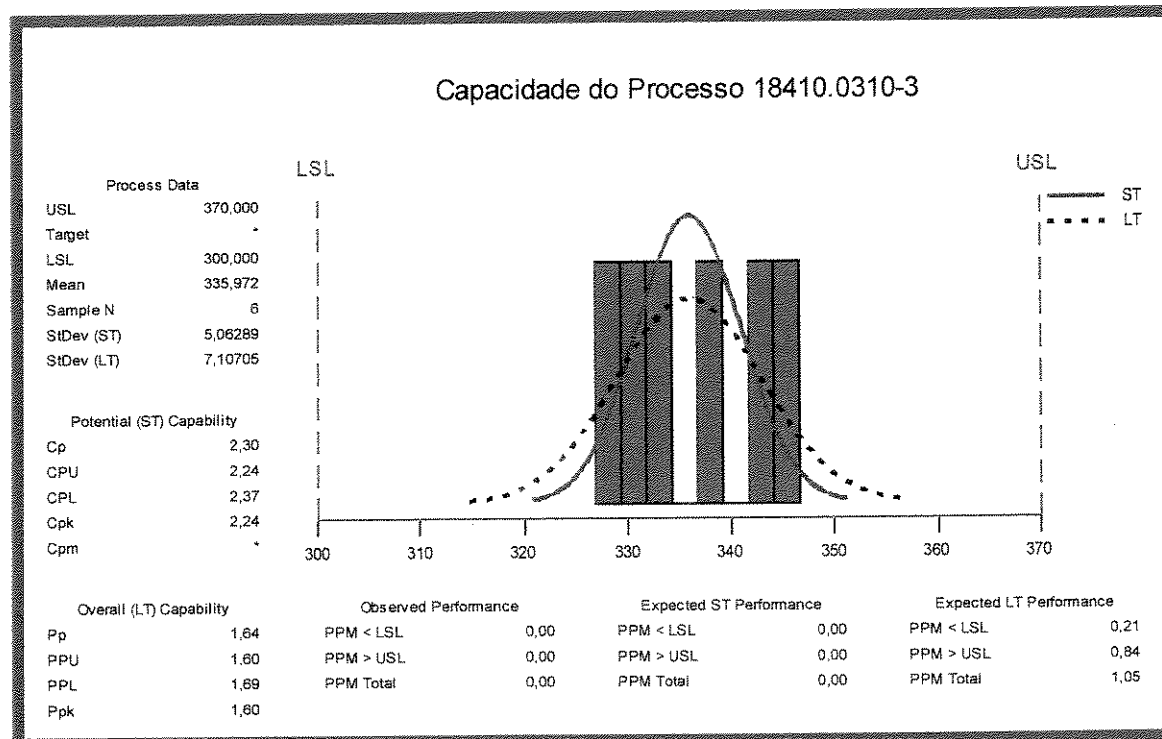
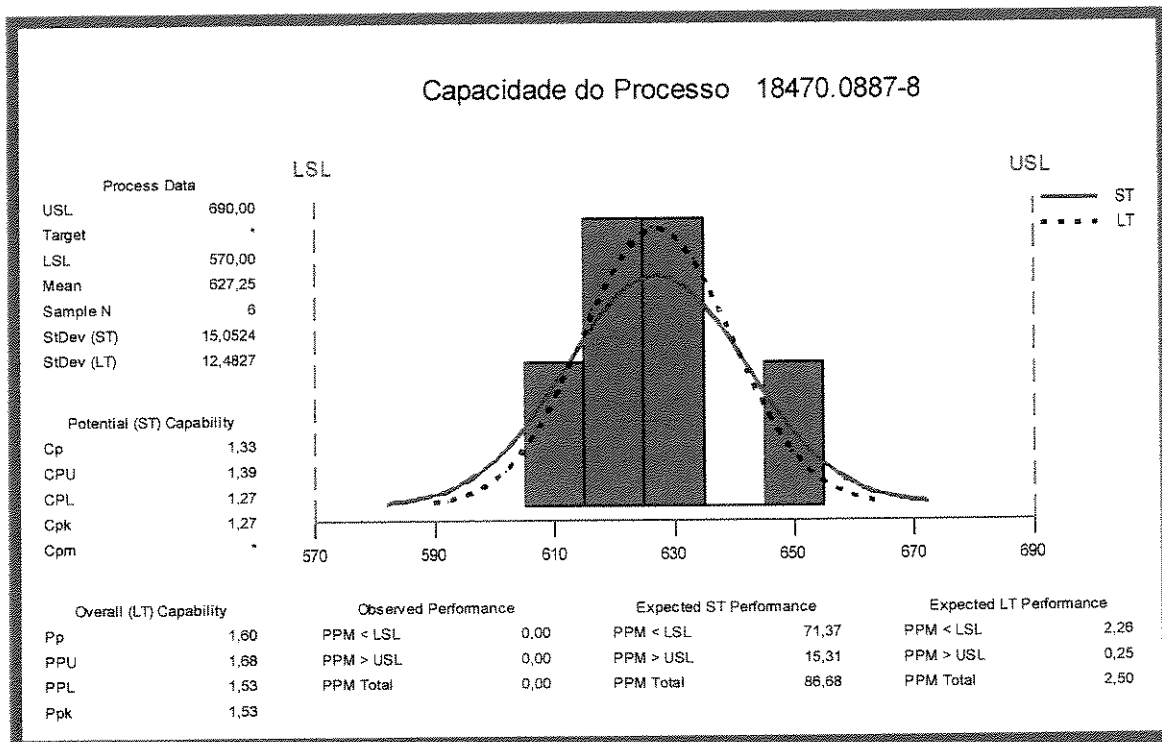
Test Statistic: 1.266
P-Value : 0.531

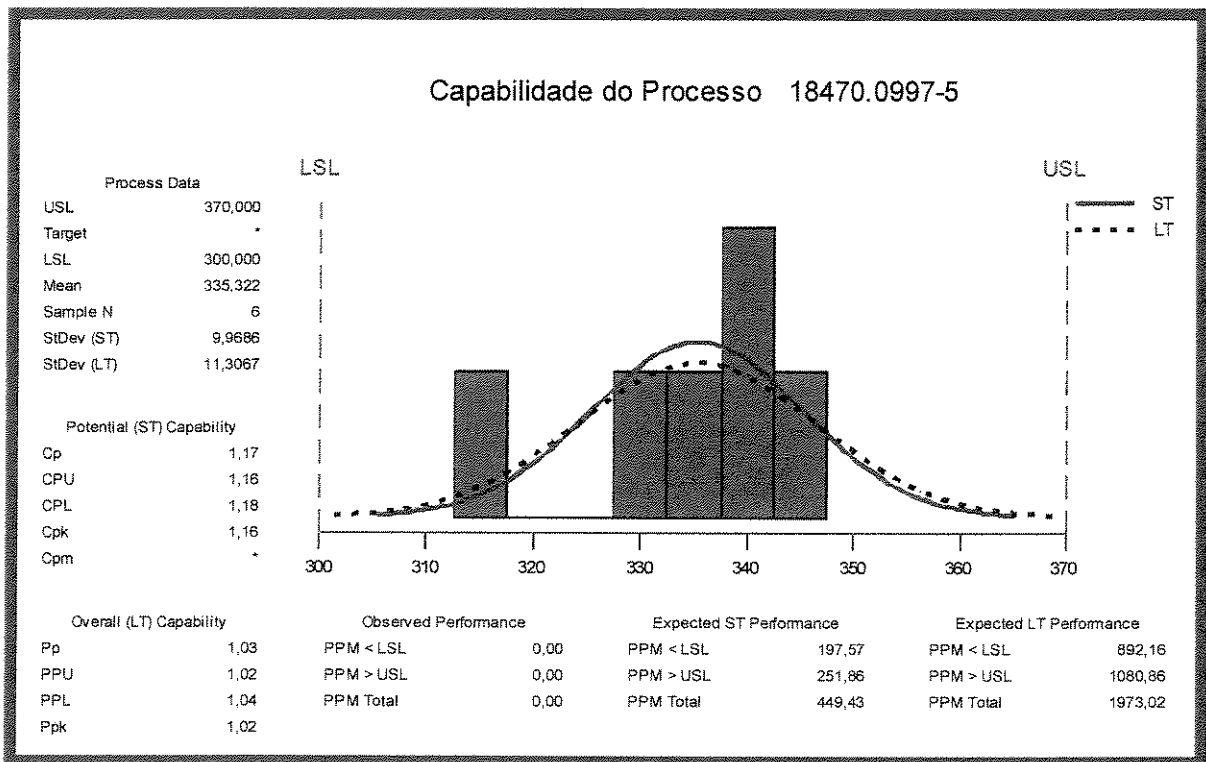
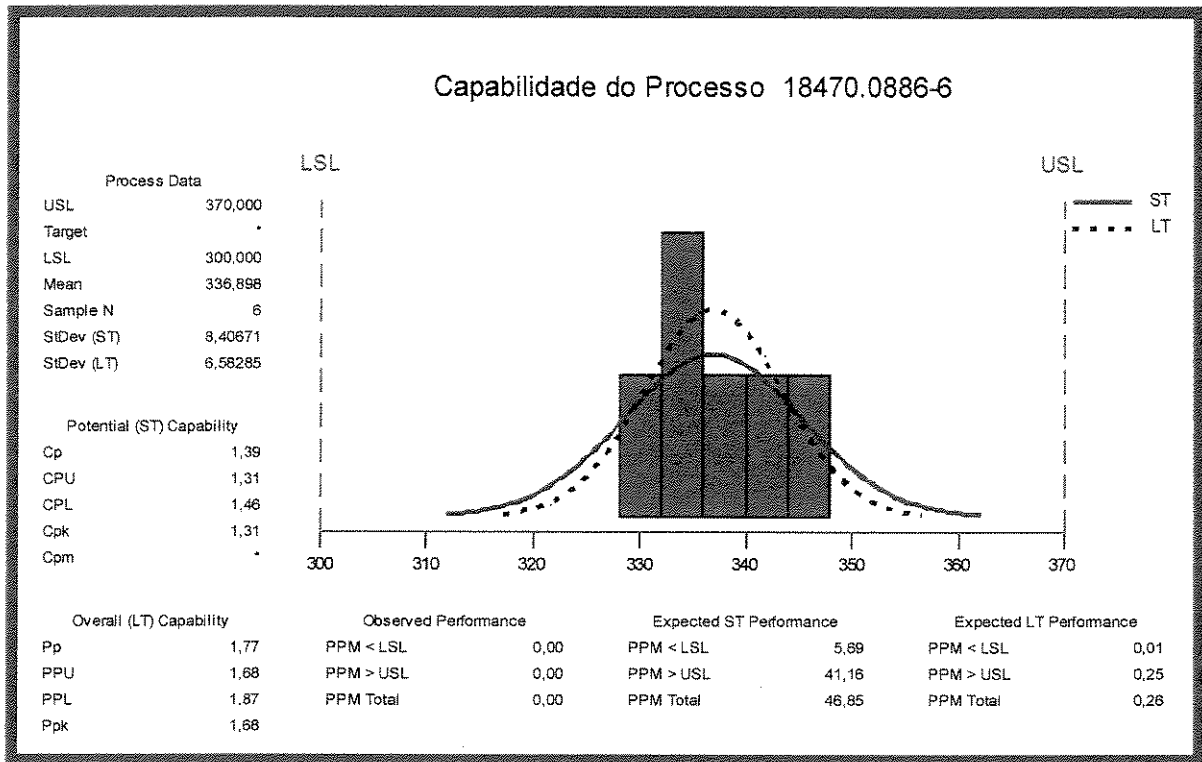
Levene's Test

Test Statistic: 0.702
P-Value : 0.511

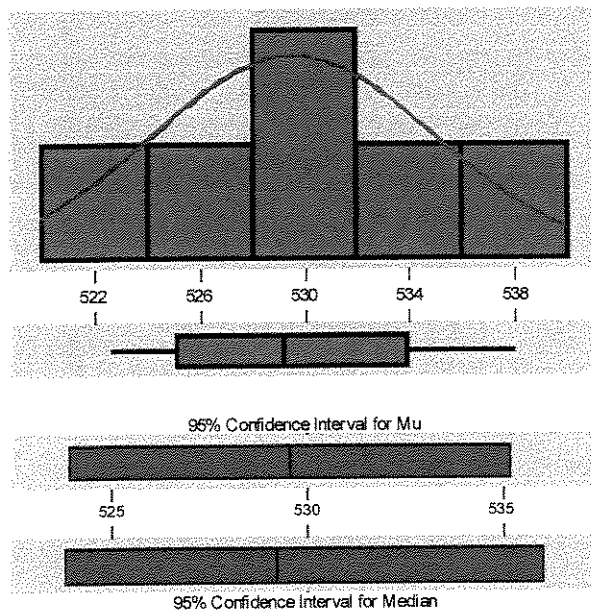








Descriptive Statistics



Variable: FATOR Vo (c

Group: 18470.0435-3

Anderson-Darling Normality Test

A-Squared: 0,141
P-Value: 0,938

Mean 529,567
StDev 5,374
Variance 28,8787
Skewness 0,453985
Kurtosis 0,190771
N 6

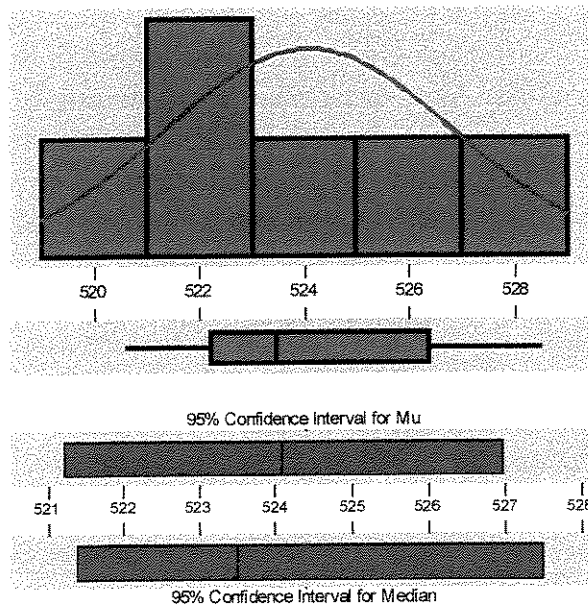
Minimum 522,600
1st Quartile 525,075
Median 529,200
3rd Quartile 533,875
Maximum 538,000

95% Confidence Interval for Mu
523,927 535,206

95% Confidence Interval for Sigma
3,354 13,180

95% Confidence Interval for Median
523,779 536,036

Descriptive Statistics



Variable: FATOR Vo (c

Group: 18470.0887-8

Anderson-Darling Normality Test

A-Squared: 0,223
P-Value: 0,685

Mean 524,083
StDev 2,740
Variance 7,50919
Skewness 0,642691
Kurtosis 0,470231
N 6

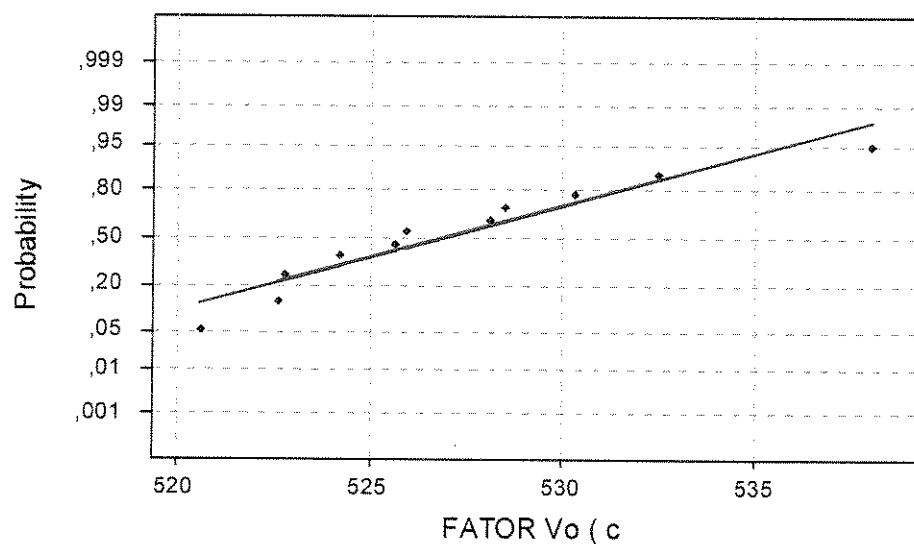
Minimum 520,610
1st Quartile 522,230
Median 523,485
3rd Quartile 526,357
Maximum 528,510

95% Confidence Interval for Mu
521,208 526,959

95% Confidence Interval for Sigma
1,711 6,721

95% Confidence Interval for Median
521,381 527,485

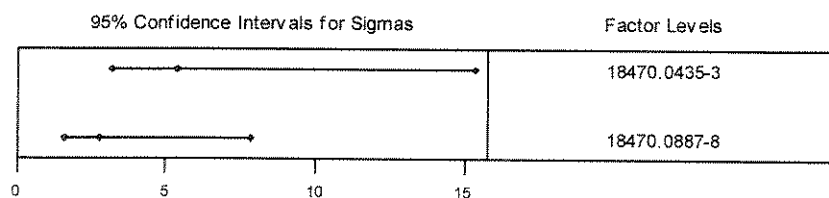
Teste de Normalidade Vc 120 m/ min



Average: 526,825
StDev: 4,97393
N: 12

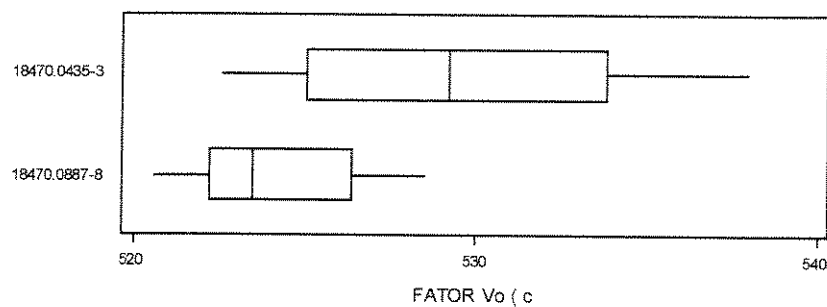
Kolmogorov-Smirnov Normality Test
D+: 0,157 D-: 0,114 D : 0,157
Approximate P-Value > 0,15

Variancia VC 120 m/ min



F-Test

Test Statistic: 3,846
P-Value : 0,166



Levene's Test

Test Statistic: 1,921
P-Value : 0,196

Capacidade do Processo 18470.0887-8 VC120 m / min

