

TESE DEFENDIDA POR DOUGLAS FONTANA
E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 08/12/2003
Anselmo Eduardo Diniz
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Controle de vida da Ferramenta do tipo Lâmina
Alternada Gleason no Fresamento de Coroas
Hipoidais**

Autor: Douglas Fontana
Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

Controle de vida da ferramenta do tipo Lâmina Alternada Gleason no Fresamento de Coroas Hipoidais

Autor: Douglas Fontana
Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2003
SP-Brasil

UNIDADE	EX
Nº CHAMADA	UNICAMP
F734c	
V	EX
TOMBO BC/	58486
PROC.	16.11.04
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	14.00
DATA	29-06-04
Nº CPD	

CM00198176-3

13 10 317208

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

F734c

Fontana, Douglas

Controle de vida da ferramenta do tipo lâmina alternada Gleason no fresamento de coroas hipoidais / Douglas Fontana. --Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Ferramenta. 2. engrenagens. 3. Máquina - Industriais. 4. Processos de fabricação. I. Diniz, Anselmo Eduardo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

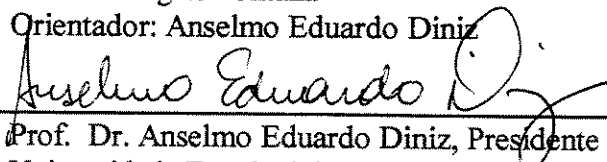
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO


Controle de vida da ferramenta do tipo Lâmina
Alternada Gleason no Fresamento de Coroas
Hipoidais

Autor: Douglas Fontana

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, Presidente
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Oswaldo Luis Agostinho
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Marco Stipkovic Filho
Escola Politécnica da USP

Campinas, 08 de Dezembro de 2003

Dedicatória:

Dedico este trabalho a minha esposa Marise, a meu filho Leonardo, aos meus pais e irmã.

Agradecimentos:

A elaboração deste trabalho só foi possível, graças a ajuda de importantes pessoas as quais presto minha homenagem:

A minha esposa pela sua ajuda e incentivo nos momentos mais difíceis.

Ao professor Anselmo Eduardo Diniz que me ajudou, guiou e incentivou nesta jornada.

Ao amigo Denilson Martins Gomes, que esteve presente em toda esta jornada.

Ao amigo de departamento Antonio César Elias, que colaborou de forma intensa na elaboração deste trabalho.

Ao amigo Altemir Camino Castro, coordenador de usinagem Gleason.

A todos os colegas do departamento, que ajudaram de forma direta ou indireta.

Ao diretor industrial Jair Lunhani que permitiu e facilitou a continuação de meus estudos.

A empresa Moto Peças Transmissões S/A, por toda a estrutura cedida para a elaboração deste trabalho.

Ao amigo Reinaldo Ramazotti, da empresa Balzers Balinit do Brasil, pela sua cooperação na realização deste trabalho.

A Deus pela força e saúde.

Cada um que passa em nossa vida, passa sozinho, pois cada pessoa é única e nenhuma substitui outra. Cada um que passa em nossa vida, passa sozinho, mas não vai só, nem nos deixa sós; leva um pouco de nós mesmos, deixa um pouco de si mesmo. Há os que levam muito, mas há os que não levam nada. Há os que deixam muito, mas há os que não deixam nada. Esta é a maior responsabilidade de nossa vida e prova evidente de que duas almas não se encontram por acaso.

Resumo

FONTANA, Douglas, Controle da Vida da Ferramenta do Tipo Lâmina Alternada Gleason no Fresamento Coroas Hipoidais, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 165p. Dissertação de Mestrado.

A transmissão de movimentos mecânicos através de engrenagens é muito utilizado em todos os segmentos industriais. O corte de dentes de engrenagens é uma operação bastante importante dentro da usinagem. Apesar de sua importância, este é um processo pouco estudado, pois esta é uma área bastante restrita de atuação. Em função disso, a maior parte dos desenvolvimentos relacionados à tecnologia de corte de dentes de engrenagens ocorre no meio industrial, geralmente de forma empírica. A determinação do fim de vida das lâminas de corte Gleason são feitas, no chão de fábrica, pelos preparadores ou mesmo pelos operadores das máquinas. Tal decisão é baseada em critérios altamente subjetivos e portanto, faz com que o tempo de utilização da ferramenta apresente uma grande variabilidade, ou seja, em determinados momentos, a ferramenta é utilizada além de sua vida efetiva e, em outros momentos, esta utilização se dá aquém da mesma. Caso a ferramenta ultrapasse sua utilização ótima, ocorrem vários problemas, dentre os quais: maior volume de material retirado na afiação da ferramenta com conseqüente redução do número de vidas desta, a rugosidade média (R_a) das peças torna-se muito elevada, fazendo com que a lapidação do dentado (operação posterior ao corte) seja muito demorada e portanto, anti-econômica. Por outro lado, se a ferramenta for sub-utilizada, ocorre um desperdício de lâmina, bem como um aumento do tempo de processamento pois um maior número de trocas da ferramenta vai ocorrer. Este trabalho procurou estabelecer um parâmetro objetivo de fim de vida da lâmina de corte do tipo Hardac, utilizando o processo de corte denominado Completo (Completing). Para tanto, foi feito um trabalho junto a um

fabricante de auto-peças, que usina engrenagens cônicas e hipoidais, utilizada em diferenciais de caminhões e ônibus. O parâmetro escolhido foi a rugosidade média (R_a) do flanco dos dentes das engrenagens. O comportamento e a dispersão da vida da ferramenta anterior e posterior à implantação do parâmetro proposto foram analisadas. Os resultados mostram uma maior uniformidade da vida das lâminas de corte gleason, bem como dos tempos de afiação das mesmas e lapidação do dentado. Além disso, as lâminas passaram a ser utilizadas de forma otimizadas em relação ao seu desgaste e à qualidade superficial da peça. Um segundo objetivo do trabalho foi comparar a vida de ferramentas de aço rápido com algumas coberturas diferentes e também sem cobertura na superfície de saída, pois foram utilizadas após a afiação da ferramenta com cobertura total. Pelo desempenho mostrado nos resultados a melhor cobertura foi aquela de nitreto de titânio originária do fabricante da ferramenta e do equipamento.

Palavra chave:

Engrenagem hipoidal, ferramentas para engrenagens, fabricação de engrenagens cônicas e hipoidais.

Abstract

FONTANA, Douglas, Life of tool to a type of Gleason Alternate Blade at the milling hypoid gears, Campinas, : Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 165p Dissertação de Mestrado.

The transmission of mechanical motion through gears is very used in all industrial segments. The cutting process of gears is a very important process in the manufacturing. Despite its importance this is a process not so studied as it a very specific area. According to this, most part of the industrial field, usually in an empirical way. The determination to end the life of a Gleason Cutter Blade is made by machine operators. The decision is based on highly subjective criteria and as for this it makes the using time of this tool to present a great variability. As result this tool is sometimes used longer or less than it should. If its use is longer exceeding its lifetime, many problems may occur, such as: bigger volume taken from the sharpening material of tools which results in a reduction of their lifetime, the average roughness (Ra) of the parts becomes higher which makes lapping of the teeth (process which occurs after cutting) to take longer and as a result not economical. On the other hand, if the tool is used less there is a waste of the blade as well as an increase in the manufacturing process due to the change of tools. This work tried to establish an objective parameter on the end of the life of the Hardac type of blade, using a cutting process called Completing. For this reason this work was done together with an Automotive Company that produces bevel and hypoid gears used on heavy duty drive axles for trucks and buses. The chosen parameter was the average roughness (Ra) of the teeth flank of the gears. The behavior and dispersion of the tool life before and after the setting of the proposed parameter were analized. The results show a greater uniformity of the life the Gleason Cutter Blade as well as its sharpening time and teeth lapping. Apart from it, the blades started to be used on an optimized way related to its wear and to the surface quality of the

piece. Another objective of this work was to compare the high speed steel tool life with some different coats and also no coating on the front face plane, as they were used after the tool sharpening with total coat. For the result showed the best coating was the one with titanium nitride originated from the tool and equipment manufacturer.

Key Words:

Bevel and Hypoid Gears, Tools for Gears, Manufacturing Gears, Hypoid Gears Cutting.

Índice

Lista de figuras	iv
Lista de tabelas	viii
Nomenclatura	x

Capítulo 1

Introdução	1
------------	---

Capítulo 2

2.1 Introdução	3
2.2 Modelos de Engrenagens	4
2.2.1 Modelos de Engrenagens Espirocônicas	5
2.3 Nomenclatura de Engrenagens Hipoidais	14
2.4 Projeto de Engrenagens Cônicas e Hipoidais	15
2.5 Processo de Fabricação de Engrenagens Hipoidais	17
2.6 Exigências na fabricação de Engrenagens Cônicas e Hipoidais	
2.6.1 Características Gerais	22
2.6.2 Controle do corpo da engrenagem	23
2.6.3 Controle do dentado	26
2.6.4 Controle do dentado em disposição de funcionamento	32

Capítulo 3

Características gerais do processo de fabricação de engrenagens Hipoidais

Lâminas Alternadas Gleason

3.1 Introdução	38
----------------	----

3.2 Princípios de geração	39
3.3 Características da geração	40
3.4 Sistema de corte	43
3.5 Tipos de usinagem dos dentes	44
3.6 Processo de usinagem dos dentes	45
3.7 Classificação geral dos Métodos de corte	49
3.8 Fresadoras de engrenagens cônicas e hipoidais CNC	52
3.9 Lâminas Alternadas Gleason	
3.9.1 Introdução	54
3.9.2 Forma de Construção das lâminas	55
3.9.3 Cabeçote porta lâminas	57
3.9.4 Disposição das lâminas	57
3.9.5 Classificação das lâminas	60
3.9.6 Nomenclatura das lâminas	65
3.9.7 Materiais para lâminas	66

Capítulo 4

Estendendo a vida das lâminas alternadas Gleason

4.1 Mecanismos de desgaste de ferramentas de usinagem	71
4.2 Formação do cavaco na usinagem com lâminas Gleason	74
4.3 Tipos de desgastes nas lâminas alternadas Gleason	75
4.4 Desenvolvimento de desgaste nas lâminas alternadas Gleason	75
4.5 Determinação dos problemas em lâminas Gleason	81
4.6 Mecanismos de proteção das lâminas	
4.6.1 Características Gerais	86
4.6.2 Histórico da utilização dos revestimentos	86
4.6.3 Processo de Revestimento	87
4.6.4 Exigências para o metal base	90
4.6.5 Propriedade dos revestimentos	90
4.6.6 Tipos de Revestimentos	91
4.6.7 Efeito redutor de desgaste através da utilização dos revestimentos	94

4.7 Afição de lâminas alternadas Gleason	
4.7.1 Preparação da Ferramenta	95
4.7.2 Como as lâminas alternadas Gleason são afiadas	99
 Capítulo 5	
Materiais, equipamentos e procedimentos experimentais	
5.1 Introdução	103
5.2 Desenvolvimento dos ensaios e critérios de fim de vida	105
5.3 Máquina, Material e ferramenta	112
5.4 Parâmetros de usinagem nos ensaios	119
 Capítulo 6	
Resultados e discussões	
6.1 Introdução	123
6.2 Critério de fim de vida da ferramenta	132
6.3 Análise do comportamento dos diferentes tipos de coberturas	151
 Capítulo 7	
7.1 Conclusões	158
7.2 Sugestões para trabalhos futuros	159
 Referências Bibliográficas	160

Lista de figuras

2.1	Tipos de engrenagens cilíndricas	4
2.2	Aplicação de engrenagem espirocônica	6
2.3	Princípio básico – tronco de cone	7
2.4	Engrenagem cônica reta	7
2.5	Evolução dente espiral	8
2.6	Engrenagem cônica espiral	9
2.7	Engrenagem cônica zeral	9
2.8	Troncos de hiperbolóides	11
2.9	Engrenagem Hipoidal	11
2.10	Distância de decalagem (OFF SET)	12
2.11	Nomenclatura básica de conjuntos hipoidais	14
2.12	Nomenclatura do dente da engrenagem hipoidal	15
2.13	Processo de lapidação	21
2.14	Processo de fabricação de coroas hipoidais	22
2.15	Requisitos básicos no corpo da engrenagem	26
2.16	Variação do diâmetro primitivo	27
2.17	Variação de espaçamento do dente	28
2.18	Variação de indexação	28
2.19	Verificação da precisão de indexação	29
2.20	Espessura do dente	30
2.21	Altura do dente	30
2.22	Mapeamento da superfície do flanco do dente	31
2.23	Contato gerado após teste	33
2.24	Variação do contato no flanco do dente	34

2.25	Análise de Bias – TCA	35
3.1	Cortador circular e engrenagem geradora imaginária	40
3.2	Cinemática de corte para engrenagem formada	42
3.3	Formação de um dente não gerado	42
3.4	Diferença entre gerado e formado	45
3.5	Processo bilateral	50
3.6	Processo Unilateral	51
3.7	Montagem fixa	52
3.8	Fresadora CNC	54
3.9	Três formas de construção das lâminas	55
3.10	Sistema de fixação das lâminas alternadas ao cabeçote	56
3.11	Tipo de cabeçote porta lâmina	57
3.12	Disposição de lâminas alternadas	59
3.13	Lâmina Hardac® III	65
3.14	Nomenclatura da lâmina externa Hardac® III	66
3.15	Vantagens no uso de lâminas de metal duro	67
4.1	Desgastes típicos sobre ferramentas de corte	72
4.2	Desgaste da aresta de corte de uma ferramenta	73
4.3	Mecânismo de formação do cavaco	74
4.4	Tipos de desgastes em lâminas	75
4.5	Desgaste na superfície de folga da lâmina	76
4.6	Desgaste na superfície de saída da lâminas	77
4.7	Escoamento do cavaco em ferramentas com e sem cobertura de TiN	78
4.8	Desempenho de ferramentas com e sem cobertura de TiN	80
4.9	Tipos de folhas extremas	81
4.10	Influência do material	83
4.11	Direcionamento do fluido de corte	83
4.12	Desvio axial e radial em lâminas	84
4.13	Processo de revestimentos	90
4.14	Formação de trincas	96
4.15	Micro rebarbas de afiação	97

4.16	Afiação de lâminas alternadas Gleason	99
4.17	Rebolo para afiação de lâminas Gleason	100
4.18	Alinhamento entre lâminas	101
4.19	Medição após a afiação	102
5.1	Ferramenta Hardac® III	106
5.2	Determinação da rugosidade do flanco do dente	109
5.3	Rugosidade do flanco do dente	
5.4	Lâmina alternada sem revestimento na superfície de saída após ao fim de um dos ensaios	111
5.5	Máquinas Gleason Phoenix® 1000 HC	112
5.6	Engrenagem hipoidal	113
5.7	Equipamentos para análise da rugosidade e dimensional do dente	114
5.8	Detalhe da cobertura de TiN executado por um fornecedor nacional e TiN originário da empresa Gleason	116
5.9	Lâminas insertadas externa e interna com cobertura de TiN executada por um fornecedor nacional	117
5.10	Perfil do dente usinado	118
5.11	Operação de usinarem do dente hipoidal	119
5.12	Posições de desbaste e acabamento das lâminas no corte do dente	121
6.1	Condição das lâminas para os ensaios	123
6.2	Número de peças produzidas utilizando ferramenta com cobertura total de TiN	125
6.3	Número de peças produzidas utilizando ferramenta sem cobertura de TiN na superfície de saída	126
6.4	Rugosidade da marcha ré utilizando ferramenta com cobertura total de TiN	127
6.5	Rugosidade da marcha ré utilizando ferramenta sem cobertura na superfície de saída	128
6.6	Material removido da ferramenta na afiação com cobertura total de TiN	129
6.7	Material removido da ferramenta na afiação sem cobertura de TiN na superfície de saída	129
6.8	Rugosidade da marcha frente no início da vida da ferramenta	136

6.9	Rugosidade da marcha frente no final da vida da ferramenta	136
6.10	Rugosidade da marcha ré no início da vida da ferrament	137
6.11	Número de peças produzidas versus tipos de coberturas	138
6.12	Exemplificação de distribuição normal dos ensaios 1 e 3	139
6.13	Condições apresentadas pela lâmina no início e fim do ensaio 1 (TiN originário da Gleason)	141
6.14	Condições apresentadas pela lâmina no início e fim do ensaio 4 (TiN originário da Gleason sem cobertura na superfície de saída)	142
6.15	Adesão do material usinado na superfície de saída da ferramenta com cobertura total após o término dos ensaios 1,2,3,7 e 8	143
6.16	Análise do desgaste VB na superfície de folga	144
6.17	Análise do desgaste da ferramenta sem cobertura na superfície de saída	146
6.18	Material removido na afiação versus tipos de coberturas	147
6.19	Potência utilizada no início e fim da ferramenta de cada ensaio versus tipo de cobertura	149
6.20	Potência utilizada versus material removido no ensaio 1 com cobertura total (lado esquerdo do gráfico) e ensaio 5, no qual a ferramenta não apresentava cobertura na superfície de saída (lado direito do gráfico)	150
6.21	Volume de cavaco removido versus tipos de coberturas	152

Tabelas

2.1	Comparação entre características de engrenagem hipoidal e cônica espiral	13
2.2	Valor da rugosidade para a usinagem do dente da coroa	32
3.1	Composição química do aço rápido ASP 23	68
3.2	Aços para ferramenta de usinagem	70
4.1	Características dos revestimentos	93
6.1	Ferramenta com cobertura total de TiN	124
6.2	Ferramenta sem cobertura na superfície de saída	125
6.3	Ensaio 1 – Ferramenta com cobertura de TiN originária do fabricante Gleason	132
6.4	Ensaio 2 - Ferramenta com cobertura de TiN executado por um fornecedor nacional	133
6.5	Ensaio 3 - Ferramenta com cobertura de TiCN + TiN executado por um fornecedor nacional	133
6.6	Ensaio 4 - Ferramenta com cobertura TiN originário do fabricante Gleason, somente nas superfícies de folga	133
6.7	Ensaio 5 - Ferramenta com cobertura TiN executado por um fornecedor nacional, somente nas superfícies de folga	134
6.8	Ensaio 6 - Ferramenta com cobertura TiCN + TiN executado por um fornecedor nacional somente nas superfícies de folga	134
6.9	Ensaio 7 - Ferramenta com cobertura total de TiN e executado por um fornecedor nacional, com afiação executada no local onde os ensaios foram realizados	134
6.10	Ensaio - 8 Ferramenta com cobertura total TiCN + TiN executado por um fornecedor nacional, com afiação executado no local onde os ensaios foram realizados	135

6.11	Percentual de aumento de potência entre o início e fim da vida da ferramenta	151
------	--	-----

Nomenclatura

A	Número de peças produzidas	
AGMA	Associação Americana dos fabricantes de engrenagem	
APC	Aresta postiça de corte	
B	Volume de cavaco removido / vida	(cm ³)
Balinit A	Nitreto de titânio	
Balinit G	Carbonitreto de titânio e Nitreto de titânio	
C	Carbono	
C	Diamante policristalino	
C	Material removido na afiação	(mm)
CBN	Nitreto cubico de boro	
CLP	Comando lógico programável	
CNC	Controle numérico computadorizado	
Co	Cobalto	
Cr	Cromo	
CrC	Carboneto de cromo	
CrN	Nitreto de cromo	
CVD	Deposição química a vapor	
D	Rugosidade da marcha frente no início da vida da lâmina	(μm)
Desv. P	Desvio padrão	
E	Rugosidade da marcha frente no fim da vida da lâmina	(μm)
f	Avanço por fãca	(mm)
F	Rugosidade da marcha ré no início da vida da lâmina	(μm)
G	Rugosidade da marcha ré no fim da vida da lâmina	(μm)
h	Espessura de corte	(mm)

H	Porcentagem da potência total da máquina no início da vida da lâmina	(%)
H	Teste horizontal	
HB	Dureza Brinell	
HRc	Dureza Rockwell	
HV	Dureza Vickers	
J	Porcentagem da potência total da máquina no fim da vida da lâmina	(%)
KB	Largura da cratera	(mm)
Kg	Kilograma	
Kt	Profundidade de cratera	(μm)
Mn	Manganês	
Mo	Molibdênio	
P	Fósforo	
PVD	Deposição física de vapor	
Ra	desvio médio aritmético	(μm)
Ra (CLA)	Desvio médio em micro polegadas	($\mu\text{ inch}$)
RBC	Rede Brasileira de Calibração	
rpm	Rotações por minuto	
S	Enxofre	
SAE	Sociedade de Engenheiros Americanos	
Si	Silício	
TCA	Análise do contato do dente	
TiALN	Nitreto de titânio alumínio	
TiC	Carboneto de titânio	
TiCN	Carbonitreto de titânio	
TiCN+TiN	Carbonitreto de titânio e Nitreto de titânio	
TiN	Nitreto de titânio	
TiN+CrN	Nitreto de titânio e nitreto de cromo gradual	
v	Teste vertical	
V	Vanádio	
v	Velocidade de corte	(m/min)
VBb	Desgaste frontal médio	(mm)

Vbmax	Largura máxima do desgaste do flanco	(mm)
VBn	Desgaste frontal	(mm)
W	Tungstênio	
WC/C	Carboneto de tungstênio com carbono	

Capítulo 1

Introdução

A partir da década de 90, fatores como a busca incessante de produtividade, qualidade, custos reduzidos, satisfação do cliente, pressionaram as empresas a aprimorar rapidamente seus métodos de trabalho, instalações e estratégias de negócios para tornar cada vez menor o tempo de resposta às mudanças no ambiente de negócios global.

Para o tempo de resposta ser cada vez menor é necessário aplicar novas metodologias gerenciais e administrativas que permitam o emprego de novas tecnologias em todo o sistema de manufatura, tornando-os mais rápidos, eficazes e integrados, para a obtenção de padrões de competitividade mundial.

Desta forma as organizações empresariais se vêem hoje diante de um grande desafio, decorrente da abertura de mercados entre as nações. Assim, é preciso estar preparado para defrontar-se com mercados mais exigentes, com forte concorrência entre centenas de empresas e, o mais importante, lidar com um cliente final que busca um produto que satisfaça todas as suas expectativas com custo baixo e os impactos que este produto possam causar à sociedade e ao meio ambiente.

Portanto, a crescente necessidade de buscar formas mais competitivas de atuação e criar produtos diferenciados que atraiam novos consumidores fez elevar o papel da manufatura, permitindo investimentos e grandes avanços no campo da usinagem, deixando-a em destaque no mundo dos negócios.

A operação de corte de dentes de engrenagens hipoidais é bastante importante, porém muito cara e demorada, devido ao tipo de ferramenta, à afiação das mesmas, precisa de conhecimentos e

equipamentos de usinagem específicos o que torna este processo muito complexo e restrito e pouco estudado no meio acadêmico. Assim, a maior parte dos desenvolvimentos tecnológicos deste tipo de usinagem ocorre no meio industrial.

Os principais objetivos deste trabalho foram:

Encontrar um método eficiente de determinação do fim de vida da ferramenta – até a realização deste trabalho, esta determinação era feita de maneira subjetiva e imprecisa pelo preparador da máquina, o que causava prejuízos para a operação de lapidação do dentado posterior ao corte, para a operação de afiação do cortador e para a própria operação de corte;

Avaliar o desempenho de diferentes coberturas do cortador de aço rápido (TiN e multicamadas TiCN + TiN), bem como o desempenho da ferramenta afiada e sem passar novamente pelo processo de recobrimento, o que faz com que ela não tenha cobertura em suas superfícies de saída e o desempenho de ferramentas afiadas e que passaram pelo processo de recobrimento e portanto, possuem cobertura total novamente.

Assim, após alguns ensaios de usinagem de dentes de engrenagens hipoidais, conclui-se que a rugosidade superficial do flanco do dente é um bom parâmetro para determinar o fim da vida da ferramenta. Além disso, conclui-se também que a ferramenta recoberta com TiN foi a que melhor desempenho apresentou dentre todas as testadas. Enfim, este trabalho está dividido em sete capítulos, quais sejam:

Capítulo 1 – Introdução

Capítulo 2 – Características Gerais- Análise do produto

Capítulo 3 – Características Gerais – Lâminas Alternadas Gleason

Capítulo 4 – Características Gerais – Extendendo a vida das Lâminas Alternadas Gleason

Capítulo 5 – Materiais, Equipamentos e procedimentos experimentais

Capítulo 6 – Resultados e discussões

Capítulo 7 – Conclusões e sugestões para futuros trabalhos

Capítulo 2

Características Gerais – Análise do Produtos

2.1 - Introdução

Quando se fala em estudar o desempenho de ferramentas de usinagem, logo se depara com uma grande quantidade de variáveis presentes em qualquer processo, que podem afetar de inúmeras maneiras os resultados de uma pesquisa. Assim, pode-se dizer que todo trabalho realizado no campo da engenharia de fabricação, precisa antes de mais nada, analisar todos os itens que participam diretamente do processo e que tem influência nos resultados. Desta forma, a análise do produto a ser fabricado é fundamental, pois características como geometria, o material do produto, o roteiro de fabricação influenciam no comportamento da ferramenta que está sendo utilizada na fase da manufatura.

Quando se fala em ferramentas do tipo lâminas alternadas gleason logo se associa à fabricação de engrenagens cônicas e hipoidais, que são, portanto ponto fundamental deste estudo.

Segundo Price (1999) os primeiros estudos com engrenagens aconteceram respectivamente por volta de 300 A.C. com Ctesibios da Alexandria e posteriormente com Aristóteles em 280 A.C. A maior evidência do uso prático de engrenagens se deu com Arquimedes em 250 A.C, em um extraordinário mecanismo de relógio. Depois de Arquimedes, outro marco, foi o mecanismo de Antikythera, por volta de 80 A.C .

Porém, foi a partir de fins do século XVIII e início do século XIX que começou a tornar forma a conceituação do uso e do projeto de engrenagens e o aperfeiçoamento no processo de fabricação, segundo Rodrigues, Agostinho e Lirani (1978).

Assim, as engrenagens passaram por um longo desenvolvimento, chegando ao perfil evolvente, permitindo um melhor engrenamento, baixo nível de ruído, maior resistência a esforços mecânicos, etc..

2.2 - Modelos de Engrenagens

A engrenagem é um dos elementos mecânicos mais tradicionais na fabricação mecânica, tanto pelo tipo de cálculo necessário, como pelos diferentes processos de usinagem.

Segundo Niemann (1971) e Stadtfeld (2000) as engrenagens podem ser definidas como elementos de máquinas cuja função é a transmissão regular de movimento rotatório de um eixo para outro, geralmente com uma razão de velocidade angular constante. Para que possam atuar eficientemente, as engrenagens são providas de dentes, os quais engrenam para impedir o escorregamento entre o par a medida que giram juntos. A razão entre o número de dentes nos membros estabelece a razão de velocidade do par.

Engrenagens cilíndricas de dentes retos e engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais possuem um largo campo de aplicação em todos os segmentos industriais. A figura 2.1 mostra alguns exemplos desses tipos de engrenagens. (Niemann, 1971)

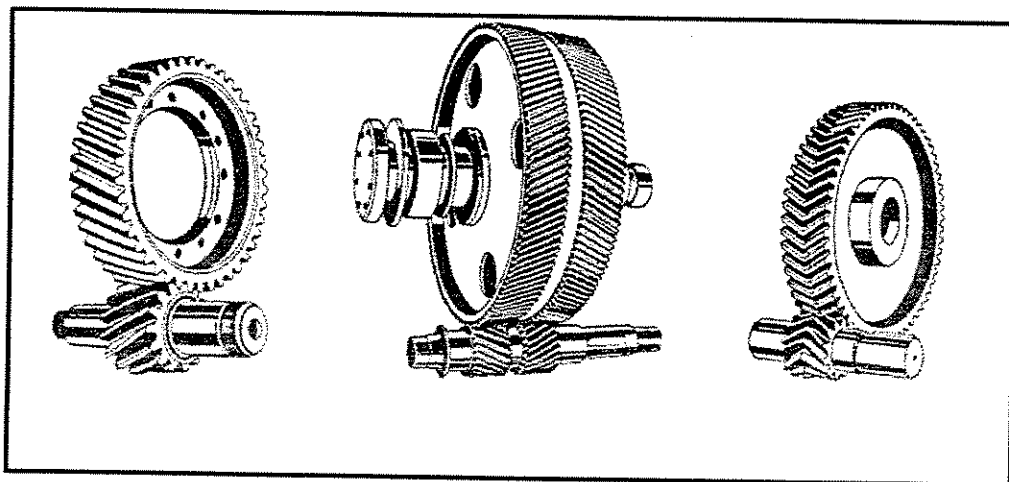


Fig. 2.1 – Tipos de engrenagens cilíndricas

Conforme apostila técnica da empresa Moto Peças Transmissões (1990) e Stipkovic (1987) é natural classificar as engrenagens de acordo com as posições relativas dos eixos que elas fazem parte. Em geral, são possíveis quatro posições relativas, e todas as engrenagens podem ser classificadas sob uma delas, como segue:

- Eixos paralelos
- Eixos cruzados
- Eixos que cortam-se
- Eixos reversos ou com deslocamento

Assim, os blanks para engrenagens em operação sobre eixos paralelos são de forma cilíndrica, apresentando dentes retos ou helicoidais. Para as engrenagens em operação sobre eixos cruzados, os blanks são produzidos de de forma cilíndrica, apresentando dentes helicoidais. Coroa e parafuso sem fim é um exemplo clássico de aplicação de eixo cruzado. Eixos que cortam-se são aqueles que passam pelo centro da engrenagem e se cruzam num ponto, formando na maioria das vezes, um ângulo de 90° entre eles, os blanks são produzidos na maioria das vezes em forma de tronco de cones e podem apresentar dentes retos, inclinados ou espirais. Para eixos reversos ou com deslocamento os blanks são produzidos em forma de troncos de hiperbolóides e apresentam dentes hipoidais.

2.2.1 - Modelos de Engrenagens Espirocônicas

Dentre os tipos de engrenagens existentes, destacam-se as cônicas e, particularmente, as espirocônicas (pela sua técnica e especialidade), que são utilizadas para transmissões angulares de força e movimento de rotação, sendo aplicadas em automóveis, caminhões, ônibus, tratores e em máquinas-ferramentas, entre outros. (Nascimento, 1989).

Segundo Niemann (1971), Dudley (1992) e Gleason (2001) as engrenagens espirocônicas são utilizadas em eixos que cortam-se e também em eixos reversos ou com deslocamento, principalmente em eixos traseiros de veículos automotores, permitindo transmissão de altos torques com baixo nível de ruído.

Devido à complexidade da geometria superficial dos dentes espirocônicos, necessitam-se de cálculos, processos de fabricação e equipamentos de usinagem especiais. (Nascimento,1989)

A figura 2.2 (Gleason ,2001) mostra uma aplicação de um tipo de engrenagem espirocônica aplicada em um eixo traseiro de um veículo automotor (engrenagem hipoidal).

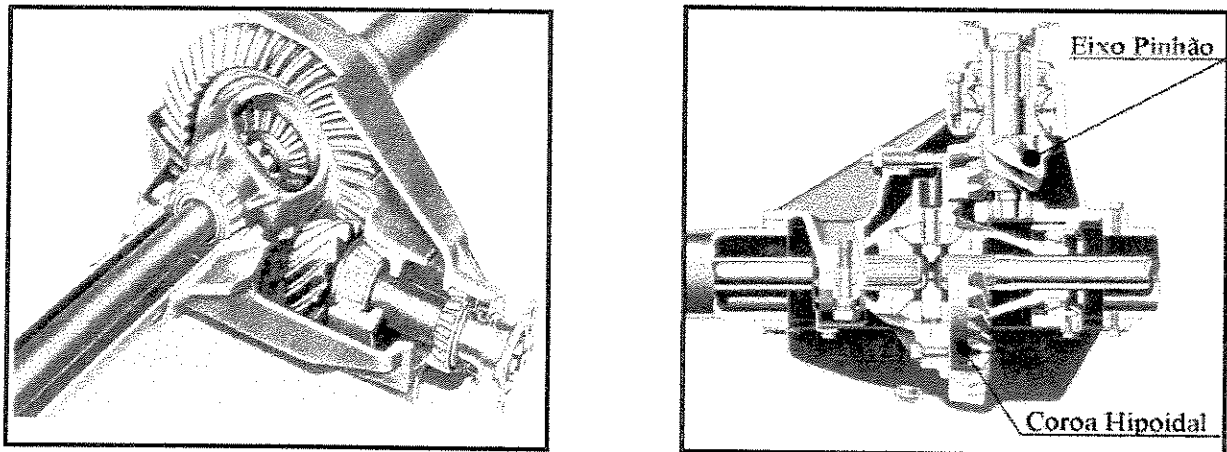


Fig. 2.2 - Aplicação de engrenagem espirocônica

Os tipos de engrenagens espirocônicas mais utilizados são:

- Engrenagem cônica de dentes retos
- Engrenagem cônica espiral
- Engrenagem cônica zeral
- Engrenagem hipoidal

Estas engrenagens cônicas, como seu nome indica, são engrenagens cujos dentes são cortados num tronco de cone, como mostra a figura 2.3 (Gleason ,2001)

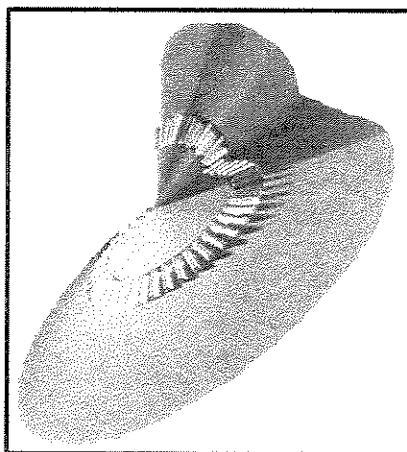


Fig. 2.3 – Princípio básico – Tronco de cone

As engrenagens cônicas de dentes retos são as mais antigas, simples e até hoje são muito utilizadas. Os dentes são retos e cônicos. As engrenagens cônicas de dentes retos possuem uma linha de contato estendida que atravessa todo o comprimento do dente. (Dudley ,1992) e (Gleason ,2001). A figura 2.4, (Gleason ,2001) mostra um par de engrenagem cônica com dentes retos.

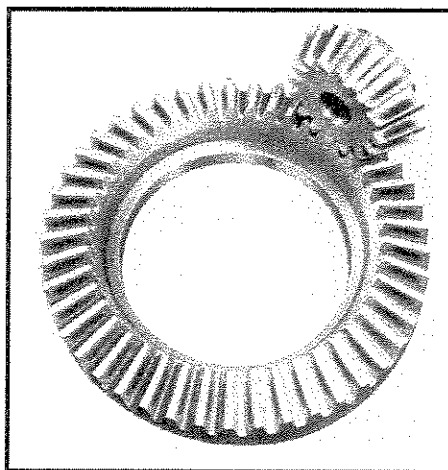


Fig. 2.4 – Engrenagem cônica reta

Engrenagens cônicas espirais são uma variante das engrenagens cônicas retas. Se uma engrenagem cônica de dentes retos for cortada em infinitos números de pequenas seções e cada um dessas pequenas seções forem deslocadas angularmente uma das outras, não concorrendo mais ao vértice do cone, obtém-se uma engrenagem cônica espiral, (Stadtfeld, 2000) e (Gleason ,2001). A figura 2.5 mostra essa evolução.

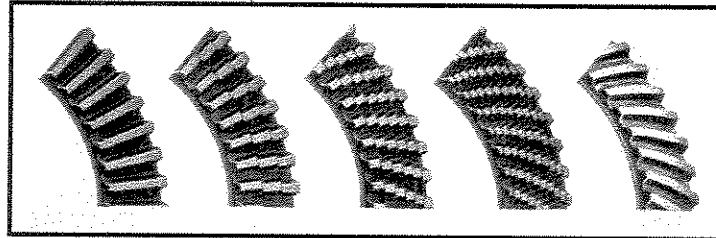


Fig. 2.5 - Evolução do dente espiral

Segundo Nascimento (1989) e Gleason (2001) as engrenagens cônicas espirais possuem dentes curvos e oblíquos. Estas engrenagens apresentam um funcionamento mais suave que as cônicas de dentes retos, devido à maior superposição ou overlapping. (Há sempre mais que um dente em contato simultaneamente). Esse fator propicia um engrenamento gradual e constante de uma extremidade do dente até a outra, transmissões angulares e altas velocidades com baixo ruído e vibração.

Neste tipo de engrenagem a linha de centro do pinhão coincide com o centro da coroa. A figura 2.6, (Gleason ,2001), mostra um par de engrenagem cônicas espiral.

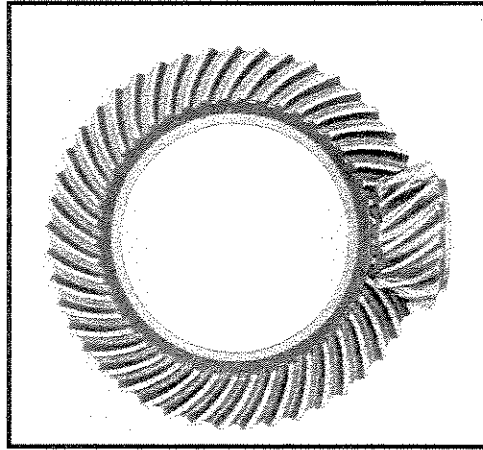


Fig. 2.6 - Engrenagem cônica espiral

A engrenagem cônica zeral é uma forma especial de engrenagem cônica, pois o ângulo de inclinação espiral está compreendido entre 0° a 10° . A linha de centro do pinhão coincide com o centro da coroa, como nos dois tipos anteriores até aqui citados.

Segundo Gleason (2001), seu funcionamento é similar às engrenagens cônicas retas, pois as duas tem as mesmas características nos índices de transmissão de torque. Porém, são extremamente empregadas na indústria de aeronaves, onde engrenagens com maior precisão são geralmente requeridas. Isso ocorre, porque os dentes de engrenagens cônicas retas não podem ser retificados devido a geometria do dente, ao contrário dos dentes de engrenagens cônicas espirais e zeral que podem ser retificados, obtendo assim uma engrenagem mais precisa, funcionamento mais suave, contato localizado e menores níveis de ruídos.

A figura 2.7, (Gleason ,2001) mostra um par de engrenagem cônica zeral.

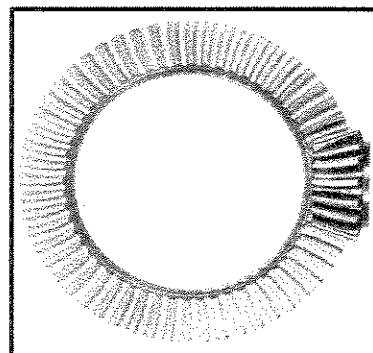


Fig. 2.7 Engrenagem cônica zeral

Engrenagem hipoidal é o tipo de engrenagem escolhida para a elaboração deste trabalho. É um tipo de engrenagem que apresenta uma geometria extremamente complexa e, portanto, para a elaboração de projetos, bem como sua fabricação, são necessários conhecimentos técnicos específicos. Trata-se de um mecanismo relativamente novo, introduzido pela Gleason Works em 1925 e, desde então, seu uso foi difundido com sucesso na indústria em geral e, principalmente, no setor automobilístico.

Dessa forma, este estudo pretende dar uma contribuição a este assunto tão pouco explorado no meio acadêmico.

Segundo Nascimento (1989), Dudley (1992) e Gleason (2001) as engrenagens cônicas hipoidais são engrenagens de dentes curvos e oblíquos, nos quais os eixos (linha de centro) são reversos. A linha de centro do pinhão é deslocada do eixo da coroa à uma distância teórica estabelecida em cálculos e recomendações práticas da Gleason Works.

Os eixos não se encontram no mesmo plano, mas sim em planos diferentes. Os dois eixos estão em dois planos geométricos paralelos, separados por uma distância denominada “decalagem” (mais conhecida como off set - ver figura 2.10).

O nome hipoidal vem do fato de que as duas engrenagens (coroa e pinhão), teoricamente, constituem troncos de hiperbolóides que, na prática, confundem-se com troncos de cones (ver fig. 2.3 troncos de cones)

Portanto, Gleason (2001), coloca que engrenagens hipoidais não são engrenagens cônicas, mas possuem forma parecida. Assim como as engrenagens cônicas, a maioria das engrenagens hipoidais operam com eixos a 90° , embora uma ampla faixa de outros ângulos podem ser usados.

A figura 2.8, (Gleason, 2001) mostra os troncos de hiperbolóides de engrenagens hipoidais.

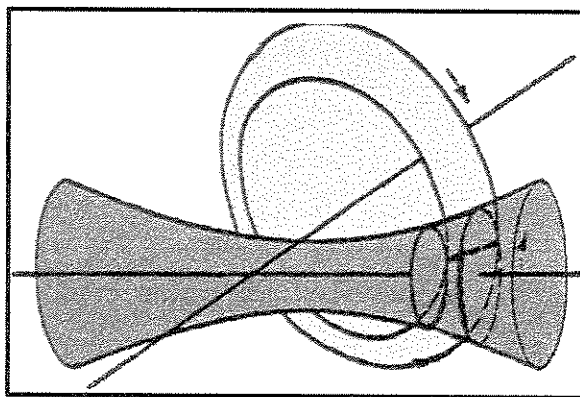


Fig. 2.8 - Troncos de hiperbolóides

As engrenagens hipoidais encontraram um vasto campo de aplicação na indústria automobilística. Além de permitirem uma construção mais baixa do túnel do eixo de transmissão, abaixando o centro de gravidade dos veículos, ainda apresentam a vantagem de possuir um pinhão mais robusto que o do sistema helicoidal, com o mesmo número de dentes. Isto permitiu a construção de pinhões com menor número de dentes, e, portanto, uma relação de transmissão maior, sem o enfraquecimento do pinhão. Além disso, são responsáveis pela transmissão do movimento da marcha frente e da marcha ré para as rodas dos veículos.

A figura 2.9, (Gleason, 2001) mostra um par de engrenagem hipoidal. A figura 2.10, Gleason (2001), mostra a distância de decalagem ou offset em um par de engrenagem hipoidal.

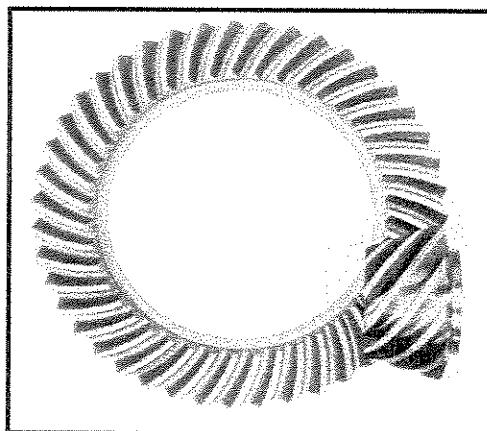


Fig. 2.9 – Engrenagem Hipoidal

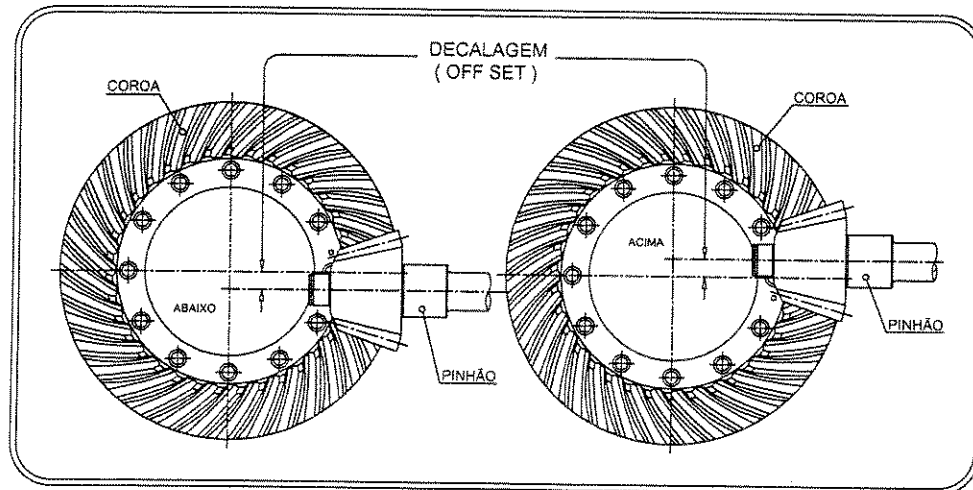


Fig. 2.10 - Distância de decalagem (OFF SET)

Segundo Dudley's (1992) e Gleason (2001) as vantagens da distância de decalagem são:

- Um par mais forte, com um engrenamento mais suave entre os dentes, quando comparado a outros tipos de engrenagens cônicas
- Aumento do tamanho do pinhão, criando um contato mais eficiente entre os dentes no engrenamento, deixando o pinhão mais resistente.
- Comprimento e profundidade do dente maiores, permitindo maior facilidade na operação final de lapidação do dentado da coroa e pinhão.
- Podem ser retificados para ter uma melhor qualidade do dentado e, assim, ter um melhor controle da localização da marca de contato entre os dentes.

A tabela 2.1, (Gleason ,2001), mostra uma comparação de características entre engrenagens hipoidais e engrenagens cônicas espirais.

Tabela 2.1 - Comparação entre características de engrenagem hipoidal e cônica espiral

CARACTERÍSTICAS	ENGRENAGEM HIPOIDAL	ENGR. CÔNICA ESPIRAL
SILÊNCIO DE FUNCIONAMENTO	MAIS SILENCIOSO	SILENCIOSO
RESISTÊNCIA	30% MAIS RESISTENTE CONFORME DISTÂNCIA DE DECALAGEM (OFF SET)	MAIS BAIXA
RESISTÊNCIA AO PITTING (CAVIDADE)	175% MAIS RESISTENTE CONFORME DISTÂNCIA DE DECALAGEM (OFF SET)	MAIS BAIXO
RESISTÊNCIA AO SCORING (ENTALHE)	MAIS BAIXO	200% MAIS RESISTENTE
RENDIMENTO (100%)	96% CONFORME CARGA E RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO	99% CONFORME CARGA E RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO
LUBRIFICAÇÃO	E.P. (EXTREMA PRESSÃO)	M.E.P. (MÉDIA PRESSÃO)
FABRICAÇÃO	MAIOR LARGURA DO FUNDO DO DENTE, MAIS FÁCIL PARA A LAPIDAÇÃO	MENOR LARGURA DO FUNDO DO DENTE, MAIS DIFÍCIL PARA A LAPIDAÇÃO
RELAÇÃO	PERMITE ALTAS RELAÇÕES DE TRANSMISSÃO	MELHOR PARA BAIXA RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO
POSIÇÃO DO CENTRO DE GRAVIDADE DO VEÍCULO	PERMITE EIXO DE ACIONAMENTO MAIS BAIXO	EIXO DE ACIONAMENTO MAIS ALTO
DIÂMETRO EXTERNO DO DIFERENCIAL	MENOR DEVIDO À POSIÇÃO DO PINHÃO	MAIOR
REAÇÃO NOS ROLAMENTOS	MAIS FORÇA CONTRA O ROLAMENTO DO PINHÃO	MENOS FORÇA CONTRA O ROLAMENTO DO PINHÃO

Vale salientar que o objetivo deste trabalho está no estudo do processo de corte dos dentes de uma engrenagem hipoidal, mais precisamente, da engrenagem conhecida como “coroa”. É bom lembrar que um par de engrenagens hipoidais é constituídos por uma coroa e um pinhão.

Segundo Henriot (1972) e Nascimento (1989) o pinhão é a engrenagem com o menor diâmetro externo ou menor número de dentes e, geralmente, é o elemento motor. A coroa é a engrenagem com o maior diâmetro externo ou maior número de dentes e, geralmente, é o elemento movido.

Como os processos de corte dos dentes de coroas e pinhões são diferentes, os testes e resultados deste trabalho se aplicam apenas para as coroas. Para coroas espirais e zero as conclusões deste trabalho são válidas, pois o processo de corte pode ser o mesmo.

Porém, para coroas cônicas de dentes retos as conclusões deste trabalho não podem ser aplicados, pois o processo de corte do dente é diferente.

2.3 - Nomenclatura de Engrenagens Hipoidais

A figura 2.11, (Gleason, 2001) mostra a nomenclatura básica aplicada em engrenagens hipoidais.

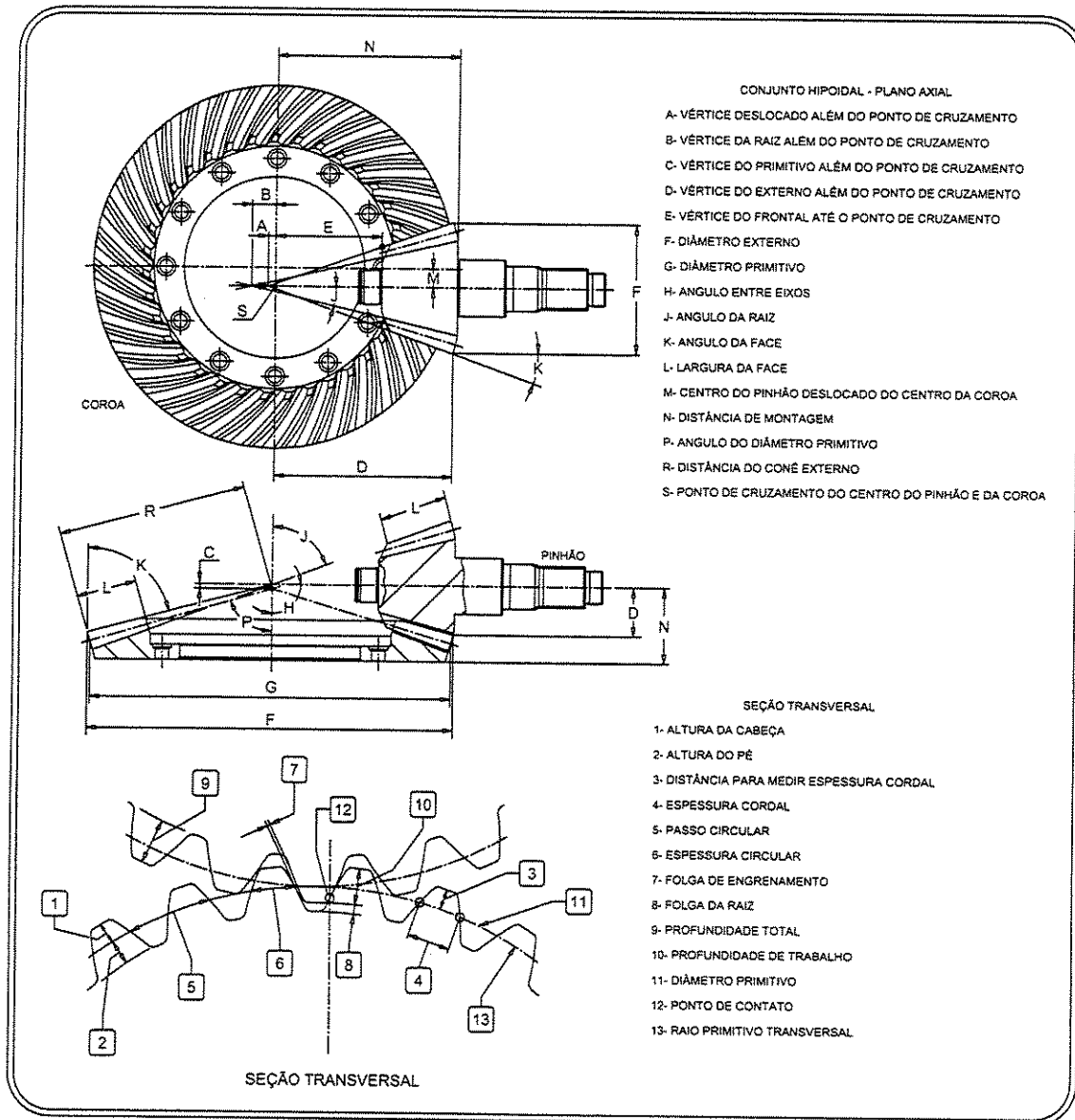


Fig. 2.11 - Nomenclatura básica de conjuntos hipoidais

A geometria superficial dos dentes de engrenagens hipoidais e cônicas é muito complexa. A figura 2.12 mostra os termos básicos usados para definir essa superfície.

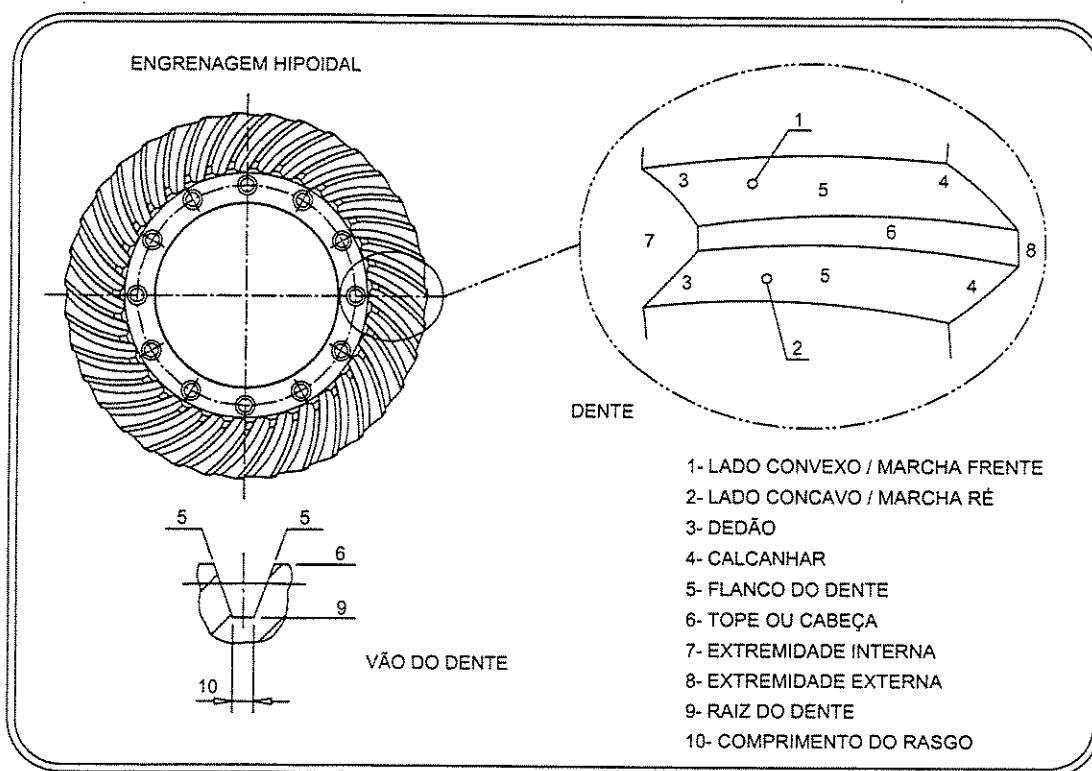


Fig. 2.12 - Nomenclatura do dente da engrenagem hipoidal

2.4 - Projeto de Engrenagens cônicas e hipoidais

As características de projeto de uma engrenagem hipoidal dependem do tipo de aplicação, das solicitações mecânicas a que será submetida, como esforços de torção, rotações e do espaço físico disponível para a engrenagem. (Dudley, 1992).

Os requisitos necessários para a criação de uma engrenagem hipoidal podem ser obtidos de duas maneiras. O primeiro modo é através de cálculos manuais. Esta maneira é muito demorada e não permite análise de contato dos dentes antes da usinagem (análise simulada no computador), de maneira precisa. O segundo modo é através de cálculos utilizando um programa chamado IBM RISK CAGE. Este programa, desenvolvido através de uma parceria entre as empresas Gleason Works, IBM Corporation, Hewlett Packard e Zeiss, permite o dimensionamento da engrenagem de forma precisa e rápida, permitindo a análise de contato dos dentes ainda na fase do projeto.

Segundo Gleason (2001), para elaborar um par de engrenagens hipoidais são necessários alguns dados:

- Determinar as condições de torque e rotação máximas
- Adotar ângulos de pressão, ângulo da espiral, valores de offset, módulos, número de dentes e comprimento de contato dos dentes através de tabelas da Gleason Works
- Determinar o método de corte dos dentes do par hipoidal.
- Determinar a relação de transmissão do conjunto (pinhão e coroa)
- Determinar o diâmetro do cortador dos dentes.
- Definir qual o tipo de máquina a ser usada entre máquinas CNC ou com acionamento mecânico.

Com a entrada de todos estes dados no software CAGE são obtidas todas as dimensões do par hipoidal (pinhão e coroa).

Os dados obtidos são divididos em 3 partes, segundo Gleason (2001):

1) Folha de dimensões: contém todas as dimensões do blank da engrenagem, o comprimento da ponta da ferramenta (blade point), o comprimento do fundo do dente da engrenagem (pont width). Contém também todos os dados de resistência mecânica da engrenagem, as folgas de engrenamento, entre outros dados.

2) Sumário: contém todas as especificações da ferramenta do corte de dentes do par hipoidal. Fornece todas as dimensões da geometria do dente e todos os dados necessários para a preparação da máquina de cortar os dentes das engrenagens. Sem o sumário é impossível cortar um par de engrenagens hipoidais funcional. Em paralelo à fase de elaboração do sumário é necessário verificar o contato superficial entre a coroa e o pinhão. Assim, o programa gera uma

simulação do contato, para verificar a posição deste contato ao longo do dente e também o sentido do contato. Esta verificação é chamada de simulação T.C.A., a qual será abordada nos próximos itens. (ver figura 2.25 – análise de Bias – TCA). É através desta simulação virtual de contato que se faz a aprovação preliminar do sumário.

3) Análise da topografia do dente: o programa gera um conjunto de dados para possibilitar o mapeamento do dente da engrenagem, verificando toda a superfície do dente, tanto do lado côncavo, quanto do lado convexo. Estes dados são enviados para uma máquina CNC quadrimensional ZEISS. A máquina possui um programa chamado HP ZEISS-G-AGE que interpreta os dados gerados pelo programa IBM-RISK-CAGE. Desta forma a máquina executa a varredura do dente da engrenagem. Essa etapa acontece após o corte dos dentes da primeira amostra.

2.5 - Processo de fabricação de engrenagens hipoidais

Para se chegar às condições ideais de fresamento do dentado de uma engrenagem é necessário realizar determinadas operações, seguindo um processo de fabricação, que permita obter as características ideais, tanto dimensionais como da forma do blank.

De uma maneira geral, Niemann (1971) coloca que a escolha do processo de fabricação depende do material, das dimensões, do número de peças a serem fabricadas e da qualidade final do dentado. Nas engrenagens usadas em máquinas, na indústria automobilística, figuram em primeiro plano os processos de fabricação com formação de cavaco, tais como, torneamento, fresamento, brochamento e retificação. A fabricação sem formação de cavaco, mediante a fundição, injeção, prensagem, forjamento e sinterização em moldes, são empregados principalmente em engrenagens pequenas, para grandes lotes de peças.

Quirino (2000) coloca que 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 apenas 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.

O volume de peças a ser produzido durante um determinado período ou mesmo uma produção mensal deve ser levado em consideração, pois afeta diretamente na escolha do processo de fabricação adotado.

Assim, 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 exigidos no projeto.

Esse sistema de referências para a usinagem procura levar em conta, a forma de utilização e desempenho do produto. Portanto, para engrenagens cilíndricas em geral ou engrenagens espirocônicas é razoável se ter o furo e as faces como locais de apoio e fixação, formando o sistema de referências de manufatura geralmente adotado. Vale salientar que esse sistema necessita que tais referências tenham valores dimensionais precisos para garantir uma melhor fixação e diminuir ao máximo os problemas gerados pela folga entre peças e dispositivos de fixação nas operações de corte do dentado.

As fases de produção para engrenagens cilíndricas e para engrenagens hipoidais (coroas) são similares.

Segundo Rodrigues, Agostinho e Lirani (1978) e Quirino (2000) estas fases são:

- Operações de torneamento da peça;
- Operações de brochamento do furo quando necessário
- Operações de abertura de dentes

- Operações de acabamento do dente antes ou após tratamento térmico
- Operações de retificação de furos e faces
- Atualmente é possível realizar operações de tornamento após tratamento térmico em furos e faces em substituição às operações de retificação.

Entretanto, para engrenagens cônicas e hipoidais é necessário acrescentar algumas operações ao processo de manufatura, para se obter o produto final. Estas operações estão relacionadas ao acabamento final da engrenagem após o tratamento térmico.

Gleason (2000), coloca 3 opções de operações para acabamento final dos dentes da coroa e do pinhão, quais sejam:

- Retificação
- Corte do dentado com metal duro em acabamento após tratamento térmico
- Lapidação

Stadfeld (1993) coloca que o mais comum dos processos usados é a lapidação. Lapidação é um processo de corte em que partículas abrasivas são depositadas entre o contato dos dentes da coroa e do pinhão. Geralmente esses abrasivos são partículas de carvão de silício.

Durante a operação de lapidação, o pinhão e a coroa giram a uma determinada rotação para melhorar o acabamento superficial e o contato do dente. É também necessário deslocar o pinhão em relação à coroa de modo a mover o contato e a área total da superfície do dente.

A combinação de forças normal e de deslizamento entre as superfícies dos dentes engrenados permite às partículas remover matéria-prima suficiente, de forma que as superfícies sejam alteradas significativamente. Com o processo de lapidação, o acabamento superficial do flanco do dente pode ser melhorado para $R_a 0,8 \mu\text{m}$ – $R_a 1,6 \mu\text{m}$ dentro de um razoável tempo de operação,

além de deixar uma desejável micro-estrutura na superfície de flanco e remover as distorções do tratamento térmico em toda a extensão do dente.

Durante o processo de lapidação sempre um pinhão e uma coroa estão montados e dessa forma, acasalados ao mesmo tempo sem a necessidade de outro equipamento ou processo. Portanto, lapidar um conjunto hipoidal é o mais econômico e rápido processo de acabamento final dos dentes. Após a coroa e o pinhão terem sido lapidados juntos e estarem com qualidade conforme especificado em processo, eles devem permanecer juntos durante toda a vida útil. (Bollinger, VG, Kimmet, GJ, 1973).

Segundo Stadtfeld (2000) a lapidação permite uma transmissão mais suave, com baixos níveis de ruídos. O acasalamento das superfícies de contato entre os dentes da coroa e do pinhão na operação de lapidação, permite um bom filme de óleo hidrodinâmico entre as áreas de contato, um melhor controle das folgas de engrenamento e uma vida útil maior.

O processo de lapidação pode corrigir certos níveis de acabamento superficial decorrentes da operação de corte dos dentes. Esses valores, porém, não devem ultrapassar os valores indicados pela norma AGMA 390.03 e pelas recomendações da empresa Gleason Works (ver tabela 2.2).

Segundo Stadtfeld (2000) quando não são respeitados esses valores ocorrem alguns problemas como:

- Aumento do tempo de lapidação
- Acasalamento ruim entre os dentes da coroa e do pinhão
- Muitas vezes, mesmo com um tempo maior de lapidação, não é possível corrigir o acabamento superficial dos flancos dos dentes. Isso leva à queda nos níveis de qualidade do produto ou ao sucateamento do par.
- Aumento do ruído em funcionamento

- Aumento das vibrações em funcionamento
- Dificuldades em corrigir o contato entre coroa e pinhão
- Desgastes prematuros da coroa e do pinhão

Na figura 2.13, Stadtfeld (2000) mostra a operação de lapidação de um par de engrenagem hipoidal.

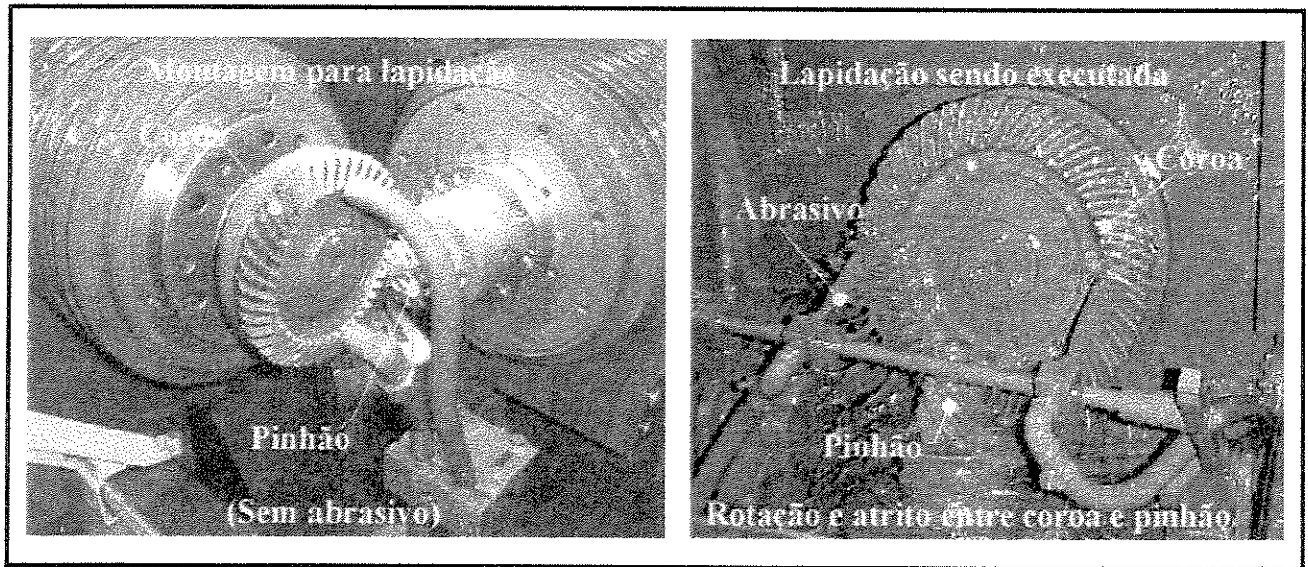


Fig. 2.13 – Processo de lapidação

Este trabalho foi idealizado para um processo de fabricação de engrenagens hipoidais utilizando a lapidação como meio de acabamento final dos dentes das engrenagens. Isso se deve ao fato de que, atualmente, 85% das engrenagens hipoidais produzidas são acasaladas através do processo de lapidação. (Stadtfeld, 2000).

Finalizando, em engrenagens (coroas) hipoidais o furo é utilizado como referência para fixação e guia para operações de corte e acabamento do dente. A referência axial é a face da peça, utilizada como apoio nas operações de corte e acabamentos nos dentes.

A figura 2.14, conforme processo de usinagem de coroas hipoidais da empresa onde se realizou este trabalho, mostra as fases de produção a partir de um forjado, cujo material é aço.

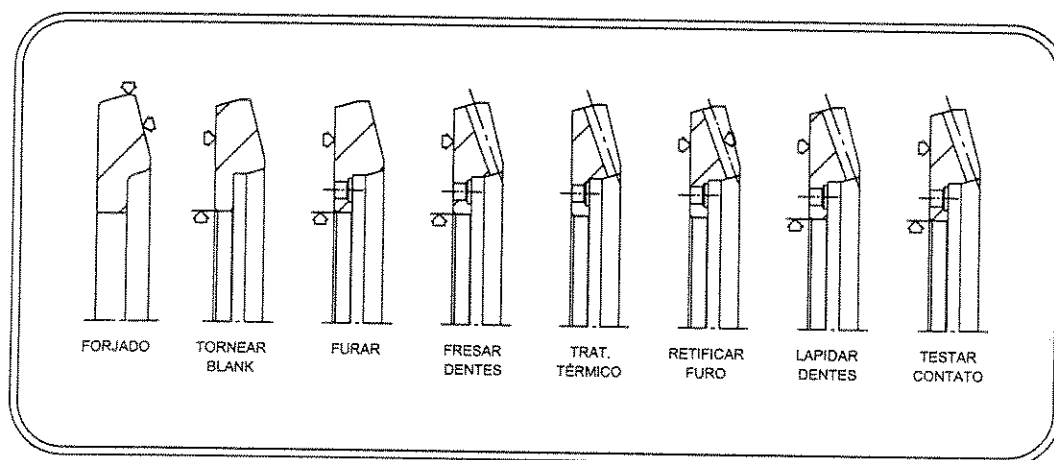


Fig. 2.14 - Processo de fabricação de coroas hipoidais

2.6 – Exigências na fabricação de Engrenagens Cônicas e Hipoidais

2.6.1 – Características Gerais

O desenvolvimento geral das técnicas de acionamento exige, cada vez mais, o uso de engrenagens para transmissão de potências e/ou torques e frequências de rotação. Esta circunstância obriga que as engrenagens tenham maiores precisões geométricas e, conseqüentemente, melhor comportamento em operação. (Reibner, 2001).

Segundo Quirino (2000), o estudo da fabricação e do controle de engrenagem dentro engenharia de fabricação reveste-se de uma importância relativamente grande, visto que tais elementos 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.

A engrenagem é de certa forma um elemento complexo no que se refere principalmente aos ajustes, pois seu funcionamento exige intercambialidade múltipla. Assim, necessita antes de ser estudada, que sejam primeiramente conhecidas sua terminologia, tipos de engrenagens, processo de fabricação, meios de controle dimensional, etc. (Rodrigues, Agostinho e Lirani (1978)).

Assim, uma máquina de cortar dentes de engrenagens espirocônicas, moderna e em boas condições, cortará uma engrenagem que conforme o especificado em projeto, desde que o blank esteja preciso, a máquina esteja corretamente ajustada e equipada com ferramentas e dispositivos adequados. Porém, apenas cortar corretamente os dentes não significa que teremos uma boa engrenagem acabada, visto que todas as operações, antes e depois do corte dos dentes, precisam ser realizadas corretamente.

Para que se possa controlar os erros da fabricação de engrenagens é necessário acompanhar todo o processo de manufatura e funcionamento. Entende-se aqui, desde a preparação do “ blank” para o corte dos dentes, seguindo as operações de corte dos dentes, tratamento térmico e operações de acabamento. (Quirino ,2000).

Rodrigues, Agostinho e Lirani (1978) e Quirino (2000) colocam que a melhor maneira de se estudar os erros de fabricação é através da abordagem dos seguintes tópicos:

- Controle do “ Blank” como corpo da engrenagem
- Controle do dentado
- Controle do dentado em disposição de funcionamento

2.6.2 - Controle do corpo da engrenagem

A principal característica de uma engrenagem é a qualidade de seu dentado, proporcionando transmissão de movimento com baixa vibração e ruídos. A usinagem dos dentes de uma engrenagem deve acontecer em um blank que esteja com especificações corretas.

Um bom blank só será possível se o projeto estiver correto, o material estiver conforme especificado e todo o processo de usinagem for corretamente realizado. Quando utilizados forjados, estes devem ter boas características metalúrgicas e de forjamento.

É evidente que o primeiro passo é fixar as referências básicas, ou seja, os pontos fundamentais que estabelecem todo o sistema de cotagem. Estas referências serão utilizadas principalmente para proporcionar e dar ao blank no momento da fixação, centragem na operação de corte do dentado, bem como na usinagem final de faces e furos. Estes pontos devem ser respeitados durante todo o processo de fabricação e inspeção. Isto quer dizer que todo dispositivo necessário à usinagem e todo o processo de inspeção terá obrigatoriamente que fixar suas referências nesses pontos básicos.

O importante é diminuir ao máximo os erros do blank, para diminuir ou minimizar os erros do dentado da engrenagem.

Kumar (1999), em estudo sobre a fabricação de engrenagens, coloca que o erro inicial do blank afeta todas as operações seguintes. Assim, estabelece-se uma hereditariedade de erros, ou seja, os erros são passados para as operações posteriores. Esse fato prejudica principalmente a operação de corte dos dentes que acaba absorvendo os erros dos blanks.

Segundo Rodrigues, Agostinho e Lirani (1978) os itens básicos que devem ser observados no controle do “ blank” de uma engrenagem são:

- Paralelismo das faces
- Bastimento das faces em relação ao furo
- Batimento dos diâmetros externos em relação ao furo

Stadtfeld (1993) acrescenta alguns itens básicos para engrenagens cônicas e hipoidais, quais sejam:

- Posicionamento radial e axial (Radial and axial position) - Duas das mais importantes superfícies em um blank são aquelas usadas para localizar a engrenagem radialmente e

axialmente na máquina de corte de dentes. Essas superfícies também são usadas para a montagem das engrenagens no conjunto final

- Ponto de crista (Crown point back) - É a distância da superfície de encosto da engrenagem (coroa) até a intersecção do ângulo de face com ângulo de encosto. Em alguns casos, esta intersecção acontece entre o ângulo de face e o diâmetro externo da engrenagem.
- Ângulo da face (Face angle) - Em engrenagens cônicas e hipoidais, é o ângulo entre a face cônica da engrenagem (coroa) e o eixo de giro.
- Ângulo de encosto (Back angle) - É o ângulo entre a face cônica de encosto de uma engrenagem (coroa) e o plano de rotação. Geralmente é perpendicular ao ângulo do diâmetro primitivo da engrenagem (coroa).
- Diâmetro externo (Outside dia)
- Superfícies cônicas (Conical surfaces)

Como as engrenagens trabalham em conjunto, cada membro do par tem que estar em sua posição axial adequada. Para isso, os vértices dos cones do pinhão e da coroa devem coincidir. Para que os vértices coincidam o blank deve ser adequadamente posicionado durante todas as operações de usinagem.

As tolerâncias para todos os requisitos básicos que devem ser observados no blank, devem respeitar os valores especificados conforme a norma AGMA 390.03 (Associação Americana de Construtores de Engrenagens)

A figura 2.15, Gleason (1990) mostra os requisitos básicos de controle de um blank de engrenagem hipoidal e os principais pontos de referência.

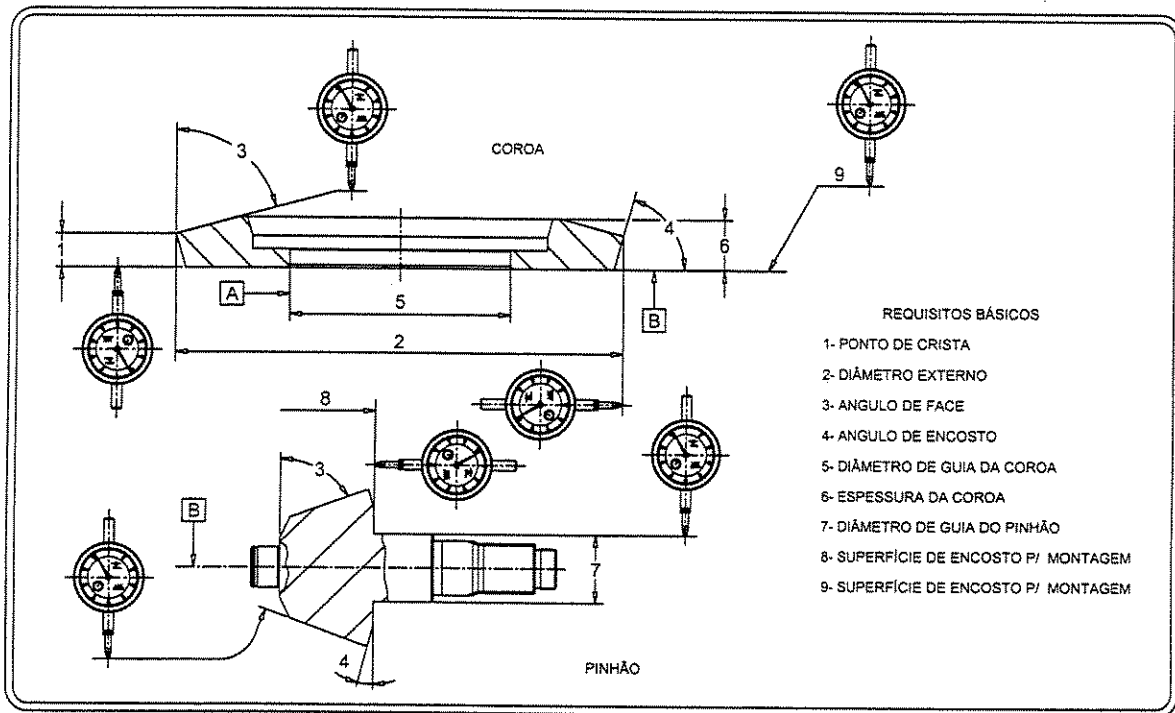


Fig. 2.15 - Requisitos básicos no corpo da engrenagem

2.6.3 - Controle do dentado

Dudley (1992) coloca que uma inspeção analítica de engrenagem abrange os vários métodos que checam as características dimensionais do dentado. Nela estão incluídos os requisitos de controle individual de cada engrenagem e o controle em condição de funcionamento. Através da análise destes requisitos é que se estabelece o roteiro de processo, quais os tipos de máquinas e a manutenção das características de processo para se obter a qualidade do dentado necessária a sua aplicação.

Segundo Rodrigues, Agostinho e Lirani (1978) e Quirino (2000) os erros e os controles necessários no dentado devem ser em grande parte correlacionados entre os dentes para assegurar uma condição tal que mantenha um funcionamento suave, boa relação de transmissão, ausência de atritos globais ou localizados, facilidade de lubrificação, baixo nível de ruído, etc.

Gleason (2000) coloca que uma engrenagem que não tem o grau de acuracidade adequado, pode ter um ou mais problemas na aplicação final, quais sejam:

- Ruído excessivo da transmissão
- Desgaste prematuro
- Fratura dos dentes
- Vibrações
- Falta de acuracidade de indexação
- Manutenção excessiva

As normas mais utilizadas para assegurar a acuracidade das engrenagens são: AGMA 390-03 (Associação Americana de Construtores de Engrenagens), DIN 3960, DIN 3962, ISO 1328 e, é claro, algumas normas internas de cada indústria, derivadas das principais, para atender ou adequar produtos e processos (Quirino (2000), Gleason (2000)).

Segundo Stadtfeld (1995) e Gleason (2000) as características de controle do dentado que devem ser controladas são:

- Variação do diâmetro primitivo: (Pitch variation) é a variação da distância entre um dente teórico para a real posição do dente usinado. Esta variação é controlada na linha do diâmetro primitivo. (Ver figura 2.16)

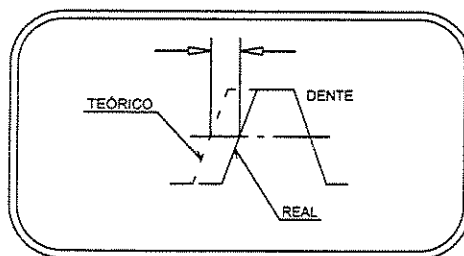


Fig. 2.16 - Variação do diâmetro primitivo

- Variação do espaçamento do dente: (Tooth spacing) é a variação de espaçamento medido dente a dente em torno da engrenagem. (Figura 2.17)

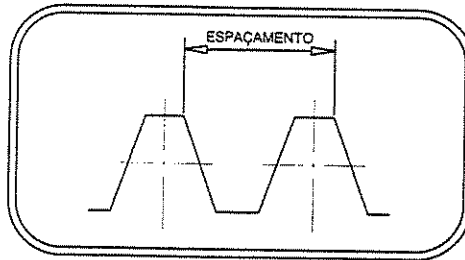


Fig. 2.17 - Variação de espaçamento do dente

- Variação de indexação: (Index Variation) é a variação do deslocamento da posição teórica angular ou linear de um dente para um ponto de referência de outro dente na sua posição real. (Figura 2.18)

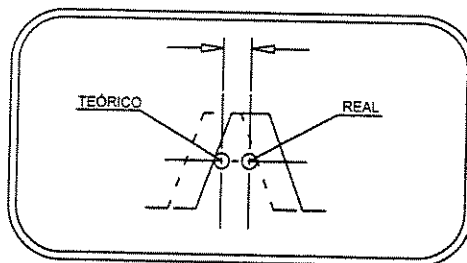


Fig. 2.18 - Variação de indexação

As características de controle até aqui citados referem-se à posição de indexação geral da engrenagem. A figura 2.19 mostra toda a unificação da precisão de indexação de uma engrenagem hipotética. Ela mostra o método de calcular o passo a partir dos valores medidos de espaçamento ou indexação.

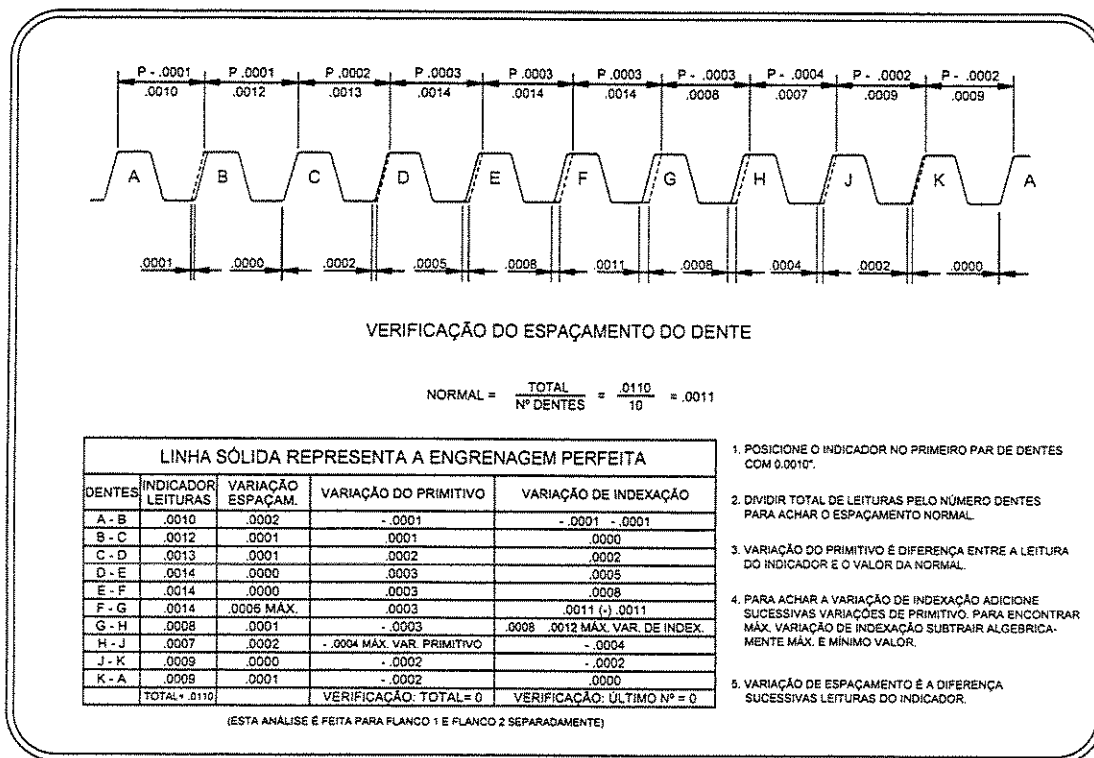


Fig. 2.19 - Verificação da precisão de indexação

Todos os requisitos de controle citados podem ser controlados através de instrumentos convencionais de medição para engrenagens cônicas e hipoidais e /ou através dos dados gerados pelo programa de cálculo G-AGE, citado no item 2.4 deste trabalho. Os dados gerados são passados para uma máquina quadrimensional CNC ZEISS, a qual executa todo o controle de precisão de indexação.

- Variação do tamanho dente: é a verificação da variação das dimensões do dente da engrenagem. Esta verificação pode ser dividida em duas etapas. A primeira é a verificação da espessura do dente da engrenagem, conforme figura 2.20. A Segunda é a verificação da altura do dente na região do diâmetro externo na engrenagem, conforme figura 2.21.

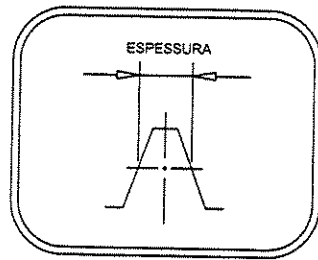


Fig. 2.20 - Espessura do dente

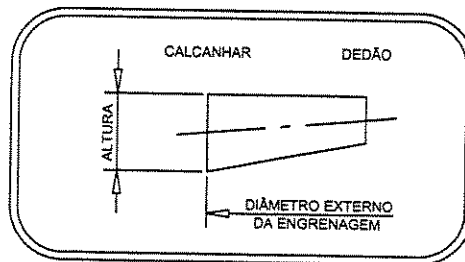


Fig. 2.21 - Altura do dente

- Superfície geométrica do dente: é a geração de toda a topografia superficial do dente da engrenagem. Estes dados são gerados tanto para o lado côncavo do dente (marcha frente), como para o lado convexo do dente (marcha ré). O programa G-AGE calcula as coordenadas necessárias para executar o mapeamento do dente. Ele divide o comprimento útil de contato do dente em 9 partes e a altura total do dente em 5 partes. Os pontos que se cruzam são as coordenadas na superfície do dente para a varredura. A verificação é feita por comparação dos dados teóricos calculados pelo programa para uma geometria ideal com uma peça usinada. Esta comparação também pode ser feita com um peça padrão ou master.

A figura 2.22 mostra o mapeamento da superfície do dente de uma engrenagem hipoidal (coroa).

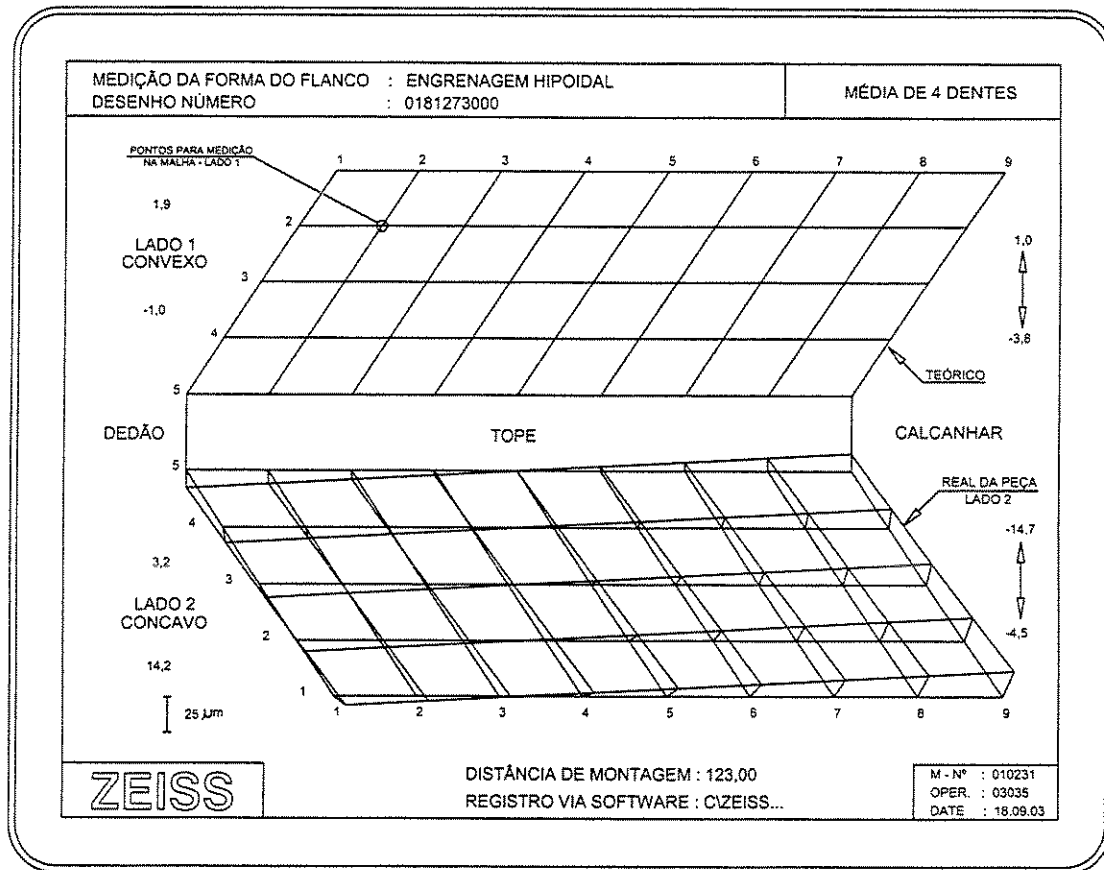


Fig. 2.22 - Mapeamento da superfície do flanco do dente

- Acabamento superficial do dente: é a textura superficial do flanco do dente. O acabamento superficial é analisado após cada operação de usinagem do dente no lado marcha frente, bem como no lado marcha ré. O acabamento superficial depende do tipo da máquina utilizada, do processo de corte, do tipo da ferramenta e do material da peça. A Gleason Works (2000) especifica o valor do acabamento superficial para cada tipo de operação ligada ao processo de usinagem do dente, conforme tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Valor da rugosidade para a usinagem do dente da coroa

TIPO DE USINAGEM	RUGOSIDADE - Ra (μm)
Corte do dente	1,0 - 2,3
Lapidação do dente	0,8 - 1,25
Retificação do dente	0,4 - 0,8

Entretanto, dependendo das características do aço ou das ferramentas, o acabamento superficial após o corte do dente torna-se-á Ra 4 μm . Esse fato acontece na empresa onde os ensaios foram realizados. Nesta empresa, se coloca um limite maior de acabamento para conseguir usinar um maior número de peças a cada afiação das lâminas.

O acabamento superficial influencia diretamente no tempo de lapidação, pois quanto mais grosseiro o acabamento superficial, maior será o tempo necessário de lapidação, aumentando custos e dificultando todo o processo produtivo.

Acabamentos superficiais grosseiros, além de dificultar a operação de lapidação, dificultam a análise de contato dos dentes, podem provocar o aumento de ruído em funcionamento, desgaste prematuro e aumento de vibrações.

2.6.4 - Controle do dentado em disposição de funcionamento

O controle do dentado em disposição de funcionamento é o conjunto de testes mais conclusivo para engrenagens cônicas e hipoidais. O teste é feito sob condições normais de funcionamento utilizando uma máquina apropriada para esta simulação funcional do conjunto final (coroa e pinhão). Nessas máquinas de testes, as engrenagens são rigidamente montadas na posição correta de funcionamento e são testadas sob aplicação de carga (Gleason, 1990).

O nível de ruído e a suavidade em operação, o formato e a posição do contato, o tamanho do contato, o acabamento superficial e os erros de desvio e espaçamento são todos perceptíveis pelo teste de funcionamento (Gleason, 2001).

Segundo Stadtfeld (1993) e Gleason (2001), os principais requisitos a serem verificados em disposição de funcionamento são:

- Formato e posição do contato: O contato do dente é uma indicação da forma correta de contato do dente acima e abaixo do seu perfil e a posição ao longo do seu comprimento. Ou seja, é a posição da superfície do dente da engrenagem que realmente faz contato com a sua conjugada. A análise do contato é sempre feita no dente da coroa. A figura 2.23, mostra um exemplo de verificação de contato no dente de uma coroa hipoidal.

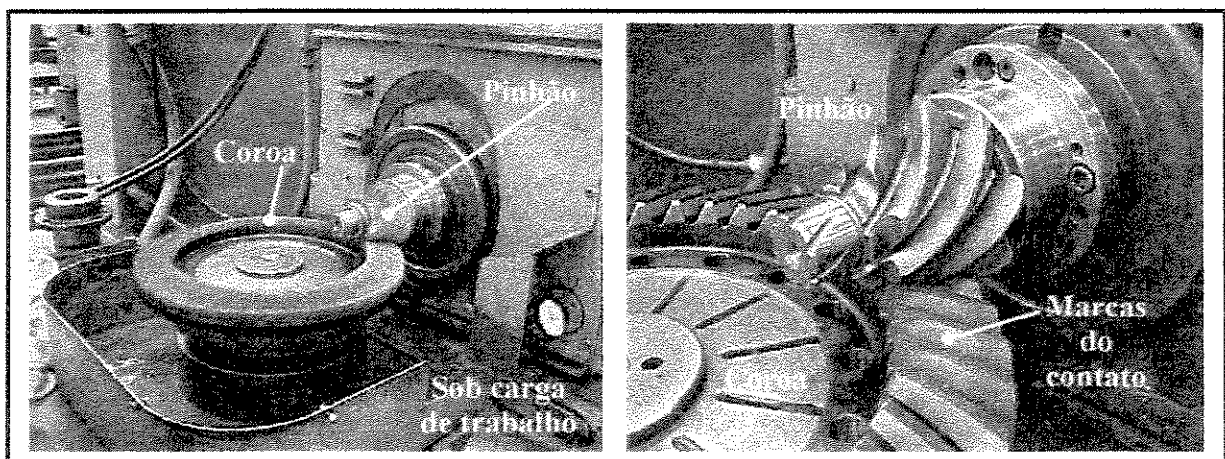


Fig. 2.23 – Contato gerado após teste

A figura 2.24, Gleason (2001) mostra as diferentes variações do contato.

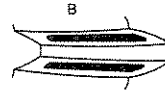
TESTE DE CONTATO DOS DENTES

CONTATO CENTRAL MAIS PARA O DEDÃO DO DENTE (IDEAL)

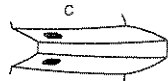


A FIGURA "A" MOSTRA UM CONTATO CENTRAL MAIS PARA A PARTE INFERIOR DO DENTE. NOTA-SE QUE O CONTATO COBRE APROXIMADAMENTE A METADE DO COMPRIMENTO DO DENTE, APROXIMA-SE MAIS DA PARTE INFERIOR DO DENTE DO QUE DA PARTE SUPERIOR. ALÉM DISSO, O CONTATO É ALIVIADO LEVEMENTE AO LONGO DA FACE E DO FLANCO DO DENTE. EM CONDIÇÕES DE CARGA LEVE, O CONTATO DEVERÁ PERMANECER NESTA POSIÇÃO DO DENTE.

CONTATO DESEJADO SOB CARGA PLENA



A FIGURA "B" MOSTRA O MESMO DENTE COM UM CONTATO COMO DEVERIA SER SOB CARGA PLENA. DEVE MOSTRAR-SE UM POUCO ALIVIADO NAS EXTREMIDADES E AO LONGO DA FACE E DO FLANCO DOS DENTES. NÃO DEVE HAVER CONCENTRAÇÃO DE CARGA NAS BORDAS EXTERNAS DOS DENTES.



CONTATO DA PARTE INFERIOR DO DENTE



CONTATO DA PARTE SUPERIOR



CONTATO CRUZADO

AS FIGURAS C / D / E / MOSTRAM AS DIFERENÇAS NO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DA HÉLICE ENTRE AS ENGENHAGENS TESTADAS



CONTATO BAIXO



CONTATO ALTO



CONTATO MANCO

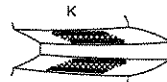
AS FIGURAS F / G / H / MOSTRAM AS DIFERENÇAS NO ÂNGULO DE PRESSÃO ENTRE AS ENGENHAGENS TESTADAS



CONTATO LARGO



CONTATO (LINHA PRIMITIVA) ESTREITO



CONTATO (PERFIL) EM PONTE

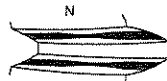
AS FIGURAS I / J / K / MOSTRAM A LARGURA DO CONTATO DOS DENTES



CONTATO (COMPRIMENTO TOTAL) LONGO

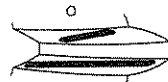


CONTATO CURTO

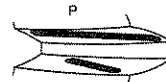


CONTATO (LONGITUDINALMENTE) EM PONTE

AS FIGURAS L / M / N / MOSTRAM O COMPRIMENTO DE CONTATO DOS DENTES



CONTATO ENVIESADO PARA DENTRO



CONTATO ENVIESADO PARA FORA

AS FIGURAS "O" E "P" MOSTRAM OS CONTATOS ENVIESADOS, INDEPENDENTE DA DIREÇÃO DA ESPIRAL NO PINHÃO, O CONTATO ENVIESADO PARA DENTRO OCORRERÁ SEMPRE DO FLANCO NA PARTE INFERIOR DO DENTE PARA O TOPE DA PARTE SUPERIOR, NO LADO CONVEXO, E DO TOPE NA PARTE INFERIOR DO DENTE PARA O FLANCO NA PARTE SUPERIOR, NO LADO CÔNCAVO.

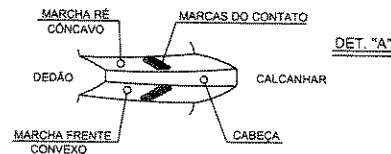
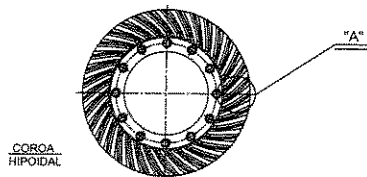


Fig. 2.24 - Variação do contato no flanco do dente

- Sentido do contato: Atualmente esta análise é feita através de imagens geradas pelo software IBM-RISK-CAGE que simula o sentido do contato. A análise TCA (Análise de contato do dente) verifica as condições de Biais, que podem ser classificadas da seguinte forma:

- Biais IN: Sentido do contato para direita
- Biais OUT: Sentido do contato para esquerda

Geralmente se trabalha com o sentido Biais IN, pois ele permite uma melhor transmissão de rotação. Porém, em algumas aplicações o sentido de Biais OUT tem um desempenho melhor.

Vale salientar que a análise de Biais IN e Biais OUT é feita também com a utilização da máquina testadora convencional. Neste teste, com o conjunto em funcionamento é possível analisar o sentido de contato após o tratamento térmico do conjunto. Assim, é possível também compensar as deformações do tratamento térmico ocorridas no dente, executando as devidas correções no pinhão antes da operação de tratamento térmico.

Desta forma, o sentido de contato pode ser determinado para Biais IN ou Biais OUT dependendo da aplicação final do produto.

A figura 2.25, Gleason (2000) mostra uma análise atual, via TCA do sentido do contato.

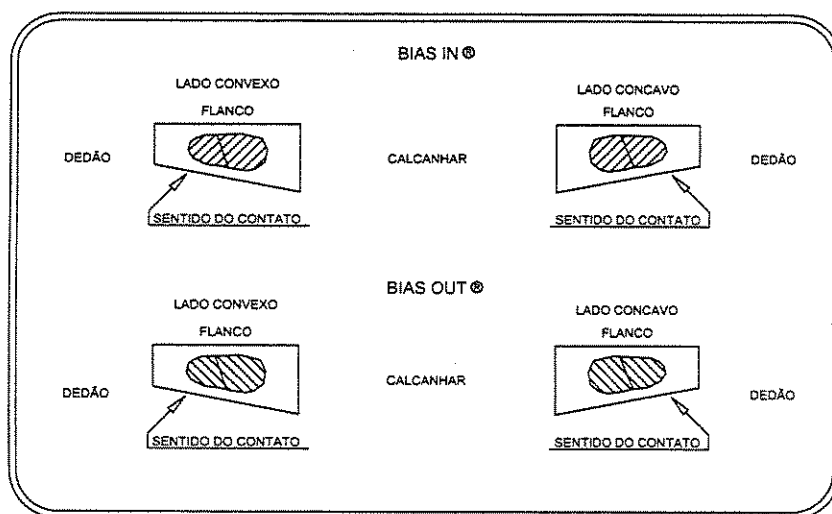


Fig. 2.25 Análise atual de Biais - TCA

- Teste de Vertical (V) e Horizontal (H): é um método para medir o valor e a direção do deslocamento vertical e axial da coroa a partir de sua posição standard, para obter um contato no meio do perfil do dente, na extremidade do calcanhar e na extremidade do dedão. O teste de (V) e (H) também fornece os valores para determinar o sentido de Bias IN ou Bias OUT na testadora convencional.
- Folga de engrenamento (Backlash): é a folga existente entre a espessura do dente do pinhão com a espessura do dente da coroa. Essa folga é necessária para que a transmissão de movimento possa ser realizada. Essa verificação é feita na máquina de testar na qual as engrenagens são fixadas, simulando a posição de trabalho final. Qualquer correção é sempre feita na espessura circular do dente do pinhão.
- Excentricidade do par (Runout): na máquina testadora é possível verificar os erros de concentricidade em relação ao eixo de rotação de cada membro. É caracterizado por uma variação periódica no som durante cada revolução e pelo deslocamento do contato progressivamente ao longo do comprimento do dente da engrenagem.
- Espaçamentos dos dentes: É um erro acumulativo que se forma em torno da engrenagem, frequentemente causando um maior erro entre o primeiro e o último dente cortado. Esses são conhecidos como defeitos do dente e são observáveis por um som característico e um contato baixo ou alto em um dente.
- Acabamento do dente e ruído: Podem ser checados na máquina testadora convencional. Isso porque o teste simula as condições de aplicação final, como por exemplo aplicação de carga e rotações sobre o par hipoidal. Desta forma, é possível analisar através do contato do dente suas condições de acabamento superficial. O nível de ruído pode ser analisado devido à rotação em que o conjunto é submetido no teste. Usualmente um acabamento pobre resulta em vibrações e ruído elevado, um contato grosseiro e desigual. Esse acabamento pobre ou ruim é muitas vezes resultado de ferramentas sem corte ou mal afiadas.

- Checagem composta: é a verificação do comportamento de duas engrenagens em movimento de rotação engrenadas. Esta análise pode ser feita de duas maneiras:
- Teste de flanco único (Single Flank Test): é checado os erros de transmissão. O par é montado corretamente usando a folga de engrenamento. Desta forma, só existe contato em um único flanco de cada dente.
- Teste de flanco duplo (Double Flank Test): é checado a distância do centro ou montagem. O par é montado com os dois flancos em contato de cada dente, ou seja, sem a folga de engrenamento.

Atualmente, existem outras formas de checagem das condições de funcionamento de engrenagens hipoidais. Isso devido aos avanços tecnológicos e à utilização de máquinas CNC equipadas com câmeras digitais de vídeo e novos softwares de análise de vibrações e ruídos incorporados a estas máquinas.

Segundo Smith (1985), Stadtfeld (1994) os métodos de teste de engrenagens hipoidais são:

- Teste de flanco único com alta rotação
- Análise 3-D de vibrações
- Imagem digital do contato do dente
- Estudos das harmônicas ou fases da propagação do som para análise digital de ruídos.

Após o estudo dos conceitos fundamentais do produto (coroa hipoidal), estudar-se-á no próximo capítulo os conceitos fundamentais das lâminas alternadas Gleason.

Capítulo 3

Características Gerais do Processo de Fabricação de Engrenagens Hipoidais – Lâminas Alternadas Gleason

3.1 - Introdução

Em 1874, William Gleason inventou a primeira plainadora de engrenagem cônica. Isso possibilitou o início de uma nova fase na indústria – a indústria para produção de engrenagens cônicas. (Gleason, 1997). Assim, começou um longo caminho de desenvolvimento de ferramentas e máquinas fresadoras especiais para a produção em escala desse tipo de engrenagem.

As ferramentas, métodos e máquinas usadas para produção de engrenagens cônicas e hipoidais são inteiramente diferentes daqueles empregados para a fabricação de outros tipos de engrenagens.

O corte de dentes de engrenagens cônicas e hipoidais com lâminas alternadas Gleason é um tipo especial de usinagem de dentes, podendo ser com geração ou sem geração. Devido à complexidade da geometria superficial dos dentes, necessitam-se de cálculos, processos de fabricação e equipamentos de usinagem especiais. (Nascimento ,1989).

Portanto, antes de falar sobre as lâminas alternadas é necessário fazer algumas considerações básicas sobre o sistema de geração com lâminas alternadas, tipos de geração e processos de corte dos dentes.

3.2 – Princípios de Geração

A geração pode ser definida como o processo básico da fabricação de engrenagens cônicas e hipoidais, já que no mínimo um membro do par deve ser gerado. O membro gerado é geralmente o pinhão, que possui o menor número de dentes (Gleason, 1990).

Segundo Gleason (2000), a teoria da geração desse tipo de engrenagem envolve os seguintes conceitos:

- Uso de uma engrenagem de geração imaginária. Esta pode ser uma engrenagem cônica ou hipoidal.
- Blank de engrenagem ou peça “obra” em que os dentes serão cortados.
- Posicionamento da engrenagem de geração imaginária deve ser de tal forma que seus dentes devem cruzar com os dentes da peça a ser cortada ou peça “obra”.
- A máquina cria um movimento entre a engrenagem geradora imaginária e a peça “obra” , de forma à rolarem juntas.
- A lâmina de corte representa um dente da engrenagem geradora.
- Os dentes da engrenagem de geração imaginária devem estar completamente envolvidos com os dentes da peça “obra” ou blank.

O conceito da engrenagem de geração imaginária é a chave para o entendimento do processo de geração. Portanto, a ferramenta girando representa a engrenagem de geração imaginária usinando os dentes da peça “obra” ou blank, de acordo com um movimento pré-estabelecido. O movimento da ferramenta deve representar, ou melhor, descrever os dentes da engrenagem de geração imaginária. (Gleason,1990).

A figura 3.1 (Stadtfeld, 2000) mostra a representação de uma engrenagem geradora imaginária por um cortador (tipo fresa de face) em uma máquina geradora de engrenagens hipoidais Gleason.

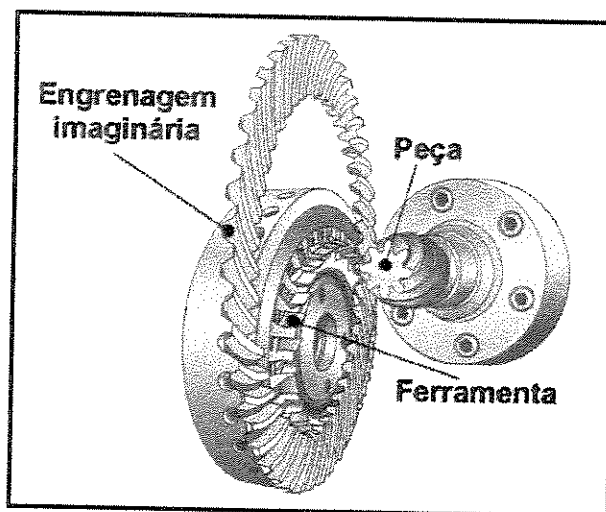


Fig. 3.1 – Cortador circular e engrenagem geradora imaginária

3.3 - Características da Geração

Existem duas classes gerais de máquinas para o corte de engrenagens cônicas e hipoidais. A primeira classe para engrenagens de dentes retos e a segunda classe para engrenagens de dentes curvos. Para a fabricação de engrenagens cônicas e hipoidais com dentes curvos é possível utilizar máquinas geradoras e não geradoras. (Gleason, 1990).

Segundo Dudley's (1992) e Quirino (2000) o princípio básico para a geração de dentes de engrenagem é ter uma ferramenta de corte e um blank (peça a ser usinada) representando um par engrenado "coroa / parafuso sem-fim" associado a um movimento de corte.

As máquinas geradoras podem ser utilizadas para o corte do pinhão e da coroa, dependendo do sistema de corte escolhido. Neste caso é gerado uma linha de contato entre os dentes devido ao perfil evolvente do dente da coroa e do pinhão. Vale salientar que o pinhão é sempre gerado.

As máquinas não geradoras são usadas para o corte de coroas cônicas e hipoidais quando se deseja atingir maiores taxas de produção. Essas superfícies do dente formadas por uma ferramenta de corte de perfil simples, podem ser produzidas muito mais rapidamente do que as superfícies dos dentes de engrenagens geradas.

Este trabalho foi realizado usinando os dentes da coroa hipoidal de forma não gerada. As coroas não geradas são o tipo mais utilizado no diferencial de veículos automotivos.

Uma máquina geradora pode usinar tanto dentes gerados, quanto dentes não gerados. Isso é possível quando se utiliza um acessório específico para realizar a indexação para o corte de um dente de cada vez.

Stadtfeld (1993) coloca que a seqüência básica para a usinagem de uma coroa hipoidal formada (não gerada) é a seguinte:

A ferramenta de corte é fixada sobre o cabeçote porta ferramenta ou berço, o qual possui um eixo giratório. O blank é fixado no cabeçote porta-peça, o qual possui um sistema de giro e indexação. Este cabeçote porta-peça desliza de forma angular até o correto posicionamento dos eixos da ferramenta e do blank, estabelecendo a correta relação de profundidade entre a ferramenta de corte e o blank.

A ferramenta começa a girar em seu eixo usinando um dente no blank que está fixo. Quando um dente é terminado, a peça gira um passo e indexa a nova posição para a usinagem de um novo dente.

A figura 3.2, Gleason (1990) mostra a cinemática de corte de um dente em uma coroa hipoidal.

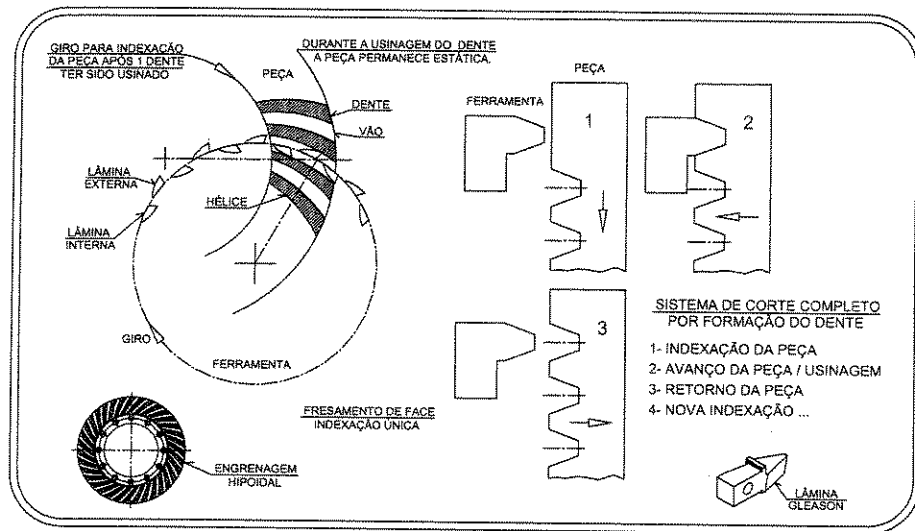


Fig. 3.2 - Cinemática de corte para engrenagem formada

A figura 3.3, (foto tirada na empresa em que foi realizado os ensaios, 2002), mostra o blank fixo e o cabeçote porta lâmina usinando o dente não gerado.

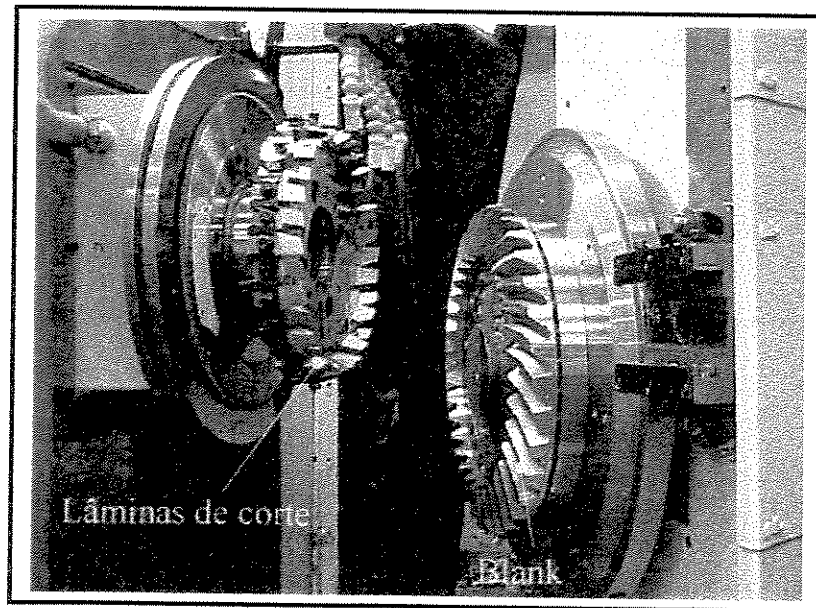


Fig. 3.3 – Formação de um dente não gerado

3.4 – Sistema de corte

Proveniente da Gleason Works dos Estados Unidos, o sistema Gleason caracteriza-se como o mais antigo de que se tem notícia. Existem diferentes métodos de usinagem neste sistema, que são utilizados no desbaste ou acabamento de engrenagens cônicas e hipoidais. (Nascimento, 1989).

Segundo Krenzer (2001), o fresamento de face com indexação (Face Milling) e o fresamento de face contínuo (Face Hobbing) são os dois principais processos usados na produção de engrenagens cônicas e hipoidais.

Fresamento de face com Indexação (Face Milling): é utilizado um processo de indexação única para cortar um dente de cada vez. Após o fresamento dos dois lados de um dente a engrenagem gira tangencialmente um passo circular, posicionando-se para o próximo dente através de um sistema de indexação. Esse processo é repetido até que todos os dentes sejam cortados.

Fresamento de Face Contínuo (Face Hobbing): é utilizado um processo de indexação contínua, com um fresamento contínuo da engrenagem, não ocorrendo a divisão dente a dente. A peça a ser usinada tem um movimento de rotação oposto ao movimento de rotação da ferramenta. Os dois lados do dente são usinados com um sincronismo perfeito entre as lâminas do cortador e os dentes cortados na peça.

Para os dois sistemas de corte as lâminas são montadas de maneira alternada no cabeçote porta lâmina. Estas lâminas montadas de maneira alternada, fresam o lado côncavo e convexo do dente ao mesmo tempo.

Segundo Krenzer (2001), o sistema de corte Face Hobbing não pode ser usado, devido à geometria evolvente do dente, quando os dentes das engrenagens necessitam ser retificados.

3.5 - Tipos de Usinagem dos Dentes

Existem basicamente duas classes para classificar a geração do perfil de um dente de uma engrenagem hipoidal, quais sejam (Gleason, 2000) :

a) Por formação (Forming ou Formate): significa dizer corte sem geração, isto é, não existe movimento de rotação do blank ou peça-obra, enquanto o dente está sendo cortado pela ferramenta, a qual está em movimento de rotação e avanço. Nesse tipo de geração o dente assume a forma das lâminas de corte.

Neste caso os dentes terão abaulamento apenas no sentido longitudinal. Esse processo se aplica apenas para as coroas cônicas e hipoidais.

b) Por geração (Generation ou Generate): nesse processo existe rotação do blank e da ferramenta, enquanto o dente está sendo usinado. Porém, os dentes são cortados simultaneamente sem a indexação após o término da usinagem de um dente. As indexações são contínuas durante todo o corte. Assim, os dentes são fresados por geração e possuem abaulamento tanto no sentido transversal e longitudinal. A forma do dente é cônica, ou seja, nas proximidades do calcanhar os dentes são mais profundos.

Esse processo pode ser aplicado para coroas e pinhões.

A figura 3.4, (Dudley ,1992), mostra a diferença entre um dente gerado e um dente não gerado ou formado. Na usinagem por formação um dente de cada vez é formado através do fresamento de face. Na usinagem por geração ocorre a geração contínua dos dentes.

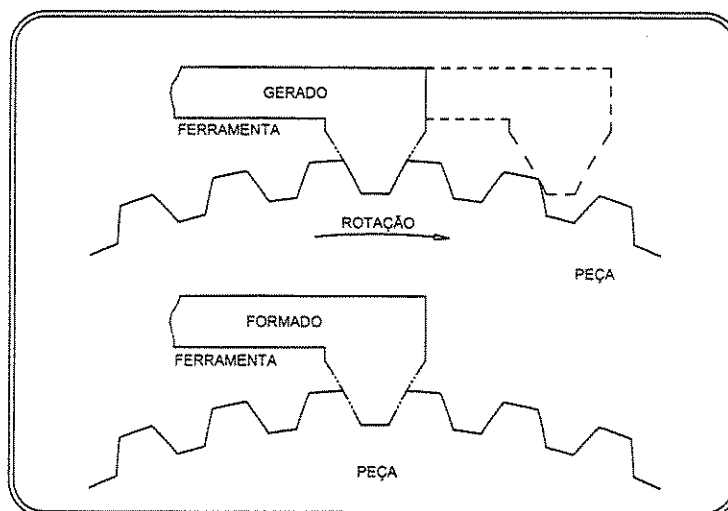


Fig. 3.4 Diferença entre gerado e formado

Segundo Gleason (2000) existe outros tipos de sistemas de geração ou não geração dos dentes de coroas e pinhões hipoidais. Porém os dois sistemas básicos, mais utilizados para a indústria foram colocados. Além disso o método utilizado para a elaboração deste trabalho, foi a usinagem dos dentes de uma coroa hipoidal formada.

3.6 – Processo de Usinagem dos dentes

Segundo Statfeld (2000), a usinagem básica de um “par de engrenagens hipoidais” pode ser realizada de duas maneiras. Pode-se usar o processo chamado 5 cortes (Five Cut Process®) ou o processo chamado Corte Completo (Completing®).

O processo 5 Cortes consiste em 5 operações independentes para obter o “par hipoidal”. São 3 operações para cortar os dentes do pinhão e 2 operações para cortar os dentes da coroa. Para o melhor entendimento é preciso separar o processo 5 cortes em duas etapas. A primeira etapa se refere às duas operações para cortar os dentes da coroa, quais sejam:

- **Desbaste dos dentes:** todos os dentes são debastados, obtendo-se somente os vãos com o devido sobremetal para acabamento. Nesse momento o acabamento superficial do dente é ruim. São geralmente utilizadas lâminas alternadas de desbaste com cobertura de nitreto de titânio.

dente é ruim. São geralmente utilizadas lâminas alternadas de desbaste com cobertura de nitreto de titânio.

- **Acabamento dos dentes:** todos os dentes são acabados, retirando apenas o sobremetal do perfil do dente. Nesse momento o acabamento superficial do dente é melhorado, não prejudicando a operação posterior de lapidação. São utilizadas lâminas alternadas de acabamento sem nenhum tipo de cobertura superficial conforme indicação da Empresa Gleason. Quando se utiliza lâminas com cobertura no acabamento o perfil do dente apresenta um aspecto vibrado e com um péssimo acabamento superficial. Acredita-se que este fato ocorra devido ao arredondamento da aresta de corte da lâmina.

Neste processo é preciso duas máquinas convencionais, uma de desbaste e outra de acabamento, montadas com suas devidas ferramentas.

Na Segunda etapa os dentes do pinhão são cortados em três operações, quais sejam:

- Desbaste dos dentes
- Acabamento do dente lado convexo (usa apenas lâminas internas)
- Acabamento do dente lado côncavo (usa apenas lâminas externas)

Nesse caso, são necessárias uma máquina para cada operação. Portanto para cortar o pinhão no processo 5 Cortes, são necessárias 3 máquinas.

O processo de Corte Completo (Completing) usa a combinação de duas operações ao mesmo tempo. As coroas e os pinhões são fresados separadamente em desbaste e acabamento. Para o corte dos dentes da coroa ou do pinhão é necessário um único ciclo de trabalho da máquina.

Segundo Stadfeld (2000), o processo de Corte Completo consiste das seguintes operações, para obter o par hipoidal, quais sejam:

Coroa: desbaste e acabamento usando a mesma ferramenta e uma única preparação de máquina.

Pinhão: desbaste e acabamento usando a mesma ferramenta e uma única preparação de máquina.

Vale salientar que a ferramenta da coroa é diferente da ferramenta do pinhão. Então para fresar a coroa é utilizado um tipo de lâmina, geralmente com revestimento de nitreto de titânio e para fresar o pinhão é utilizado um outro tipo de lâmina sem nenhum tipo revestimento superficial, conforme recomendação da empresa Gleason. Quando se executa o acabamento de pinhões com lâminas com cobertura, o perfil do dente apresenta vibrações e acabamento superficial ruim.

A cinemática de corte “Completing” pode ser descrita da seguinte forma para coroas formadas (Formate). As engrenagens são concluídas com avanço no sentido de profundidade dos dentes. O cortador é primeiramente avançado em direção ao corte numa taxa de avanço selecionada. O sentido de rotação do cortador é o mesmo sentido da hélice do produto e a direção de corte é do dedão do dente para o calcanhar do dente para evitar problemas com as rebarbas nos dentes. Durante o ciclo de corte a peça fica estática para evitar deslocamentos e a possível quebra do cortador durante o corte. O blank só tem movimento de rotação quando um vão é terminado e a máquina libera um novo giro no valor do passo para a nova indexação e libera o início de desbaste de um novo dente no blank. Neste instante o cortador recua para possibilitar a rotação do blank. Após cada vão de dentes de toda a engrenagem estar desbastado, ou seja, quando o corte alcança aproximadamente 90% da profundidade total do dente, a taxa de avanço é reduzida e a velocidade (rotação) do cortador é acrescida para se obter um melhor acabamento. Neste instante se inicia a etapa de acabamento dos dentes da coroa e todo o processo de corte se repete como no desbaste até o termino da peça.

Stadtfeld (1993) e Gleason (2000) descrevem algumas vantagens do processo corte Completo (Completing), quais sejam:

- Redução do número de máquinas com consequente aumento do espaço físico na empresa
- Menor quantidade de ferramental ou dispositivos
- Redução da quantidade de ferramentas de corte
- Redução no número de operadores
- Redução no tempo de produção
- Redução da potência utilizada
- Redução geral nos custos de produção

Uma das desvantagens do processo Completo (Completing) é referente ao acabamento superficial do flanco do dente. Como neste processo o desbaste e o acabamento são feitos no mesmo ciclo de operação, com a mesma ferramenta, o acabamento se torna ruim e muitas vezes dificulta o processo de lapidação do par hipoidal. (Gleason, 2000).

O acabamento superficial é verificado nos dois lados do dente da coroa hipoidal, ou seja, a rugosidade é medida tanto na marcha frente (lado convexo) como a marcha ré (lado côncavo). Nesse processo de corte, após algumas coroas cortadas, a rugosidade superficial, principalmente da marcha ré, começa a ficar ruim, bem acima dos valores toleráveis estabelecidos pela própria empresa Gleason.

A empresa Gleason não apresenta uma justificativa clara para esse fenômeno, ela apenas sugere alguns fatores. Sugere que para qualquer tipo de operação de “acabamento” dos dentes não é recomendado o uso de revestimentos especiais, como por exemplo o nitreto de titânio. Porém, como neste processo é utilizada a mesma ferramenta tanto para o desbaste como para o acabamento essa prática não pode ser usada.

As lâminas são revestidas com coberturas especiais, para evitar o desgaste prematuro quando se está desbastando, mas por se tratar das mesmas lâminas para o acabamento, a cobertura especial sempre estará presente no acabamento. Esse fato é uma constante quando se fala de cortar dentes de coroas hipoidais com o processo “Completing”. Esses fatores não se aplicam para a usinagem de pinhões.

Acredita-se que uma ferramenta com cobertura apresente um arredondamento na aresta de corte se comparado a uma ferramenta sem cobertura, o que prejudica o acabamento da peça.

Nesse processo, a ferramenta executa várias revoluções para terminar um dente em acabamento. Esse excesso de atrito (se comparado ao processo 5 cortes) entre as lâminas e o dente pode gerar um acabamento ruim. Esse fato deve ser associado à dificuldade de formação e escoamento do cavaco, principalmente o do lado marcha ré. Outros fatores que prejudicam o acabamento são o desgaste nas lâminas, má preparação da máquina, afiação errada das lâminas e vibrações.

Vale salientar que no processo 5 Cortes, o acabamento dos dentes da coroa formada é feito por apenas 8 lâminas sem nenhum tipo de revestimento. Além disso, essas lâminas entram em contato apenas uma vez com cada dente, dando o acabamento final. Nesse processo o acabamento superficial está sempre de acordo com o sugerido pela empresa Gleason.

3.7 - Classificação Geral dos Métodos de Corte

Existem inúmeros métodos de corte de dentes de engrenagens cônicas e hipoidais dentro do sistema criado pela empresa Gleason.

Neste trabalho estão citados apenas os métodos básicos de corte. Dependendo da necessidade do produto é possível a combinação desses métodos básicos, gerando assim outros métodos mais complexos. O motivo pelo qual se colocou apenas os métodos básicos se deve a dois fatos importantes: 1) os métodos básicos são os mais utilizados pelas empresas que

produzem engrenagens hipoidais; 2) um desses métodos básicos foi utilizado para elaboração deste trabalho.

Segundo Dudley (1992), Gleason (2000) et al... existem 3 métodos de corte ou método de ferramenta quais sejam:

1º Processo Bilateral (Spread Blade): a figura 3.5 refere-se ao processo em que o elemento que está sendo produzido é cortado por um cortador tipo fresa de facear circular com lâminas de corte internas e externas alternadas, as quais cortam os perfis em ambos os lados do espaço entre dentes na mesma operação. A largura do vão entre dentes é controlada pela largura da ponta do cortador (Point Width). Largura da ponta é a distância entre os círculos concêntricos, onde estão situadas as pontas das lâminas de corte. Esse método é universalmente usado para corte de coroas hipoidais.

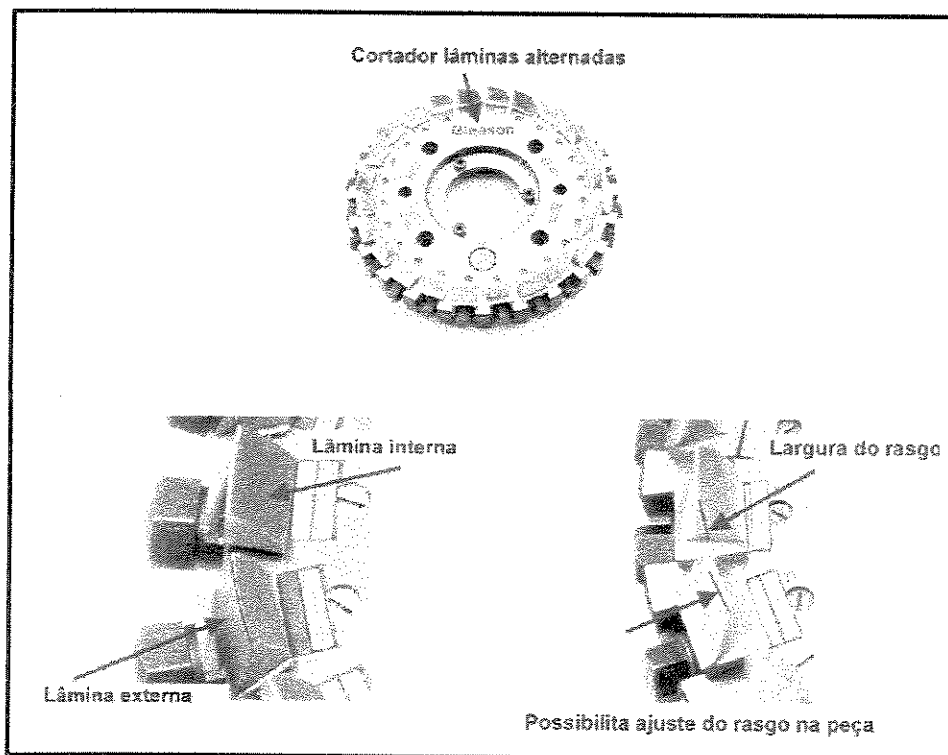


Fig. 3.5 – Processo Bilateral (Gleason, 2000)

2º Processo Unilateral (Single Side): a figura 3.6 refere-se ao processo em que o elemento que está sendo produzido é cortado por um cortador tipo fresa de face circular com lâminas internas e externas alternadas, as quais cortam os perfis em cada lado de um dente separadamente, com ajustes independentes da máquina. A largura do vão entre dentes é controlada pela rotação do blank ao redor do seu próprio eixo à uma determinada distância. É usado principalmente no acabamento de pinhões hipoidais.

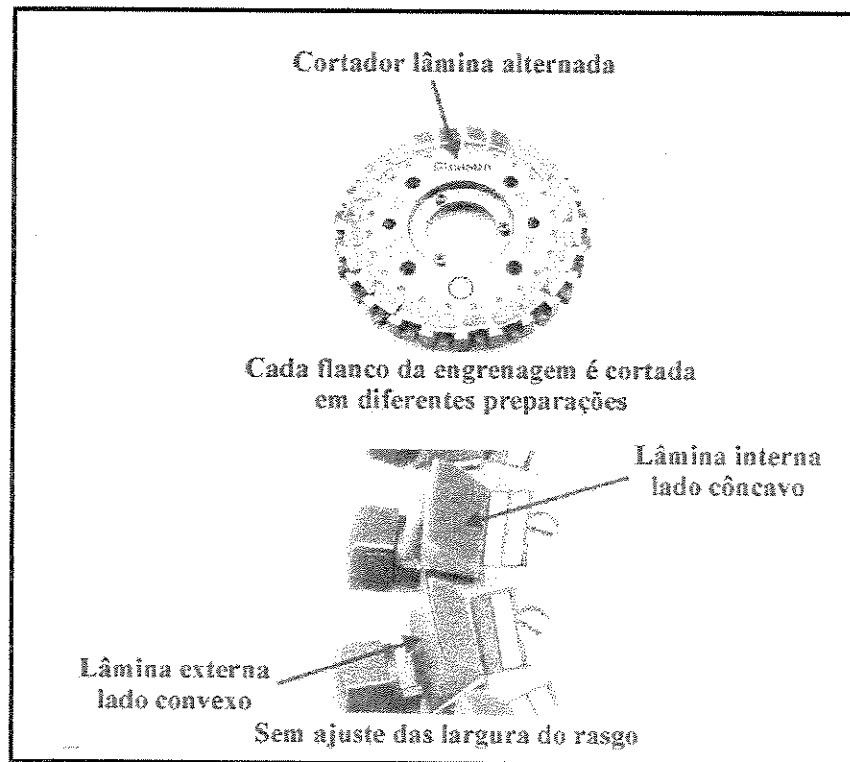


Fig. 3.6 – Processo Unilateral (Gleason, 2000)

3º Montagem Fixa (Fixed Setting): a figura 3.7 refere-se ao processo em que o elemento que está sendo produzido é cortado por dois cortadores tipo fresa de facear circular. Um montado com lâminas de corte internas somente para o corte do lado convexo do dente e o outro cabeçote montado com lâminas de corte externas para o corte do lado côncavo do dente. Os dois lados do dente são produzidos separadamente com duas montagens de máquinas totalmente diferentes. No chão-de-fábrica, duas máquinas são usadas – uma para cada lado do dente. A largura do vão é controlada pela rotação do blank.

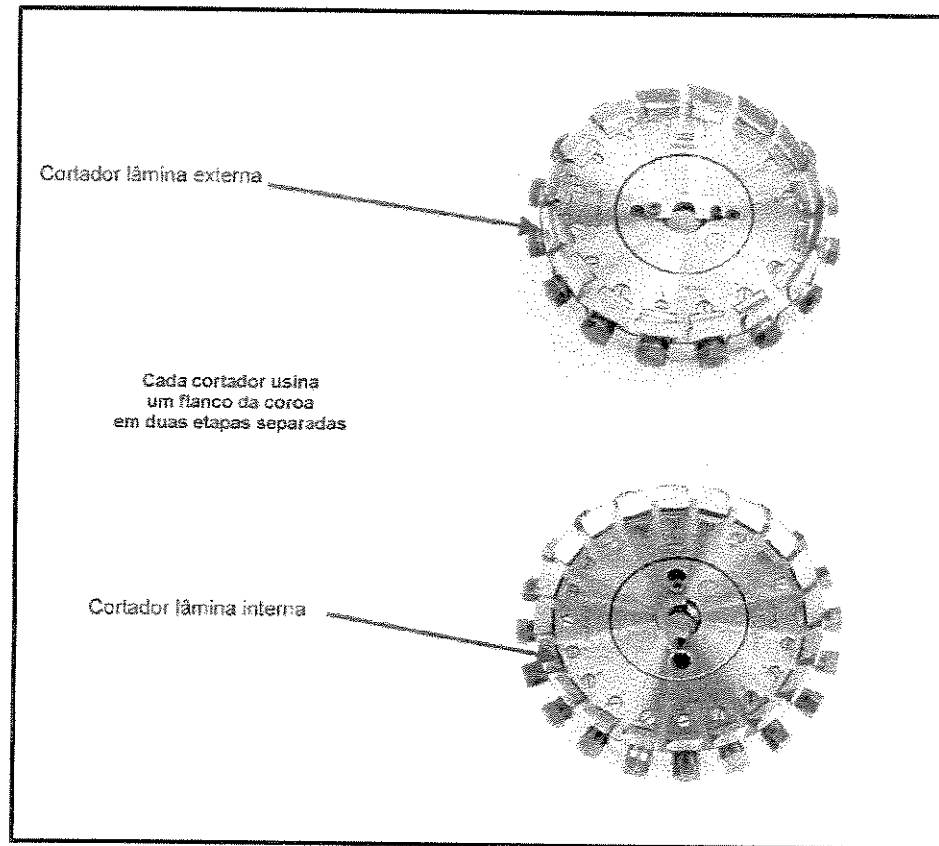


Fig. 3.7 – Montagem Fixa (Gleason, 2000)

Para a elaboração deste trabalho o método de corte utilizado foi o processo bilateral.

3.8 - Fresadoras de Engrenagens Cônicas e Hipoidais CNC

A primeira máquina com controle parcial foi introduzida em 1980. Esse controle parcial se caracteriza pela utilização do sistema CLP (Comando Lógico Programável) que controlava parcialmente as funções de movimento da máquina. Trabalha com sinais ON / OFF que acionam válvulas hidráulicas, porém utiliza interpolação mecânica entre eixos, os movimentos são todos com acionamento hidráulico e a preparação da máquina para usinagem é mecânica.

A partir de 1988, com os avanços tecnológicos nas áreas de CNC (Controle Numérico Computadorizado) e novos sistemas mecânicos como por exemplo os fusos de esferas, motor de

corrente alternada “brushless”, foi possível desenvolver o controle total da máquina através do CNC. A primeira máquina com controle total através do CNC foi concebida em 1989. Esta máquina foi chamada de Phoenix 250 HC® (Gleason, 2000). Nessas máquinas o controle do movimento dos eixos é feito totalmente através de comandos eletrônicos, inclusive a interpolação dos eixos. A preparação da máquina também é feita eletronicamente através do uso de programação específica.

A partir deste momento, se iniciou o desenvolvimento das máquinas Gleason Phoenix®. Nelas é possível desenvolver e produzir qualquer tipo de engrenagem cônica e hipoidal usando qualquer método, ferramenta, ou sistema de usinagem de dentes até hoje desenvolvido pela empresa Gleason.

Seu desenho foi desenvolvido para obter a máxima rigidez, minimizar os efeitos de altas acelerações e gerar qualquer tipo de dente cônico e hipoidal com o menor número de eixos possível (Stadtfield, 2000).

Segundo Quirino (2000) a adoção de máquinas fresadoras de dentes CNC traz os seguintes benefícios 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

Na figura 3.8 Goldrich (1989) e Stadtfeld (2000) mostram a concepção de uma máquina Gleason CNC Phoenix® para corte de dentes de coroas e pinhões hipoidais.

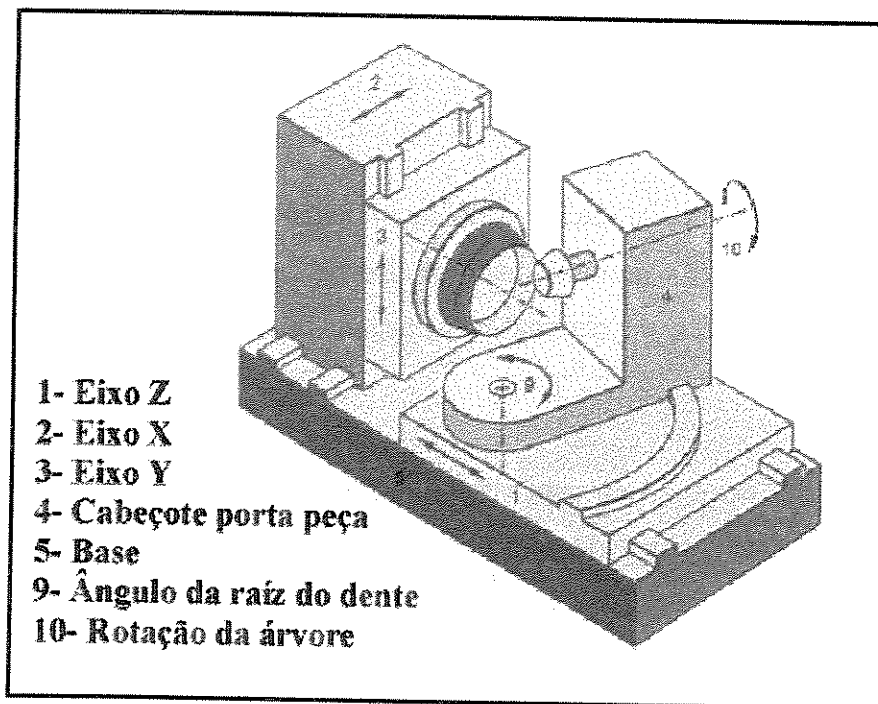


Fig. 3.8 – Fresadora CNC

3.9 – Lâminas Alternadas Gleason

3.9.1 – Introdução

O sistema Gleason de usinagem de dentes de engrenagens cônicas e hipoidais possibilita a utilização de uma grande variedade de tipos de ferramentas. A escolha de um ou mais tipos para obter o produto final acabado depende das máquinas disponíveis, da qualidade a ser assegurada e das necessidades do processo de fabricação.

Os avanços tecnológicos e a necessidade de melhorar a produtividade no chão de fábrica, contribuíram para o surgimento de novos processos e ferramentas para a obtenção do dentado. Esses avanços tecnológicos estão presentes nos processos de geração, como também nos processos de formação. Os processos de formação foram os primeiros a serem utilizados. Neles o blank tem somente o movimento de divisão e a ferramenta o perfil do dente. (Quirino, 2000).

Desta forma, é possível constatar os avanços tecnológicos em máquinas e ferramentas, utilizando sistema de formação, para a usinagem de coroas hipoidais, Exemplo disso, são as atuais máquinas CNC de corte de dentes cônicos e hipoidais, os avanços em materiais e coberturas superficiais para lâminas e os avanços na tecnologia do corte a seco de engrenagens hipoidais.

3.9.2 – Forma de construção das Lâminas

Segundo Dudley's (1992) e Gleason (2001) existem três tipos de forma de construção das lâminas, quais sejam:

- Lâmina integral
- Lâmina segmental
- Lâmina insertada

A figura 3.9, Dudley's (1992) mostra os três tipos de construção das lâminas.

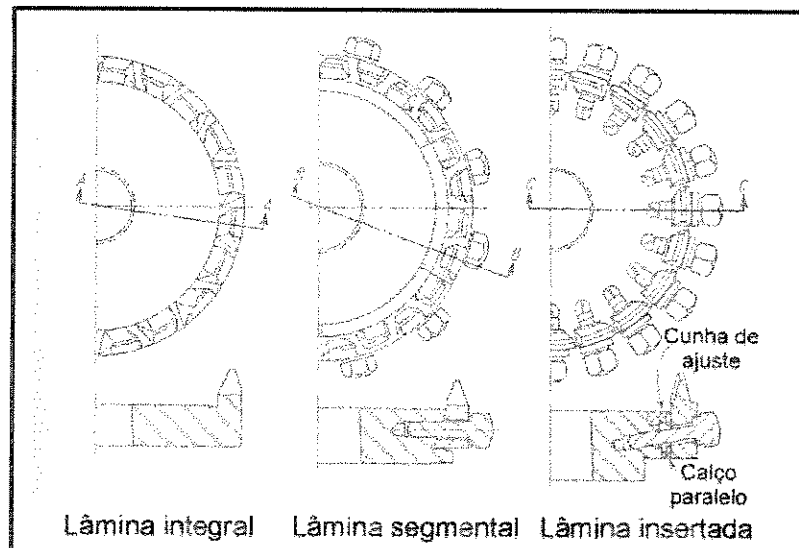


Fig. 3.9 – Três formas de construção das Lâminas

Lâmina Integral (Solid Cutters): O perfil das lâminas é confeccionado em uma única peça. Desta forma não existe a possibilidade de montagem entre o cabeçote porta lâminas e as lâminas. São usadas para usinagem de peças pequenas. As dimensões destes cabeçotes variam de diâmetro de 28 mm (1,1”) a 127 mm (5,0”) e o número máximo de lâminas é 20.

- **Lâminas Segmental (Segmental Cutters):** São lâminas formadas por um segmento. Cada segmento é composto geralmente de uma lâmina interna e outra lâmina externa. Cada segmento é fixado ao cabeçote porta-lâminas através de um parafuso especial (Gleason ,2000).
- **Lâmina insertada (Inserted Cutter):** São lâminas individuais. Geralmente são lâminas alternadas, ou seja, uma lâmina individual interna e outra lâmina individual externa. Cada lâmina é fixada individualmente através de um parafuso especial. As lâminas são apoiadas sobre calços paralelos que permitem o ajuste do diâmetro de ferramenta (Gleason ,2000).

A figura 3.10 (Gleason ,2000) mostra a montagem das lâminas insertadas

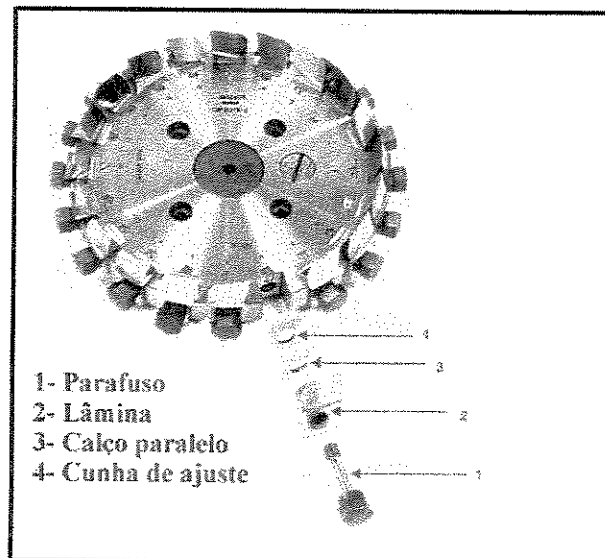


Fig. 3.10 Sistema de Fixação das Lâminas Alternadas ao Cabeçote

3.9.3 – Cabeçote porta lâminas

Os cabeçotes porta lâminas são dispositivos nos quais as lâminas são fixadas. Para cada tipo de lâmina é necessário um diferente tipo de cabeçote.

A figura 3.11, (Stadtfeld, 2000) mostra um tipo de cabeçote porta lâmina.

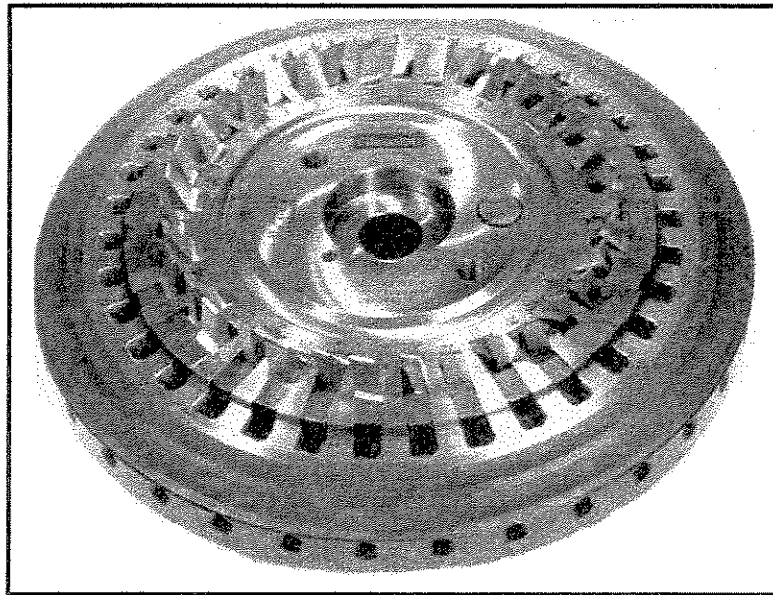


Fig. 3.11 – Tipo de cabeçote porta lâmina

3.9.4 – Disposição das Lâminas

As lâmina Gleason podem ser montadas e fixadas nos cabeçotes porta lâminas de diversas maneiras. A escolha depende dos equipamentos disponíveis das características do produto a ser usinado e das especificações do projeto e processo.

Segundo Stadtfeld (1993), pode-se classificar a disposição das lâminas da seguinte forma:

- **Alternadas:** Lâminas individuais externas e internas são fixadas ao cabeçote de maneira alternada. As lâminas são fixadas desta forma para permitir a usinagem das

duas marchas na engrenagem hipoidal, sendo que a cada revolução do cabeçote porta peça, um dente é acabado.

Assim, no momento da usinagem as lâminas externas usinam a marcha ré e as lâminas internas usinam a marcha frente. Após a fixação de uma lâmina externa é fixada uma lâmina interna e assim sucessivamente até se completar a montagem da ferramenta. Essa disposição das lâminas permite uma maior flexibilidade de ajuste fino para controlar a largura do vão entre os dentes formados. Além disso, esse ajuste entre as lâminas permite acertos de contato do dente no momento da usinagem.

A figura 3.12 mostra a disposição das lâminas de maneira alternada.

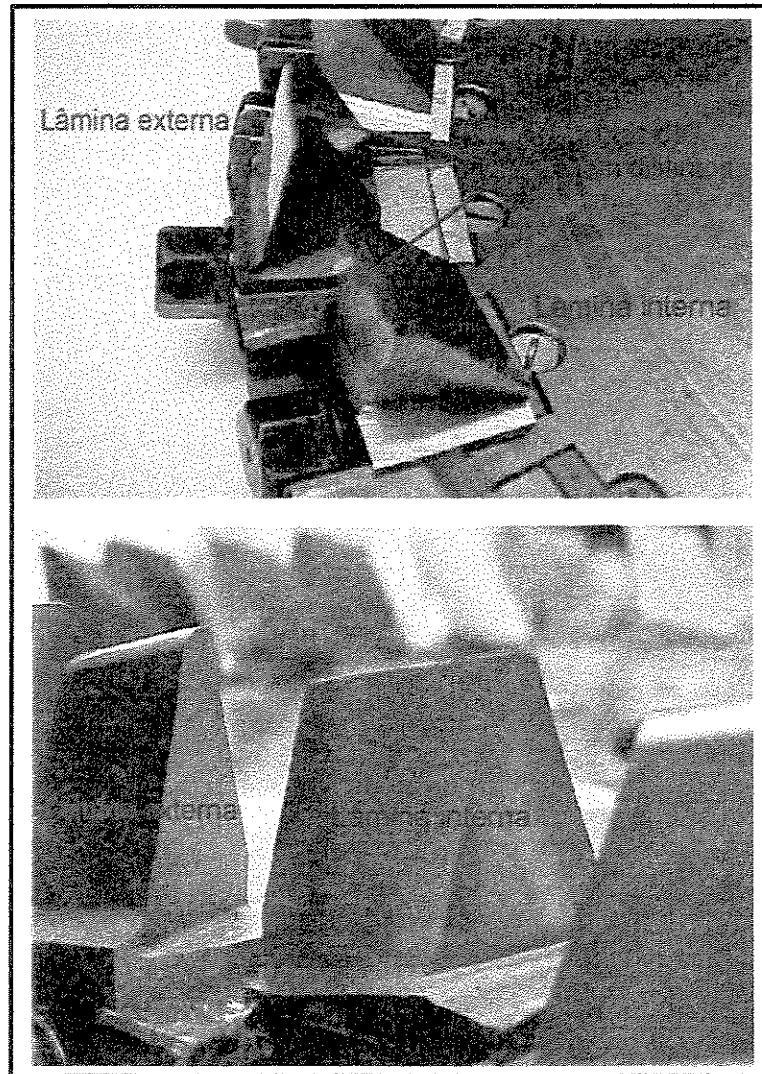


Fig. 3.12 – Disposição de Lâminas alternadas

- **Externas:** Lâminas individuais externas fixadas ao cabeçote. Essa montagem permite a usinagem de apenas um lado do dente da engrenagem hipoidal. Portanto, é necessário mais de uma preparação para terminar a usinagem do produto.
- **Internas:** Lâminas individuais internas fixadas ao cabeçote. Essa montagem é um complemento da montagem externa. Permite a usinagem do lado oposto do dente usinado com as lâminas externas.

- **Tripla (Triplex):** Lâminas individuais com geometrias diferentes são fixadas ao cabeçote de maneira alternada. É fixada uma lâmina externa, depois uma lâmina central e finalmente uma lâmina interna e assim sucessivamente até completar a montagem da ferramenta. A lâmina externa usina um flanco do dente (marcha ré), a lâmina central usina o centro do dente e a lâmina interna usina o lado oposto (marcha frente) ao das lâminas externas.

3.9.5 – Classificação das Lâminas

Segundo Stadtfeld (1995), as lâminas podem ser geralmente classificadas de duas formas, quais sejam:

- Lâminas de desbaste
- Lâminas de acabamento

Nascimento (1989), coloca que o desbaste dos dentes no processo 5 cortes é geralmente feito com ferramentas com lâminas triplas (Triplex), isto é, cabeçotes porta lâminas montados com lâminas de corte externo, corte interno e corte central. Para o processo de corte completo são utilizadas lâminas alternadas no desbaste de coroas.

Ele também divide a operação de desbaste em três partes, quais sejam:

- Desbaste sem geração (para coroas hipoidais “Formadas”)
- Desbaste com geração (para pinhões hipoidais)
- Desbaste combinado (para coroas e pinhões com relação de transmissão inferior a 3:1)

Segundo Nascimento (1989), o acabamento dos dentes pode ser feito com geração e sem geração. O acabamento com geração utiliza as mesmas classificações conforme o método de corte, ou seja, as lâminas levam o mesmo nome do método de corte. (Item 3.7 deste trabalho). Assim, as lâminas apresentam esta classificação, quais sejam:

- **Spread Blade® (Processo Bilateral):** lâminas externas e internas fixadas de maneira alternada no cabeçote. Usa calço de ajuste para correções de diâmetro.
- **Single Side® (Processo Unilateral):** lâminas para o acabamento de pinhões hipoidais.
- **Fixed Setting® (Montagem Fixa):** lâminas para o acabamento de pinhões hipoidais. É preciso ter cabeçote montado com lâminas externas para usinar um lado do dente (marcha ré) e um outro cabeçote com lâminas internas para usinar o outro lado do dente (marcha frente).

Nascimento (1989) coloca que o acabamento sem geração é utilizado somente para coroas formadas (“Formate”), as quais podem ser acabadas pelos métodos:

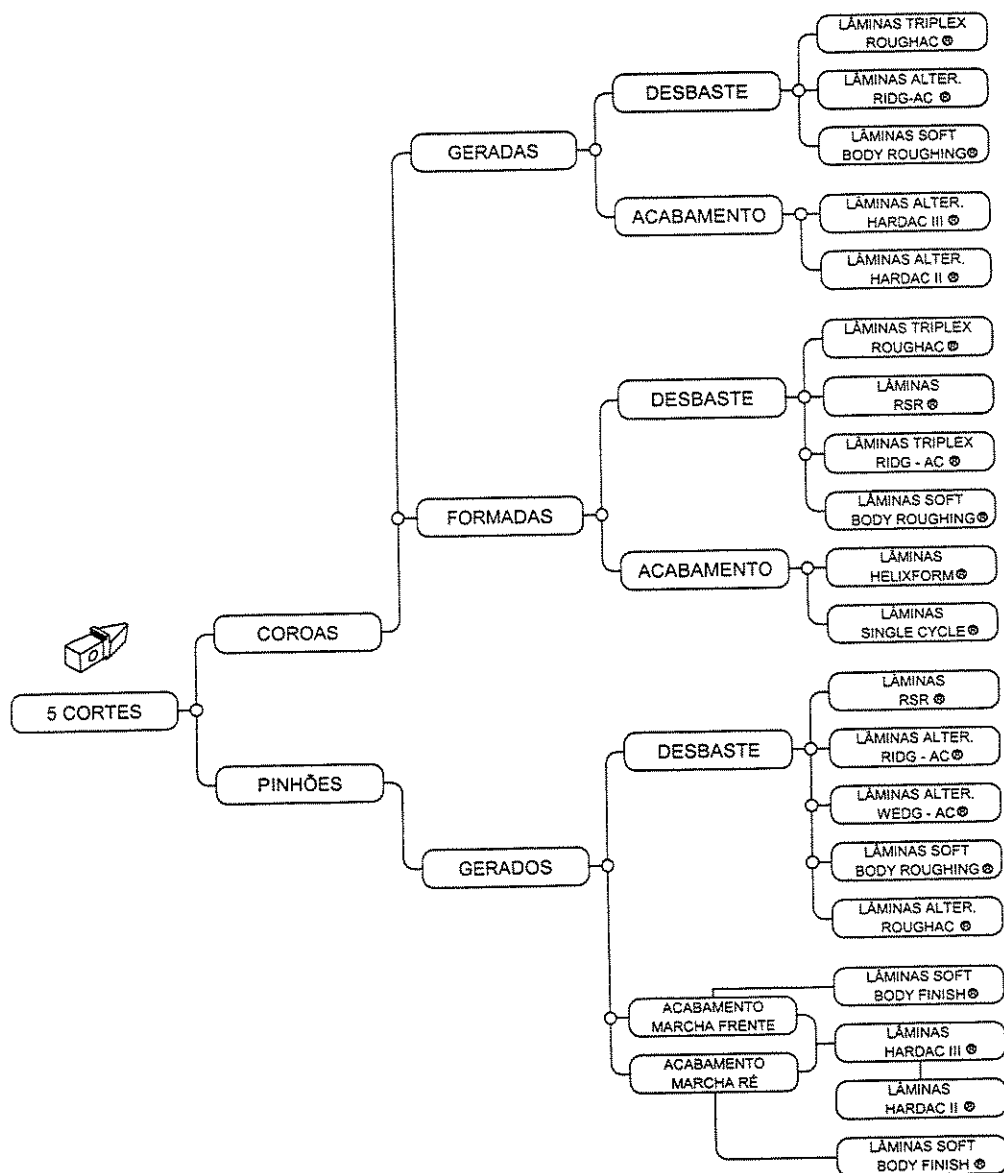
- **Single Cycle® (Ciclo Único) :** A ferramenta, neste caso, é uma espécie de brocha circular. As lâminas de desbaste aumentam radialmente de tamanho, de forma que os cavacos removidos sejam uniformes. Depois desta vêm as lâminas de acabamento , espaçadas de tal maneira que nunca hajam duas cortando simultaneamente o mesmo dente. Finalmente, após as lâminas de acabamento, segue-se um vão, no qual haverá a divisão da peça, e inicia-se a seguir o corte do próximo dente. A cada revolução do cabeçote um dente é acabado.
- **Helixform® (Formato Hélice) :** As ferramentas Helixform são semelhantes às Single Cycle em todos os aspectos, porém durante a passagem de cada lâmina a ferramenta avança axialmente para logo em seguida recuar novamente. Devido ao avanço axial do cortador enquanto gira, a engrenagem tem seus dentes com superfícies helicoidais.

As lâminas de acabamento também podem ser classificadas conforme o processo de corte completo (Completing). Os pinhões e coroas são usinados em desbaste e acabamento e um único passe, utilizando lâminas externas e internas, fixadas de maneira alternada ao cabeçote.

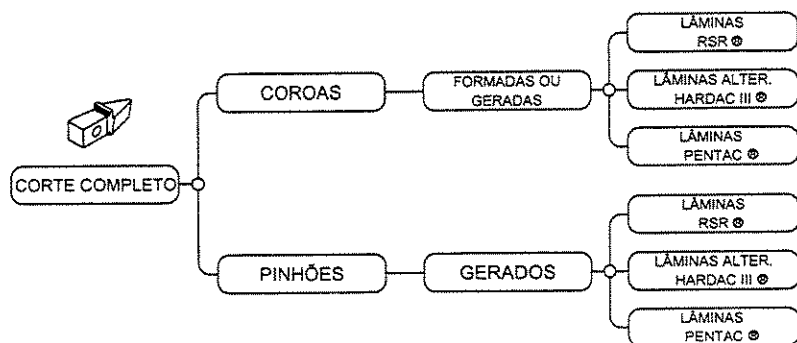
Nesse sistema as lâminas são fixadas sobre calços. Estes calços permitem certos ajustes nas lâminas que influenciam as dimensões do dentado conforme o especificado em processo.

Gleason (2002), divide os tipos de lâminas conforme o processo de usinagem dos dentes, quais sejam:

Para o processo 5 cortes os tipos de lâminas são:



Para o processo de corte completo os tipos de lâminas são:



Para a realização deste trabalho foram utilizadas lâminas Hardac® III. Hardac® é o nome comercial ou marca registrada da empresa Gleason para denominar uma lâmina do tipo insertada com grande acuracidade de posicionamento no cabeçote através do ajuste fino. É utilizada para o fresamento de Face (Face Milling). Portanto, serão feitas algumas considerações deste tipo de lâmina.

Segundo Gleason (2000), a lâmina Hardac® III foi desenhada para o acabamento de engrenagens cônicas espiral, engrenagens zerol e engrenagens hipoidais. Podem ser utilizadas para os métodos de corte bilateral (Spread Blade) e montagem fixa (Fixed Setting). Também são indicadas para o processo de usinagem dos dentes completo (Completing).

As principais vantagens da utilização de cabeçotes montados com lâminas Hardac® III são:

- Maiores profundidades de corte
- Controle positivo do diâmetro: através dos calços de ajuste é possível a regulação das lâminas individualmente.
- Máxima resistência da ferramenta
- Melhor precisão de montagem das lâminas
- Maior durabilidade
- Maior facilidade de manuseio

A figura 3.13, mostra uma lâminas externa do tipo Hardac® III

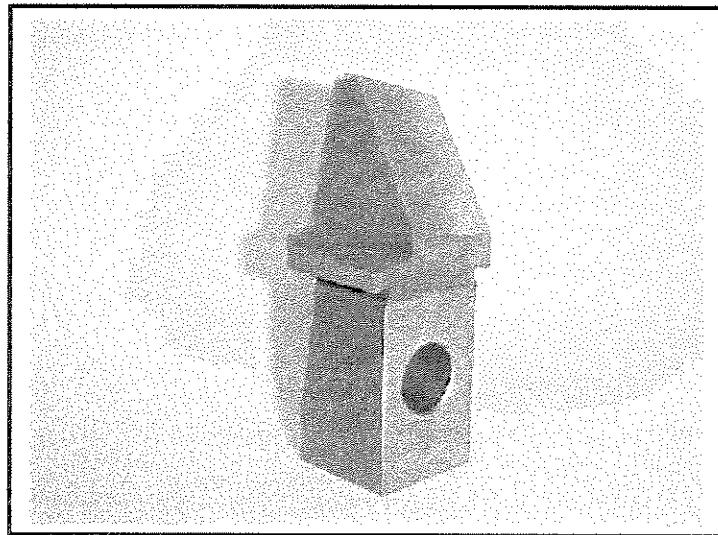


Fig. 3.13 – Lâmina Hardac® III

3.9.6 – Nomenclatura das Lâminas

Nos itens anteriores foram apresentados diferentes tipos de lâminas Gleason para a usinagem de engrenagens hipoidais. Entre os tipos apresentados destaca-se a lâminas alternada Hardac® III, pois este tipo de lâminas tem grande aplicação no meio industrial e principalmente porque é a lâmina utilizada para a elaboração deste trabalho.

Portanto, será colocado neste item, somente as informações sobre as lâminas do tipo Hardac® III. Deve ficar bem claro, que outros tipos de lâminas apresentam algumas características diferentes das do tipo Hardac® III.

A figura 3.14, Gleason (1990) mostra a nomenclatura básica de uma lâmina Hardac® III externa. Esta lâmina usina a marcha ré da engrenagem.

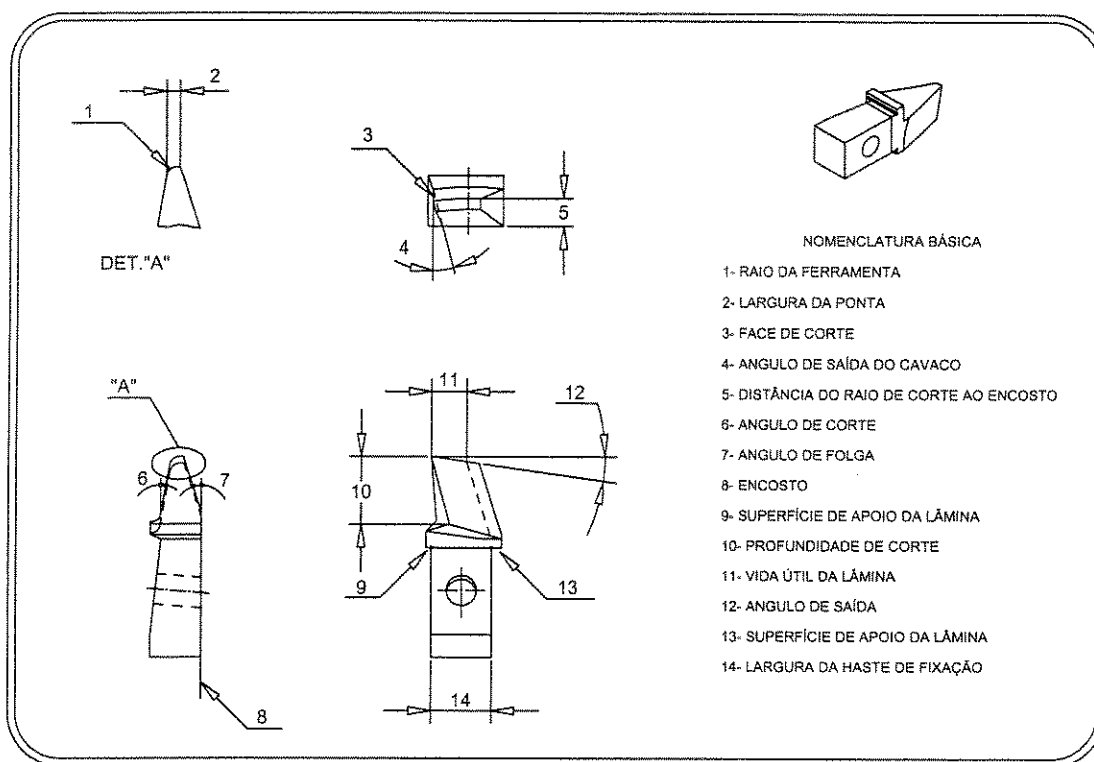


Fig. 3.14 Nomenclatura da lâmina externa Hardac®

3.9.7 – Materiais para lâminas

O fresamento de engrenagens consiste de um corte interrompido muito severo, que exige certas características da ferramenta para ser bem sucedido. A tendência geral da indústria atualmente no que tange à material da lâmina tem sido aperfeiçoar o aço rápido para uma dada aplicação, devido ao menor custo deste material. (Lima, 1995) e (Qurino, 2000)

Para a fabricação de lâminas Gleason o material mais utilizado ainda é o aço rápido. Porém, as pesquisas e a utilização de lâminas construídas em metal duro tem ganhado força, devido aos resultados obtidos no corte de engrenagens cônicas e hipoidais. Atualmente o custo com esta tecnologia (lâminas construídas com metal duro) ainda é alto se comparado ao custo com a utilização do aço rápido, devido ao elevado valor em investimentos para aquisição de máquinas preparadas para de corte dentes com metal duro, máquinas especiais para afiação das lâminas, cabeçotes porta - lâminas, etc...

A figura 3.15 Stadtfeld (1996) mostra uma comparação de características de desempenho entre lâminas de metal duro denominada “PowerCutting®” pela empresa Gleason, versus lâminas construídas em aço rápido.

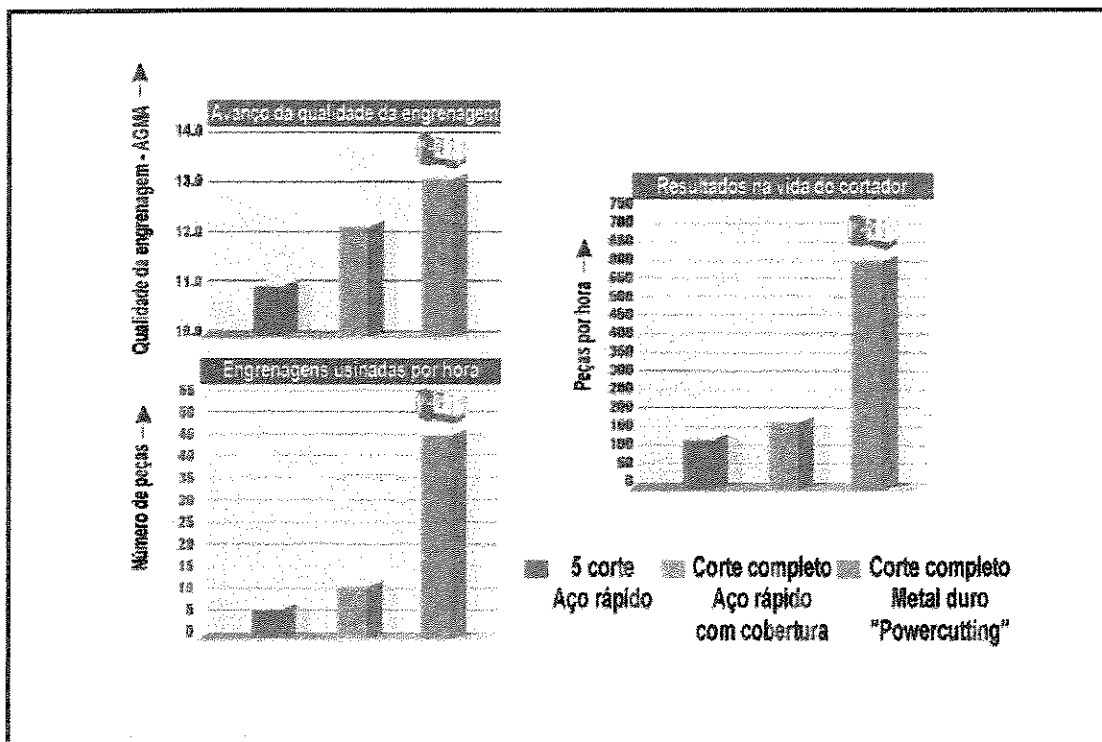


Fig. 3.15 – Vantagens no uso de lâminas de metal duro

Segundo Coppini, Diniz e Marcondes (1999), o aço rápido é um aço ferramenta de alta liga de tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio, cobalto e nióbio. É um material tenaz de elevada resistência ao desgaste e elevada dureza a quente.

Segundo Dixon (1990) e Quirino (2000), as características básicas de um aço rápido são:

- Ser tratável termicamente, atingindo dureza em torno de 63 68 HRC.
- Capacidade de manter esta alta dureza quando submetido a trabalhos severos que elevam a temperatura na região de corte.

- Resistência ao impacto e ao rompimento por fratura é necessário na usinagem com corte interrompido
- Deve ser capaz de ser trabalhado, usinado, retificado.

Os materiais que apresentam melhores resultados são os aços rápidos ASP 23 e ASP 30.

A tabela 3.1, mostra a composição do aço rápido ASP 23 usado neste trabalho (Wegst, 1983).

Tabela 3.1 – Composição química do aço rápido ASP 23

AÇO RÁPIDO AO MOLIBDÊNIO ASP 23										
%	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	W	Mo	Co
Min	1,17	0,15	0	0	0,20	3,75	2,25	6,0	6,7	0
Max	1,27	0,40	0,03	0,03	0,45	4,50	3,20	6,70	5,20	0

Conforme a apostila técnica da empresa Eaton (1994) e Quirino (2000), a micro estrutura do aço rápido “recozida” mostra partículas de carbeto globalizados numa matriz ferrítica. Esses carbeto são combinações complexas de carbono com outros elementos, dando uma importante contribuição para o aumento da resistência ao desgaste e à 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 da ferramenta.

Coppini, Diniz e Marcondes (1999), colocam que o material da ferramenta deve apresentar algumas características a fim de resistir ao processo de usinagem como:

- Dureza a quente
- Resistência ao desgaste
- Tenacidade
- Estabilidade química
- Temperabilidade no caso de ferramentas de aço rápido
- Resistência ao choque térmico

O foco principal deste trabalho é sem dúvida atuar neste segmento das lâminas Gleason fabricadas em aço rápido com coberturas.

Segundo Schlarb e Swilzer (2001), uma nova geração de aços rápidos manufaturados pelo processo da metalurgia do pó proporcionou avanços extremamente positivos em relação aos aços rápidos convencionais. Estes aços possuem muito boa resistência ao desgaste, excelente dureza na aresta de corte e possui um grande campo de aplicação, podendo cortar materiais de peças com dureza de até 38 HRc.

Sulzer (1997), em testes realizados com aço rápido produzido através do processo da metalurgia do pó, mostra que é possível o aumento da velocidade de corte em relação ao aço rápido convencional. Ele também constatou que o aumento na resistência a tração do aço rápido permite consideravelmente maior carga no cavaco, deste modo aumentando a performance do processo.

A tabela 3.2 mostra a nomenclatura de alguns aços rápidos utilizados em ferramentas de usinagem. (Catálogo Liebherr (1996) e Quirino (2000)).

Tabela 3.2 – Aços para ferramenta de usinagem

AISI	DIN	IHA	EISEN	JIS	EURO	CRUCIBLE	ERASTEEL
M2	1.3343	F-550 A	5-6-5-2	SKH 51	HS6-5-2	CPM M2	
M3	1.3344		5-6-5-3	SKH 53	HS6-5-3	CPM M3	ASP 23
M35	1.3243	F550 C	5-6-5-2-5		HS6-5-2-5	CPM M35	ASP 30
M48					HS10-6-3-9	CPM REX 76	
T15	1.3202		S-12-1-2	SKH10	HS12-0-5-5	CPM T15	

Capítulo 4

Estendendo a Vida das Lâminas Alternadas Gleason

4.1 – Mecanismos de desgaste de ferramentas de usinagem

No decorrer dos últimos anos, a engenharia de manufatura tem sido desafiada para atender à crescente demanda de produção e deparou-se com a necessidade de usar novos tipos de materiais, com melhores propriedades mecânicas, mas com maior resistência ao corte (Yuhara, 2001).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (1999), existem diversos tipos de desgastes e avarias em ferramentas de usinagem, quais sejam:

- Desgaste entalhe ou de flanco
- Desgaste de cratera
- Deformação plástica da aresta de corte
- Trincas
- Quebra

Vários são os fenômenos causadores dos desgastes da ferramenta quais sejam:

- Aresta postiça de corte

- Abrasão mecânica
- Aderência
- Difusão
- Oxidação

A operação de fresamento possui algumas particularidades relacionadas ao processo de desgaste, quais sejam:

- variação de temperatura
- variação de esforços mecânicos

A figura 4.1, Yuhara (2001) mostra os desgastes típicos sobre a ferramenta de corte

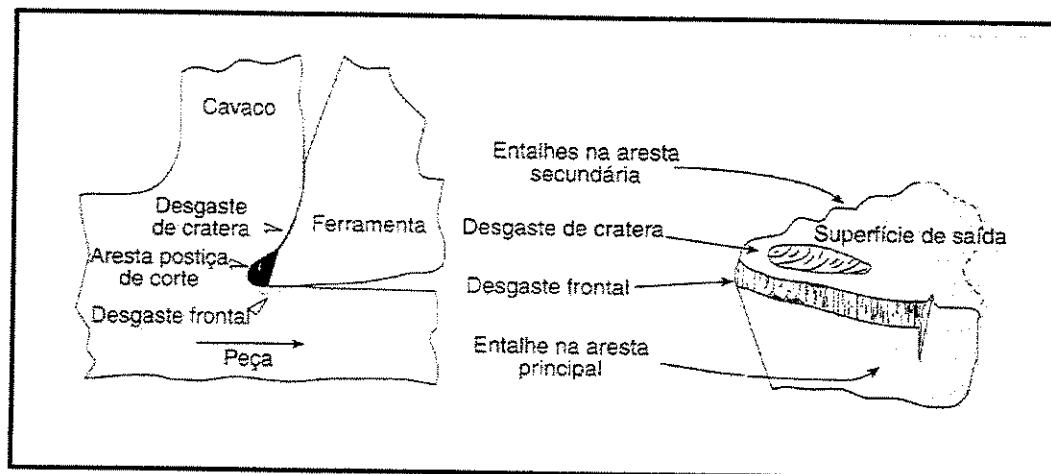


Fig. 4.1 – Desgastes típicos sobre ferramenta de corte

Os desgastes podem ser medidos por diversos parâmetros. A figura 4.2, (Diniz, Marcondes, Coppini ,1999) e Quirino ,2000) mostra tais parâmetros.

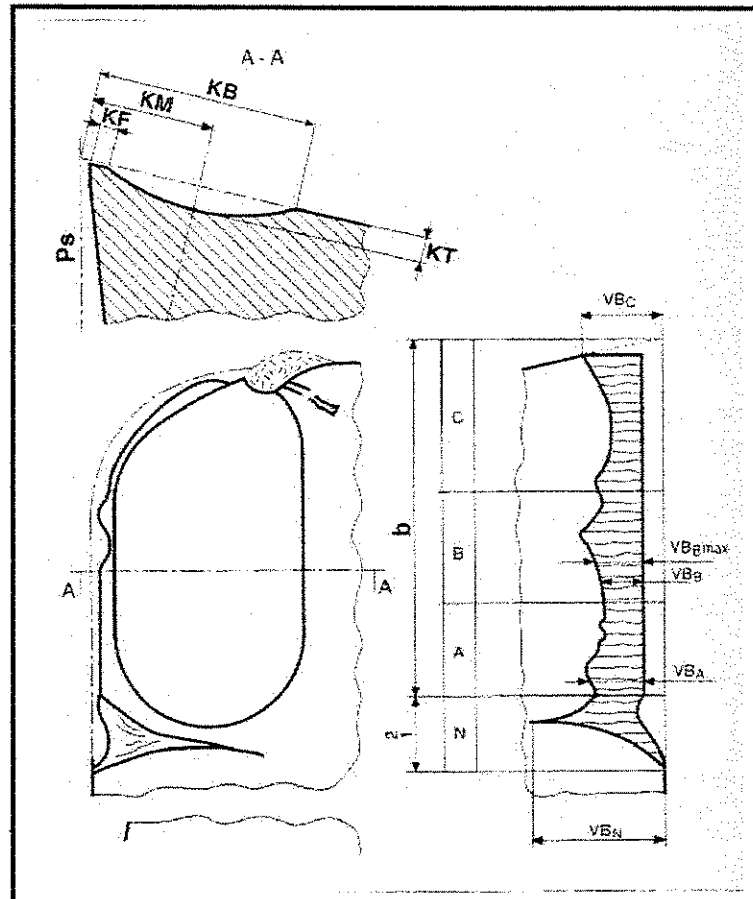


Fig. 4.2 - Desgaste da aresta de corte de uma ferramenta

Segundo Quirino (2000), os principais desgastes que ocorrem no corte de engrenagens são:

Desgaste frontal (VB_n , VB_b ou VB_{max}), medido na superfície de folga. Este desgaste limita a vida da ferramenta pelo acabamento e dimensões da peça usinada e define a profundidade de reafiação e, assim, a vida útil da ferramenta.

Desgaste de cratera ou profundidade de cratera (K_t), medido na superfície de saída, é devido à adesão e transferências das micro asperezas para o cavaco, em função das altas temperaturas desenvolvidas, além da ocorrência de difusão entre cavaco e superfície de saída da ferramenta que altera as propriedades originais do material na superfície de saída.

4.2 – Formação do cavaco na usinagem com lâminas Gleason

A figura 4.3, Stadtfeld (2000) mostra o mecanismo de formação do cavaco em lâminas Gleason.

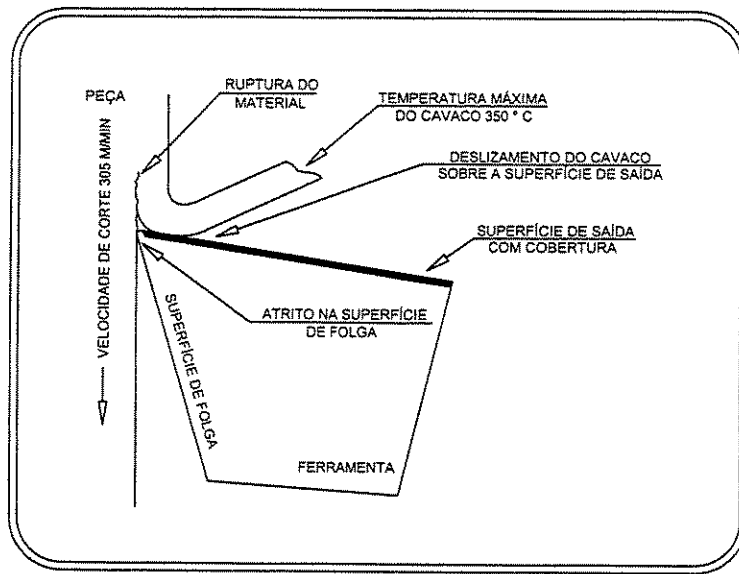


Fig. 4.3 - Mecanismo de formação do cavaco

A direção do escoamento do cavaco em relação a peça pode ser colocado de duas formas, quais sejam:

Ferramenta girando no sentido anti-horário, a direção do escoamento do cavaco é do dedão do dente para o calcanhar do dente.

Ferramenta girando no sentido horário, a direção do escoamento do cavaco é do calcanhar para o dedão do dente.

4.3 – Tipos de desgastes nas lâminas alternadas Gleason

Os tipos de desgastes em lâminas alternadas Gleason são iguais aos desgastes encontrados em cortadores de engrenagens cilíndricas, chamadas caracol ou Hob.

Segundo Gleason (1982), Bandini (1986) e catálogo Fhusa (1996) os desgastes podem ser expressados sob várias formas e, basicamente, de acordo com a figura 4.4. Os tipos de desgaste desta figura referem-se a lâminas fabricadas em aço rápido.

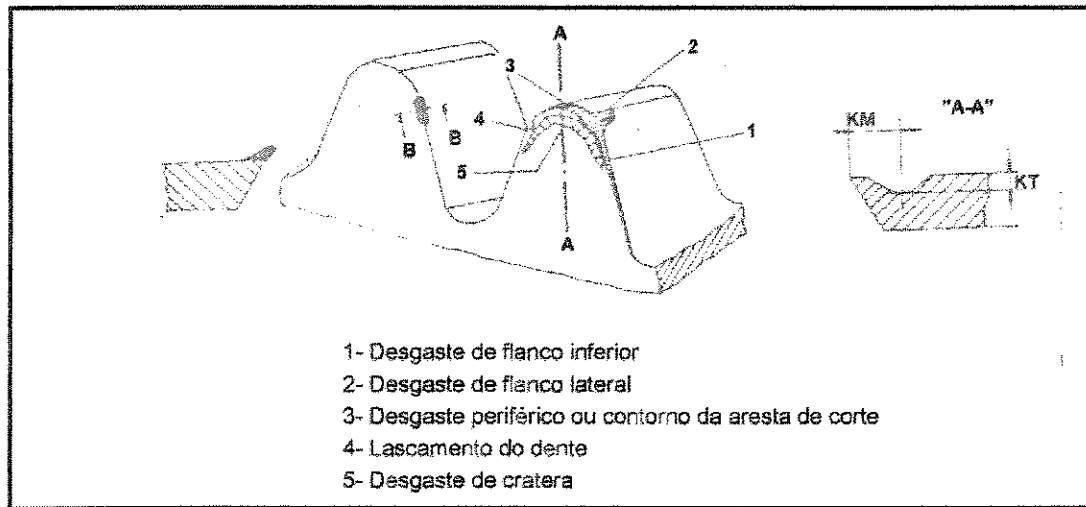


Fig. 4.4 - Tipos de desgastes em lâminas

O desgaste de flanco é o tipo que determina o fim da vida das lâminas, define a profundidade de reafiação e com isso o número de vida das mesmas.

Segundo Quirino (2000), o desgaste de flanco limita a vida da ferramenta, porque não é mais possível a obtenção de bons acabamentos superficiais e qualidade dimensional no dentado.

4.4 – Desenvolvimento de desgaste nas lâminas alternadas gleason

Segundo Yuhara (2001), durante o processo de corte a ferramenta fica exposta a cargas mecânicas, térmicas, dinâmicas e tribológicas tão complexas que não há material cortante suficientemente adequado para suportar todas essas combinações de cargas.

O desenvolvimento dos desgastes em ferramentas sem cobertura pode ser dividido em baixas e altas velocidades.

Segundo Quirino (2000) em baixas velocidades, partículas do cavaco, sob a pressão de corte na zona de aderência, mantém este contato sem movimento relativo em um espaço de tempo suficiente para soldarem à superfície de saída da ferramenta, formando a aresta postiça de corte. A aresta postiça aumenta e se rompe, de forma que partículas da superfície de folga da ferramenta são removidas, aumentando o desgaste frontal e prejudicando o acabamento superficial da peça. Com o aumento da velocidade de corte e, conseqüentemente, da temperatura, este fenômeno é minimizado.

Porém, com o aumento da temperatura, a aresta de corte é prejudicada, pois ocorre a diminuição da dureza nesta região da ferramenta. (Diniz, Marcondes e Coppini, 1999).

A figura 4.5 (empresa Moto Peças Transmissões, 2003) mostra a região da superfície de folga e de saída da lâmina com elevado desgaste. A lâmina não tem cobertura na superfície de saída, apenas na superfície de folga.

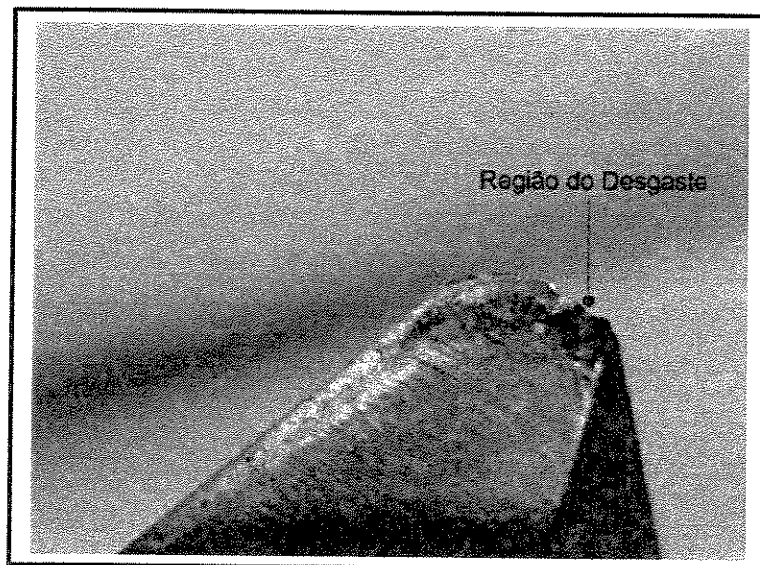


Fig. 4.5 – Desgaste na superfície de folga da lâmina

O desenvolvimento do desgaste em lâmina Gleason com coberturas especiais, como nitreto de titânio (TiN), é bem diferente do desgaste em lâminas sem cobertura. Essa diferença ocorre devido às propriedades da camada depositada sobre a lâmina.

Stadtfeld (2000) e Quirino (2000) colocam que a vida em lâminas com coberturas é determinada pelo desgaste na superfície de saída do cavaco. A figura 4.6 (empresa Moto Peças Transmissões, 2003) mostra a região da superfície de saída de cavaco de duas lâminas. A lâmina da esquerda é nova, portanto, sem uso e a lâmina da direita apresenta desgaste na superfície de saída após a usinagem de 65 peças. As duas lâminas são idênticas e para a mesma aplicação, porém, cada uma delas pertence a um jogo de 32 lâminas distinto. Nesta figura as lâminas tem cobertura de TiN em todas as superfícies.

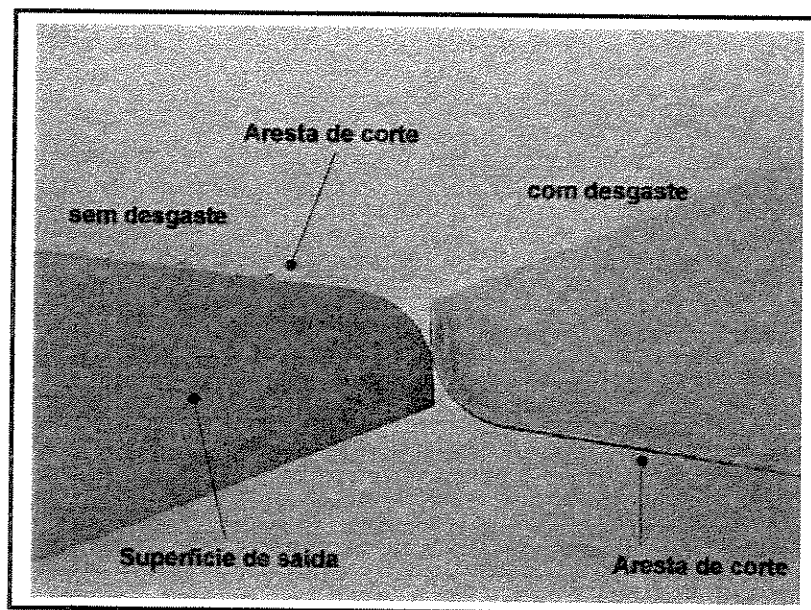


Fig. 4.6 – Desgaste na superfície de saída da lâmina

Quirino (2000) coloca que depois que o recobrimento foi desgastado ocorre crateramento na superfície de saída do cavaco, atingindo a aresta de corte da lâmina. Quando o desgaste de flanco (VBn – ver figura 4.2) atinge 0,2 a 0,3 mm, normalmente um crateramento de 100 à 200 microns já está presente, reduzindo a qualidade da peça produzida, deixando um acabamento ruim nos flancos dos dentes usinados e aumentando o risco dessas crateras crescerem. Este fato

pode levar à formação de trincas na região superior da lâmina, reduzindo assim o número de vezes em que a lâmina pode ser reafiada.

Segundo Muller (1986), as ferramentas recobertas que são reafiadas na superfície de saída do cavaco passam a ter como critério determinante de vida a profundidade de cratera, a qual limita a vida pela fragilização da aresta de corte e por ser mais acentuada que o desgaste frontal, pois a superfície de folga está sempre recoberta (protegida) e a superfície de saída, após a primeira reafiação não possui mais recobrimento algum.

A figura 4.7 (Muller, 1986) mostra um esquema do escoamento de cavaco em ferramenta recoberta com nitreto de TiN e em uma ferramenta sem cobertura na superfície de saída do cavaco.

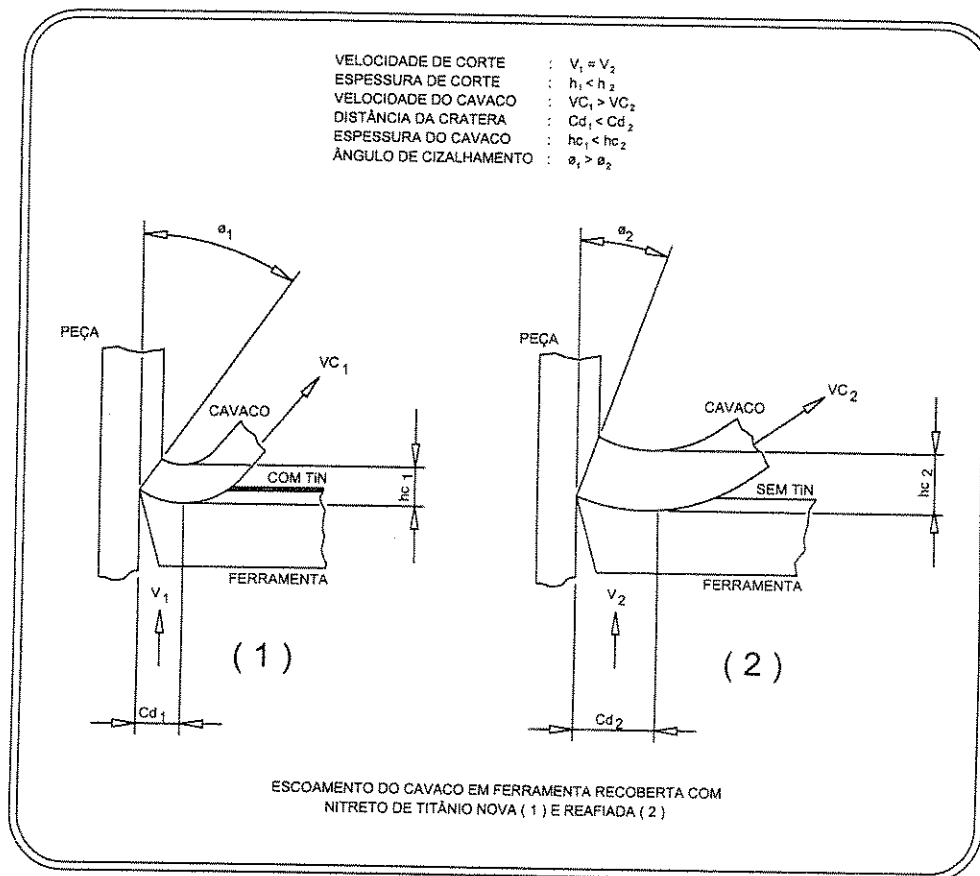


Fig. 4.7 - Escoamento do cavaco em ferramentas com e sem cobertura de TiN

Nota-se nesta figura que, com o aumento do coeficiente de atrito causado pela remoção da camada de TiN e a consequente diminuição do ângulo de cisalhamento (ϕ) ocorre:

- Aumento da velocidade do cavaco e portanto da velocidade de craterização;
- Aumento do grau de recalque e a força de corte e com isto o aumento do risco de quebra da aresta de corte da ferramenta

Ainda segundo este autor, geralmente a eficiência de uma ferramenta nova, com cobertura em todas as superfícies, é da ordem de 60% a 120% maior, comparada a uma ferramenta reafiada, e portanto, sem cobertura na superfície de saída do cavaco.

A figura 4.8 , Muller (1986) mostra a vida da ferramenta em duas situações distintas. A primeira situação mostra o desgaste de uma ferramenta recoberta com TiN reafiada (cobertura feita após a reafiação) e uma ferramenta sem cobertura utilizando-se os critérios de desgaste da cratera medido pelo deslocamento da aresta de corte, e o desgaste frontal medido em função também do deslocamento da aresta. Pode-se verificar a grande redução do desgaste frontal (1). Na segunda situação tem-se ferramentas com e sem cobertura em materiais bases diferentes em função do comprimento usinado, tendo como critério de fim de vida da ferramenta o deslocamento radial da aresta de corte. Pode ser verificado que após um determinado tempo de uso o desgaste tende a crescer rapidamente. Para se obter o máximo rendimento da ferramenta (máxima vida por afiação e máximo número de afiações) não devem ser ultrapassados os pontos indicados com “x” os quais devem ser detectados e fixados caso a caso pelo usuário (2). Pode-se ver nesta figura que a influência da cobertura de TiN para os desgastes da ferramenta é muito mais forte que a influência do material do substrato.

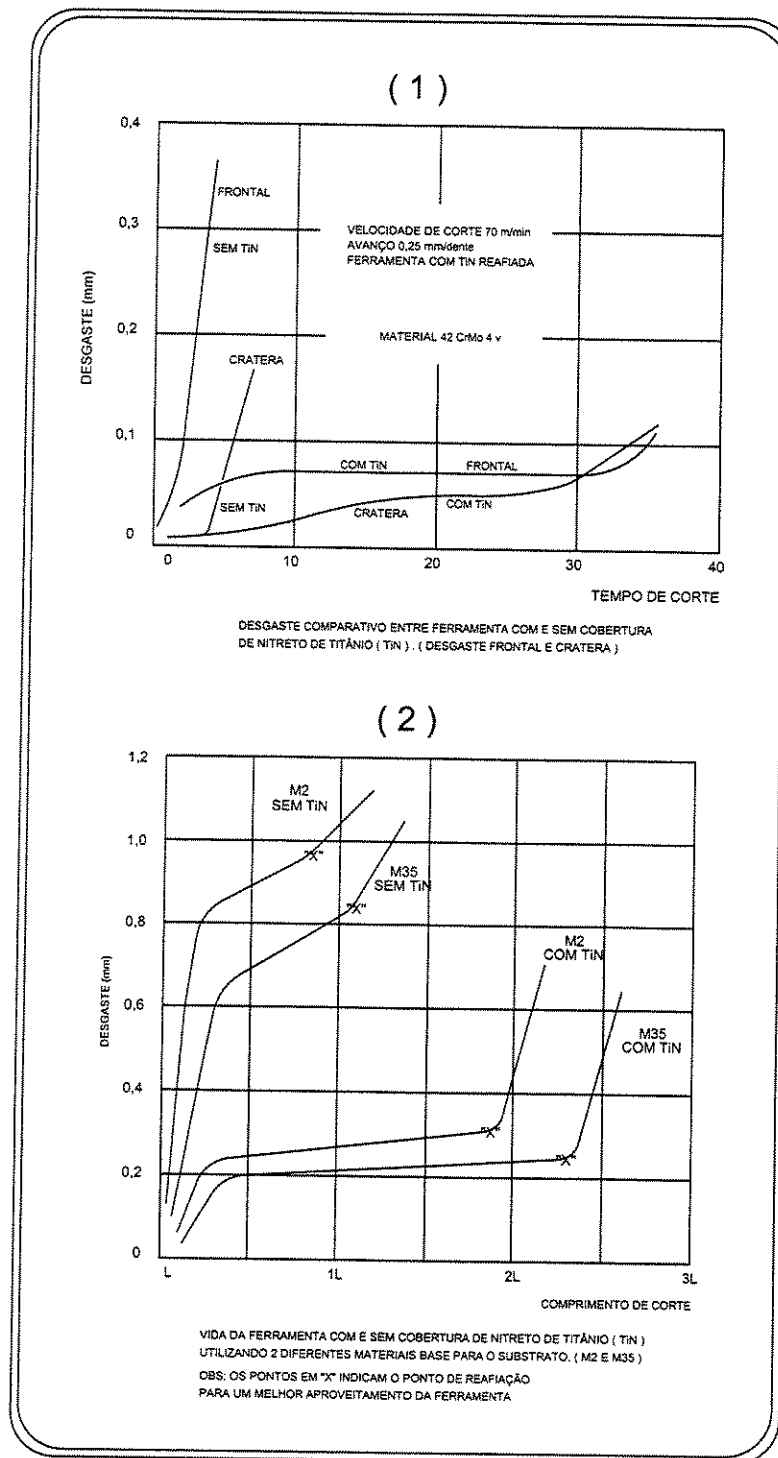


Fig. 4.8 - Desempenho de ferramentas com e sem cobertura de TiN

4.5 – Determinação dos problemas em lâminas Gleason (Gleason, 1982)

Segundo Gleason (1982), a grande questão relacionada a ferramentas de usinagem de engrenagens hipoidais é a performance do cortador e como mantê-lo durante toda a sua vida útil.

A figura 4.9, Gleason (1982) mostra o desgaste normal de uma lâmina alternada em comparação a 3 exemplos extremos de falhas em lâminas: Desgaste extremo, quebra e grandes profundidades de cratera.

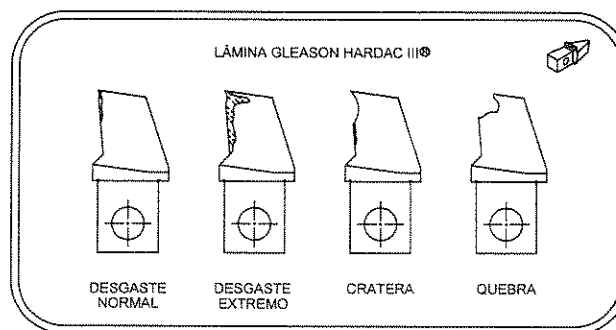
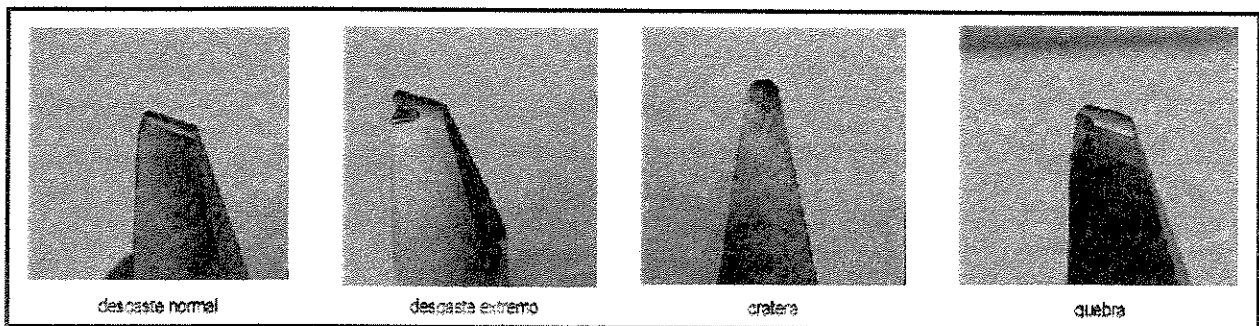


Fig. 4.9 - Tipos de falhas extremas

Vários fatores tecnológicos podem influenciar a vida das lâminas, resultado de condições anormais de trabalho, quais sejam: materiais, fluido de corte, limitações do projeto da engrenagem, eficiência do ciclo de corte, comprimento da ponta do cortador (point width), condições da máquina de usinagem e afiação. (Gleason, 1982). Quando se tem problemas com extremo desgaste, quebras ou grandes profundidades de cratera, a quantidade de material retirado na afiação se torna grande, e assim a vida total da ferramenta se reduz.

Alguns fatores devem ser levados em consideração para evitar a diminuição da vida útil da lâmina e conseqüentemente problemas com o produto final, quais sejam:

- **Limitações do projeto da engrenagem:** se o comprimento da ponta do cortador (point width cutter) (ver figura 3.5) for menor que 1,27 mm (0,050”) irá resultar em uma curta vida das lâminas. Em desbaste de engrenagens cônicas um curto comprimento da ponta do cortador irá geralmente produzir uma pressão do cavaco sobre o ângulo de folga da lâmina e criar um excessivo atrito entre lâmina e peça (chip scrubbing). O resultado é um acabamento superficial do flanco do dente ruim e o rápido desgaste da lâmina. (Gleason, 1982).
- **Material da peça:** Segundo Gleason(1982), a seleção adequada do material da peça é um fator de maior importância na prevenção de problemas com lâminas. O material deve combinar boas características de dureza e de estrutura. A dureza do material deve ser de 160 à 190 Brinell. A figura 4.10 mostra o comportamento do acabamento superficial da peça e da vida da ferramenta, tomando como referência a dureza do material.

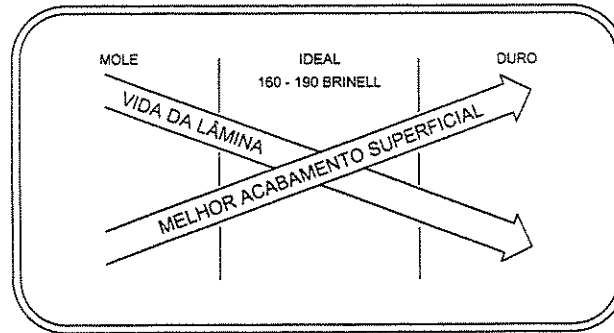


Fig. 4.10 - Influência do material do peça

- **Fluido de corte:** Como em qualquer outro processo de usinagem, o fluido de corte é outro fator importante na vida da ferramenta. Além de usar o fluido correto para este tipo de usinagem é preciso dar uma atenção especial à posição dos bicos de óleos. Em geral, muitos bicos devem ser direcionados na direção da rotação do cortador com a função de lubrificante. Um bico de fluido, com a função de refrigerante, deve ser colocado na direção oposta. As mais altas temperaturas ocorrem na interface cavaco – ferramenta e é lá que tem que tentar lubrificar. Já a refrigeração naquele ponto mostrado cria um gradiente de temperatura na ferramenta que propicia a refrigeração. A figura 4.11 Gleason (1982) mostra a posição correta do lubrificante e do refrigerante.

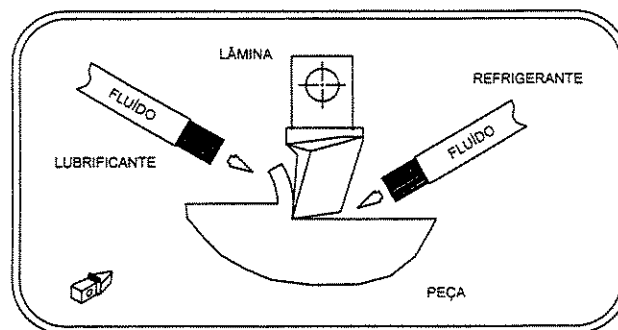


Fig. 4.11 Direcionamento do fluído de corte

- **Manutenção da qualidade do cortador:** Outro aspecto crítico na performance das lâminas é a manutenção da qualidade do cortador. Para manter a qualidade são necessários respeitar alguns critérios, quais sejam:
- Desvio axial entre as lâminas
- Desvio radial entre as lâminas
- Torque adequado para fixação das lâminas ao cabeçote porta lâminas

Precisão da afiação, tanto na afiação de lâminas para desbaste, como na afiação de lâminas para acabamento é recomendado que o acabamento superficial na superfície de saída do cavaco seja o melhor possível (ver item 4.6.6)

A figura 4.12, Gleason (1982), mostra o desvio axial e o desvio radial em lâminas alternadas Gleason.

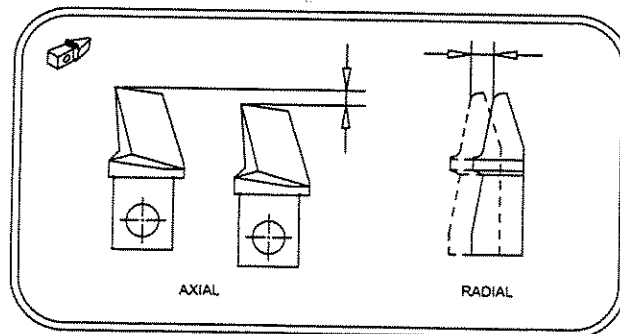


Fig. 4.12 - Desvio axial e radial em lâminas

Quando se usa as lâminas Hardac® III é possível corrigir estes desvios na montagem do cabeçote porta lâminas no eixo árvore da máquina. Ou seja, na preparação o operador tem condições de conferir e ajustar cada lâmina de maneira individual até todo o conjunto estar de acordo com o recomendado.

- **Eficiência do ciclo de corte:** A performance do cortador é diretamente relacionada com a eficiência do ciclo de corte. Velocidades de corte, velocidades de avanço, podem influenciar de alguma maneira na vida das lâminas. Neste trabalho foram utilizados os parâmetros de usinagem recomendados pela empresa Gleason, como sendo os ideais.

Outro ponto relacionado à eficiência do ciclo de corte diz respeito à preparação da máquina. A preparação deve respeitar rigorosamente os valores obtidos através do sumário de cálculo e preparação. Além disso, a correta fixação do cabeçote porta lâmina na máquina, bem como a verificação e ajuste das lâminas, é fundamental para a vida das lâminas e da manutenção da qualidade do produto. O ângulo de folga das lâminas influencia na vida das lâminas. Se o ângulo de folga esta de acordo com o sumário de cálculos , a pressão ou carga do cavaco será ideal e desta forma boa performance do cortador. Pequenos ou excessivos ângulos reduzem a vida das lâminas.

- **Análise e medição criteriosa de desgastes:** Um dos procedimentos recomendados para um bom controle para obter máxima vida da lâmina é a medição do desgaste usando lupa ou microscópio para determinar as características reais do desgaste da lâmina. É preciso ter condição e conhecimentos específicos para determinar o desgaste exato e ser capaz de distinguir entre desgaste das lâminas, marcas de queima de óleo ou descoloração. Em geral é preciso afiar a lâmina removendo o desgaste na superfície de saída ou de folga. Não é necessário remover a descoloração ou marcas de queima do óleo. Na análise do desgaste, é preciso buscar a lâmina com o maior desgaste entre todas e registrar este valor. Todas as lâminas devem ser afiadas com base no maior desgaste encontrado. A empresa Gleason recomenda a afiação de 10% a mais de material sobre o maior desgaste encontrado.

4.6 Mecanismos de proteção das lâminas

4.6.1 Características Gerais

O objetivo deste trabalho é a análise do desempenho das lâminas alternadas Gleason, construídas em aço rápido, utilizando diferentes tipos de coberturas especiais, no fresamento de engrenagens hipoidais. Isso porque, atualmente, a grande maioria das empresas continua utilizando o aço rápido em grande escala na usinagem deste tipo de engrenagem. Por outro lado, com os avanços tecnológicos dos fabricantes de máquinas, existe uma tendência natural para a utilização de ferramentas fabricadas com metal duro, devido aos bons resultados obtidos em relação à ferramentas construídas com aço rápido.

Porém, o custo ainda é muito alto quando se pensa em lâminas alternadas Gleason e, portanto, é normal que as empresas continuem a investir no desenvolvimento de lâminas de aço rápido com revestimentos.

Com a crescente demanda por novos produtos e velocidades cada vez maiores de resposta às necessidades do mercado, é de extrema importância analisar e buscar as melhores condições de usinagem, a fim de se ter um processo mais rápido, com menores custos e principalmente sem a perda da qualidade.

Assim, é necessário que se evite o desgaste prematuro das ferramentas de corte. Muitos processos de melhoria da resistência ao desgaste foram desenvolvidos, sendo os processos de revestimentos com coberturas de extrema dureza os que mais demonstram eficácia.

Portanto, o revestimento de ferramentas tornou-se um fator indispensável na moderna tecnologia de produção em que o objetivo é a alta produtividade (Abele e Dorr, 2002).

4.6.2 Histórico da utilização dos revestimentos

Segundo Suh (1976) a aplicação de revestimentos em peças e componentes com o objetivo de melhorar sua resistência ao desgaste teve início na década de 30. A deposição de

revestimentos está ligada à evolução dos materiais de ferramentas de corte, a partir do desenvolvimento do metal duro, patenteado no mesmo período.

Segundo Langendorfer (1982), começou em 1940, principalmente no período da 2ª Guerra Mundial, uma revolução no projeto e fabricação de ferramentas para usinar dentes de engrenagem com o objetivo de melhorar o perfil do cortador e possibilitar o aumento da vida útil da ferramenta.

Segundo Wick (1987) a aplicação de revestimentos em ferramentas de usinagem iniciou-se na década de 60. As primeiras ferramentas com coberturas, colocadas no mercado em 1969 pela empresa Sandvik, foram pastilhas de metal duro, as quais, receberam finas camadas de carboneto de titânio (TiC), através do processo CVD (deposição química a vapor), com o objetivo de reduzir os desgastes prematuros. (Suh, 1976 e Hartschek, 1983)

Schlarb e Switzer (2001) colocam que, por volta de 1980, foi desenvolvido simultaneamente na Europa e Japão o recobrimento de ferramentas com camadas de nitreto de titânio pelo processo PVD (deposição física de vapor). A partir deste momento, começou a ser introduzido definitivamente ferramentas fabricadas em aço rápido revestidas com camadas duras. Este desenvolvimento possibilitou aumento de produtividade, melhoria da qualidade das superfícies das peças usinadas e principalmente o aumento da vida útil.

4.6.3 Processo de revestimento

Os revestimentos para ferramentas de corte de metais podem ser realizados pelo processo de deposição química de vapor (CVD Chemical Vapour Deposition) e pelo processo deposição física de vapor (PVD Physical Vapour Deposition). (Yuhara, 2000 e Abele e Dorr, 2002)

Segundo Wick (1986) no processo CVD, o revestimento é acumulado sobre a superfície aquecida do substrato por deposição química da fase de gás em um reator. As vantagens deste processos são:

- Excelente aderência entre revestimento e substrato

- Fortes espessuras de revestimentos, geralmente de até 12 μm
- Possibilita a aplicação de múltiplos revestimentos, já que a composição dos revestimentos podem ser ajustadas na fase gasosa.
- Pode ser usado em ferramentas com geometria irregular
- É geralmente mais econômico que o processo PVD, pois mais ferramentas podem receber o revestimento ao mesmo tempo.

As limitações no uso do processo CVD estão relacionadas basicamente às altas temperaturas necessárias ao processo. O processo CVD requer temperaturas de até 1100°C para deposição do revestimento e, desta forma, as ferramentas construídas em aço rápido devem ser excluídas neste processo. (Wick, 1986). Esta alta temperatura, acima da zona de revenimento dos aços na qual o aço rápido perde suas propriedades mecânicas, com dureza e resistência, provoca também a descarbonetação e a deformação na geometria da ferramenta. (Wick, 1986).

Atualmente isto é superado pelos processos CVD de baixa temperaturas apoiados por plasma, (MTCVD) os quais podem usar temperaturas de revestimentos entre 400 e 600°C, mas que, não produzem boa aderência e qualidade equivalente ao revestimento CVD normal. (Cselle, 1995 e Abele e Dorr, 2002).

No processo PVD, a deposição de átomos ou moléculas é feita fisicamente a partir da fase de vapor.

Segundo Wick (1986) e Yuhara (2001), diversos tipos de processos PVD são utilizados atualmente para o revestimentos de peças e ferramentas de corte. A diferença básica entre eles consiste na maneira como o material metálico e sólido é evaporado. Entre os modos de evaporação o processo a arco é o mais empregado, porque propicia maior taxa de ionização (cerca de 90%).

Os átomos do material metálico evaporado e ionizado positivamente são acelerados em direção ao substrato submetido a um potencial negativo. Todo o processo transcorre sob alto vácuo e a atmosfera gerada a base de átomos metálicos e de gases reativos, ambos ionizados, denomina-se plasma. A deposição da cobertura é feita em temperaturas menores do que no processo CVD, em torno de 250 a 500°C.

Esse processo permite o revestimento de ferramentas construídas em aço rápido, pois a temperatura de operação está abaixo da zona de revenimento do aço rápido. Desta forma, não há riscos de perda da dureza superficial e as características dimensionais e as propriedades mecânicas do material não são alteradas. (Schlarb e Switzer, 2001).

Além de ser aplicado em baixas temperaturas, o processo PVD possibilita a aplicação de espessuras de revestimentos entre 1 a 4 µm, a geometria aguda da aresta de corte não é alterada, forte adesão da camada e alta dureza do revestimento. (Seminário Balzers®, 2002).

Entretanto, existem desvantagens na utilização do processo PVD, quais sejam:

- Má formação do revestimento em cavidades e rebaixos.
- Custo elevado do equipamento de PVD.
- Menor número de ferramentas podem ser revestidas ao mesmo tempo em comparação ao processo CVD.

A figura 4.13, Abele e Dorr (2002), mostra um esquema dos processos de revestimento CVD e PVD.

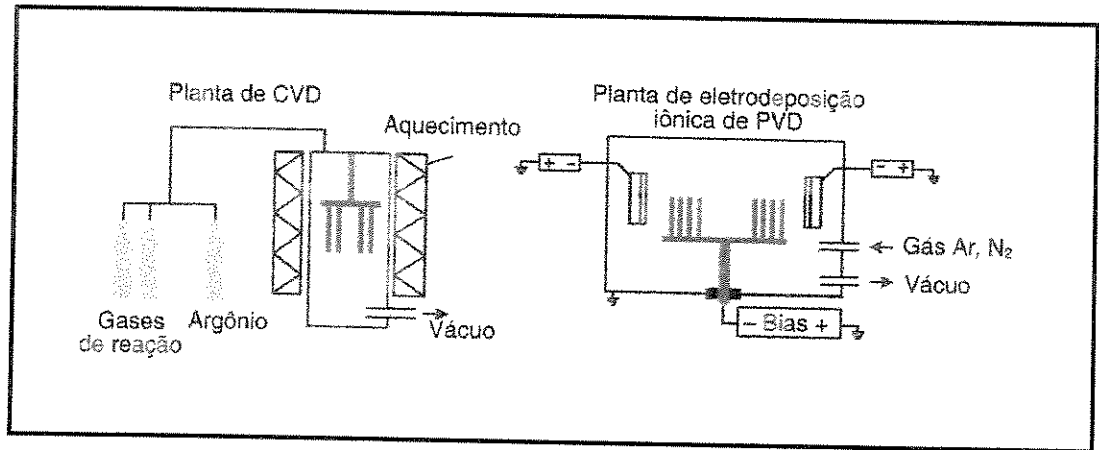


Fig. 4.13 Processo de revestimentos

4.6.4 Exigências para o metal base

Segundo Hatscheck (1983), Quirino (2000) e a apostila técnica da empresa Eaton, o material base precisa ter certas propriedades mecânicas, como dureza, resistência e módulo de elasticidade para que a camada superficial de TiN (nitreto de titânio) possa desempenhar sua função em uma operação de usinagem. O material base tem que ser compatível, pois quando a ferramenta está em serviço, deformações ocorrem na camada de TiN, gerando tensões de tração e compressão. O grau de deformações e as tensões resultantes diminuem com o aumento do módulo de elasticidade do metal base.

4.6.5 - Propriedade dos revestimentos

Segundo Sarwar (1997) e Sjöstrand et al (2001) as principais propriedades dos revestimentos são:

a) Propriedades essenciais

- estabilidade química

- alta dureza, da ordem de 2.300 HV
- estabilidade da dureza em altas temperaturas
- boa adesividade com o substrato

b) Propriedades desejáveis

- espessura ótima (camadas finas e uniformes)
- tensões residuais de compressão
- baixa condutividade térmica
- baixa adesividade com o material da peça (baixo coeficiente de atrito)
- ótima aparência

4.6.6 Tipos de Revestimentos

Segundo Wick (1986), Schlarb e Switzer (2001) e o seminário Balzers® (2002), atualmente existem inúmeros tipos de coberturas para aumentar o rendimento de ferramentas de usinagem. Alguns deles são:

- Nitreto de titânio (TiN)
- Carbonitreto de titânio (TiCN)
- Nitreto de titânio alumínio (TiALN)
- carboneto de titânio (TiC)

- nitreto de cromo (CrN)
- carboneto de tungstênio com carbono (WC/C)
- carboneto de cromo (CrC)
- carbonitreto de titânio multicamada gradual (TiCN + TiN)
- nitreto de titânio e nitreto de cromo gradual (TiN + CrN)
- nitreto de titânio alumínio – Nano – estruturado (TiALN)
- diamante policristalino (C)
- óxido de alumínio (Al_2O_3)

Segundo Stadtfeld (2000), os tipos de revestimentos indicados para lâminas gleason são:

- **nitreto de titânio (TiN):** é a cobertura mais utilizada pelas empresas que atuam com processos de usinagem. Possui boas propriedades mecânicas como dureza, tenacidade, aderência, estabilidade química e térmica e reduzido coeficiente de atrito.
- **carbonitreto de titânio (TiCN):** possui uma estrutura mais complexa, com o objetivo de conciliar boa aderência com o substrato e com alta dureza superficial. Possui uma dureza maior que a camada de TiN e o coeficiente de atrito é igual ao TiN.
- **nitreto de titânio alumínio (TiALN):** pode ser utilizado tanto os revestimentos com multicamadas (TiALN + TiN) como o revestimento com uma única camada (TiALN). A sua principal característica é de formar um filme protetivo extremamente denso e com alta adesão de Al_2O_3 , aumentando a resistência a difusão e oxidação do material. Possui baixa condutividade térmica.

A empresa Balzers do Brasil (Balzers, 2000) recomenda a utilização de dois revestimentos para lâminas Gleason, quais sejam:

- nitreto de titânio (TiN), citado acima. É denominado pela empresa Balzers como Balinit® “A”.
- carbonitreto de titânio multicamada gradual (TiCN + TiN) : Revestimento com elevada dureza e boa tenacidade, resistente a abrasão, utilizado em particular nas ferramentas submetidas a solicitações mecânicas elevadas, como no caso da usinagem de dentes de engrenagens. É denominado pela empresa Balzers como Balinit® “G”.

Todos os tipos de revestimentos citados, são classificados pela empresa Balzers Balinit do Brasil, através de utilização de uma marca registrada denominada “Balinit®”. O que deve ficar claro é que os revestimentos, independentemente de como são classificados pelos diversos fabricantes, possuem propriedades similares.

Portanto, a tabela 4.1, conforme o catálogo da empresa Balzers Balinit do Brasil (2002), mostra as características de alguns tipos de revestimentos.

Tabela 4.1 - Características dos Revestimentos

	BALINIT® A	BALINIT® B	BALINIT® D	BALINIT® FUTURA	BALINIT® X.TREME
<i>Composição Química</i>	<i>TiN</i>	<i>TiCN</i>	<i>CrN</i>	<i>TiAlN/TiN multicamada</i>	<i>TiAlN</i>
<i>Dureza (HV 0,05)</i>	<i>2300</i>	<i>3000</i>	<i>1750</i>	<i>3000</i>	<i>3500</i>
<i>Coefficiente de Atrito contra o aço (seco)</i>	<i>0,4</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,4</i>	<i>0,4</i>
<i>Espessura (µm)*</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>3</i>
<i>Max. Temperatura de Trabalho (°C)</i>	<i>600</i>	<i>400</i>	<i>700</i>	<i>800</i>	<i>800</i>
<i>Coloração</i>	<i>Dourada</i>	<i>Azul-Cinza</i>	<i>Prateado</i>	<i>grafite</i>	<i>grafite</i>
<i>Temperatura de Deposição (°C)</i>	<i>450</i>	<i>450</i>	<i>450</i>	<i>450</i>	<i>450</i>

	BALINIT® C	BALINIT® CAST	BALINIT® G	BALINIT® X CELL	BALINIT® X CEED	BALINIT® Diamond
<i>Composição Química</i>	<i>WC/C</i>	<i>CrC</i>	<i>Multi-camada</i>	<i>Multi-camada</i>	<i>TiAlN</i>	<i>C</i>
<i>Dureza (HV 0,05)</i>	<i>1000</i>	<i>1850</i>	<i>3000</i>	<i>2100</i>	<i>2600</i>	<i>8-10000</i>
<i>Coefficiente de Atrito contra o aço (seco)</i>	<i>0,2</i>	<i>0,5</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,4</i>	<i>-</i>
<i>Espessura (µm)*</i>	<i>3</i>	<i>5</i>	<i>4</i>	<i>8</i>	<i>5</i>	<i>6 - 30</i>
<i>Max. Temperatura de Trabalho (°C)</i>	<i>300</i>	<i>700</i>	<i>400</i>	<i>700</i>	<i>800</i>	<i>≈ 600</i>
<i>Coloração</i>	<i>preto</i>	<i>Prateado</i>	<i>Dourado</i>	<i>Prateado</i>	<i>Grafite</i>	<i>cinza</i>
<i>Temperatura de Deposição (°C)</i>	<i>250</i>	<i>480</i>	<i>480</i>	<i>480</i>	<i>550</i>	<i>800</i>

4.6.7 - Efeito redutor de desgaste através da utilização dos revestimentos

Segundo Wick (1986) e Yuhara (2001), os chamados revestimentos ou coberturas duras, como o TiN, aplicadas a superfície da ferramenta, são a chave para a melhoria do desempenho das ferramentas utilizadas para a usinagem em geral.

Segundo Yuhara (2001), os principais efeitos favoráveis na utilização de revestimentos duros são provenientes da redução do atrito, da menor geração de calor e menores forças de corte, da menor tendência à adesão do material da peça, resultando em uma menor transferência de material da superfície da ferramenta, do aumento da dureza superficial e portanto como consequência um menor desgaste abrasivo, da redução do mecanismo de difusão devido à propriedade do revestimento de formar uma barreira química e térmica.

A baixa condutividade térmica da camada dura em relação ao substrato significa que mais calor é retirado no cavaco e na peça, o que reduz as tensões térmicas nas lâminas gleason.

Segundo Mack (1990) e Cselle (1995), os resultados da utilização dos revestimentos são:

- condições de corte mais severas para uma mesma vida da ferramenta ou maior vida da ferramenta sob condições de corte iguais às aquelas utilizadas com ferramentas sem cobertura.

- maior vida da ferramenta entre reafiações sob as mesmas condições de usinagem
- devido à maior vida útil da ferramenta, ocorre a redução dos custos com ferramentas
- redução de custos com tempos não produtivos
- redução de consumo de potência da máquina
- melhoria na qualidade da peça, na forma de um melhor acabamento superficial, além da melhoria da precisão dimensional durante o corte
- aumento da produtividade

4.7 - Afiação de lâminas alternadas Gleason

4.7.1 - Preparação da ferramenta

Fischer (1997), coloca que a ótima preparação do substrato permite uma melhor adesão dos revestimentos e contribui para o sucesso das operações subsequentes de revestimentos.

Segundo o catálogo da empresa Balzers e Gleason (1982), quanto menor for a rugosidade das superfícies do substrato, significativamente maior será o rendimento da ferramenta quando utilizada em operações de usinagem. Portanto, as superfícies devem passar pelo processo de retificação ou polimento até atingir o brilho metálico. (Abele e Dorr, 2002)

Segundo Fischer (1997), a rugosidade superficial do substrato não é alterada pela deposição das camadas de TiN. Assim, quanto melhor for a rugosidade do substrato melhor será o escoamento do cavaco, o atrito entre ferramaneta / peça e ferramenta / cavaco será menor e a resistência ao desgaste da ferramenta será maior.

Em lâminas alternadas Gleason a rugosidade superficial deve ser a menor possível. O valor de acabamento recomendado é de aproximadamente Ra 0,25 μm . (Gleason, 1982)

Com os avanços da tecnologia de retificação, como a utilização de rebolos de CBN, é possível atingir níveis ótimos de acabamentos em lâminas Gleason. Assim, atualmente os valores de acabamento superficial, principalmente para lâminas construídas com metal duro, estão próximo a $Ra\ 1,6\ \mu\text{inch}$ ($Ra\ 0,04\ \mu\text{m}$). (Stadtfeld, 2000)

Outro fator importante para o bom desempenho da ferramenta é evitar a formação de trincas no momento de retificação, quando se está executando a afiação das lâminas. A remoção de volume adequado de material por passada do rebolo, rebolos bem dressados e refrigeração abundante podem evitar este tipo de problema.

A figura 4.14, (seminário Balzers®, 2002), mostra uma formação de trinca na superfície da ferramenta afiada.



Fig. 4.14 - Formação de trincas

Segundo a apostila da empresa Eaton e Gleason (1982), deve se ter cuidado para evitar que um calor excessivo seja gerado na afiação. É possível que o calor seja gerado de tal maneira que a face de corte da ferramenta seja amolecida, gerando um aumento na taxa de desgaste quando de sua utilização.

Segundo o seminário Balzers® (2002), é preciso também, além dos pontos até aqui citados, evitar as micro-rebarbas geradas pela afiação da ferramenta. As micro-rebarbas tem uma influência negativa nas ferramentas com revestimentos, porque com o rompimento destas micro-rebarbas no momento da usinagem, uma parte sem revestimento da aresta será exposta. Impurezas por debaixo das rebarbas resultam em problemas de adesão ao longo da aresta de corte. A figura 4.15, mostra as micro-rebarbas de afiação.

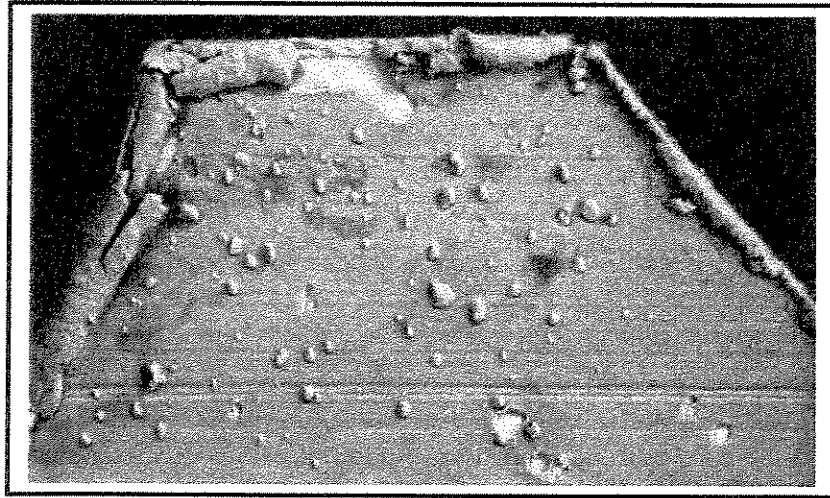


Fig. 4.15 - Micro-rebarbas de afiação

Seminário Balzers® (2002) coloca que, para se obter a preparação ótima dos substratos das ferramentas, é preciso ainda executar duas etapas finais, quais sejam:

▪ **Limpeza:**

Desengraxe

Limpeza ultra-sônica

Enxague

Secagem com ar quente

▪ **Pré-tratamento:**

Desgaseificação

Decapagem

Microjateamento

Segundo Gleason (1982), a afiação de lâminas gleason deve seguir os critérios determinados pelos chamados boletins de engenharia, conforme códigos Gleason 142, 171A e 191. Isso é necessário para manter a máxima performance das lâminas, bem como a manutenção da qualidade da engrenagem produzida.

Um bom processo de afiação pode garantir a continuidade de um bom processo de produção, promover a manutenção do baixo consumo de energia e potência da máquina em comparação com ferramentas novas. Em outras palavras, as afiações devem ter ótima qualidade para sempre proporcionar boa qualidade ao produto final e reduzir os custos da produção.

Segundo Quirino (2000), em processos de usinagem sempre ocorre algum tipo de avaria ou desgaste nas arestas de corte, o que prejudica a formação do cavaco e aumenta a força de corte, reduzindo a qualidade da peça. Assim, é necessário remover o desgaste quando este atinge um determinado valor.

Alguns fatores devem ser levados em conta para determinar este valor de desgaste determinante do fim da vida da ferramenta (momento em que se deve levar a ferramenta para a afiação), quais sejam:

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

- não pode ser muito alto, pois isto, além de ser prejudicial à qualidade da peça, gera uma grande remoção de material da lâmina no momento da afiação, e, com isso, um menor número de afiações possíveis das lâminas, o que também é anti-econômico.

A figura 4.16, (empresa Moto Peças Transmissões, 2003) mostra a operação de afiação de um cabeçote com 32 lâminas alternadas gleason do tipo Hardac® III.

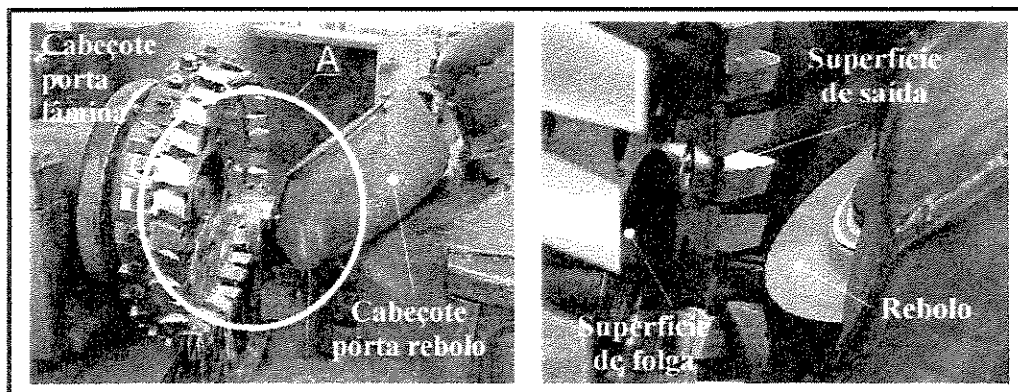


Fig. 4.16 - Afiação de lâminas alternadas gleason

4.7.2 – Como as lâminas alternadas Gleason são afiadas

Todo o procedimento de afiação de lâminas alternadas gleason segue os critérios da apostila sobre lâminas da empresa Gleason (1982) e da empresa onde os ensaios para este trabalho foram realizados.

A ferramenta utilizada é um rebolo prato especial para a afiação de lâminas gleason. Podem ser utilizados rebolos convencionais (óxido de alumínio) ou rebolos feitos de CBN (nitreto cúbico de boro).

A figura 4.17, Gleason (1982) mostra um exemplo de rebolo para afiação de lâminas.

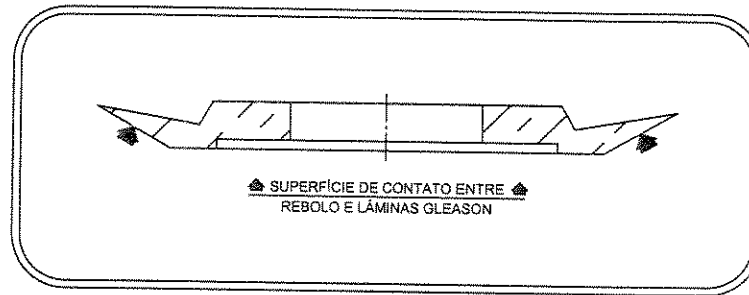


Fig. 4.17 - Rebolo para afiação de lâminas Gleason

Várias são as etapas para retificar um jogo de lâminas gleason, quais sejam:

- análise visual para distinguir entre desgaste e marcas de queima de óleo, trincas ou mesmo lâminas que apresentam quebra.
- medir desgaste com lupa graduada
- analisar entre as lâminas internas e externas qual apresenta o maior desgaste. A quantidade de material removido da lâmina é baseado sempre na lâmina que apresenta o maior desgaste. Todas as demais são afiadas com base nesta informação
- ajustar todos os divisores, indexadores, caso seja uma máquina convencional, ou acertar a programação no caso de uma máquina CNC.
- executar o desbaste de todas as lâminas para retirar todo o desgaste. Para a operação de desbaste a dressagem do rebolo é feita de maneira rápida. A Gleason recomenda afiar 10% a mais de material além do desgaste, como uma forma de segurança (ver item 4.5)
- executar o acabamento de todas as lâminas, buscando o melhor acabamento superficial possível. Para o acabamento, o rebolo é dressado de maneira mais lenta se comparado ao desbaste.

- analisar e medir parâmetros como altura das lâminas (todas devem estar com a mesma altura), folga entre lâminas, medir e anotar o quanto de material foi afiado e principalmente o quanto de vida útil (material) das lâminas pode ser afiado (ver figura 4.19).
- enviar para o recobrimento com as coberturas duras.

Em todo o processo de afiação das lâminas é usado fluido refrigerante em abundância para tentar evitar qualquer possível dano térmico à ferramenta em afiação.

A figura 4.18 mostra o controle, através de uma régua especial, da folga entre as lâminas. A figura 4.19 mostra o comprimento útil de trabalho da lâmina. (Gleason, 1982)

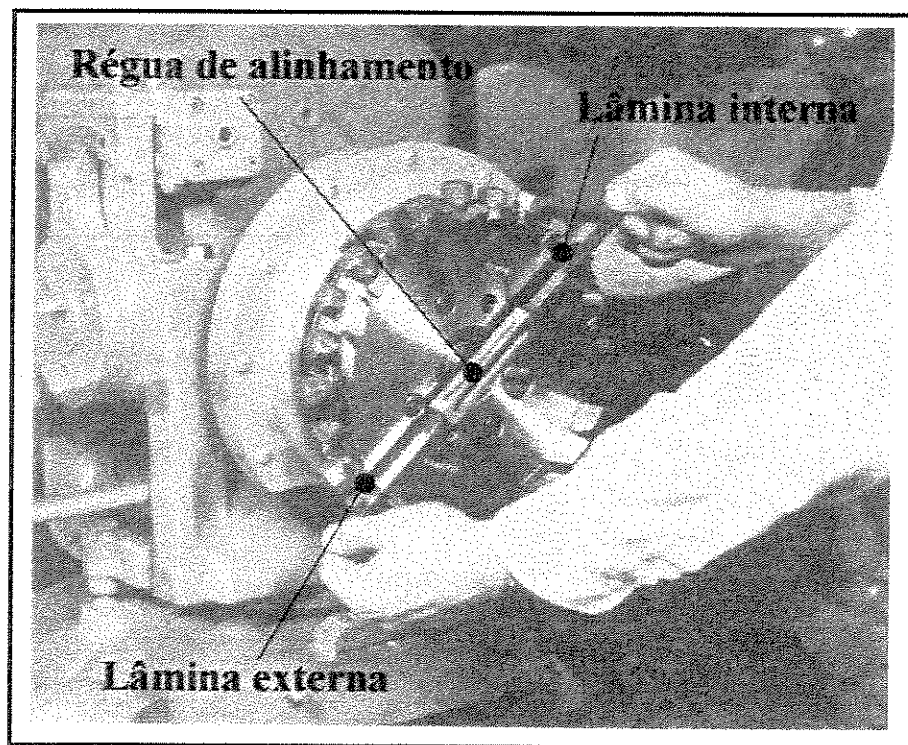


Fig 4.18 - Alinhamento entre lâminas

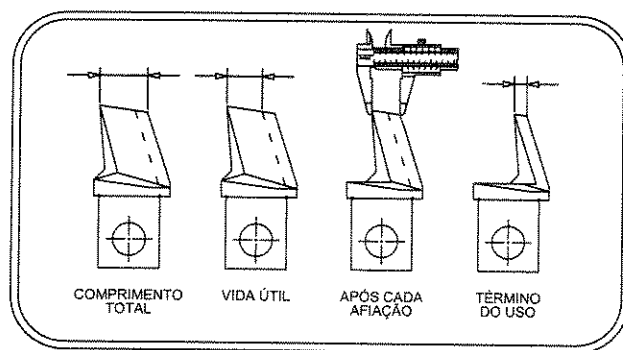


Fig. 4.19 - Medição após a afiação

Capítulo 5

Materiais, equipamentos e procedimentos experimentais

5.1 Introdução

A usinagem de engrenagens hipoidais é um processo muito específico. Desta forma, necessita de tecnologias e equipamentos diferenciados para fabricação deste importante e tradicional mecanismo de transmissão de movimento.

A engrenagem hipoidal denominada “coroa” (é sempre a engrenagem movida e o objeto deste trabalho) é um dos itens fundamentais no conjunto dos componentes do diferencial de veículos automotores. Assim, a coroa faz parte do mecanismo de transmissão de movimento final do motor para as rodas do veículo, proporcionando velocidade e torque.

Os ensaios foram realizados em uma empresa da região de Sorocaba, que é especializada na fabricação de transmissões para veículos automotivos, com forte atuação nos mercados de conjuntos cônicos para diferencial de caminhões, ônibus e máquinas agrícolas. É bom frisar as dificuldades que se encontra quando o pesquisador realiza os experimentos no chão de fábrica, pois os testes não podem interferir nas atividades produtivas da empresa.

Abaixo estão algumas das dificuldades encontradas para a realização dos ensaios no chão de fábrica, quais sejam:

- Obter a colaboração de operadores e gerentes das áreas envolvidas durante a realização dos ensaios, pois muitas vezes, informações importantes não são comunicadas ou documentadas por descuido ou esquecimento, tendo que se realizar novamente os testes.

- Justificar à alta administração os investimentos necessários em ferramental, principalmente para realizar os ensaios.

Máquinas funcionam conforme os turnos de revezamento dos operadores. Muitas vezes durante os ensaios, não foi possível acompanhar a troca de ferramenta devido à diversidade de horários. Assim, ocorreu a perda de alguns ensaios por descuido dos operadores na retirada da ferramenta, sem documentar os valores necessários para a pesquisa.

Peso das peças utilizadas nos ensaios de aproximadamente 35 Kg, o que dificultava o manuseio para aferições dimensionais necessárias para a pesquisa.

Mudar conceitos, processos e rotinas de trabalho.

Os experimentos foram realizados em uma máquina CNC cortadora de engrenagens cônicas e hipoidais, possibilitando o total monitoramento do processo de usinagem.

O principal objetivo deste trabalho é o controle da vida das lâminas alternadas Gleason Hardac® III. Assim, determinar um parâmetro que permita padronizar o momento para a troca da ferramenta e tirar dessa forma a análise subjetiva do homem. Com este parâmetro é possível padronizar os tempos de usinagem da operação seguinte (lapidação dos dentes) sem comprometer a qualidade do produto. Este trabalho possibilita também, a análise do desempenho de diferentes revestimentos especiais aplicados nas lâminas alternadas. Isso é possível através da análise do desgaste das lâminas, comportamento da máquina durante a usinagem, número de peças produzidas e características dimensionais da peça usinada.

O parâmetro usado para padronizar o momento de troca da ferramenta foi a rugosidade do flanco do dente das coroas hipoidais, tanto a rugosidade do lado da marcha frente, como a rugosidade do flanco do lado marcha ré.

Vale salientar que este parâmetro é válido para o sistema de corte chamado Fresamento de Face (Face Milling), sem geração, ou seja, utilizando o sistema de Formação (Formate), para

como o processo de corte denominado Completo (Completing) e com lâminas alternadas Gleason Hardac® III.

5.2 - Desenvolvimento dos ensaios e critérios de fim de vida

Para a realização desta pesquisa, seria possível escolher entre duas possibilidades de processo de usinagem dos dentes hipoidais.

O processo 5 cortes (desbasta e executa o acabamento em diferentes máquinas) ou o processo de corte completo (combina operações de desbaste e acabamento em uma única máquina e ferramenta).

Optou-se pelo processo de corte completo. Isso porque é um processo mais recente e que apresenta maiores problemas de acabamento superficial no flanco do dente. Além disso, existe uma enorme falta de critérios de usinagem para a determinação de fim de vida da ferramenta e critérios para afiação das lâminas alternadas.

Já no processo de 5 cortes o problema com acabamento superficial dos flancos é menor e não prejudica a operação de lapidação, posterior ao corte.

Além do processo de corte, outros pontos foram fixados para a realização deste trabalho, quais sejam:

- Quanto a geração: optou-se pelo sistema de formação (Formate)
- Quanto ao sistema de corte: optou-se pelo sistema de fresamento de face (Face Milling)
- Quanto ao método de corte: optou-se pelo processo bilateral (Spread Blade)
- Quanto ao sistema da ferramenta: para a realização deste trabalho optou-se pelo sistema Hardac® III. Neste sistema são fixadas 32 lâminas insertadas em um cabeçote especial

porta lâminas adequado. São 16 lâminas para usinar a marcha frente e 16 lâminas para usinar marcha ré, montadas e fixadas de maneira alternada.

A figura 5.1, Gleason (2002) mostra um cortador Hardac® III com lâminas alternadas.

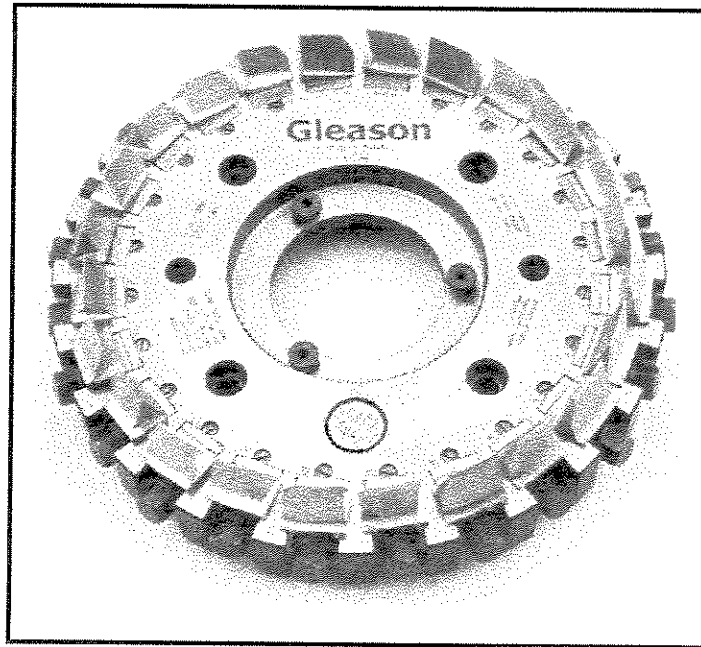


Fig. 5.1 – Ferramenta Hardac® III

- Quanto aos parâmetros de usinagem: optou-se por utilizar os parâmetros de usinagem sugeridos pelo fabricante da máquina e das ferramentas. Segundo a empresa Gleason os dados como velocidade de corte, avanço e rotações são ideais para se obter a qualidade nos produtos e alta vida útil das lâminas e do próprio equipamento. Além disso, não era possível alterar os parâmetros para não interferir na produção da empresa onde os ensaios foram realizados.

Assim, as condições para a realização dos ensaios foram mantidas constantes e rigorosamente como acontece no chão de fábrica diariamente, desde a primeira peça do ensaio até a última. Estas condições estão citadas mais a frente.

Antes da realização deste trabalho a determinação do fim de vida das lâminas era feito através de uma análise visual e muito subjetiva do especialista da área. Esta análise era feita da seguinte forma:

1) Após a Usinagem da primeira peça do lote o especialista da área examinava visualmente o acabamento superficial do flanco do dente da engrenagem. Esta verificação era feita no lado do dente marcha frente e do lado do dente marcha ré. Se o especialista considerasse o acabamento do dente bom, a peça era encaminhada ao departamento de metrologia que analisava todo o dimensional da peça. Se todos os dados estivessem corretos, o lote era liberado para operação.

2) Após a usinagem de algumas peças, o especialista realizava apenas uma nova análise visual. Dependendo de sua interpretação visual do acabamento era permitido ou não a continuidade da operação. Este processo de inspeção continuava até o especialista da área parar o processo de usinagem. Assim, visualmente era determinado se o acabamento estava ruim e consequentemente fora do especificado e, portanto, era chegado o momento da troca da ferramenta para a afiação. Neste momento a ferramenta também era inspecionada visualmente (na própria máquina) para saber os possíveis motivos que tornaram o acabamento mais grosseiro.

3) A ferramenta era retirada da máquina e enviada para a afiação e, quando necessário, as ferramentas eram encaminhadas novamente para o processo de revestimento com coberturas especiais, como por exemplo TiN. No departamento de afiação a análise da ferramenta também era feita de maneira muito subjetiva pelo operador. As lâminas eram inspecionadas visualmente para saber qual tipo de avaria ela apresentava e qual lâmina apresentava o maior desgaste. Visualmente se estimava o valor desse possível desgaste e, portanto, o volume de material a ser retirado na afiação. Por exemplo, se o operador estimasse 0,3 mm de desgaste de flanco, o material a ser retirado na afiação seria aproximadamente 0,5 mm ou mais, para evitar futuros problemas quando a ferramenta voltasse para a usinagem das peças.

Muitas vezes o operador associava marcas de queima de óleo na superfície de folga da lâmina com desgastes, o que ocasionava um alto valor de material removido da lâmina na afiação. Por muito tempo criou-se uma cultura entre os afiadores que era preciso retirar grandes

quantidades de material da lâmina para ter certeza que todos os possíveis desgastes foram eliminados. O desperdício de material da lâmina era alto e, conseqüentemente, existia uma redução do número de vidas da lâmina.

Para os ensaios deste trabalho, o momento de fim de vida da ferramenta foi determinado pelo pesquisador, utilizando como critério o acabamento superficial do flanco do dente. Os fatores que levaram à escolha deste critério de fim de vida foram: a dificuldade de se medir o desgaste da lâmina fixada na máquina, já que é impossível retirá-las no meio da usinagem do lote; os valores de acabamento estavam fora do exigido em processo de produção em grande parte das peças usinadas, o que, prejudicava a operação seguinte de lapidação dos dentes e a qualidade final do produto; o tempo de utilização da ferramenta apresentava uma grande variabilidade, ou seja, em determinados momentos, a ferramenta era utilizada além de sua vida efetiva e em outros momentos, esta utilização se dava aquém da mesma.

Os ensaios foram realizados da seguinte forma:

Após a usinagem da primeira peça do lote a ser utilizada para ensaios, a peça era levada ao departamento de metrologia que realizava todas as análises dimensionais. Nesse momento a rugosidade do flanco do dente, em ambos os lados, marcha frente e marcha ré, era medida e anotado pelo pesquisador. A rugosidade era medida em quatro posições, divididas a cada 90° em cada peça. Em cada uma destas quatro posições foram medidos durante todo o ensaio dois dentes da coroa hipoidal. A leitura era feita em três posições ao longo do comprimento do dente, uma no “calcanhar”, outra no meio e a última no “dedão”. O cut off do rugosímetro foi ajustado em 0.8 mm.

A figura 5.2, mostra a medição da rugosidade do dente da coroa hipoidal.

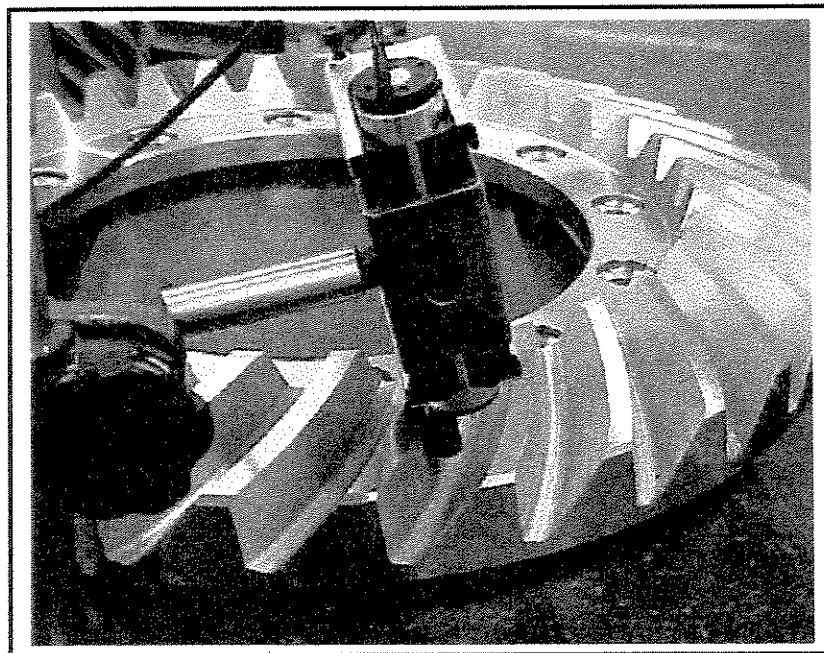


Fig. 5.2 – Determinação da rugosidade do flanco do dente

Após a aprovação da primeira peça do ensaio, o lote de peças era liberado para fabricação e os dados podiam ser computados para posterior análise do pesquisador.

Ao término da usinagem de cada peça, o operador da máquina gravava um número seqüencial na peça e o pesquisador media a rugosidade superficial do flanco do dente. Nos primeiros ensaios foram medidos 100% das peças usinadas, nos demais ensaios os valores eram medidos e anotados a cada 3 peças usinadas. Essa seqüência continuou até o término deste trabalho.

Quando o valor da rugosidade superficial atingia a faixa de $Ra\ 3,5\mu m$ e $Ra\ 4\mu m$ a operação era interrompida e o ensaio era considerado como terminado (limite de vida da ferramenta). Esse valor foi respeitado para que a operação posterior de lapidação do dente não fosse prejudicada, bem como a qualidade final do produto tomando como base os critérios da empresa onde os ensaios foram realizados. Quando esses valores são ultrapassados o risco de fabricar produtos fora do especificado é grande e o trabalho de lapidação fica sobrecarregado para levar a engrenagem a sua rugosidade final de projeto que é $Ra\ 1,6\mu m$.

Chegado o limite de fim de vida especificado nos ensaios, a ferramenta era substituída e enviada para o departamento de afiação onde seria analisada. Para todas as ferramentas utilizadas neste trabalho, o pesquisador acompanhou o desgaste na superfície de saída e de folga. Foram medidos e anotados no departamento de afiação os valores do desgaste e a quantidade de material retirado da lâmina na afiação. A avaliação na empresa do desgaste, após a conscientização e treinamento dos afiadores, se deu com o auxílio de uma lupa graduada (ampliação de 8x). Utilizou-se também um microscópio ótico Leica e o software Global imagem com ampliação de 50x.

A figura 5.3, mostra um flanco do dente de uma peça deste trabalho, com a rugosidade superficial com valores próximos a $Ra\ 4\mu m$.

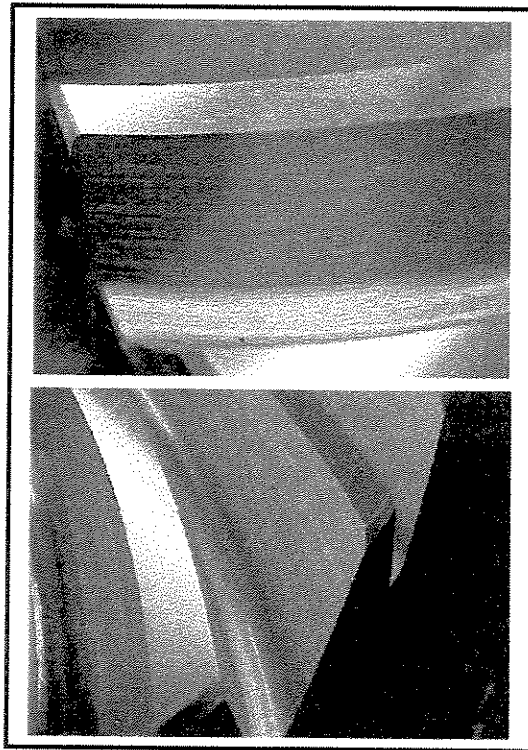


Fig. 5.3 - Rugosidade do flanco do dente

Durante todos os ensaios foram medidos e registrados os valores de porcentagem da potência da máquina utilizada durante a usinagem. Todos os dados registrados foram da primeira

a última peça, levando em consideração os valores de potência no início da vida das lâminas e os valores de potência no fim da vida das lâminas. O sistema CNC da máquina informava automaticamente estes dados através do display da máquina.

A figura 5.4, mostra uma lâmina sem cobertura na superfície de saída do cavaco, quando a potência utilizada apresentava valores mais altos, após o término de um dos ensaios.

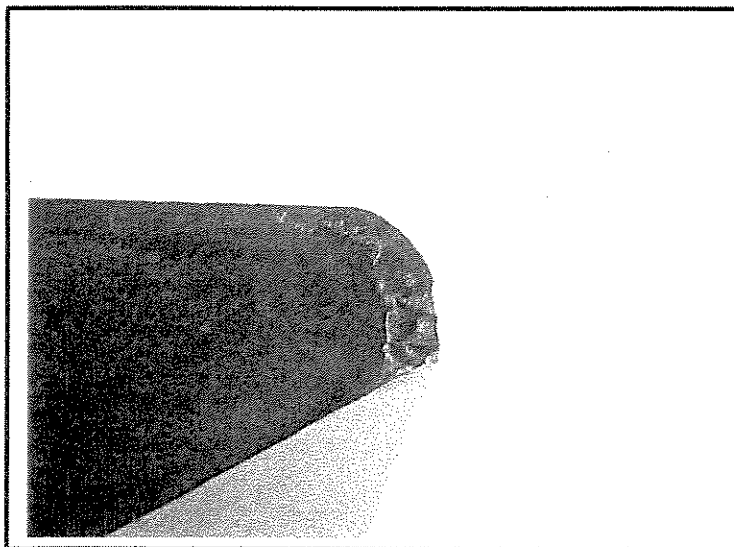


Fig. 5.4 - Lâmina alternada sem revestimento na superfície de saída após ao fim de um ensaio.

Para a realização deste trabalho foram utilizados vários jogos de lâminas com diferentes revestimentos superficiais. Um desses ensaios não utilizou revestimento na superfície de saída do cavaco da lâmina após o processo de afiação. Para cada diferente tipo de revestimento os critérios dos ensaios foram respeitados e a seqüência de trabalho mantida.

Em determinados momentos, alguns valores foram desprezados, porque em alguns ensaios houve lascamento ou quebra das lâminas, fazendo com que os valores de rugosidade fossem muito além do permitido em processo. Quando havia um lascamento na lâmina a rugosidade do dente atingia subitamente valores de $Ra\ 6\mu m$.

5.3 - Máquina, Material e Ferramenta

A máquina utilizada foi uma Gleason CNC Phoenix® 1000 HC Hipoidal, com 6 eixos controlados para corte de coroas e pinhões cônicos e hipoidais. Este equipamento permite a usinagem de engrenagens utilizando fluido de corte em abundância ou através do corte a seco utilizando lâminas de metal duro. Esta máquina possibilita a usinagem de qualquer tipo de engrenagem cônica e hipoidal, utilizando qualquer tipo de método de corte e ferramenta desenvolvido pela empresa Gleason.

O sistema CNC da máquina permite a verificação com precisão de todos os dados necessários para a realização dos ensaios como velocidade de corte, monitoramento dos avanços, rotações e potência utilizada.

A figura 5.5, mostra a máquina utilizada neste trabalho.

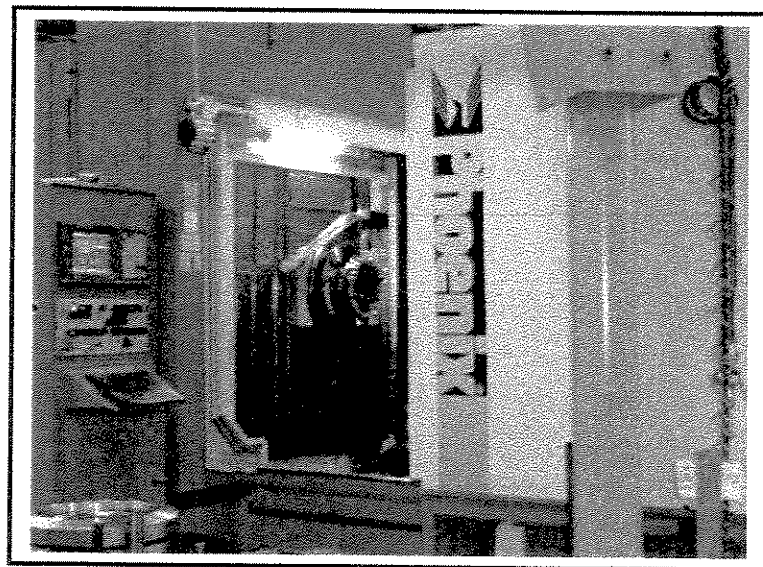


Fig. 5.5 – Máquina Gleason Phoenix® 1000 HC

O óleo lubrificante utilizado foi o integral de base mineral aditivado DMI 046 da empresa Shell. Sua densidade é de 0,885 a 20/4°C, viscosidade cinemática 45,90 mm²/s a 40°C e teor de metais em 0,230% P.

O material da peça nos ensaios era o aço SAE 4320-H, forjado e normalizado com dureza variando entre 163 a 187 HB.

A figura 5.6, mostra uma peça utilizada para a realização dos ensaios.

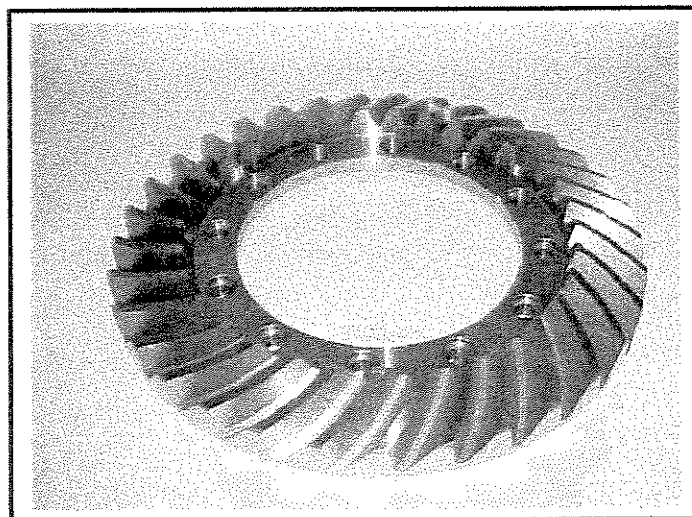


Fig.5.6 - Engrenagem hipoidal

Foi utilizado para a análise da rugosidade dos flancos do dente um rugosímetro Perthmoter - Mahr código M4P, calibrado conforme certificado RBC número 21000-1/2002. O rugosímetro estava fixado a um desempeno de granito da empresa Mitutoyo. Outro equipamento utilizado foi uma máquina quadrimensional Zeis Prismo 7 - HTG Vast, para executar o mapeamento do dente da peça usinada e verificar se o desgaste das lâminas não estava afetando as características do dentado.

A figura 5.7, mostra todos os equipamentos utilizados na verificação dimensional para a realização dos ensaios.

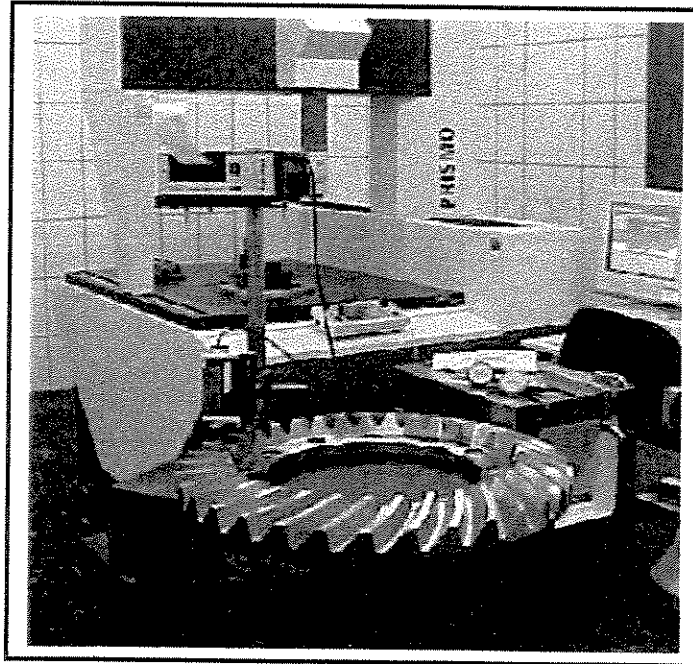


Fig. 5.7 - Equipamentos para análise da rugosidade e dimensional do dentado.

A ferramentas utilizadas foram lâminas insertadas do tipo Hardac® III, construídas em aço rápido do tipo ASP 23 (Ver item 3.9.8 Materiais para lâminas e a tabela 3.1).

Quanto aos tipos de revestimentos, seis tipos foram os testados, quais sejam:

- 1- Lâminas insertadas com revestimento original de TiN da empresa Gleason, vindas dos Estados Unidos ou Inglaterra. (Lâminas já vem com o revestimento da fábrica)
- 2- Lâminas insertadas com revestimento de TiN. A lâmina é comprada branca (sem revestimento) e depois é enviada à fornecedor nacional, que executa o trabalho de revestimentos das lâminas.
- 3- Lâminas insertadas com revestimento de TiCN + TiN. As lâminas sofrem o mesmo processo do item 2.
- 4- Lâminas reafiadas e, portanto, sem revestimento na superfície de saída de cavaco. Essa condição foi testada para os 3 tipos de revestimentos citados acima.

5- Lâminas insertadas reafiadas na própria empresa onde os testes foram realizados. Estas lâminas foram enviadas à um fornecedor nacional que executou o recobrimento com TiN. Assim, as lâminas eram testadas novamente com um novo revestimento em todas as superfícies da lâmina, mas não mais com a afiação original da empresa Gleason. Os ensaios para esta condição foram repetidos sete vezes.

6- Lâminas insertadas reafiadas na própria empresa onde os testes foram realizados. Estas lâminas foram enviadas à um fornecedor nacional que executou o recobrimento TiCN+TiN. A partir deste ponto, a sequência do ensaio foi igual ao item 5.

Devido ao fato de que o item 4 resulta em 3 ensaios (3 tipos de revestimentos somente na superfície de folga da ferramenta), realizou-se 8 ensaios. Cada ensaio foi repetido 4 vezes, com exceção do ensaio cuja ferramenta usava revestimento de TiN (item 1 e item 5) que foi repetido 7 vezes, porque é o revestimento normalmente utilizado pela empresa, é o mais barato e também é o recomendado pela Gleason, fabricante da máquina e da ferramenta.

Um ponto que deve ficar claro é referente aos revestimentos de TiN testados neste trabalho. Depois de uma análise feita pela empresa Balzers Balinit do Brasil em seu próprio laboratório aqui no Brasil, antes do início dos ensaios, ficou constatado que não existe diferença entre os revestimentos de TiN das lâminas vindas do exterior e o revestimento aplicado aqui no Brasil. Ambos são nitreto de titânio aplicado pelo processo P.V.D. O que diferencia uma lâmina da outra neste caso é a presença de uma possível queima no substrato. Este fato é evidenciado pela faixa entre o substrato e a cobertura, na lâmina que foi revestida pelo fornecedor nacional.

A figura 5.8, mostra o detalhe do revestimento “original” Gleason com o material base da lâmina e o detalhe do revestimento feito por um fornecedor nacional. (Ensaio feito no Laboratório da empresa Balzers, 2002)

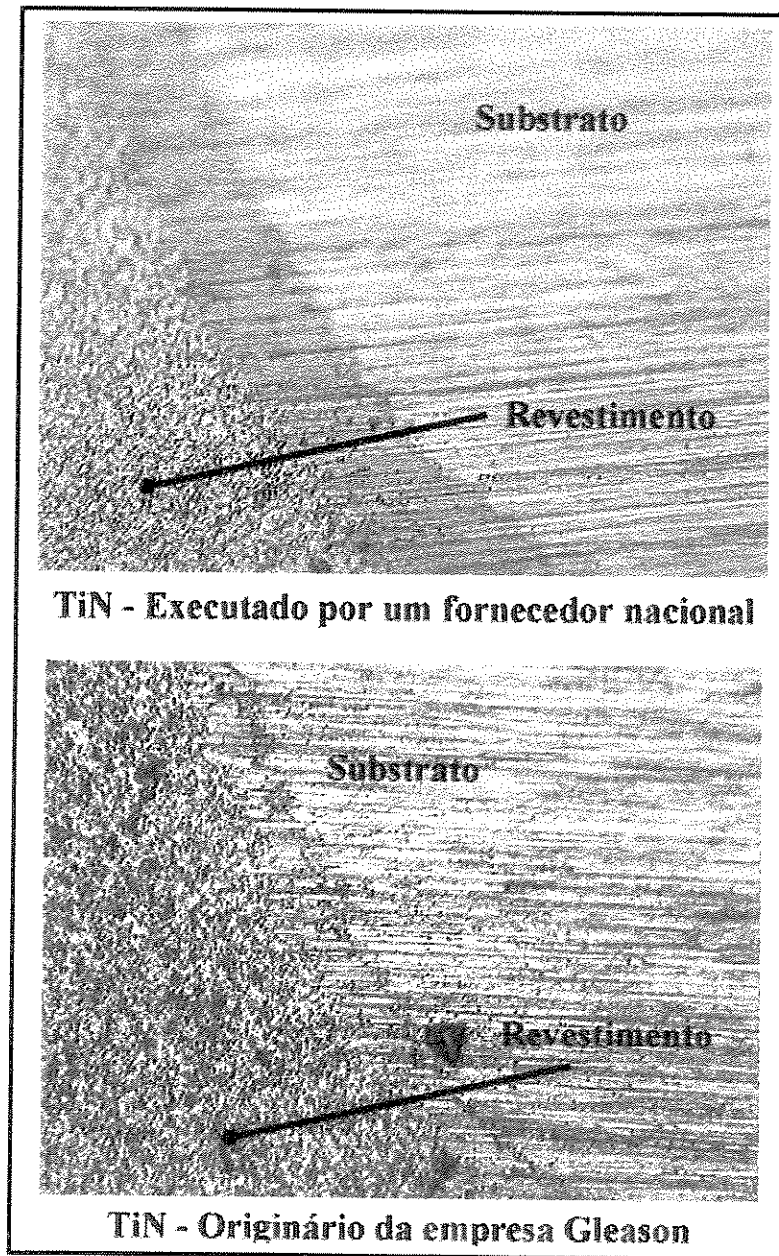


Fig.5.8 – Detalhe da cobertura de TiN executado por um fornecedor nacional e TiN originário da empresa Gleason

A figura 5.9, mostra uma lâmina externa e uma lâmina interna Hardac® III, com cobertura de TiN .

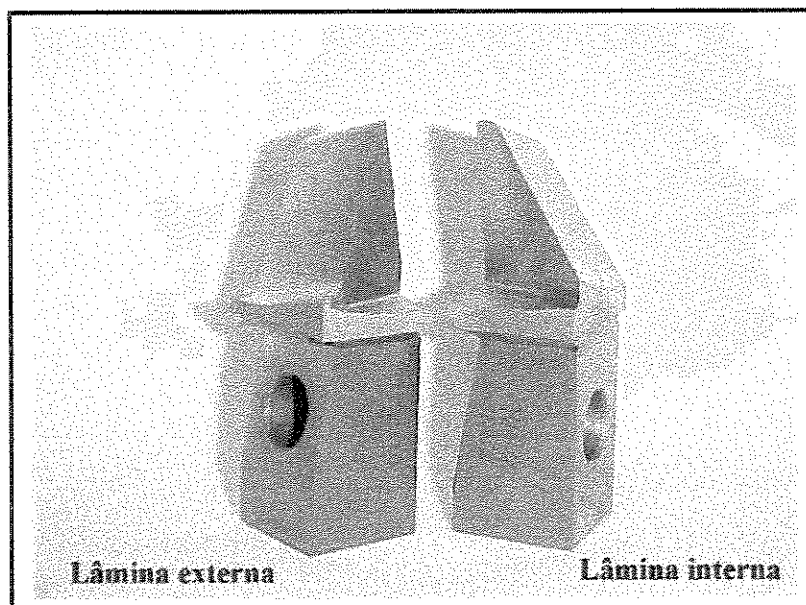


Fig.5.9 - Lâminas insertadas externa e interna com cobertura de TiN executada por um fornecedor nacional

Os ensaios foram realizados em engrenagens hipoidais (coroas), com as seguintes características:

- 35 Kg
- altura do dente usinado igual a 24 mm
- diâmetro externo de 480 mm
- sentido da hélice a direita
- 35 dentes a serem usinados
- módulo normal 13,714

Optou-se por utilizar coroas hipoidais com as mesmas características para todos os ensaios. Isso porque, independente de valores de módulo, número de dentes, ângulo de hélice ou mesmo ângulo de pressão, o parâmetro de rugosidade do flanco do dente é o fator crítico, quando se utiliza o processo de corte Completo (Compliting).

Assim, crê-se que os resultados obtidos com os ensaios são válidos para coroas hipoidais com outros dados de dentado. Porém, quando se usina uma engrenagem hipoidal com lâminas de metal duro e utilizando o processo de corte completo, os resultados deste trabalho não são válidos.

A figura 5.10, mostra o dente da coroa hipoidal usinado durante os ensaios.

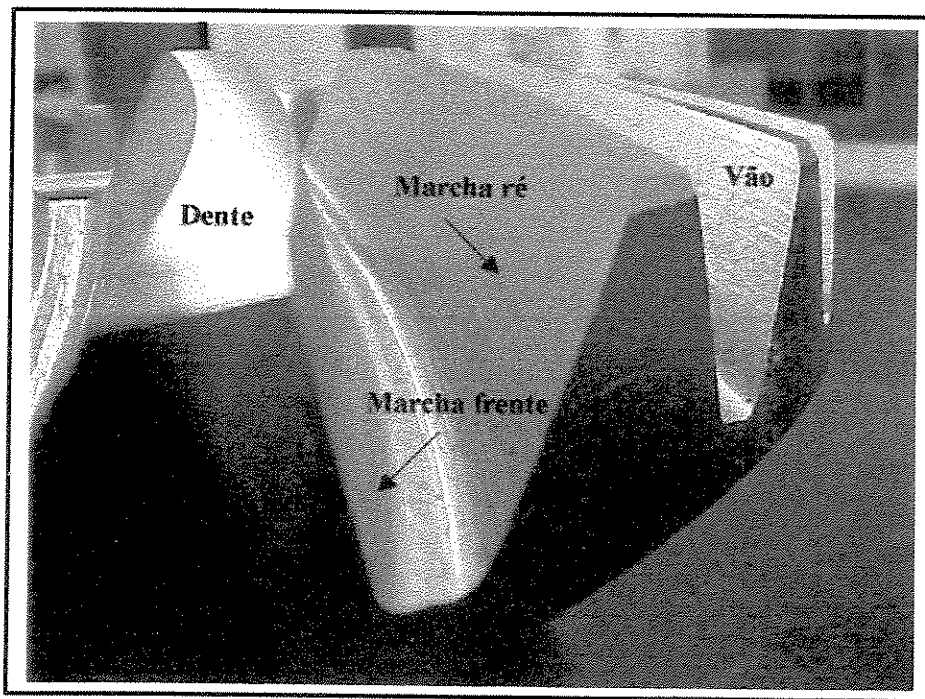


Fig.5.10 - Perfil do dente usinado

5.4- Parâmetros de usinagem nos ensaios.

A figura 5.11, mostra a operação de usinagem da engrenagem hipoidal utilizada neste trabalho.

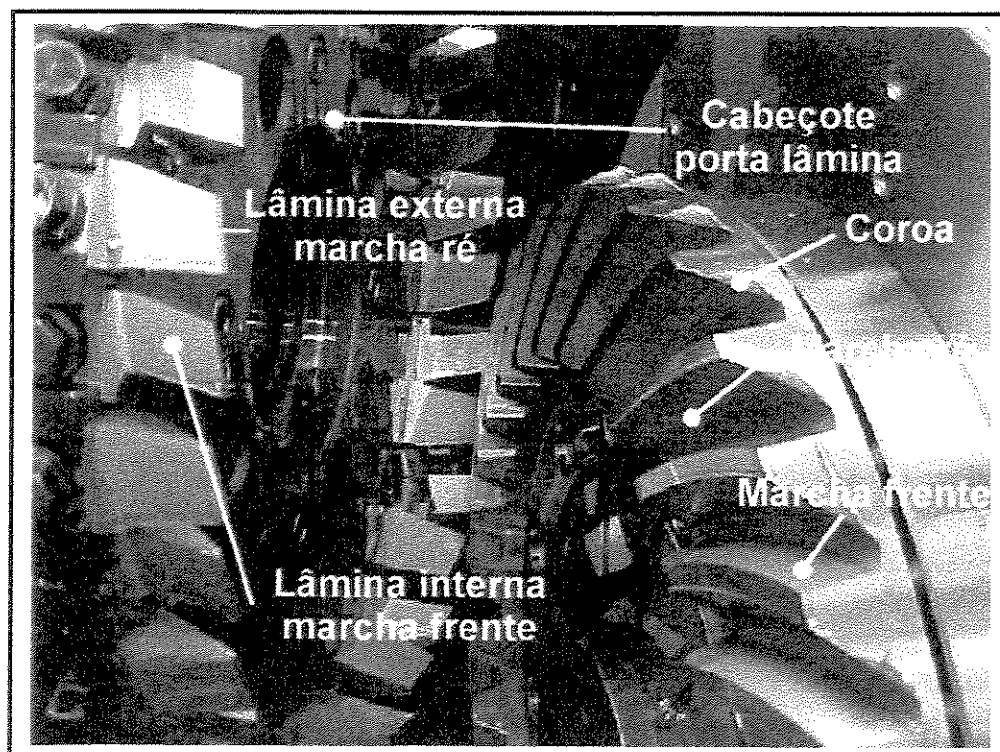


Fig.5.11 - Operação de usinagem do dente hipoidal.

5.4- Parâmetros de usinagem nos ensaios

Para a realização deste trabalho adotou-se as seguintes condições de usinagem:

- Ferramenta: 32 lâminas alternadas Hardac® III - 16 lâminas marcha frente – 16 lâminas marcha ré
- Velocidade de corte: 54 m/min
- Rotação da ferramenta: 48 rpm

POSIÇÃO DA LÂMINA NO DESBASTE

Posição da lâmina	Altura do dente	Avanço por faca	Velocidade de avanço
Pos. 1	24,97 mm	0,2286 mm	175 mm/min
Pos. 2	15,13 mm	0,1524 mm	117 mm/min
Pos. 3	3,33 mm	0,061 mm	47 mm/min
Pos. 4	0,38 mm	Início acabamento	Início acabamento

POSIÇÃO DA LÂMINA NO ACABAMENTO

Posição da lâmina	Altura do dente	Avanço por faca	Velocidade de avanço
Pos. 4	0,38 mm	0,0381 mm	29,1 mm/min
Pos. 5	0	Dente acabado	Dente acabado

A figura 5.12, mostra a posição das lâminas no momento do processo de usinagem dos dentes, mostrando passo a passo todas as etapas de desbaste e acabamento.

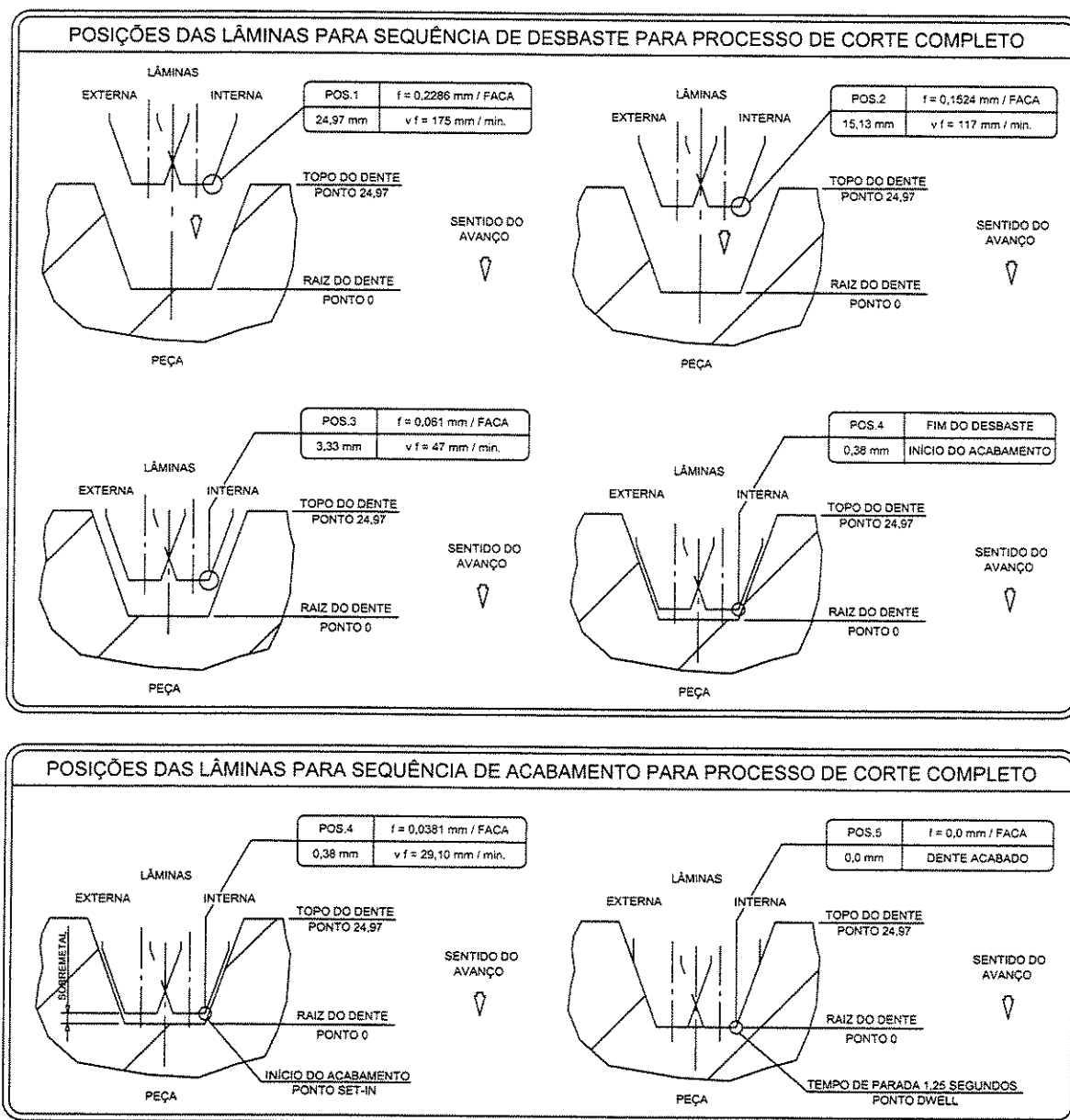


Fig. 5.12 - Posições de desbaste e acabamento das lâminas no corte do dente

As condições de usinagem adotadas foram as recomendadas pela empresa Gleason. Estas recomendações são as ideais para a usinagem destas peças, obtendo-se desta forma o melhor rendimento da máquina e das lâminas.

Para todos os ensaios foram mantidas as condições de usinagem e da peça, diferenciando apenas o tipo de cobertura.

O objetivo final era determinar critério objetivo de fim de vida e verificar qual é o melhor tipo de cobertura superficial para as lâminas. Assim tirar a análise visual e subjetiva do homem na determinação momento de troca de ferramenta sempre com o mesmo acabamento superficial do flanco do dente.

Com a padronização do momento de troca da ferramenta baseada no acabamento superficial do flanco do dente, buscou-se manter os níveis de qualidade dentro do especificado em processo de produção para todos os lotes sem prejudicar os tempos de lapidação e a qualidade final do produto.

Seria ideal que, além desses objetivos, o desgaste na superfície de saída das lâminas fosse o menor possível e que o número de peças produzidos nos intervalos de cada afiação fossem maiores e sem afetar a qualidade do produto usinado.

No capítulo 6 deste trabalho é possível analisar e discutir os resultados encontrados nos ensaios.

Capítulo 6

Resultados e discussões

6.1 – Introdução

Para estabelecer uma análise mais clara dos resultados deste trabalho, os dados apresentados nas tabelas e gráficos que seguem, mostram as características do processo de usinagem “antes” da realização dos ensaios, isto é, como acontecia o processo de corte dos dentes da engrenagem quando se decidiu pela realização dos ensaios.

Os dados apresentados representam as duas lâminas mais utilizadas nas operações de corte de dentes hipoidais, quais sejam:

- lâminas Hardac® III com cobertura total de TiN
- lâminas Hardac® III sem cobertura na superfície de saída

A figura 6.1, exemplifica as duas condições de lâminas citadas.

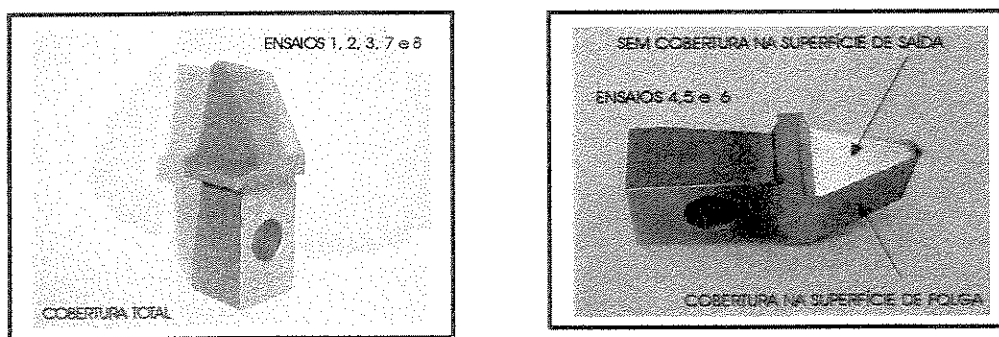


Fig. 6.1 – Condição das lâminas para os ensaios.

As tabelas 6.1 e 6.2 mostram dados reais do estado da operação antes do início da realização deste trabalho. Nela pode-se ver valores de volume de material removido por vida da ferramenta, espessura de material removido na afiação da lâmina, rugosidade nos flancos dos dentes no início e fim de vida da ferramenta e potência de corte também no início e fim da vida da ferramenta. Cabe lembrar que, antes de iniciado o trabalho, a determinação do fim da vida da ferramenta era feita pelo preparador da máquina, através de uma análise visual dos flancos dos dentes usinados.

Legenda - Tabelas 6.1 à 6.10

- A = Número de peças produzidas**
B = Volume de cavaco removido / vida (cm³)
C = Material removido na afiação (mm)
D = Rugosidade da marcha frente no início da vida da lâmina (Ra μ m)
E = Rugosidade da marcha frente no fim da vida da lâmina (Ra μ m)
F = Rugosidade da marcha ré no início da vida da lâmina (Ra μ m)
G = Rugosidade da marcha ré no fim da vida da lâmina (Ra μ m)
H = Porcentagem da potência total da máquina no início da vida da lâmina (%)
J = Porcentagem da potência total da máquina no fim da vida da lâmina (%)

Tabela 6.1 – Ferramenta com cobertura total de TiN.

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	58	56550	0,4	1,2	2,04	1,32	2,83	38	47
2	70	68250	0,5	1,1	2,52	1,58	3,5	38	48
3	78	76050	0,2	1,2	2,1	1,2	4	38	50
4	125	121875	1,3	0,86	3,3	1	5,48	36	60
5	71	69225	0,9	1,2	2,8	1,5	3,9	38	48
6	64	62400	0,2	1	2,3	1,3	3,3	37	47
7	127	123825	1,4	1	3,2	1,1	5,84	38	57
8	57	55575	0,3	0,9	1,97	1,15	2,7	38	48
Média	81,250	79218,750	0,650	1,058	2,529	1,269	3,944	37,625	50,625
Desv. P.	28,474	27762,442	0,487	0,138	0,522	0,198	1,156	0,744	5,012

Tabela 6.2 – Ferramenta sem cobertura na superfície de saída.

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	16	15600	0,5	1,2	1,9	1,4	2,6	39	47
2	67	65325	2,5	1,1	2,9	1,3	5,8	38	54
3	52	50700	0,8	1,07	2,3	1,3	4,15	38	53
4	64	62400	1	1,1	2,23	1,2	5,37	38	54
5	45	43875	0,7	1	2,23	1,5	3,72	37	54
6	29	28275	0,7	1,3	2	1,07	3,3	38	49
7	26	25350	0,3	1,05	1,85	1,5	2,9	37	48
Média	42,714	41646,429	0,929	1,117	2,201	1,324	3,977	37,857	51,286
Desv. P.	19,644	19153,347	0,727	0,101	0,355	0,157	1,216	0,690	3,147

As figuras 6.2 e 6.3 mostram os números de peças produzidas para as condições de lâminas escolhidas “antes” da realização dos ensaios . Nelas também se tem uma indicação da média e do desvio padrão destes valores.

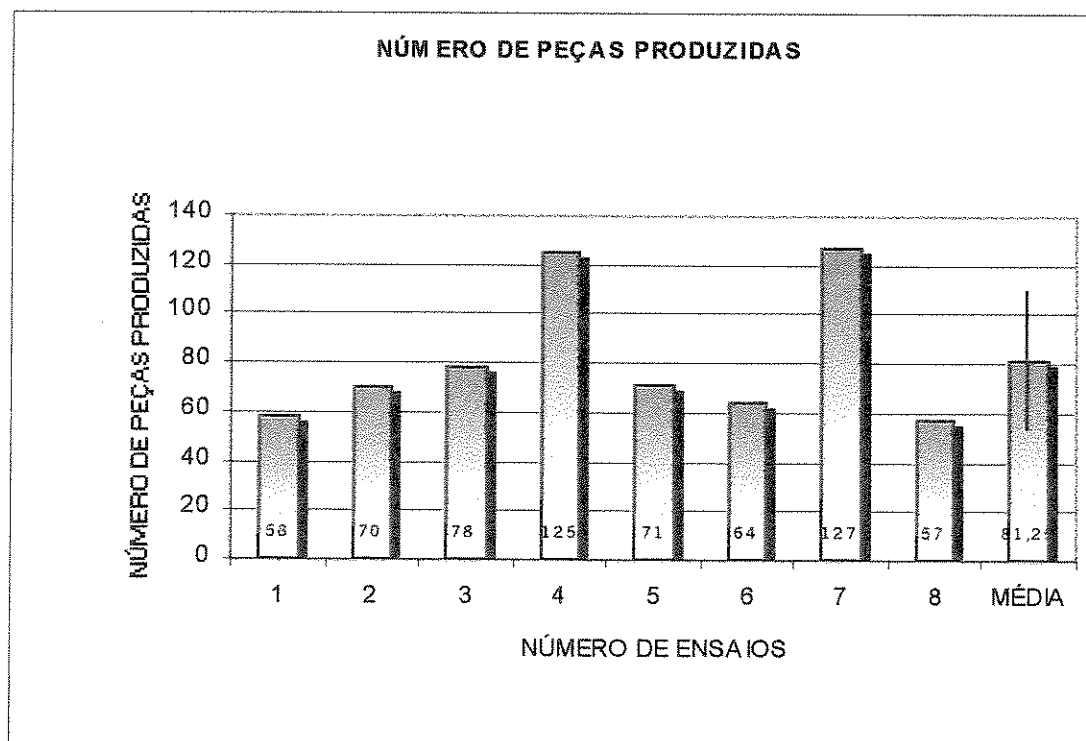


Fig. 6.2 – Número de peças produzidas utilizando ferramenta com cobertura total de TIN.

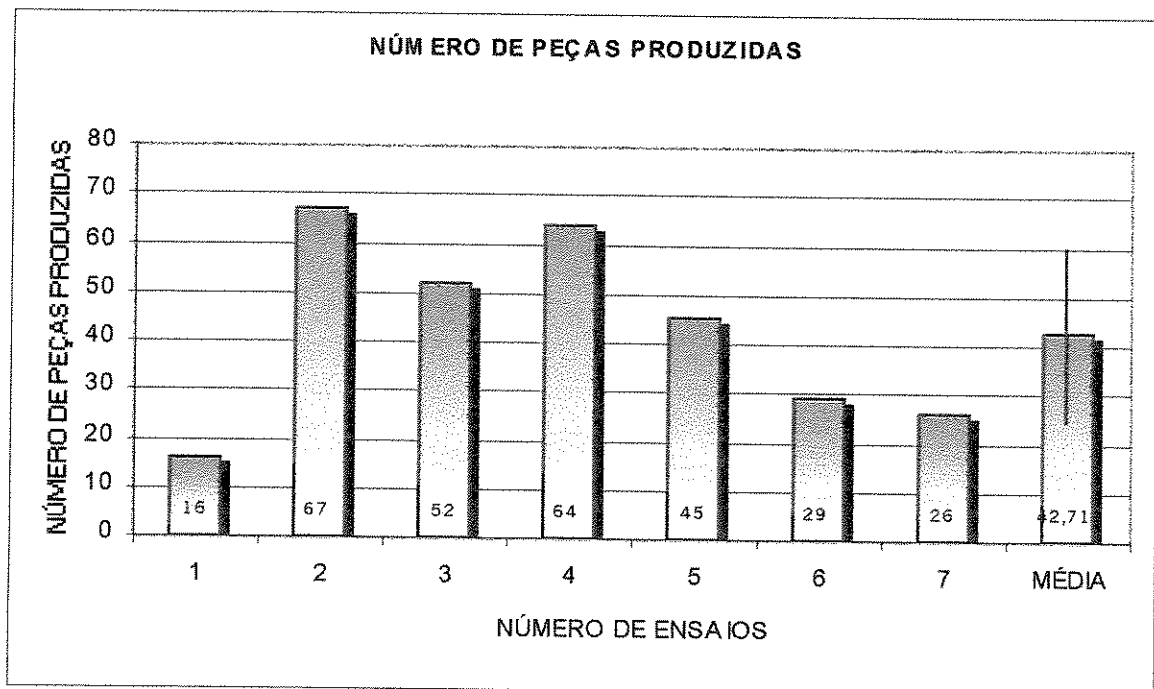


Fig. 6.3 – Número de peças produzidas utilizando ferramenta sem cobertura de TiN na superfície de saída.

As figuras 6.4 e 6.5 mostram os valores de rugosidade (R_a) do flanco do dente da marcha ré, também antes da realização dos ensaios. Nelas também se tem uma indicação da dispersão e da média desses resultados.

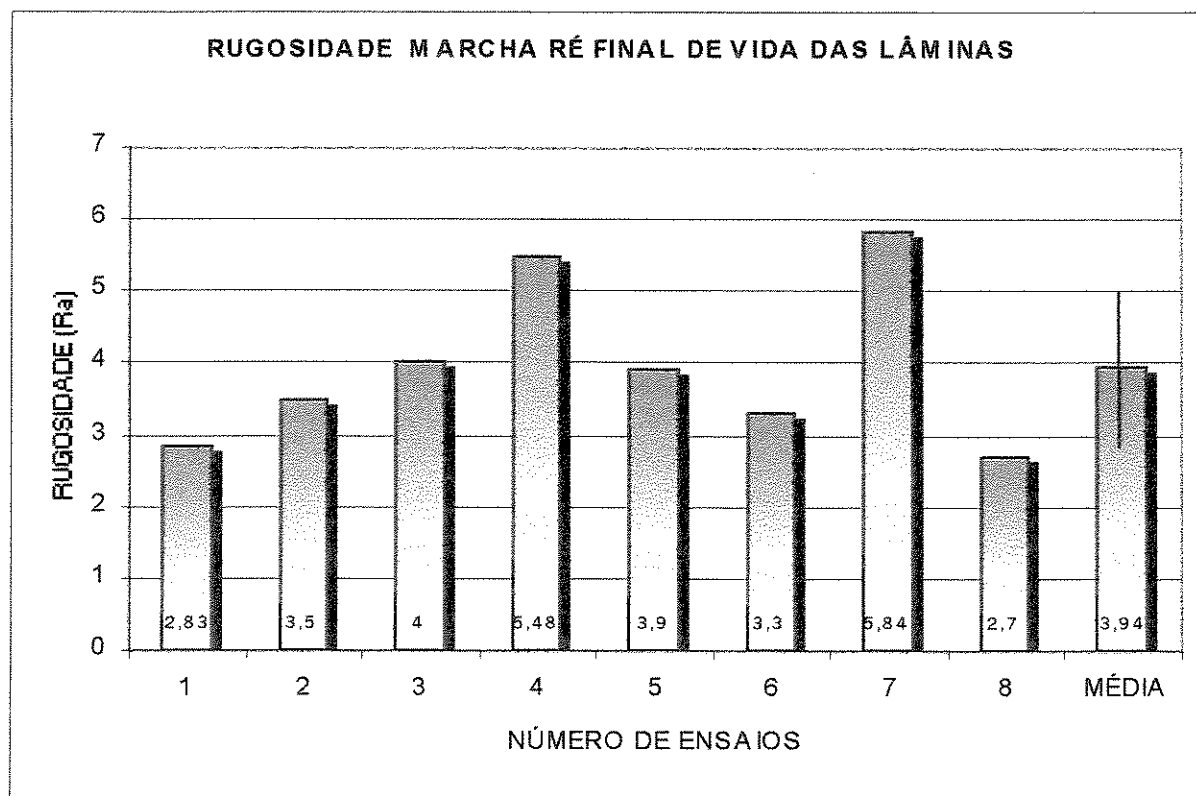


Fig. 6.4 – Rugosidade da marcha ré utilizando ferramenta com cobertura total de TiN.

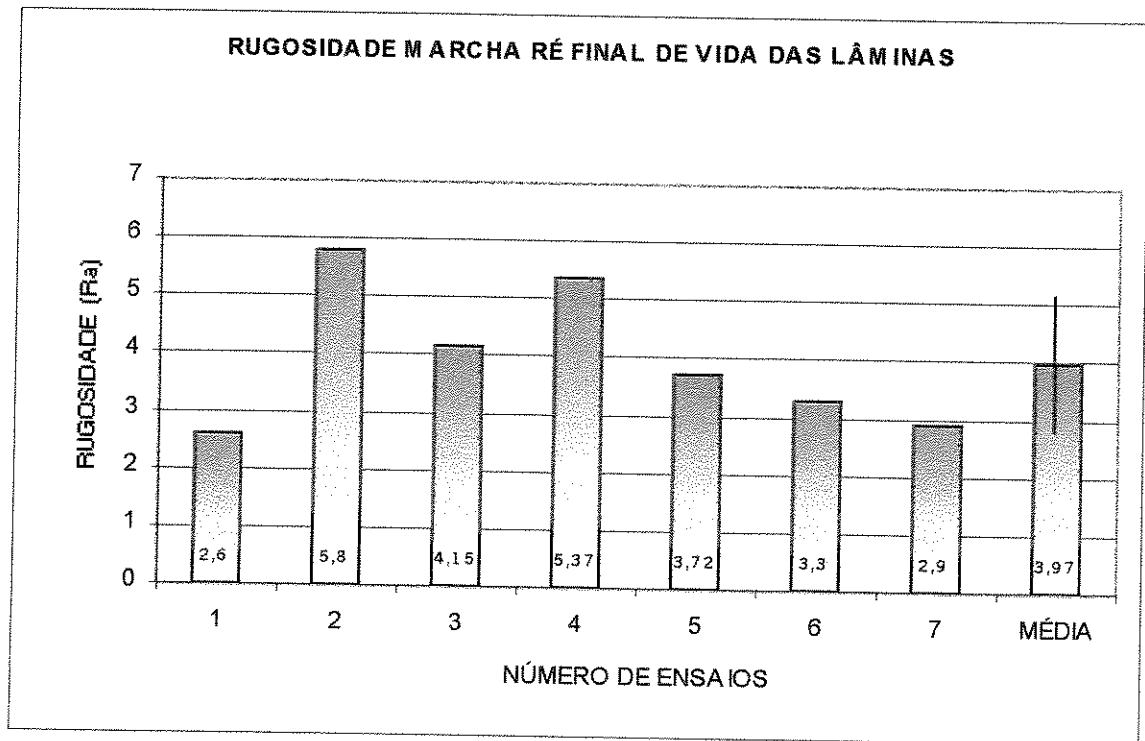


Fig. 6.5 – Rugosidade da marcha ré utilizando ferramenta sem cobertura na superfície de saída.

As figuras 6.6 e 6.7 mostram o material removido da ferramenta após o término da usinarem, junto com a média e dispersão desses resultados.

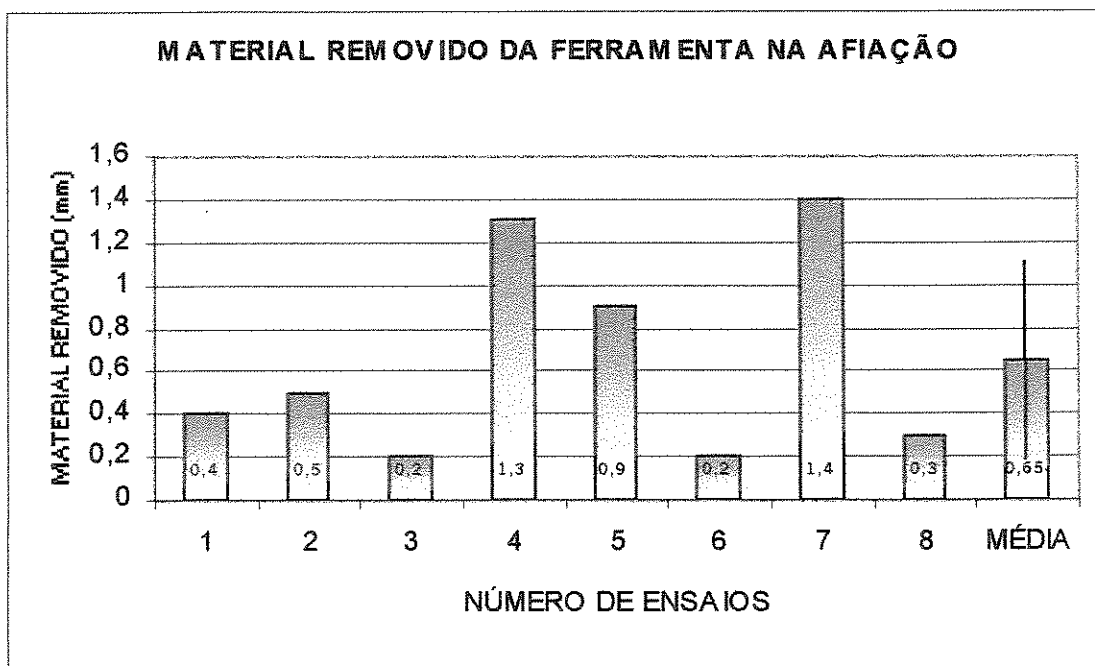


Fig. 6.6 – Material removido da ferramenta na afiação com cobertura total de TiN.

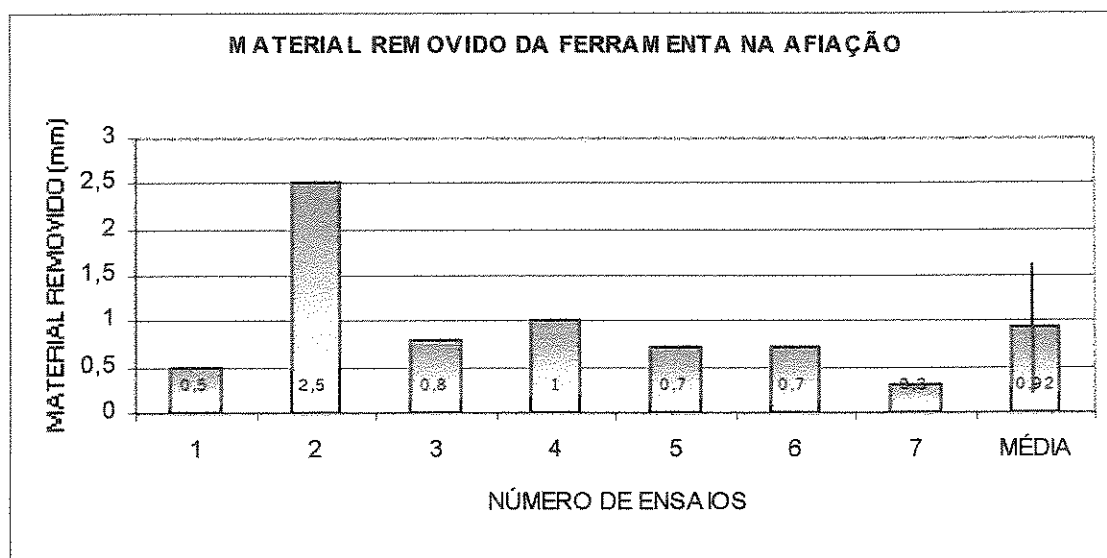


Fig.6.7 – Material removido da ferramenta na afiação sem cobertura de TiN na superfície de saída

Alguns pontos merecem ser destacados nestas tabelas e figuras citadas, quais sejam:

Através da análise nos valores de rugosidade da marcha frente e da marcha ré, foi possível concluir que em todas as repetições a rugosidade superficial da marcha frente esteve conforme o estabelecido em processo ($Ra < 4,0 \mu m$). Já a rugosidade superficial do flanco do dente da marcha ré apresentou uma alta dispersão com valores ora dentro do especificado em processo, ora bem acima do limite do processo. ($Ra 4,0 \mu m$)

Essa dispersão nos valores mostra uma falta de critério para o momento de troca da ferramenta. Quando o processo é interrompido com valores muito abaixo do especificado, resulta muitas vezes, no desperdício do material da ferramenta no momento da afiação, já que a ferramenta teria condições de continuar a usinar mais peças. Essa condição, por outro lado, favorece em muito a operação seguinte de lapidação dos dentes, não sobrecarregando a operação e proporcionando uma qualidade final do produto no fator rugosidade e acasalamento dos dentes, conforme o especificado em projeto.

Quando o processo é interrompido com valores de rugosidade do flanco do dente acima do especificado, causa prejuízo à operação seguinte de lapidação dos dentes. Isso ocorre porque é preciso um tempo maior na operação de lapidação para atingir os níveis de qualidade exigidos nos dentes da coroa hipoidal. Tal fato leva a um desperdício dos recursos da empresa e, pior, muitas vezes a operação de lapidação não consegue trazer os valores de rugosidade para dentro do especificado e, assim, não atende os requisitos mínimos exigidos em projeto. Esta condição não permite um bom acasalamento entre coroa e pinhão, cria dificuldades para analisar o conjunto montado na operação de testar em condições próximas a de trabalho.

Existiu uma grande variação no número de peças produzidas. Esse fato está relacionado com a questão da rugosidade do flanco do dente. Como a interrupção do processo foi feita de maneira subjetiva, o rendimento da ferramenta (número de peças produzidas) ora foi baixo, usinando poucas peças, ora usinando uma grande quantidade de peças.

Isso evidencia a má utilização da capacidade de usinagem da ferramenta e o desperdício de recursos da empresa.

A quantidade de material a ser removido no momento da afiação é sempre baseado na lâmina que apresentou o maior desgaste ou avaria como:

- deformação da aresta de corte
- desgaste na superfície de saída do cavaco e na superfície de folga

Na maioria das vezes, devido às características do processo de usinagem, as lâminas que executam a usinagem da marcha ré apresentam as maiores evidências de avarias. Isso se deve ao fato de que a lâmina da marcha ré (16 lâminas externas neste trabalho) retira uma maior quantidade de volume de cavaco da peça. O percurso que a lâmina da marcha ré (lâmina externa) faz no momento da usinagem é maior devido a sua fixação no cabeçote porta lâminas, gerando diâmetros diferentes de trabalho entre as lâminas externas e internas. (Ver figura 3.12 do capítulo 3.)

Portanto, a quantidade de material da ferramenta na afiação é na maioria das vezes baseado na lâmina externa.

A dispersão da quantidade de material removido da ferramenta mostra a falta de critério para determinar o fim de vida e, principalmente, a falta de critério para avaliar a dimensão do desgaste. Tal fato resulta na remoção no momento da afiação, de valores que não condizem com a real utilização da ferramenta provocando o desperdício da vida da ferramenta. Era de se esperar que isto ocorresse, pois se não há critério objetivo para a troca da ferramenta, seu desgaste no momento da troca é bastante aleatório e, assim, o volume de material a ser removido na afiação é bastante disperso.

Após uma breve análise dos dados que ocorriam antes da realização deste trabalho, fica mais fácil compreender e interpretar os resultados dos ensaios deste trabalho.

6.2 – Critério de Fim de Vida da Ferramenta

Para tornar objetiva a troca de ferramenta e tirar a análise subjetiva, foi determinado um critério que zela principalmente pela qualidade final do produto. Quando se pensa em engrenagens, é lógico que a qualidade do dentado é de suma importância. Portanto, o critério para determinar o final da vida da ferramenta está relacionado com um dos requisitos em projeto para a obtenção da qualidade do dentado.

O critério escolhido foi a rugosidade do flanco do dente da marcha ré. A justificativa para esta escolha era a alta dispersão dos valores de rugosidade. Isso porque se os valores de rugosidade não forem controlados através da imposição de um limite máximo (critério de fim de vida) podem ultrapassar os requisitos especificados em projeto, sobrecarregando a operação seguinte de lapidação e, principalmente, afetando o desempenho do produto final em campo.

As tabelas 6.3 à 6.10 mostram os resultados obtidos do primeiro ao oitavo ensaio, já com o novo critério de fim de vida da ferramenta. Foram realizados com as mesmas condições de usinagem, alterando o tipo de cobertura da ferramenta.

Tabela 6.3- Ensaio 1- Ferramenta com cobertura total de TiN originária do fabricante Gleason

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	111	108225	0,45	1,47	3	0,98	4	36	52
2	108	105300	0,5	1,72	2,87	1,19	4,05	36	53
3	81	78975	0,25	1,3	2,01	1,4	4,12	37	49
4	81	78975	0,3	1,5	2,5	1,3	3,96	37	47
5	78	76050	0,2	1,1	3	1,2	4	37	48
6	104	101400	0,4	1,23	3,2	0,87	4	38	50
7	87	84825	0,3	0,9	1,93	1,3	4,1	37	50
Média	92,857	90535,714	0,343	1,317	2,644	1,177	4,033	36,857	49,857
Desv. P.	14,253	13896,499	0,110	0,273	0,508	0,189	0,059	0,690	2,116

Tabela 6.4- Ensaio 2- Ferramenta com cobertura total de TiN executado por um fornecedor nacional .

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	78	76050	0,2	1,64	2,92	0,92	4,06	35	49
2	80	78000	0,3	1,4	2,37	1,18	3,9	36	49
3	78	76050	0,27	1,51	2,23	1,07	4	37	49
4	67	65325	0,25	1,2	2,87	1,1	4,05	37	50
Média	75,750	73856,250	0,255	1,438	2,598	1,068	4,003	36,250	49,250
Desv. P.	5,909	5761,307	0,042	0,186	0,349	0,109	0,073	0,957	0,500

Tabela 6.5- Ensaio 3- Ferramenta com cobertura total de TiCN+TiN executado por um fornecedor nacional.

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	80	78000	0,3	0,97	2,97	1,21	3,98	36	51
2	107	104325	1,4	1	2,48	1,7	4,3	35	61
3	87	84825	0,3	1,2	2,63	1,1	4	38	48
4	72	70200	0,3	0,83	2	1,2	4,08	38	48
Média	86,500	84337,500	0,575	1,000	2,520	1,303	4,090	36,750	52,000
Desv. P.	14,978	14603,317	0,550	0,153	0,403	0,270	0,147	1,500	6,164

Tabela 6.6- Ensaio 4- Ferramenta com cobertura de TiN originaria do fabricante Gleason, somente nas superfícies de folga

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	42	40950	1	1,07	2,7	1,3	3,58	40	57
2	52	50700	0,6	1,3	2,8	1,6	4	38	53
3	45	43875	1	1,05	2,51	1,5	4,02	37	54
4	44	42900	0,4	1,4	2,57	1,18	3,83	37	54
Média	45,750	44606,250	0,750	1,205	2,645	1,395	3,858	38,000	54,500
Desv. P.	4,349	4240,596	0,300	0,173	0,130	0,190	0,204	1,414	1,732

Tabela 6.7- Ensaio 5- Ferramenta com cobertura de TiN executado por um fornecedor nacional, somente nas superfícies de folga.

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	48	46800	1	1,22	3,2	1,12	4,01	42	58
2	52	50700	1,2	1,19	2,8	1,2	4,17	40	60
3	52	50700	0,7	1,37	2,33	1,18	4	42	56
4	45	43875	0,8	1,3	2,84	1	3,94	39	56
Média	49,250	48018,750	0,925	1,270	2,793	1,125	4,030	40,750	57,500
Desv. P.	3,403	3318,344	0,222	0,081	0,357	0,090	0,098	1,500	1,915

Tabela 6.8- Ensaio 6- Ferramenta com cobertura de TiCN+TiN executado por um fornecedor nacional, somente nas superfícies de folga.

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	54	52650	0,6	1	2,5	1,6	4,15	40	54
2	47	45825	0,4	1,6	2,29	1,51	3,97	39	51
3	52	50700	1	1,68	2,43	1,21	4	42	58
4	45	43875	0,6	1	2,1	1,15	4	40	55
Média	49,500	48262,500	0,650	1,320	2,330	1,368	4,030	40,250	54,500
Desv. P.	3,640	3549,054	0,218	0,321	0,153	0,191	0,070	1,090	2,500

Tabela 6.9- Ensaio 7- Ferramenta com cobertura total de TiN executado por um fornecedor nacional, com afiação executada no local onde os ensaios foram realizados.

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	71	69225	0,25	1,1	2,5	1,3	3,95	38	49
2	76	74100	0,4	1,3	2,7	1,5	4,1	37	49
3	65	63375	0,3	1,03	2,89	1,6	4	39	51
4	60	58500	0,21	0,83	2,13	1,17	3,82	38	49
5	81	78975	0,3	1,6	3,2	1,8	4,2	36	52
6	70	68250	0,25	1,8	2,88	1,6	4	36	48
7	67	65325	0,3	1,6	2,75	1,6	3,81	36	49
Média	70,000	68250,000	0,287	1,323	2,721	1,510	3,983	37,143	49,571
Desv. P.	6,976	6801,746	0,060	0,356	0,337	0,211	0,141	1,215	1,397

Tabela 6.10- Ensaio 8- Ferramenta com cobertura total de TiCN+TiN executado por um fornecedor nacional, com afiação executada no local onde os ensaios foram realizados.

Ensaio	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	73	71175	0,3	1,2	2,43	1,3	4	36	51
2	60	58500	0,2	1,6	2,52	1,56	4,1	37	49
3	65	63375	0,3	1,6	2,29	1,47	4,05	37	49
4	76	74100	0,45	1,7	3	1,9	4	38	52
Média	68,500	66787,500	0,313	1,525	2,560	1,558	4,038	37,000	50,250
Desv. P.	7,326	7142,610	0,103	0,222	0,308	0,253	0,048	0,816	1,500

Os valores da rugosidade da marcha “frente” sempre permaneceram abaixo dos valores de rugosidade da marcha “ré”, tanto nos resultados apresentados antes da realização dos ensaios deste trabalho (tabela 6.1 a 6.2) como nos ensaios (tabela 6.3 a 6.10) realizados para este trabalho.

As figuras 6.8 à 6.9 mostram os valores de rugosidade do flanco do dente da marcha frente no início da vida da ferramenta e no momento em que o critério de fim de vida deste trabalho foi utilizado. A figura 6.10 mostra a rugosidade do flanco do dente da marcha ré no início da vida da ferramenta.

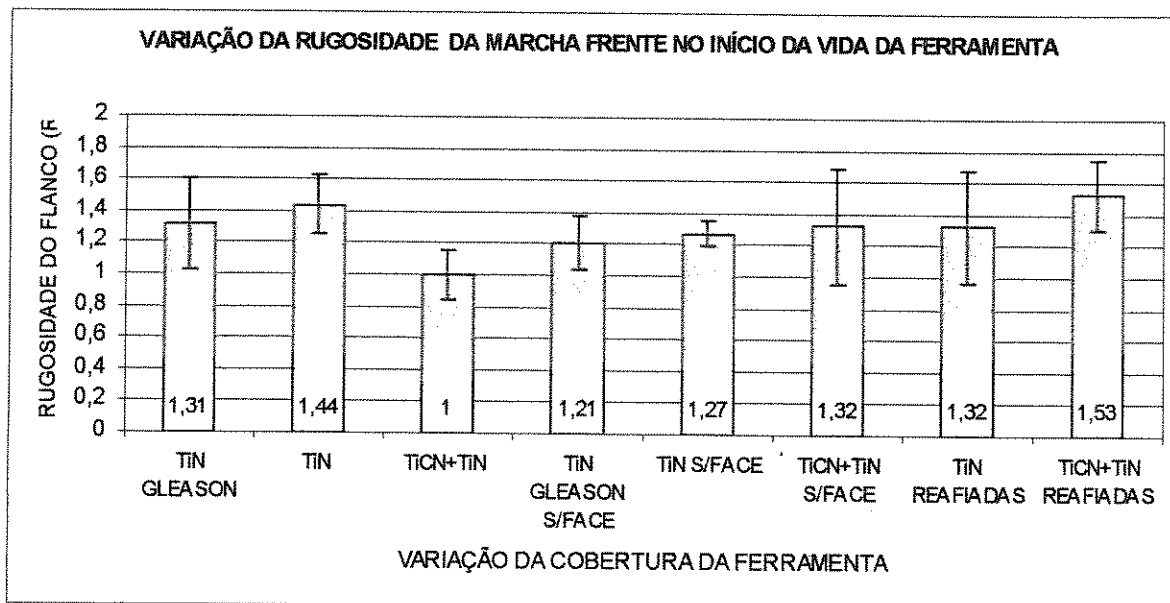


Fig.6.8 – Rugosidade da marcha frente no início da vida da ferramenta

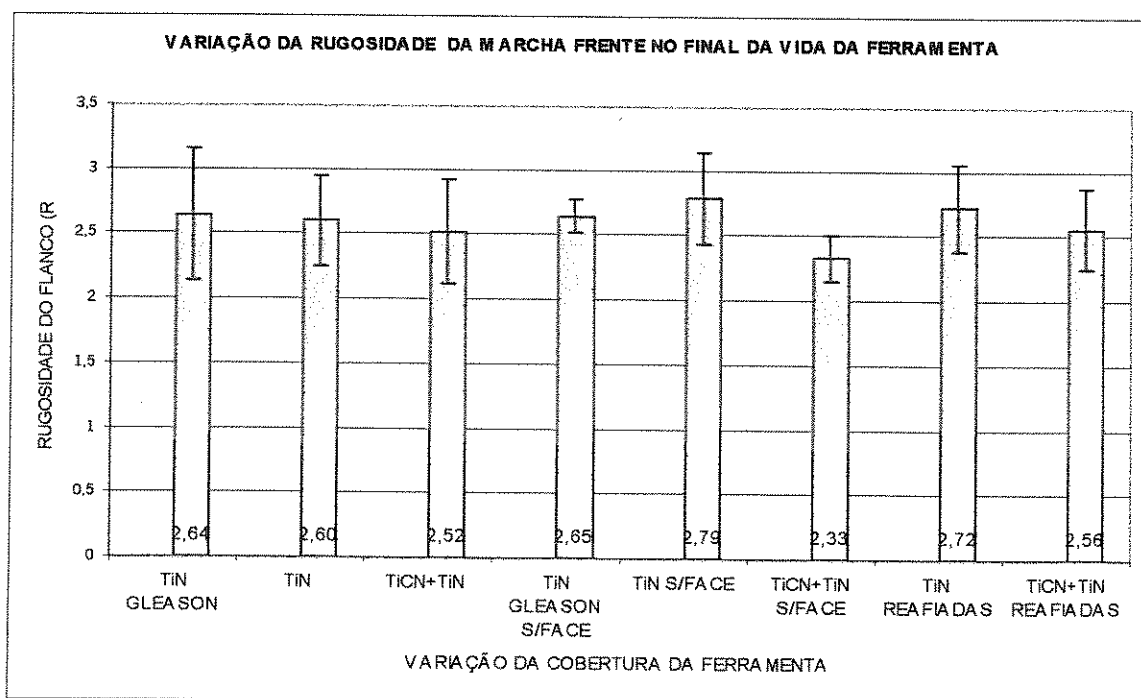


Fig. 6.9- Rugosidade da marcha frente no final da vida da ferramenta

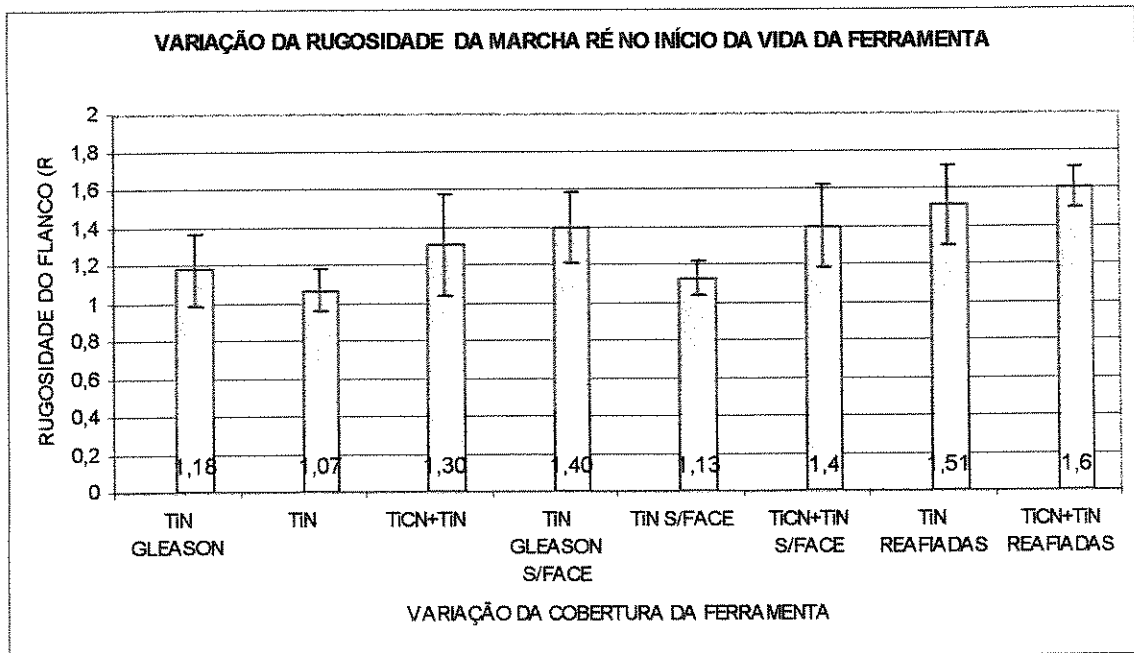


Fig. 6.10 Rugosidade da marcha ré no início da vida da ferramenta

O valor limite para determinação do fim da vida da ferramenta, independente do tipo de cobertura utilizada, foi de Ra 3,5 μm à Ra 4,0 μm .

Quando se fixou o critério de determinação para o fim de vida da ferramenta (Ra), alguns pontos merecem ser destacados:

- trocou-se em todos os ensaios a ferramenta com um intervalo de Ra igual a 3,85 μm até 4,15 μm . A variação entre o valor do critério de fim de vida estabelecido (Ra 3,5 μm à Ra 4,0 μm) e os valores efetivos em que o processo foi interrompido nos ensaios, ocorreu porque é difícil interromper a usinagem no momento exato. Procurou-se parar o processo o mais próximo possível do critério estabelecido. Imagine um ensaio em que a usinagem foi interrompida com Ra igual a 3.85 μm para a medição de rugosidade. O risco de continuar a usinagem e ultrapassar o critério estabelecido seria grande e, assim, perder um ensaio completo.

A figura 6.11 mostra o número de peças produzidas para cada ensaio.

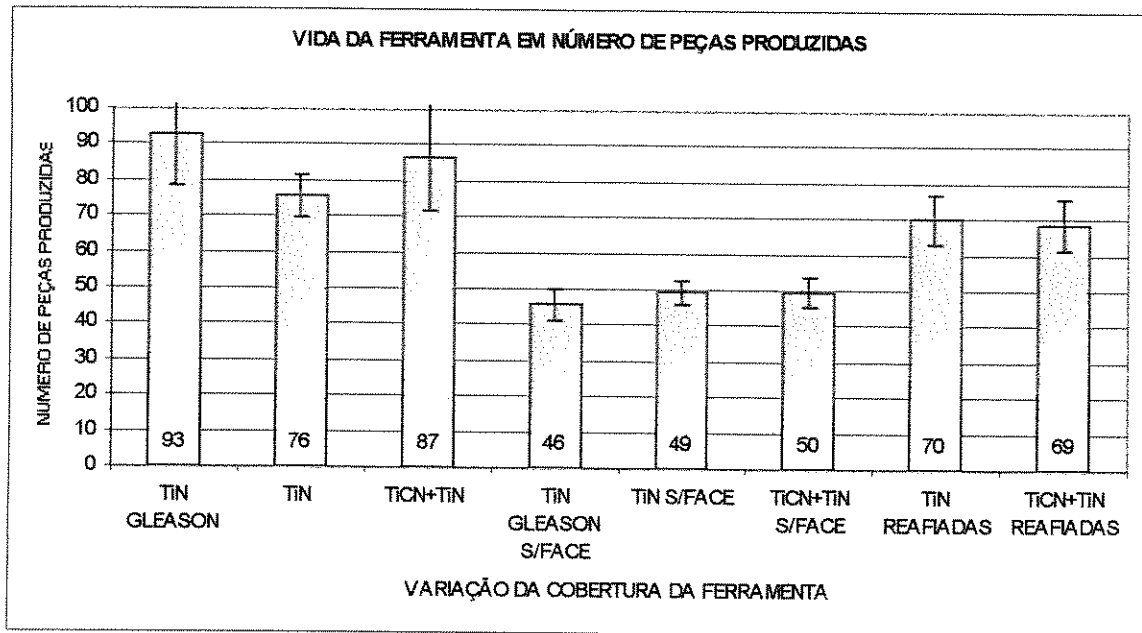


Fig. 6.11 – Número de peças produzidas versus tipos de coberturas

Mesmo com a utilização de um critério objetivo para determinação do fim de vida, a dispersão do número de peças produzidas é alto. Portanto inviabiliza o uso de um critério de determinação de fim da vida da ferramenta baseado em um certo número de peças produzidas. Por exemplo, nos ensaios com a lâmina com cobertura de TiN a média de vida da ferramenta foi de 90536 cm³. Se adotarmos uma distribuição normal desta variável, o que é razoável baseado no que a literatura propõe (Diniz, 1989), e quisermos adotar um volume fixo de material removido para determinar o fim da vida da lâmina, teremos bastante desperdício da ferramenta. Numa distribuição normal, 90% das amostras estão no intervalo de $-1,67\sigma$ e $+1,67\sigma$ em torno da média. Então, para se ter uma confiança de 95% de que não vai se ter peças rejeitadas ($Ra > 4,0\mu\text{m}$), deve-se estabelecer como momento de troca da ferramenta quando ela já tiver usinado $90536 - 1,67 \times 13896,5 = 67328.8 \text{ cm}^3$.

Porém, na grande maioria das vezes, a ferramenta ainda tem condições de usinar um longo tempo depois disto. A figura 6.12 ilustra o aqui explicado em duas situações. Na primeira (

ensaio 1) refere – se a vida da ferramenta em volume de cavaco removido e a Segunda (ensaio 3) refere – se a vida da ferramenta em número de peças produzidas.

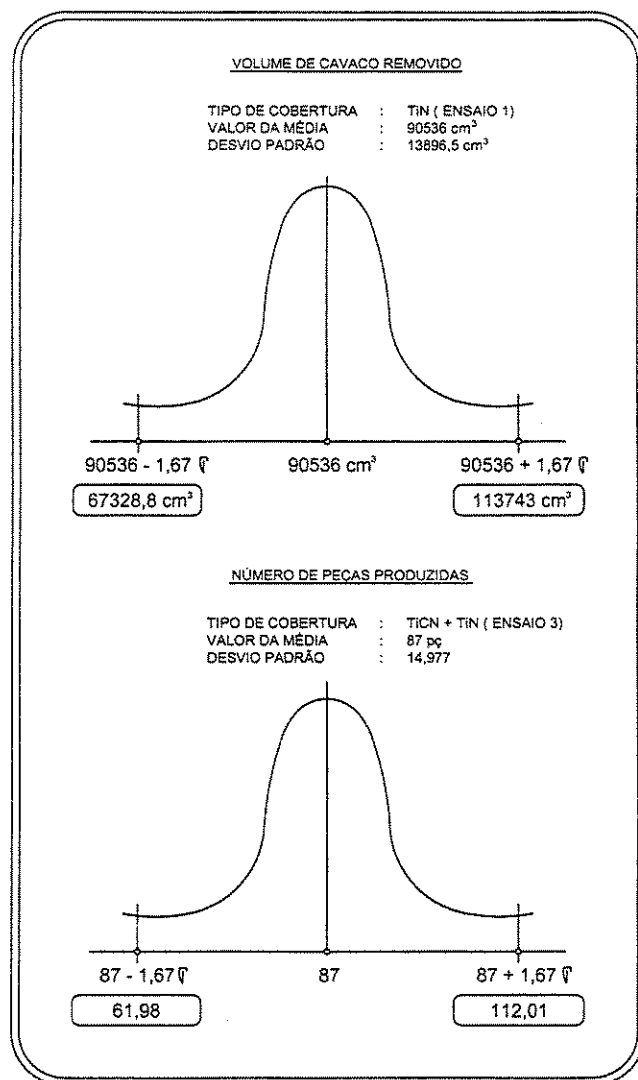


Fig. 6.12 - Exemplificação de distribuição normal dos ensaios 1 e 3

Estes resultados mostram também a aleatoriedade deste processo de usinagem. Mesmo com todas as condições mantidas constantes, pequenas variações aleatórias na condição da ferramenta, determinaram o crescimento ou não da rugosidade da peça e, com isso, a dispersão do número de peças usinadas por vida da ferramenta.

Porém, comparando-se as vidas das ferramentas e as suas dispersões para ensaios com mesmo tipo de ferramentas, antes e depois da introdução da metodologia de medição da rugosidade do flanco do dente para determinação do fim da vida, pode-se chegar a conclusões interessantes:

As medias de vida de ferramentas aumentaram um pouco após a introdução da metodologia. Assim, antes de se iniciarem os ensaios a média de vida das ferramentas recobertas com TiN em todas as superfícies era 81,25 peças (figura 6.2 e tab. 6.1), depois de introduzida a metodologia passou para 93 peças (figura 6.11 e tab. 6.4). Com relação às ferramentas reafiadas (sem cobertura na superfície de saída) a vida média da ferramenta antes de serem iniciados os ensaios era de 42,71 peças (figura 6.3 e tab. 6.2) e passou para 45,75 (figura 6.3 e tab. 6.6) com o início dos ensaios. O que mudou bastante foi a dispersão da vida da ferramenta que é um fator muito importante para a estabilidade do processo. Apesar de, como citado, a dispersão em torno da vida média ser alta depois de iniciado os ensaios, devido a aleatoriedade típica do processo de usinagem, ela foi bem menor que antes de iniciados os testes. Assim, antes dos testes começarem os desvios padrões para as ferramentas totalmente recobertas e sem recobrimento da superfície de saída eram de 28,47 peças (tabela 6.1) (35 % da média) e 19,64 peças (tabela 6.2) (45,9 % da média) respectivamente e depois de iniciados os ensaios eram de 14,25 peças (tabela 6.3) (15,3 % da média) e 4,34 peças (9,5 % da média) (tabela 6.6). Estes resultados comprovam a ineficácia da metodologia que vinha sendo utilizada para a determinação do momento de troca da ferramenta.

O número de peças produzidas não está relacionado com o desgaste de flanco da ferramenta com cobertura total, pois o critério de fim de vida baseado no acabamento superficial interrompe o processo antes que a ferramenta apresente desgaste. Isso faz com que a quantidade de material removido na afiação diminua, com tendência a estabilizar. Além disso, é possível perceber que, pelas condições da ferramenta, após a interrupção do ensaio (uso de lupa graduada para medição

do desgaste VB) seria possível usinar mais peças. Porém, isso refletiria no prejuízo da qualidade do produto final.

A figura 6.13, mostra as condições da superfície de saída de uma lâmina da marcha ré no início e no fim do ensaio número 1.

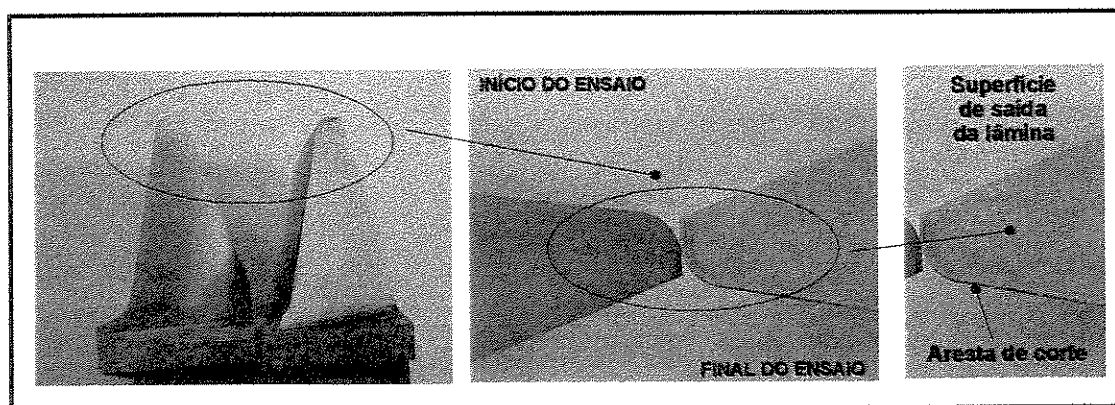


Fig. 6.13 – Condições apresentadas pela lâmina no início e fim do ensaio 1 (TiN originário da Gleason).

Nesta figura é possível perceber que a ferramenta após o término do ensaio não apresentou desgaste acentuado na superfície de saída. Pode-se também verificar que a geometria da ponta da ferramenta praticamente não se alterou o que, se ocorresse, teria forte influência na rugosidade. Portanto, não se pode creditar a piora na rugosidade do flanco do dente da engrenagem ao desgaste visível da ferramenta, quando se utilizou cobertura total.

Quando se utiliza a ferramenta sem cobertura na superfície de saída do cavaco (cobertura apenas nas superfícies de folga) o desempenho da ferramenta não se repetiu. Neste caso, quando o critério de fim de vida baseado na rugosidade é aplicado a ferramenta já apresenta elevado desgaste VB na superfície de folga, desgaste de cratera na superfície de saída e deformações na aresta principal de corte (Figura 6.14). Isso devido às variações de temperatura e de esforços mecânicos característicos de operações de fresamento e o elevado atrito entre ferramenta e cavaco devido à falta de cobertura na superfície de saída. Este resultado comprova a ausência de relação entre desgastes e a rugosidade. Nos 2 casos (ferramentas com e sem cobertura na

superfície de saída) a rugosidade da peça no fim da ferramenta era a mesma, mas os desgastes totalmente diferentes.

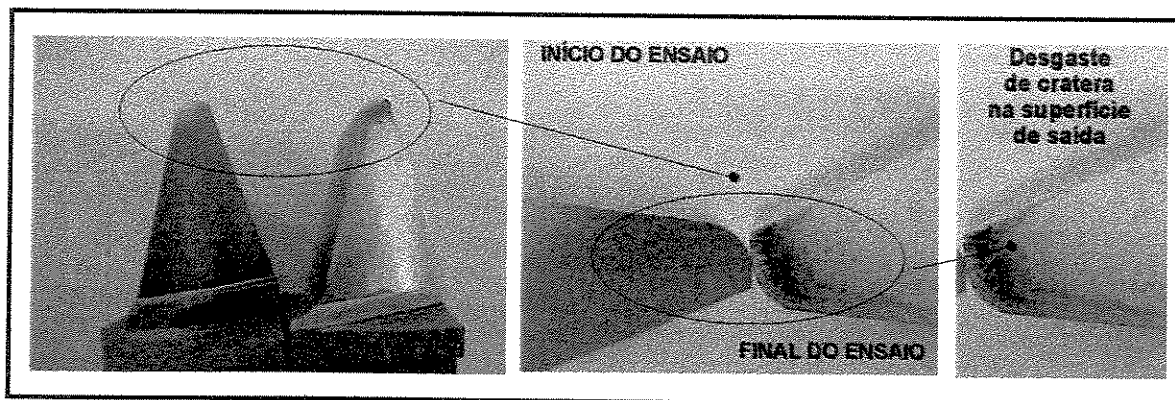


Fig. 6.14 – Condições apresentadas pela lâmina no início e fim do ensaio 4 (TiN originário da Gleason sem cobertura na superfície de saída)

O fator que mais influenciou a rugosidade do flanco do dente da marcha ré, quando se utilizou ferramentas com cobertura total foi uma “adesão” do material da peça usinada com a ferramenta em toda a extensão da aresta principal de corte. Esse material não caracteriza aresta postiça de corte, porque aparentemente não existiu a fusão entre o material da ferramenta e o material da peça, não apresentou desgaste frontal comum na presença de aresta postiça de corte e a usinagem era com corte interrompido, o que dificulta a estabilização da APC. Esse material é facilmente removido com a mão com o auxílio de uma espátula ou um bastão de bronze. Porém quando se estava usinando a peça, esse material permanecia junto à ferramenta, fazendo com que a rugosidade aumentasse e, muitas vezes, provocando riscos profundos no flanco do dente obrigando a interrupção do processo, a remoção da ferramenta (mesmo sem aparente desgaste) e nova afiação para eliminação desse material.

A figura 6.15, mostra a região da aresta de corte com a presença deste material. As ferramentas usadas para estas figuras, eram lâminas externas (usina a marcha ré) com cobertura total. Esse fenômeno não ocorreu nas lâminas internas (usina a marcha frente).

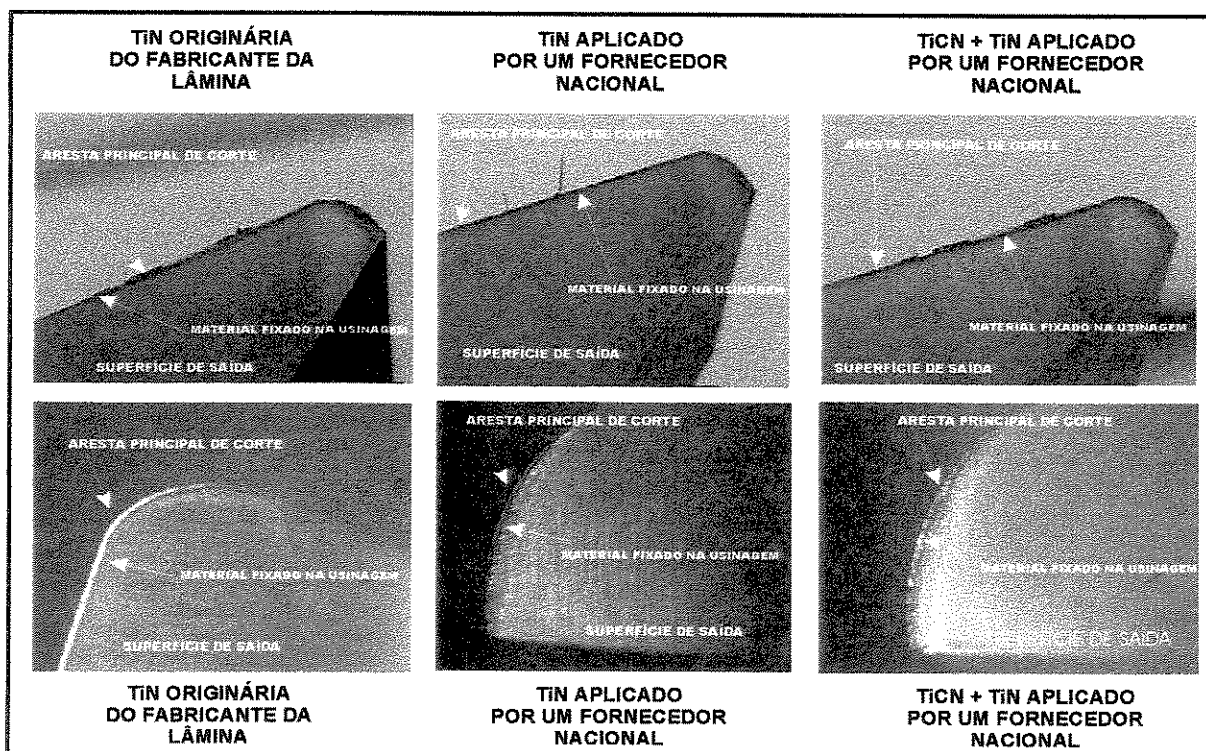


Fig. 6.15 – Adesão do material usinado na superfície de saída da ferramenta com cobertura total, após o término dos ensaios 1,2,3,7 e 8.

A figura 6.16, mostra o pequeno desgaste VB das lâminas nas mesmas condições da figura 6.15. Isso mostra que o desgaste VB não tem influência na rugosidade do flanco do dente. Porém, a presença deste material aderido fazia com que a micro geometria da aresta de corte se tornasse irregular e, com isso, prejudicasse a rugosidade da peça usinada.

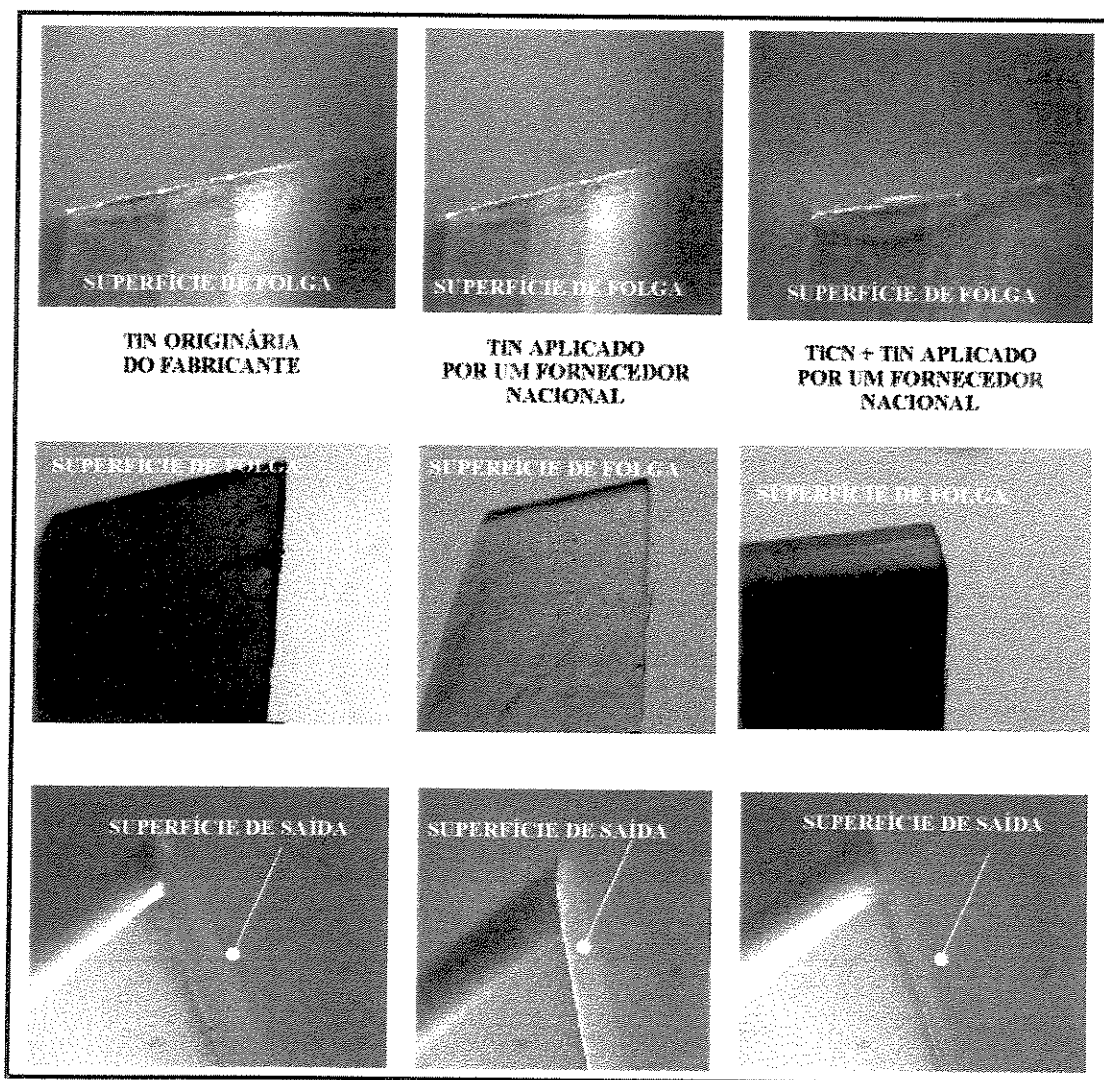


Fig 6.16 - Análise do desgaste VB na superfície de folga.

O coeficiente de atrito do revestimento contra o aço é o mesmo (0,4) nos ensaios 1,2,3,7 e 8, conforme a tabela 4.1 do capítulo 4 deste trabalho. Além disso, todos os parâmetros de usinagem estavam conforme o indicado pelo fabricante da máquina e da ferramenta e a dureza da peça usinada estava dentro dos parâmetros da figura 4.10 do capítulo 4 deste trabalho.

Nos ensaios 4, 5 e 6 em que a ferramenta não tinha cobertura na superfície de saída (apenas nas superfícies de folga), esse fenômeno da aderência do cavaco descrito anteriormente não

ocorreu, ou, se ocorreu, foi depois arrancado pelos desgastes e avarias que se seguiram. O que fica claro nestes ensaios é o desgaste VB na superfície de folga, a deformação da aresta de corte e desgaste de cratera na superfície de saída.

Nestes ensaios a ferramenta não tinha a proteção superficial da cobertura na superfície de saída. Portanto, a ferramenta ficou a mercê dos inúmeros mecanismos causadores de desgastes normais em processos de usinagem. Sem a cobertura existiu uma elevação do coeficiente de atrito entre ferramenta e cavaco e a temperatura teve uma influência maior no desempenho das ferramentas.

Além disso por se tratar de operação de fresamento, existem algumas particularidades que incentivam o processo de desgaste, quais sejam:

- Variações de temperaturas
- Variações de esforços mecânicos.

Nestes ensaios as avarias e/ou desgastes tiveram influência na rápida elevação da rugosidade do flanco do dente.

A figura 6.17 mostra o desgaste VB na superfície de folga da ferramenta sem cobertura na superfície de saída.

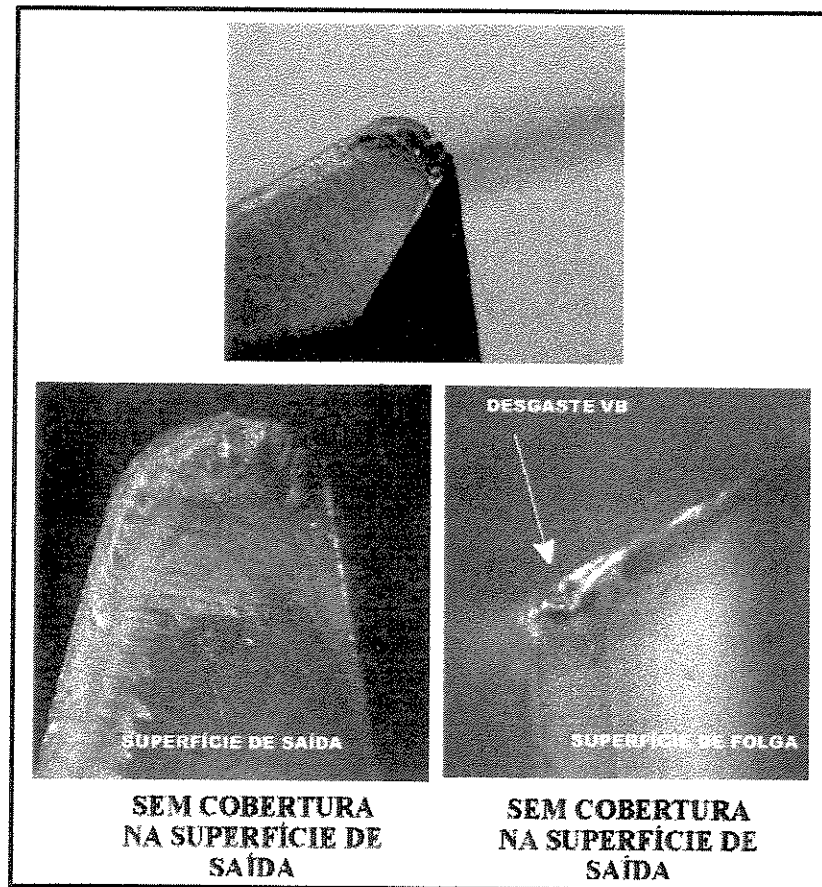


Fig. 6.17 – Análise do desgaste da ferramenta sem cobertura na superfície de saída.

A mudança do fenômeno que causa o crescimento da rugosidade do flanco do dente que foi, ora uma pequena adesão de cavaco na aresta de corte quando se tinha cobertura em todas as faces da ferramenta, ora desgastes e avarias acentuadas da ferramenta quando se tinha ferramenta sem cobertura na superfície de saída inviabiliza a utilização do critério de fim de vida da ferramenta baseado no desgaste apresentado pela ferramenta, sejam estes desgastes na superfície de folga “VB” ou qualquer outro tipo de avaria.

Se o critério utilizado fosse através do desgaste VB apresentado pela ferramenta, a dispersão da rugosidade do flanco do dente seria extremamente grande, fazendo com que a qualidade do produto fosse prejudicada e a operação seguinte de lapidação sobrecarregada.

A dispersão e média do material removido na afiação caíram bastante para as ferramentas com cobertura total, exceto para a ferramenta TiCN+TiN. Pode-se ver na tabela 6.5 que o

material afiado da ferramenta foi o mesmo em 3 repetições dos ensaios (0,30 mm), mas em um ensaio houve um lascamento em umas das lâminas. Assim, no momento da afiação da lâmina uma quantidade maior de material (1,4mm) precisou ser retirado e, conseqüentemente, elevou a dispersão neste ensaio. Para as ferramentas sem TiN na superfície de saída pode-se dizer que a dispersão caiu um pouco, mas a média não, como pode ser visto na comparação das figuras 6.6 / 6.7 e figura 6.18. Isso ocorreu devido ao acompanhamento feito com o auxílio de uma lupa graduada para medir o desgaste imediatamente antes da afiação e a utilização dos métodos de afiação indicados pelo fabricante das lâminas.

Pode-se verificar na figura 6.18 que quando se utilizou ferramentas sem cobertura na superfície de saída o material removido na afiação é, em geral, bem maior do que quando se tinha cobertura nesta face. Isto se deve ao fato de que, quando não se tinha cobertura nesta face, os desgastes no fim da vida da ferramenta eram bem altos, como já citado.

A figura 6.18, mostra a quantidade de material da ferramenta em milímetros removido na afiação da ferramenta após o término de cada ensaio.

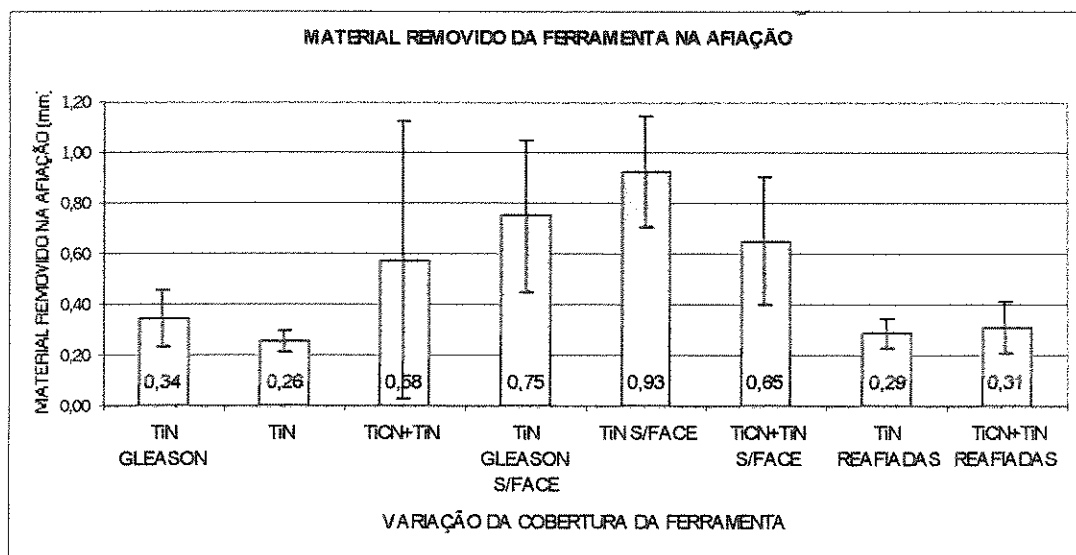


Fig. 6.18 – Material removido na afiação versus tipos de coberturas.

O número de peças produzidas também não apresentou relação com o material removido na afiação ou desgaste da ferramenta, como pode ser visto nas figuras 6.11 e 6.15.

O material removido na afiação dá uma idéia do desgaste VB da lâmina, pois os valores removidos nos ensaios para a realização deste trabalho, foram medidos através de uma lupa graduada. Portanto, se através da lupa graduada o maior desgaste VB encontrado na avaliação de todas as lâminas tem 0,2 mm de profundidade na superfície de folga, o material a ser removido da ferramenta será 0,2 mm mais os 10% da norma do fabricante da ferramenta.

O material da cobertura da ferramenta não influenciou a potência de corte no início da vida da ferramenta, como pode ser visto na figura 6.19

Para todos os ensaios os valores se situaram entre 37% a 42% da capacidade do equipamento. Uma pequena variação se deu nos ensaios 4, 5 e 6, porque sem a cobertura na superfície de saída houve um aumento de atrito e a potência exigida para a usinagem se tornou maior. (Mesmo no início da vida da ferramenta).

A figura 6.19 também mostra o percentual da potência máxima da máquina consumida no corte no início e fim de vida da ferramenta dos 8 ensaios.

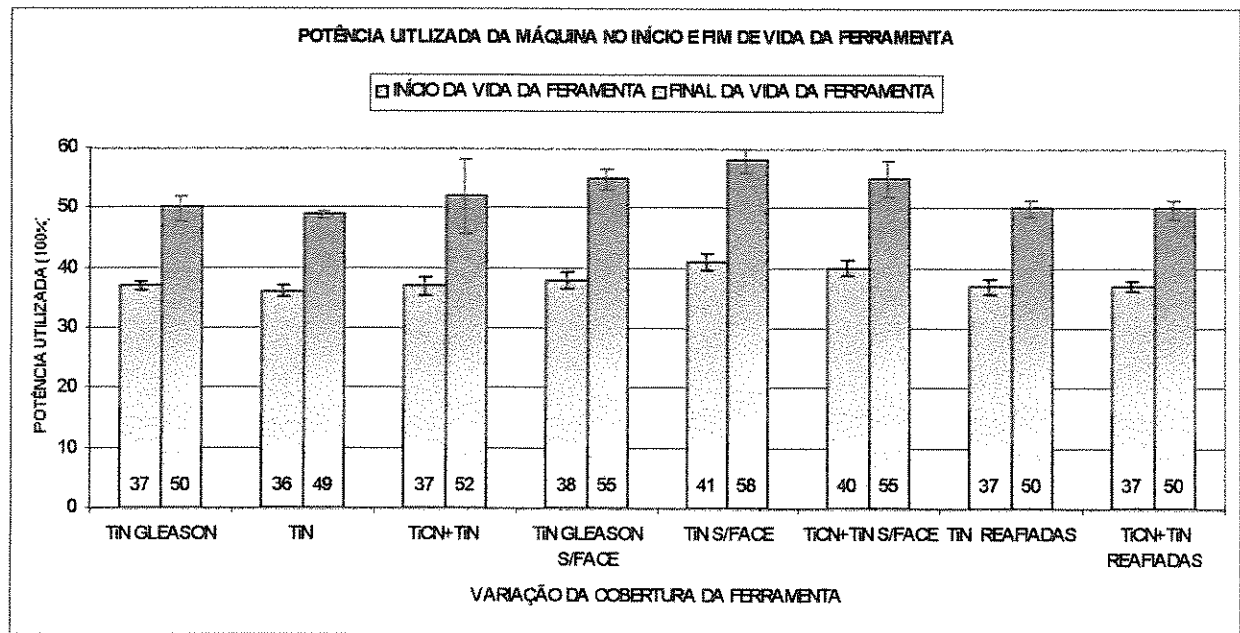


Figura 6.19 – Potência utilizada no início e fim de vida da ferramenta de cada ensaio versus tipo de cobertura

A potência utilizada para a usinagem das peças no final dos ensaios não apresentou grande variação de uma ferramenta para outra, principalmente se somente se levar em conta as ferramentas totalmente recobertas. Nestes ensaios (1,2,3,7 e 8) a potência utilizada sempre esteve dentro das condições normais de trabalho do equipamento, variando entre 48% à 53%.

Para os ensaios 4, 5 e 6 a justificativa para o aumento da potência utilizada (máximo valor de potência consumida no corte próximo a 58%) é a falta de revestimento na superfície de saída da ferramenta. Esse fato eleva o atrito, deixando as condições de usinagem mais severas favorecendo o surgimento de elevados desgastes que propiciaram este crescimento da potência.

A figura 6.20 mostram a relação entre a potência utilizada no fim da vida da ferramenta e o material removido na afiação. Como já dito anteriormente o material removido na afiação dá uma idéia do desgaste VB da lâmina. Cada ponto deste gráfico é proveniente das várias repetições realizadas dos ensaios.

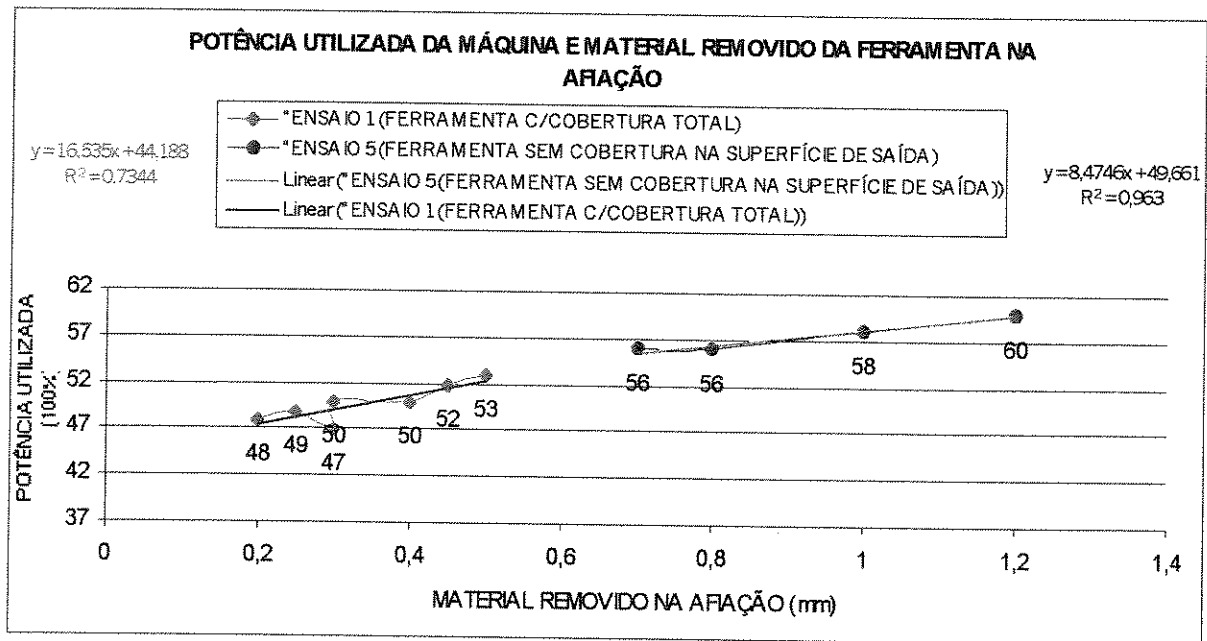


Figura 6.20 – Potência utilizada versus material removido no ensaio 1 com cobertura total (lado esquerdo do gráfico) e ensaio 5, no qual, a ferramenta não apresentava cobertura na superfície de saída (lado direito da gráfico).

Na figura 6.20 é possível perceber um aumento uniforme e mais ameno da potência utilizada no ensaio 1 se comparado ao ensaio 5. Isso mostra a influência positiva do revestimento favorecendo a usinagem, preservando mais o equipamento e mantendo bons níveis de consumo de energia.

O desgaste da ferramenta tem relação com a potência utilizada. Quando a ferramenta apresentou desgaste o percentual da potência consumida no corte aumentou. Fixar o percentual da potência consumida no corte como critério de fim de vida da ferramenta não garante a manutenção da rugosidade do flanco do dente conforme o processo, mas pode pelo menos, auxiliar o operador na decisão da troca da ferramenta. Isso porque a dispersão não foi tão grande como se pode verificar por exemplo no ensaio 1 (A variação foi de 48 a 53 %).

Um outro fenômeno que pode auxiliar o operador para a tomada de decisão do momento de troca da ferramenta é o percentual de aumento entre o início e o fim da vida da ferramenta (ver tabela 6.11). Este percentual variou de 35 %, quando se usinou com a ferramenta com TiN Gleason em que a potência cresceu de 37 a 50 % durante sua vida a 45 % para a ferramenta TiN

Gleason sem cobertura na superfície de saída. Então o operador poderia começar a medir a rugosidade do flanco do dente da engrenagem somente a partir do momento em que a potência tivesse já crescido cerca de 35 %.

A tabela 6.11 mostra o percentual de aumento da potência entre o início e fim da vida da ferramenta conforme o tipo de cobertura da ferramenta.

Tabela 6.11 – Percentual de aumento de potência entre o início e fim da vida da ferramenta

Ensaio	Tipo de cobertura	Potência no início	Potência no fim	Percentual
1	TiN Gleason	37%	50%	35%
2	TiN	36%	49%	36%
3	TiCN+TiN	37%	52%	40,50%
4	TiN Gleason sem na superfície de saída	38%	55%	45%
5	TiN sem na superfície de saída	41%	58%	41,50%
6	TiCN+TiN sem na superfície de saída	40%	55%	37,50%
7	TiN Reafiada e recoberta	37%	50%	35%
8	TiCN+TiN Reafiada e recoberta	37%	50%	35%

Ainda abordando o tema do aumento da potência consumida ao longo da vida da ferramenta, pode-se ver na tabela 6.11 que a aderência de cavaco que gera o fim da vida em ferramentas totalmente recobertas causa acréscimo de potência (e consequentemente de força de corte) similares aos que os desgastes das ferramentas sem cobertura na superfície de saída causam.

6.3 – Análise do comportamento dos diferentes tipos de coberturas.

Após a apresentação dos resultados e discussões sobre o comportamento do critério de fim de vida da ferramenta adotado para a elaboração deste trabalho, resta saber qual revestimento da ferramenta teve o melhor desempenho.

A figura 6.21 mostra o desempenho de diversos revestimentos utilizados nos oito ensaios realizados neste trabalho.

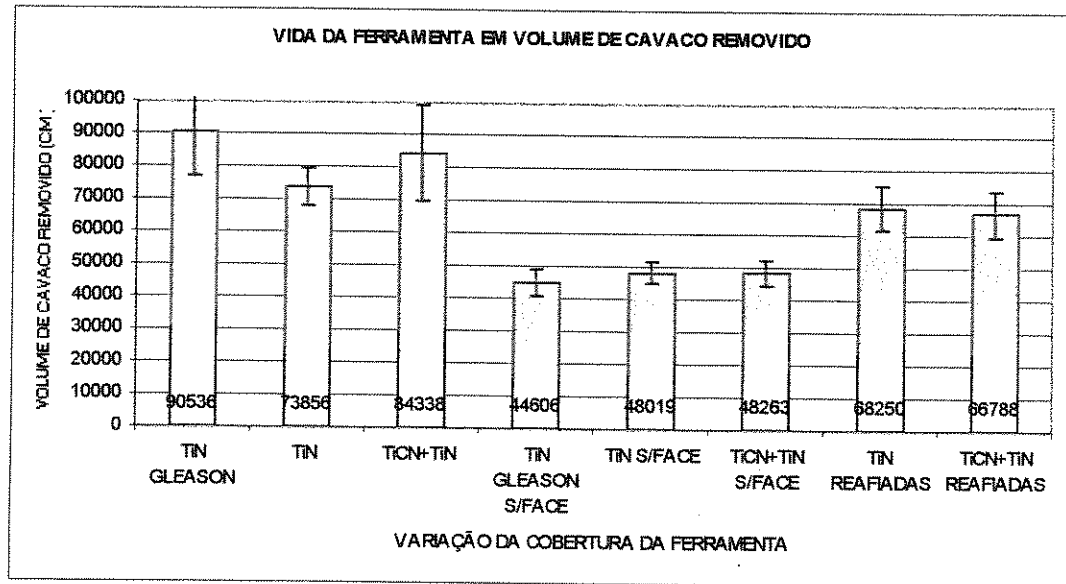


Fig. 6.21 – Volume de cavaco removido versus tipos de coberturas.

A figura 6.21 mostra alguns pontos que merecem ser destacados:

A utilização de revestimentos neste tipo de usinagem proporciona um maior rendimento da ferramenta. Isso fica claro quando da comparação das médias obtidas no grupo de ensaios 1, 2 e 3 com o grupo de ensaios 4, 5 e 6. A vida da ferramenta totalmente recoberta foi aproximadamente 2 vezes maior que aquela da ferramenta sem cobertura na superfície de saída.

Com a utilização de revestimentos principalmente nos ensaios 1, 2 e 3 foi possível atingir os melhores resultados em volume de cavaco removido até atingir o critério de fim de vida estabelecido para este trabalho. Isso permite dizer que se manteve a qualidade do produto dentro dos padrões estabelecidos em projeto, sem sobrecarregar a operação seguinte de lapidação, com o melhor desempenho possível da ferramenta. (dentro do critério de vida estabelecido).

A justificativa para este desempenho está relacionado com as propriedades do revestimento que facilitam o atrito entre cavaco e ferramenta e a elevada dureza superficial destes revestimentos.

Quando se tira a cobertura da superfície de saída, não importa qual a cobertura utilizada na superfície de folga da ferramenta, a vida fica bem menor se compararmos a ferramentas com cobertura total.

Resta saber, se vale a pena economicamente mandar a ferramenta passar pelo processo de recobrimento depois de cada afiação. Pode-se ver também na figura 6.21 que a ferramenta em que foi feito um novo recobrimento depois da afiação não apresentou o mesmo desempenho da ferramenta nova.

Pelos melhores resultados obtidos durante alguns meses de produção na empresa onde os ensaios foram realizados, a conclusão que se chega é que economicamente não vale a pena mandar recobrir as lâminas após cada afiação. O custo do revestimento é alto se considerarmos a quantidade de peças produzidas por afiação. É melhor economicamente ter um desgaste maior na ferramenta com um determinado número de peças produzidas, mesmo com um número maior de paradas de máquina para troca de ferramenta.

O que deve ficar claro é que para esta condição descrita a ferramenta foi comprada com cobertura total, passou pelo processo de afiação e não foi mais aplicado cobertura na superfície de saída. (A cobertura permaneceu somente nas superfícies de folga).

Esta condição é usada na produção de engrenagens hipoidais utilizando o processo “5 Cortes” para usinagem dos dentes. Além disso, são resultados exclusivos da empresa onde os ensaios foram realizados e não se aplicam a outros processos de usinagem, inclusive cortadores convencionais de engrenagens, pois os custos de revestimento para ferramentas caracóis é bem menor do que os custos com revestimentos para lâminas de corte de engrenagens cônicas e hipoidais.

Pensando apenas em vida da ferramenta e comparando os resultados obtidos nos ensaios 7 e 8 (ferramentas que foram afiadas e passaram pelo processo de recobrimento) fica evidente que mandar recobrir a ferramenta após cada afiação significa ter “vida” da ferramenta 30% maior do

que utilizá-la com cobertura apenas nas superfícies de folga. Essa análise é válida para qualquer tipo de cobertura na superfície de folga apresentada neste trabalho.

Nos ensaios 7 e 8, as ferramentas foram afiadas no próprio local da realização dos ensaios. Se compararmos as médias de volume de cavaco removido entre os ensaios 7 e 8 com os resultados dos ensaios 1, 2 e 3 as quais foram afiadas pelo próprio fabricante, é possível perceber a influência negativa da afiação da empresa no desempenho das lâminas. O conceito de afiação aplicado é o mesmo, os parâmetros de usinagem foram iguais, as propriedades das camadas são as mesmas, porém o que foi possível notar de diferente, foram os valores de rugosidade da superfície de saída da lâmina. As lâminas novas, compradas com afiação original do fabricante, utilizadas nos ensaios 1, 2 e 3 apresentavam rugosidade muito baixas, em torno de $R_a 0,1 \mu m$. Já as lâminas utilizadas e reafiadas para a realização dos ensaios 7 e 8 apresentavam rugosidade em torno de $R_a 0,3$ a $0,4 \mu m$. Crê-se que o pior desempenho da ferramenta afiada e recoberta pela segunda vez se deve ao maior coeficiente de atrito causado pela maior rugosidade da superfície de saída, que aumentou a temperatura da ferramenta e facilitou o fenômeno da aderência do cavaco.

Portanto, para trabalhos futuros, sugere-se que a afiação da ferramenta seja melhorada a fim de que se obtenha rugosidade de sua superfície similar àquela obtida na ferramenta afiada pelo fabricante e, depois, seja novamente recoberta e novamente comparadas com as ferramentas que já vem recobertas do fabricante.

Analisando os resultados dos ensaios 7 e 8 é possível perceber que não houve diferença de rendimento entre as coberturas, mesmo apresentando durezas diferentes (TiCN + TiN 3000 HV e TiN 2300 HV) e faixa de temperatura máxima de trabalho desiguais (TiCN + TiN 400° C e TiN 600°C).

As ferramentas utilizadas nos ensaios 1 e 2 tem coberturas idênticas, porém feitas em lugares diferentes. As lâminas do ensaio 1 foram adquiridas já com cobertura. As lâminas do ensaio 2 foram compradas sem cobertura e enviadas a um fornecedor nacional que executou o

trabalho de revestimento. Além disso, as lâminas recobertas do ensaio 1 e as lâminas ainda sem cobertura do ensaio 2 foram adquiridas do mesmo fabricante e com o mesmo padrão de afiação.

Pode-se ver na figura 6.21 que a média do ensaio 1 é maior que a média do ensaio 2, porém a dispersão do ensaio 1 é bem maior que a dispersão do ensaio 2. Isso mostra a influência do processo de cobertura feito em 2 lugares diferentes. Também evidencia as dificuldades em se estabelecer um critério de fim de vida baseada num número fixo de peças em processos de usinagem, pois as variáveis são inúmeras e as diferentes influências que estas variáveis provocam são marcantes dentro do processo produtivo.

Ainda analisando a figura 6.21, pode-se constatar que a cobertura que resultou em maior vida da ferramenta foi aquela de TiN originária da empresa fabricante da lâmina (Gleason Works). Apresentou um desempenho um pouco superior que a ferramenta que utilizava TiCN+TiN, mesmo esta sendo uma cobertura multi-camada, com maior dureza e mesmo coeficiente de atrito (ver tabela 4.1 – capítulo 4). Nos ensaios 2 e 3 foram utilizadas coberturas diferentes. As duas coberturas apresentam o mesmo coeficiente de atrito, porém a dureza da cobertura do TiCN + TiN é 3000 HV e a cobertura de TiN tem dureza em torno de 2300 HV. Esse fato com certeza justifica o melhor desempenho do ensaio 3 em relação ao ensaio 2. Porém, a explicação para o fato de que a cobertura da ferramenta do ensaio 3, apesar de ter características melhores que as do ensaio 1, apresentou resultados similares e a ferramenta do ensaio 2, apesar de ser idêntica à ferramenta do ensaio 1 apresentou resultados piores não tem a ver com características mecânicas. O processo de recobrimento da empresa que fez as coberturas das ferramentas dos ensaios 2 e 3 deve imputar alguma deficiência à ferramenta que fez com que coberturas idênticas (ensaios 1 e 2) apresentassem resultados diferentes e uma cobertura mais nobre (ensaio 3) apresentasse desempenho inferior a uma com propriedades piores (ensaio 1). Esta deficiência não está ligada a resistência ao desgaste da ferramenta pois, como já foi visto, o que causou o crescimento da rugosidade e, conseqüentemente, o fim da vida da ferramenta com cobertura em todas as superfícies, foi a aderência de um pequeno volume de cavaco na aresta de corte. Portanto, esta deficiência deve estar ligada à afinidade entre o material do cavaco e as coberturas que facilita a aderência citada.

Pela pouca diferença entre os resultados nos ensaios 1 e 3 e pela pequena dispersão dos resultados é possível justificar o uso de qualquer uma das coberturas. Porém a cobertura de TiCN+TiN tem um custo 40% mais caro e desta forma não tem porque ser usada.

Apesar dos resultados obtidos no ensaio 2 (ferramenta com cobertura de TiN feita por um fornecedor nacional) terem apresentado uma vida menor que os resultados obtidos nos ensaios 1 e 3, ela não pode ser descartada devido à relação custo / benefício que proporciona. Tem um desempenho menor, porém apresentou uma dispersão menor proporcionando um processo mais uniforme e principalmente com um custo menor em relação as coberturas dos ensaios 1 e 3. Esse conjunto de fatores poderia justificar a possibilidade de ser usada.

Atualmente, na empresa onde os ensaios foram realizados optou-se por usar uma associação entre as condições apresentadas nos ensaios 1 e 7. O conjunto de lâminas é comprado já com a cobertura total de TiN originária do fabricante . Após cada afiação a ferramenta é enviada para o fornecedor nacional que executa o recobrimento com TiN.

A justificativa para esta escolha quando se usa o processo de corte completo (Completing) está relacionado a alguns fatores, quais sejam:

- neste tipo de processo o dente é desbastado e acabado com a mesma ferramenta. Portanto é preciso ter atenção quanto à manutenção da qualidade do dente, principalmente referente à rugosidade do flanco do dente. Por este motivo a utilização do revestimento é fundamental neste tipo de processo, pois facilita obter a qualidade desejada com o melhor desempenho possível.
- reduzir a quantidade de material removido da lâmina, permitindo uma vida útil maior.
- economicamente, pelos resultados até hoje obtidos, não é viável o recobrimento após cada afiação. Essa afirmação é baseada nos custos apresentados pela empresa, neste tipo de processo de corte completo (Completing). O recobrimento após cada afiação é executado para garantir a qualidade do dentado. As lâminas com cobertura propiciam

uma rugosidade melhor no flanco do dente em um maior número de peças produzidas por vida da ferramenta.

Um fato chama a atenção quando se analisa os ensaios 2 e 3. A cobertura de TiCN+TiN apresenta uma dureza superior a cobertura de TiN e vida maior quando comparada com a ferramenta de TiN do ensaio 2 e quase igual quando comparado com a do ensaio 1. Porém, a sua média de material removido na afiação foi maior (ver figura 6.18). Isso com certeza é explicado pela faixa de máxima temperatura de trabalho. A tabela 4.1 do capítulo 4 deste trabalho coloca que a temperatura máxima de trabalho do TiCN+TiN é 400°C, e na cobertura de TiN é de 600°C. A figura 4.3 do capítulo 4 mostra que a temperatura do cavaco no local da usinagem é de aproximadamente 350°C, bem próxima do limite da cobertura de TiCN+TiN. Assim, o calor na ferramenta danificava um maior volume na ferramenta com TiCN+TiN, o que exigia que mais material fosse removido na afiação.

Sabe-se que a proteção e resistência das coberturas contra altas temperaturas é vital para o bom desempenho de ferramentas de usinagem. Soma-se a este fato uma peculiaridade presente nos processos de fresamento (já citadas neste trabalho) que são as variações da temperatura. Esse fato pode explicar também a diferença de material removido na afiação entre as ferramentas dos ensaios 1 e 2.

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

Capítulo 7

7.1 Conclusões

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho, para o processo de corte denominado completo (Completing) de engrenagens (coroas) hipoidais com lâminas alternadas Hardac® III, conclui-se que:

- 1- O critério de fim de vida da ferramenta baseado no valor da rugosidade do flanco do dente é viável, pois favorece a qualidade final do produto e não permite a sobrecarga da operação seguinte de lapidação dos dentes.
- 2- Critérios de fim de vida da ferramenta baseados em número de peças produzidas, volume de cavaco removido ou mesmo desgaste da ferramenta não são viáveis devido à dispersão apresentada nos resultados. Assim, quando utilizadas não foi possível cumprir com as exigências de qualidade do projeto da peça sem sobrecarregar a operação de lapidação.
- 3- Quando se utilizou ferramentas com cobertura total, seja ela qual for, a rugosidade do flanco do dente não apresentou relação com o desgaste VB da lâmina. Neste tipo de ferramenta o que determinou o crescimento da rugosidade e, conseqüentemente, o fim da vida ferramenta foi a aderência do cavaco à aresta de corte.
- 4- Quando se utiliza ferramentas com cobertura total, o critério de fim de vida adotado neste trabalho, interrompe o processo, na maioria das vezes, antes que a ferramenta apresente sinais consideráveis de desgaste ou limitações de uso.

- 5- Quando se utilizou ferramentas sem cobertura na superfície de saída, os elevados desgastes que a lâmina apresentou tem influência no desempenho e no acabamento superficial do flanco do dente.
- 6- Pelos resultados encontrados a escolha de um tipo de cobertura está mais relacionada com a questão econômica, do que com o desempenho obtido por cada uma das condições apresentadas nos ensaios que utilizaram cobertura total.
- 7- Pelo desempenho mostrado nos resultados a melhor cobertura foi aquela de TiN originária do fabricante da ferramenta e do equipamento

7.2 - Sugestões para trabalhos futuros

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

- Repetição dos ensaios aqui realizados utilizando outros parâmetros de usinagem e outros materiais de ferramenta, como por exemplo o metal duro.
- Repetição dos ensaios utilizando outros tipos de coberturas.
- Repetição dos ensaios utilizando outro sistema de corte e outro tipo de lâmina.
- Repetição dos ensaios com ferramentas reafiadas mas melhorando o processo de afiação feito pela empresa, para se conseguir rugosidade da superfície de saída similar àquela das ferramentas originárias do fabricante da ferramenta.
- Utilização de técnicas de monitoramento de processo, como emissão acústica e vibração, com o fim de se estabelecer automaticamente o fim da vida da lâmina.

Referências Bibliográficas

- Abele, E., Dorr J., Ferramentas de Corte protegidas contra a defasagem tecnológica – Máquinas e Metais, nº 439, Agosto 2002, pp. 38-53.
- American Gear Manufacturers Association, Virginia AGMA Standard 390.03ª Junho 1988, 99 p.
- Apostila Técnica Eaton Company, Ferramentas para usinagem de engrenagens, Valinhos – Departamento de Engenharia de fabricação C.F.E. 1994, cap. 8 e 9, 98 p.
- Apostila técnica Moto Peças Trnasmissões Ltda, Teoria do processo de usinagem de engrenagens cônicas e hipoidais. Sorocaba, 1990, 252 p.
- Balzers, Especificações Técnicas sobre revestimentos – Balzers Balinit do Brasil Ltda. 2000.
- Balzers, Usinagens de alto desempenho. Balzers Balinit do Brasil, Seminário Balzers 2002.
- Bandini, J. B., II Seminário Brasileiro de Engrenagens. Julho 1986. Unicamp, cap. 3, pp. 27-40.
- Bollinger, J. G., Kimmet, G. J., The Dynamics of lapping North American Metal Working Research Conference Mc Masters University, May 1973.

Cselle, J. Et all: Today's applications and future developments of coating for drill and rotating cutting tools. Surface and coating technology, vol 76/77, pp 712-718, 1995.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L. , Tecnologia da Usinagem dos Materiais. São Paulo: MM Editora 1999 242 p.

Dixon, R.B. Gears Manufacturing – SME, Detroit, 1990, 242 p.

Dudley, D.W., Dudley's Gear Handbook. The design, Manufacture and Application of Gears. USA, New York MC Graw Hill, 1992, 2º Edição.

Fhusa Tool, Fabricação de Ferramentas, Fhusa Spain 1996, 51 p.

Fisher, G., Hard coating on contaminated surface – a case study, Gear technology, Jan-Fev 1997, pp. 14-15.

Gleason Works, An Introduction To Gears Inspection G-AGE Zeiss, Rochester New York: The Gleason Works Training Center, 2000, 183 p.

Gleason Works, Applied Gear Engineering Course – Bevel Gear and Hypoid Analysis, Rochester New York: The Gleason Works Training Center, 1997, 332 p.

Gleason Works, Cutter Blade Seminar, Rochester New York: The Gleason Works Training Center, 1982, 247 p.

Gleason Works, Face Milling Process, Rochester New York: The Gleason Works Training Center, 2000, 412 p.

Gleason Works, Fundamentals of Bevel Gear Design, Rochester New York: The Gleason Works Training Center, 2002, 305 p.

- Gleason Works, Gear Process Theory, Rochester New York: The Gleason Works Training Center, 1990 213 p.
- Gleason Works, Gear Process Theory. Rochester New York: The Gleason Works Training Center, 2001, 398 p.
- Gleason Works, The Gleason Cutting Process, Rochester New York: The Gleason Works Training Center, 2000, 212 p.
- Gleason Works. Gear Inspection and Metology, Rochester New York: The Gleason Works Training Center, 2000, 280 p.
- Goldrich, R. N., Theory of Six Axes CNC Generation of Spiral bevel and hypoid gears. AGMA Fall Technicall meeting, Pittsburgh, Nov. 1989.
- Henriot, G., Teoria e Prática sobre engrenagens. Paris: Editora Dunod, 1972, Cap. 2, pp 191-323.
- International Standard – Germany DIN 3962, 1995 Tolerances for Cylindrical Gears Teeth.
- International Standard, Concepts and parameters associaters with cylindrical gears and cylindrical gear pairs with involute teeth, Germany DIN 3960, 1995.
- International Standard. Parallel involute gears – ISO System of accuracy, USA ISO 1328, 1997.
- Klocke, F. Krieg, T. Coated tools for metal cutting – Features and applications, Annals of the CIRP, vol 48, nº 2, 1999, pp 515-525.
- Krenzer, J. T., Face Milling or Face Hobbing choosing the best process. Published by

- the Gleason Works, Rochester New York 2001 9 p.
- Kumar, A.D., Technological heredity in spor year manufacturing, Journal of Materials Processing Technology v. 91 n° 2, 1999.
- Langendorfer, W. New coating extend gear hob life. Manufacturing Engineering, vol 88, n° 5, pp. 59-62, may 1982.
- Liebherr Machine. Hobbing Machine, Kempten: Liebherr Gmb 4, 1996, 237 p.
- Lima, J. E., Monitoramento do corte de dente de engrenagem com ferramenta hob, via corrente elétrica do motor, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1995, Tese (Mestrado).
- Mack, M., Surface Technology wear protection, Metaplas 1990.
- Muller, H.R., II Seminário Brasileiro de Engrenagens, Julho 1986, Unicamp, Cap. 4, pp 41-49.
- Nascimento, J. C. , Os sistemas de produção de engrenagens espirocônicas. Máquinas e Metais, pp 42-50, Junho 1989.
- Niemann, G, Elementos de Máquinas. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1971 Vol 2, Cap 5, pp 86-89
- Niemann, G, Elementos de Máquinas. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1971 Vol 3, Cap 23, pp 1-20.
- Price, D. S., As Brief history of years. Gear Technology. July-August, 1999 p. 64

- Quirino, J. B., Controle de vida da ferramenta caracol parametro teórico.
Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de
Campinas, 2000, 108 p Tese(Mestrado).
- Reibner, H. Engrenagens medidas em aparelhos de medição de forma. Máquinas e
Metais, pp 46-55, Maio 2001.
- 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.
- Sarwar, M, Applications of advanced surface engineering treatments to multi-point
cutting edges. Surface and Coating Technology, vol 108/109, pp 612-619.
- Schlarb, G., Switzer, K. Dry hobbing process – Technology road map., Gear
Technology, March – April, 2001 pp 14-21.
- Smith, R.E., Indentification of Gear Noise with Single Flank Composite Measurement,
AGME Fall Technical meeting São Francisko, CA, October, 1985
- Stadtfeld, H. J. The G-LAB Expert System, a third dimension in developing Bevel gears,
Published by The Gleason Works, Rochester New York, 1994.
- Stadtfeld, H. J., Gleason Bevel Gear Technology. Published by The Gleason Works,
Rochester New York, 1995.
- Stadtfeld, H. J., Handbook of Bevel and Hypoid Gears, Calculation
Manufacturing and Optimization, Rochester Institute of Technology, 1993.

Stadtfeld, H. J., The Basics of Spiral Bevel Gears – Gear Technology, Jan – Feb 2001, pp 31-38.

Stadtfeld, H. J., The Gleason Power Cutting Process, Published by The Gleason Works, Rochester New York, set. 1996.

Stadtfeld, J.H., Advanced Bevel Gear Technology Manufacturing, Inspection and Optimization. Rochester New York: The Gleason Works Division of Gleason Corporation, 2000, 343 p.

Stipkovic, M.F., Engrenagens: Geometria, Dimensionamento, Controle, Geração, Ensaios. Rio de Janeiro, 2ª Edição Editora Guanabara, 1987, 163 p.

Sulzer, G, High speed dry hobbing Manufacturing Engineering – Vol 199, nº 5, nov. 1997, pp. 46-52.

Wegst, C.W. Stahlschlüssel – Verlag Stahlschlüssel Wegst Gmbh, Western Germany 1983 548 p.

Wick, C., Coating Improve to life increase productivity Manufacturing Engineering vol 97, nº 6, dez 1986, pp 26-31

Wick, C., HSS cutting tool gain a productivity, Edge. Manufacturing Engineering, vol. 98 nº 5, may 1987, pp. 38-42

Yuhara, D.A., Aplicação de revestimentos PVD em ferramentas de corte – Publicado por Brasimet Com Ind. S.A. São Paulo, Agosto 2000, pp 1-10.

Yuhara, D.A., Aplicação de revestimentos por deposição física a vapor. Máquinas e Metais, nº 423, Abril 2001, pp 148-160.

