

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Desgaste de Fresa Caracol na Usinagem de Engrenagens

por

Rafaela Priscila Fernandes Buogo

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Mecânica

Porto Alegre, 10 de Dezembro 2010.

DESGASTE DE FRESA CARACOL NA USINAGEM DE ENGRENAGEM

por

Rafaela Priscila Fernandes Buogo
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processo de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Joyson Luiz Pacheco

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza DEMEC/PROMEC/ UFRGS

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez..... DEMEC/PROMEC/ UFRGS

Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos.....PGETEMA/PUCRS

Prof. Dr. Horácio A Vielmo
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 10 de Dezembro de 2010.

Dedico esse trabalho aos meus pais José Roberto Fernandes e Eliana Fernandes, por serem o meu exemplo de vida e me apoiarem em todos os momentos. E ao meu esposo Natanael Buogo, pelo apoio, paciência e compreensão durante a realização desse trabalho

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Joyson Luiz Pacheco pela orientação e incentivo durante o desenvolvimento desse trabalho.

Aos colegas de mestrado Eng. Fabiano Silva Brites, Eng. Sandro Dias Vieira e Eng. Vinícios Vargas pelo apoio e amizade.

Aos colegas de trabalho, que auxiliaram no desenvolvimento desse trabalho.

Aos familiares e amigos, que estiveram sempre presente.

A todos, o meu muito obrigado!

RESUMO

Um dos métodos de fabricação de engrenagem em grande escala é baseado na usinagem por ferramentas de corte denominadas Cortador Hob ou Fresa Caracol. Esse método permite agilidade e precisão. A máquina e a ferramenta destinadas a esse processo são para aplicação específica na fabricação de dentados em engrenagens e eixos, fazendo-se necessário portanto um aprofundamento na otimização, melhor utilização dessas ferramentas. A não substituição da ferramenta no momento correto implica em dois problemas: ou ela poder ser trocada antes do término da vida ou ela pode ser usada em excesso e formar o chamado desgaste excessivo, o que reduz o número de afiações do cortador. O ponto a ser estudado o qual se trata essa dissertação é poder estimar a quantidade de peças a ser produzida com cada uma dessas ferramentas. Entretanto, sabe-se que uma mesma ferramenta pode ser aplicada a diversos tipos de peças, com variação de diâmetro e espessura, o que caracteriza a complexibilidade desse processo. Para isso foram coletados dados de usinagem e de desgaste da ferramenta em função das dimensões do par peça/ferramenta. Depois foram determinada curva padrão de desgaste em relação ao par peça/ferramenta e a partir dessa curva padrão, determinar a vida dos cortadores em quantidade de peças a serem fabricadas. Em seguida, os testes realizados puderam comprovar a efetividade dessa correlação.

Palavras-chave: Hob, caracol, usinagem, engrenagem, vida.

ABSTRACT

The method of manufacture of gear on a large scale is based on process that use cutting tools, called Hob or “Caracol”. This method allows the speed and accuracy. The machine and tool designed for this process are specific for application in the manufacture of toothed gears and shafts. This making it necessary insight into the optimization of these tools. Failure to replace the tool at the right time involves two problems: or it can be exchanged before the end of life, or it can be overused and form the so-called excessive wear, which reduces the number of cutter sharpenings. The point of study from which it comes this work is to determine the quantity of parts to be produced with each of these tools, it know that the same tool can be applied to various types of pieces, ranging in diameter and thickness, which characterizes the complexity of this process. Therefore data about machining tool wear depending on the size of the pair part / tool were plotted collected. After that, standard curves of wear in relation to the pair part / tool and by this standard curve, to determine the life of the cutters in quantities of parts to be manufactured. Soon after, the tests performed could proved the effectiveness of this correlation.

Keywords: Hob, caracol, machining, gear, life

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 14 |
| 2.1 | Aplicação das Engrenagens..... | 14 |
| 2.2 | Processos de Fabricação de Engrenagens..... | 15 |
| 2.2.1 | Processo direto com fresas de forma..... | 18 |
| 2.2.2 | Processo indireto ou por geração | 19 |
| 2.2.3 | Shaving | 24 |
| 2.2.4 | Inspeção das engrenagens..... | 25 |
| 2.3 | Desgaste de Ferramentas de corte | 26 |
| 2.3.1 | Tipos de desgastes e avarias das ferramentas..... | 26 |
| 2.3.2 | Mecanismos causadores do desgastes das ferramentas..... | 30 |
| 2.3.3 | Desgaste e Vida da Ferramenta..... | 32 |
| 2.3.4 | Fatores que influenciam no desgastes das ferramentas..... | 33 |
| 2.3.5 | Curvas que determinam a vida da ferramenta | 34 |
| 2.4 | Métodos de Detecção da Vida da Ferramenta..... | 37 |
| 2.4.1 | Método Linear | 37 |
| 2.4.2 | Método pelo cálculo do volume de material removido..... | 39 |
| 2.4.3 | Método pelo aumento da corrente elétrica | 41 |
| 2.4.4 | Desgaste de ferramentas de puncionamento..... | 42 |
| 2.5 | Análise comparativa entre os métodos apresentados | 45 |
| 2.6 | Conceitos estatísticos..... | 46 |
| 2.6.1 | Correlação | 46 |
| 2.6.2 | Regressão | 48 |
| 2.6.3 | Desvio Padrão e Média..... | 49 |

| | | |
|-----|--|----|
| 3 | PROPOSTA PARA DETERMINAR A VIDA DO CORTADOR CARACOL..... | 50 |
| 3.1 | Descrição do Método Experimental | 51 |
| 3.2 | Características das Engrenagens..... | 52 |
| 3.3 | Características da Ferramenta Caracol | 52 |
| 3.4 | Dados Coletados | 55 |
| 3.5 | Análise Estatística dos Dados..... | 55 |
| 3.6 | Testes..... | 56 |
| 3.7 | Análise dos Testes | 57 |
| 4 | DISCUSSÕES | 59 |
| 5 | CONCLUSÕES | 60 |
| 6 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 61 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Transmissão automotiva | 15 |
| Figura 2 - Terminologia da Engrenagem (Shigley 1970 – pg. 225)..... | 16 |
| Figura 3 - Terminologia da Engrenagem (Shigley 1970 – pg. 225)..... | 16 |
| Figura 4 - Geração do dentado da engrenagem | 17 |
| Figura 5 - Fresa de disco | 18 |
| Figura 6 - Geração de engrenagens por dentes retos (Stipkovic <i>et al.</i> , 1973)..... | 20 |
| Figura 7 - Ferramenta de corte de dentes retos (Shaper)..... | 20 |
| Figura 8 - Geração de engrenagens por dentes retos. a) Interno – b) Externo | 21 |
| Figura 9 - Máquina para geração por dentes Reto. a) Interno – b) Externo | 21 |
| Figura 10 - Geração de engrenagens por cortador helicoidal (Fellows) (Stipkovic <i>et al.</i> , 1973) | 22 |
| Figura 11 - Geração de engrenagens por cremalheira (Shigley 1970 – pg. 237) | 22 |
| Figura 12 - Ferramenta caracol..... | 23 |
| Figura 13 - Foto de geração de engrenagens por cortador Caracol..... | 23 |
| Figura 14 - Máquina para geração por fresa caracol reto. a) Interno – b) Externo | 24 |
| Figura 15 - Processo de shaving | 25 |
| Figura 16 - Máquina de medição em coordenadas tridimensionais. | 25 |
| Figura 17 - Desgaste frontal em ferramenta de corte (Diniz <i>et al.</i> , 2003)..... | 26 |
| Figura 18 - Desgaste de cratera em ferramenta de corte (Diniz <i>et al.</i> , 2003)..... | 27 |
| Figura 19 - Deformação plástica da ferramenta de corte (Diniz <i>et al.</i> , 2003)..... | 28 |
| Figura 20 - Lascamento da ferramenta de corte (Diniz <i>et al.</i> , 2003)..... | 28 |
| Figura 21 - a) Trincas Térmicas b) Trincas mecânicas (Diniz <i>et al.</i> , 2003)..... | 29 |
| Figura 22 - Desgaste de ferramentas e suas medidas (Stoeterau, 2009)..... | 30 |
| Figura 23 - Aresta postiça da ferramenta (Diniz <i>et al.</i> , 2003)..... | 31 |
| Figura 24 - Desgaste VB (mm) x Vida T (min) | 35 |
| Figura 25 - Vida T (min) x Velocidade de Corte Vc (m/min). (Diniz <i>et al.</i> , 2003) | 35 |
| Figura 26 - Desgaste KT (mm) x velocidade de corte (m/min). (Diniz <i>et al.</i> , 2003)..... | 36 |
| Figura 27 - Utilização do cortador caracol no sentido vertical (Dell Vecchio, 2007)..... | 37 |
| Figura 28 - Utilização do cortador caracol no sentido horizontal (Dell Vecchio, 2007) | 38 |
| Figura 29 - Desgastes do cortador no momento da substituição versus o volume de cavaco removido. (Quirino, 2000)..... | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 30 - Gráfico do sinal de corrente elétrica do motor de acionamento da máquina versus o número de peças (Máquina com CNC). (Lima, 1995) | 42 |
| Figura 31 - Dados coletados no experimento de puncionamento (Dal Bianco, 2003)..... | 43 |
| Figura 32 - Gráfico do desgaste da ferramenta em função da quantidade de puncionamento (Dal Bianco, 2003) | 44 |
| Figura 33 – Diagrama de dispersão e análise do coeficiente de correlação (Triola, 2005)..... | 47 |
| Figura 34 - Fluxograma do Procedimento Experimental | 51 |
| Figura 35 - a) Croqui b) Foto de um exemplo de engrenagem..... | 52 |
| Figura 36 - Cortador caracol com revestimento de TiN..... | 53 |
| Figura 37 - Desgaste de flanco VB no dente da ferramenta caracol | 53 |
| Figura 38 - Ficha controle de vida da ferramenta..... | 54 |
| Figura 39 - Microscópio para medição do desgaste de flanco (VB) | 54 |
| Figura 40 - Gráfico de dispersão da amostra..... | 56 |
| Figura 41 – Composição química do aço AISI CL18 (Departamento de Metalurgia Eaton) .. | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Valores Estimados de K (Dell Vecchio, 2007)..... | 39 |
| Tabela 2 – Dados coletados da ferramenta e da engrenagem..... | 55 |
| Tabela 3 – Teste realizado a partir da curva padrão | 57 |

1 INTRODUÇÃO

Um dos processos de fabricação de eixos e engrenagens é baseado na geração de dentado por usinagem utilizando máquinas fresadoras caracol, bem como ferramentas de corte específicas para essa aplicação. A boa correlação desse sistema garante a melhor utilização do equipamento e da ferramenta. Em uma empresa de Caxias do Sul, esse processo é utilizado em larga escala. A mesma possui sistema de produção baseado em células, o que evidencia a necessidade da melhor utilização da ferramenta. Para evitar afiações desnecessárias e também a troca excessiva de cortadores, o que impacta diretamente no tempo de máquina parada, sendo um processo incidental (tempo necessário ao processo, mas não agrega valor ao produto), deseja-se reduzi-lo ao máximo.

Atualmente o momento de troca desses cortadores é baseado no acabamento superficial do dentado, determinado por visualização e/ou desgaste do dente do cortador, também verificado visualmente. Ambos os procedimentos estão passivos de erro, pois se baseiam na percepção de cada operador. Existe uma dificuldade de se realizar um cálculo teórico que determine o momento da troca, pois um mesmo cortador pode ser utilizado em diversas peças, ou seja, dependendo a quantidade de peças usinadas de cada modelo, tem-se variação no rendimento final do cortador.

Embora já hajam alguns estudos para determinação desses parâmetros, os mesmos não podem ser facilmente aplicados na rotina de produção. Os estudos já realizados, pesquisados, para determinação da vida do cortado Caracol são: “ Métodos linear de utilização do cortador Del Vechio 2007” – “ no cálculo do volume de material removido para formação do dentado de J.A. Quirino 2000” - “ Aumento da corrente elétrica da máquina de João Lima (1995).

As transmissões são utilizadas em veículos automotivos, como por exemplo, carros de passeio, tratores, colheitadeiras, caminhões, caminhonetes entre outros. Com uma gama tão grande e um mercado que cresce velozmente, a necessidade de se desenvolver os processos de fabricação de seus componentes é indispensável.

Uma empresa de Caxias do Sul tem sua produção segmentada no ramo agrícola, ou seja, fabrica caixas de transmissão para tratores e colheitadeiras. Para se ter uma noção das características desse mercado, uma reportagem “Colheita aquece venda de máquinas agrícolas” no site de economia www.agrolink.com.br, acessado em 05/05/10, mostra que durante o período de janeiro a março de 2009, marcado pela crise mundial, foram vendidas no

Brasil, aproximadamente 10.868 unidades de tratores, se comparado com o mesmo período de 2010, foram vendidos 16.507 unidades de tratores, entre nacionais e importados.

O que demonstra um aumento de 52% nas vendas, esse acréscimo de vendas e produção, sofre diversos impactos, como por exemplo, a dificuldade dos fornecedores acompanharem o aumento da produção e entregarem as componentes nas quantidades e nos prazos necessários, o principal produto fornecido que não reage na mesma velocidade do que o cliente é o aço, pois quando há um aumento na cadeia produtiva, a maioria das indústrias busca por esse recurso fundamental. Outro ponto que também tem suas dificuldades é a contratação de mão-de-obra, no momento da retomada o mercado está aquecido e os melhores profissionais escolhem entre as vagas ofertadas. Além do que para a produção de componentes para transmissão é necessário uma mão-de-obra especializada da qual o mercado não está preparado para oferecer.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para se tratar do assunto de usinagem de dentados de engrenagens, é importante definir alguns conceitos, que sirvam de base para este trabalho, para que se possa entender o comportamento do desgaste das ferramentas de corte, a influência no processo produtivo e as vantagens de se controlar o desgaste. Entre esses conceitos estão: a aplicação das engrenagens e os processos de fabricação das engrenagens, máquinas de usinagem de engrenagens, ferramentas de corte de engrenagens, desgaste de ferramentas de corte e os três métodos já estudados para determinar a vida da ferramenta.

2.1 Aplicação das Engrenagens

A aplicação das engrenagens estudadas nesse trabalho, está relacionada com sua utilização em caixas de transmissão automotivas. Sendo a transmissão um equipamento mecânico responsável por transmitir a força gerada por uma fonte (motor) até o ponto de aplicação, podendo também ter seu desempenho potencializado. A transmissão pode ter algumas variações, como por exemplo transmissão por forma ou transmissão por atrito.

Transmissão por forma recebe esse nome devido seus componentes terem formatos específicos para realizar encaixes irão proporcionar a transmissão da força. Exemplo desses elementos: eixos entalhados, chavetados ou estriados e as engrenagens.

Transmissão por atrito baseia-se na boa centralização das peças ligadas aos eixos, mas tem por característica não possuir a mesma capacidade de transmissão gerada pela de forma, dados que seus componentes não são estruturados para forças elevadas, e são eles; polias, correias, arruelas dentadas e correntes.

Niemann (1995) diz que as transmissões por engrenagens são as mais frequentemente usadas em função da potência, rotações e relações de multiplicações que variam de valores mínimos até máximos. A transmissão por engrenamento é diferenciado pela transmissão de força sem deslizamento, pela segurança de funcionamento, pela vida, pela resistência a sobrecargas, devido a poucas manutenções, tamanho reduzido e ao alto rendimento. Em contrários a essas vantagens apresentam-se também os fatores desfavoráveis o seu maior custo de fabricação, a existência de maiores ruídos durante o funcionamento e transmissão relativamente rígida, o que faz algumas vezes prever-se um acoplamento elástico para se

evitar choques. A figura 1, representa uma transmissão automotiva com seus componentes, entre eles, eixos e engrenagens fabricados pelo processo de geração de dentes.

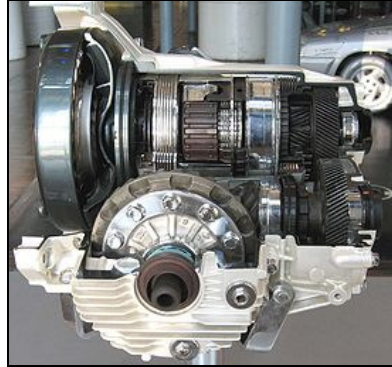


Figura 1 - Transmissão automotiva

2.2 Processos de Fabricação de Engrenagens

A engrenagem é um componente fundamental da transmissão, onde o acabamento superficial das engrenagens é um fator muito importante para sua utilização, pois é responsável pelo nível de emissão de ruído da transmissão, para isso é fundamental que o processo de fabricação das engrenagens esteja voltado a atender essa especificação. Na empresa onde será realizado o estudo, o método utilizado para a fabricação de engrenagens é o fresamento com ferramenta caracol e posteriormente a utilização da ferramenta de *shaver* (processo de fabricação que realiza o acabamento superficial do dentado, antes do tratamento térmico). A máquina e a ferramenta são denominados *Shaver*, o processo é denominado *shaving*, e mais detalhes sobre esse processo estão descritos no capítulo 2.3 desse trabalho.

O *shaver* é o responsável pelo acabamento final do dente da engrenagem, porém esse processo sofre forte influência do resultado obtido no processo anterior que é o fresamento. Sendo assim, o fresamento é o processo que sendo bem monitorado, irá apresentar os melhores resultados de acabamento.

Shigley (1970) apresenta o estudo dos mecanismos formados por engrenagens, tanto de dentes retos como de dentes helicoidais, bem como os processos de fabricação desses componentes. A figura 2, mostra a terminologia adotada no estudo das engrenagens e a Figura 3, mostra um exemplo de engrenagem.

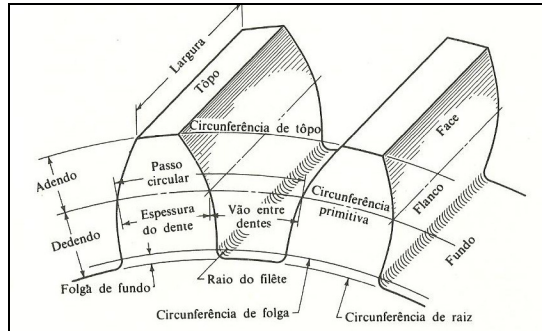


Figura 2 - Terminologia da Engrenagem (Shigley 1970)



Figura 3 - Terminologia da Engrenagem (Shigley 1970)

No projeto da transmissão, características importantes como movimento uniforme, suave, livre de deslizamento, alta velocidade, peso reduzido, sincronismo preciso, elevada eficiência ou um projeto compacto. Collins (2002) indica a seleção do sistema de engrenagens como o mais apropriado. Ainda que existam outros mais baratos como transmissões por correntes ou correias, esses não se mostram tão vantajosos em situações adversas como, por exemplo, quando há um grande afastamento entre o eixo de entrada e de saída.

Collins (2002) diz que para se realizar a seleção adequada do tipo de engrenagem, existem alguns fatores como: arranjo geométrico necessário para a máquina, relação de redução necessária, a potência a ser transmitida, as velocidades de rotação, as metas de eficiência, as limitações do nível de ruído e as restrições de custos.

As engrenagens estão sujeitas a qualquer um dos modos de falha dos componentes mecânicos e a sua análise se torna cada vez mais complexa por se tratar de diversas variáveis de carga que atuam no processo de engrenamento. A maioria das engrenagens gira em apenas um sentido, assim cada um de seus dentes fica submetido a uma carga de flexão repetida, o que pode vir a causar fadiga de altos ciclos. Também pode ocorrer fadiga de superfície devido

ao contato cíclico de Hertz, gerados entre as superfícies curvas dos dentes à medida que se engrenam repetidamente.

Outras falhas que podem ser encontradas nas engrenagens, mas que já não são tão comuns é a fratura frágil ou a ruptura dúctil que ocorre na região do adoçamento da raiz (região onde dever haver um raio para que não haja acúmulo de tensões) do dente da engrenagem, gerando escoamento devido a sobrecargas imprevisíveis.

A geometria do perfil do dente da engrenagem deve reproduzir uma razão de velocidades exatamente constante entre as engrenagens movida e motora durante a rotação em cada posição de contato entre os dentes, para que seja satisfeita a lei fundamental do engrenamento.

Um fator muito importante na fabricação de engrenagens é a geometria da evoluta, base para a envolvente. Shingley (1970) apresenta a evolventometria, ou seja, o estudo da geometria da evoluta. A Figura 4, mostra como é o processo de geração dos dentes da engrenagem.

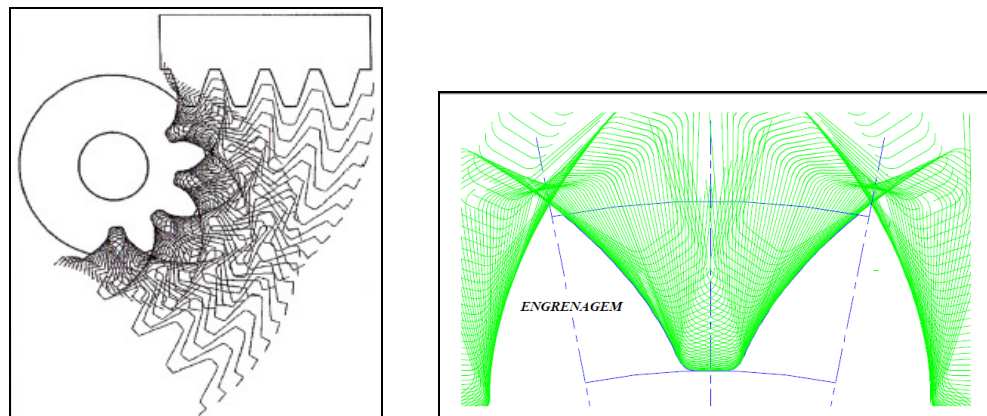


Figura 4 - Geração do dentado da engrenagem

Norton (2004) apresenta a fabricação das engrenagens por dois diferentes processos: conformação e usinagem. A usinagem, o processo foco desse trabalho, entende-se que este processo também pode ser subdividido.

Na obra de Stipkovic *et al.* (1973) discorre-se sobre dois processos de fabricação de engrenagens, que podem ser entendidos como um enquadramento geral: processo direto com fresa de forma e processo indireto ou por geração.

Norton (2004) descreve sobre a usinagem por processos grosseiros, que incluem fresamento do dentado por cortador caracol, de forma ou cortador cremalheira e processos de acabamento que incluem brunimento, polimento, lapidação e retificação de dentes.

Para se usinar engrenagens pelo processo de geração são necessárias máquinas especiais para esse fim. Tais máquinas são chamadas de fresadoras de engrenagens e segundo Stipkovic *et al.* (1973), existem alguns tipos de ferramentas empregadas para o corte de dentes e de acordo com a ferramenta a ser empregada, há uma máquina especial.

No catálogo de Máquinas Ferramentas Brasileiras, Vidossich (1986), mostra as diversas máquinas empregadas no sistema de geração de engrenagens. Alguns processos chegam a ser confundidos com as marcas das máquinas. Neste, podem ser encontrados três modelos de máquinas para fresamento com cortador caracol.

2.2.1 Processo direto com fresas de forma

Stipkovic *et al.* (1973) apresenta o processo direto com fresas de forma tem como principal vantagem, de não necessitar de uma máquina especial para realizar a forma do dentado. Basta uma máquina fresadora universal e uma fresa de forma, que esta pode ser de topo ou de disco, com perfil afiado conforme o formato que se deseja ter na engrenagem usinada. A figura 05 mostra a usinagem de dentados de engrenagens a partir da fresa de disco.

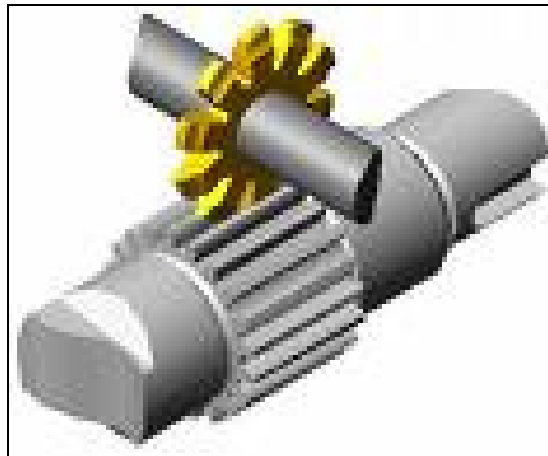


Figura 5 - Fresa de disco

O que diferencia a utilização da fresa de topo para a de disco é o sentido do eixo de rotação da ferramenta com relação à peça. Sempre que possível, deve-se utilizar a fresa de disco, pois a mesma mantém seu perfil inalterado mesmo após várias afiações. Já a fresa de topo é utilizada em casos especiais onde a fresa de disco não é a mais indicada, como na usinagem de uma engrenagem bi-helicoidal ou dente de serra com dente contínuo.

A máquina para essa aplicação deve estar equipada de um divisor (equipamento que auxilia a rotação da engrenagem no passo correto da formação dos dentes). Caso seja de interesse fabricar uma engrenagem helicoidal, será necessário que a máquina seja universal.

Porém existem alguns inconvenientes desse método de fabricação. Entre eles estão a dificuldade em gerar o perfil obtido correspondente ao perfil teórico e a utilização de uma vasta gama de cortadores para cada módulo a ser fabricado. Tudo isso evidencia que esse é um processo demorado e por isso é utilizado em casos de produção de poucas peças ou em casos de manutenções emergenciais.

Norton (2004) também afirma que o cortador (ou fresa de forma) deve ser feito para a forma do vão do dente, para a geometria e para o número de dentes da engrenagem. A singularidade dessas ferramentas faz com que o custo de sua utilização seja alto. Assim, com o objetivo de reduzir esses custos, faz-se uma associação das engrenagens com tamanhos múltiplos, resultando em erros de perfil para todos os números de dentes, exceto um. De todos os métodos, o menos preciso de todos eles.

2.2.2 Processo indireto ou por geração

Para fabricação em produção seriada é indicado o uso do processo por geração, o qual Stipkovic *et al.* (1973) diz que o corte de dentes utiliza a característica do perfil conjugado. Para esse caso existem alguns métodos, entre eles: geração por engrenagens de dentes retos (*shaper*); por engrenagens helicoidais (Fellows); cremalheira de corte, coroa sem-fim ou cortador caracol. A seguir explica-se simplificada cada um desses processos.

Geração por dentes retos (*Shaper*): o cortador tem o formato de um prisma dentado (muito semelhante a própria engrenagem). O ponto de corte resulta da interseção da superfície frontal da peça e a superfície lateral do cortador. A espiga se projeta sobre um plano perpendicular ao eixo. A afiação é feita na superfície cônica frontal do cortador.

A figura 06 representa um croqui do sistema de corte, mostrando o movimento axial da ferramenta e o movimento de rotação da engrenagem, também uma vista lateral da ferramenta, onde pode ser evidenciada a altura (h) do dente da ferramenta e também os diâmetros D_p (primitivo) e D_b (base) da ferramenta, responsável por formar os dentes da engrenagem.

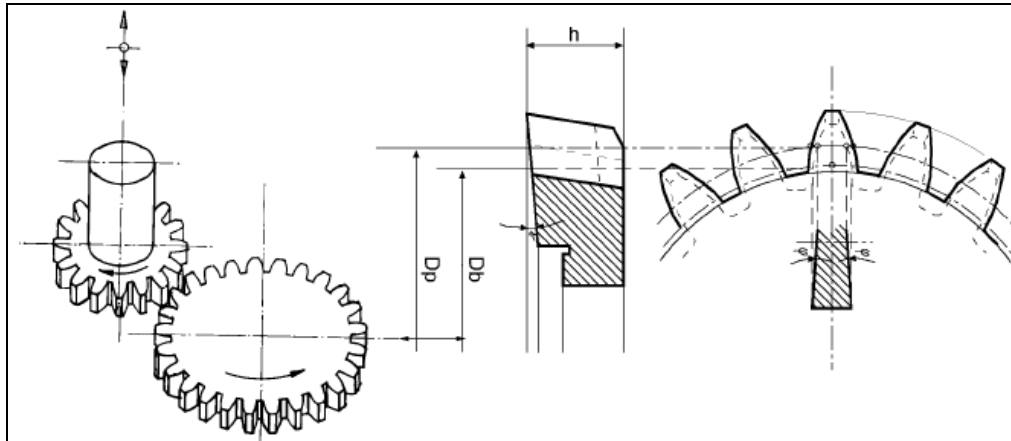


Figura 6 - Geração de engrenagens por dentes retos (Stipkovic *et al.*, 1973)

De modo mais simplificado, Norton (2004) diz que o método de geração de dentes retos usa uma ferramenta cortante no formato de uma engrenagem que se move axialmente para frente e para trás para cortar os dentes, enquanto o disco gira ao redor da ferramenta. Esse processo corre o risco do defeito de qualquer dente do cortador ser transferido para todos os dentes da engrenagem. Esse método permite a fabricação de dentados internos e externos.

A ferramenta utilizada nesse processo é o cortador de dentes retos, também conhecido como cortador *shaper* e pode ser demonstrado pela figura 07.

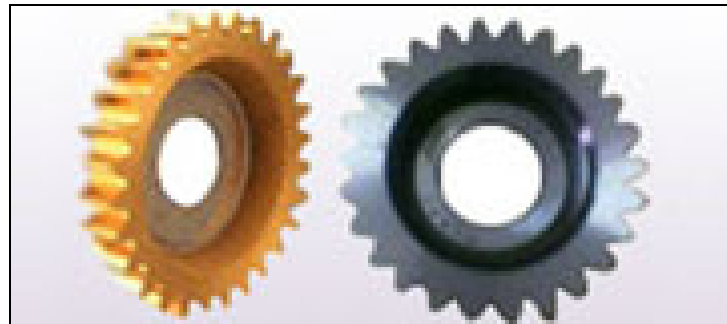


Figura 7 - Ferramenta de corte de dentes retos (Shaper)

A figura 08, representa o corte de engrenagens, utilizando uma ferramenta de dentes retos. a) representa corte interno e b) representa o corte externo.

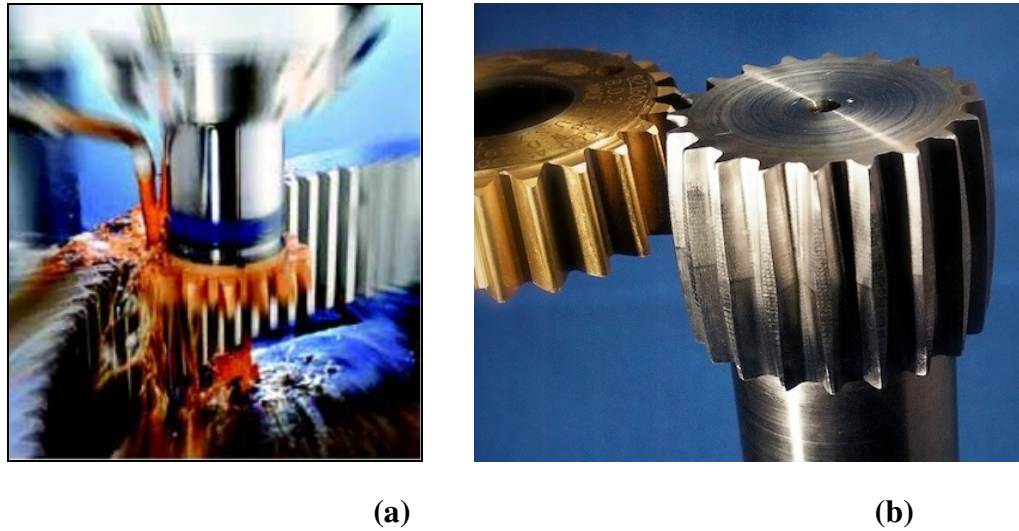


Figura 8 - Geração de engrenagens por dentes retos. a) Interno – b) Externo

A máquina utilizada para realizar a fabricação de engrenagens pelo sistema de corte de dentes retos tem seu sistema de corte representado na figura 09 (a), onde o movimento axial é representado por uma seta. Na figura 13 (b), mostra o lado externo da máquina para realização desse processo.

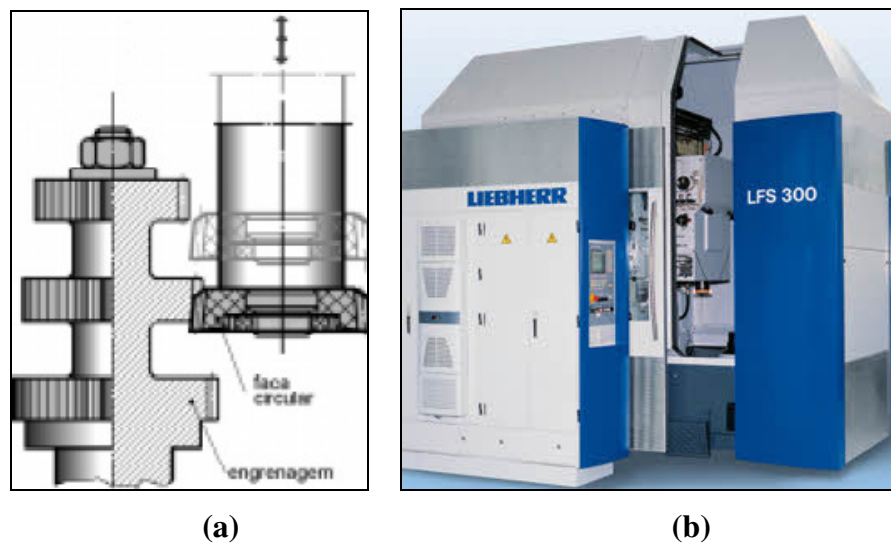


Figura 9 - Máquina para geração por dentes Reto. a) Interno – b) Externo

Geração por dentes helicoidais (Fellows): Para Stipkovic *et al.* (1973), o cortador tem por característica ter o formato da engrenagem, porém com dentes helicoidais, como mostra a figura 10. O objetivo é formar engrenagens também com dentes helicoidais.

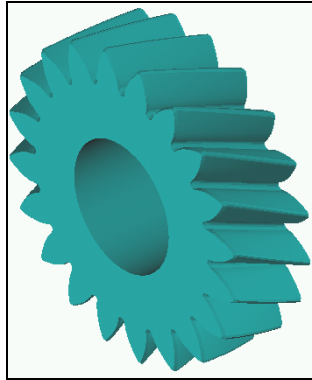


Figura 10 – Engrenagem gerada por cortador helicoidal (Fellows) (Stipkovic *et al.*, 1973)

Stipkovic *et al* (1973) descreve essa operação a partir da ferramenta que tem o formato de um prisma dentado que se projeta sobre um plano perpendicular ao eixo, formando um perfil envolvente de um dente conjugado com a roda (peça cilíndrica) a ser fresada.

Geração por cremalheira de corte: Stipkovic *et al.* (1973) diz que a engrenagem pode ser gerada por cortador *Fellows* ou pela cremalheira *Maag*. Esse processo tem por princípio que o cilindro primitivo da roda deve rolar sem deslizar sobre o plano primitivo da ferramenta geradora. O eixo da roda tem direção paralela à do dente da roda.

Para Norton (2004), o processo por cremalheira pode ser facilmente desenvolvido, porque o seu dente tem o formato de um trapézio. A cremalheira endurecida e afiada move-se para frente e para trás alternadamente ao longo do eixo do disco da engrenagem, ao mesmo tempo em que avança sobre ele para gerar a engrenagem. Esse processo é representado na figura 11.

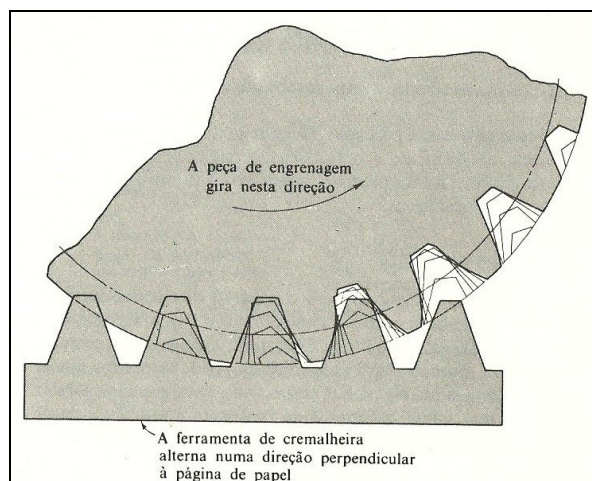


Figura 11 - Geração de engrenagens por cremalheira (Shigley 1970 – pg. 237)

Shigley (1970) explica o processo de usinagem por cremalheira como um método altamente favorável à geração dos dentes da engrenagem em que a ferramenta de corte, chamada cremalheira, é encaixada na peça da engrenagem até que os círculos de passo sejam tangentes. Então, a engrenagem e a ferramenta rolam, após cada curso de corte.

Geração por cortador caracol: Stipkovic *et al.* (1973) fala que esse cortador é caracterizado por uma rosca sem fim, apresentando um filete interrompido por uma série de sulcos helicoidais normais a hélice primitiva.

A ferramenta utilizada para realizar o processo de geração de engrenagens por fresa caracol é mostrada na figura 12.



Figura 12 - Ferramenta caracol

Com um mesmo cortador caracol é possível fabricar uma série diversificada de engrenagens cilíndricas de dentes retos ou helicoidais, porém todos com o mesmo módulo e o mesmo ângulo de pressão. A figura 13, mostra o processo de fabricação por geração com cortador caracol.

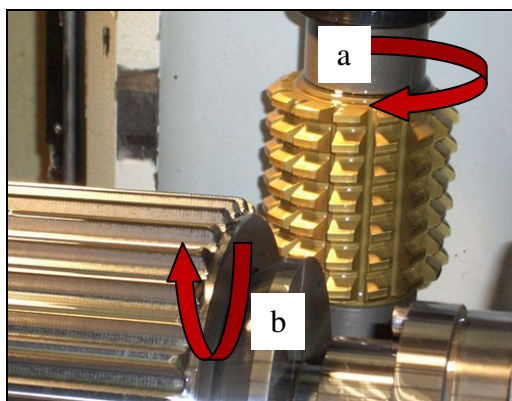


Figura 13 - Foto de geração de engrenagens por cortador Caracol

Na mesma linha de raciocínio, Norton (2004) diz que o cortador caracol é análogo a uma rosca cônica. Para permitir as arestas cortantes, os dentes são interrompidos. Esse cortador roda em torno de um eixo perpendicular ao disco da engrenagem, que gira para formar o dente da engrenagem, na figura 12, pode ser observado os sentidos de rotação do cortador indicado pela letra “a” e o sentido de rotação da engrenagem indicado pela letra “b”. Se comparado com os outros métodos apresentados, esse é o mais preciso, mas quando utilizado na produção de engrenagens, gera excelente acabamento superficial. Os erros são minimizados porque nenhum reposicionamento do dente é requerido durante a geração.

Para a fabricação de engrenagens pelo método de geração por cortador caracol, são utilizadas máquinas especiais para esse fim, chamadas de fresadoras caracol. A Figura 14, apresenta a fresadora caracol, que pode ser ou não CNC. a) Visão interna da máquina b) Visão Externa da máquina.

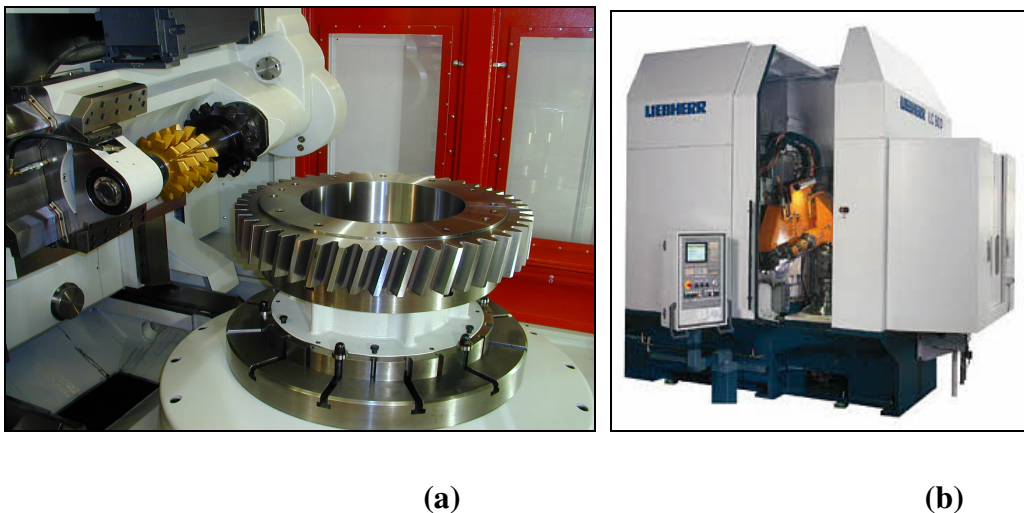


Figura 14 - Máquina para geração por fresa caracol reto. a) Interno – b) Externo

2.2.3 Shaving

Para se realizar a usinagem de acabamento superficial do dentado, o processo utilizado é o *shaving*. Tanto a máquina quanto a ferramenta são denominados *shaver*. A figura 14, ilustra esse processo, onde podem ser evidenciadas a engrenagem sendo usinada, a máquina e a ferramenta.

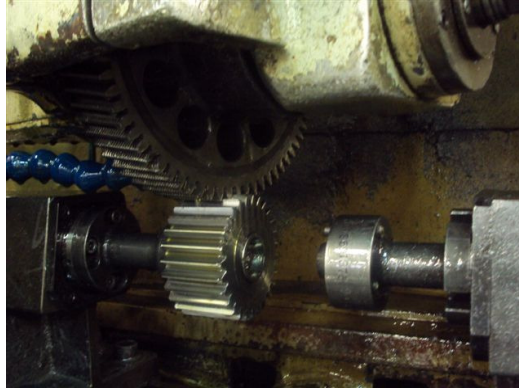


Figura 15 - Processo de shaving

2.2.4 Inspeção das engrenagens

Na fase de fabricação do dente da engrenagem é gerada a evoluta, o qual deve atender as especificações do projeto para ao qual se destina. Se essa característica não for devidamente atendida no processo de fresamento, mais difícil se torna atendê-la no processo de *shaving*. Uma prática comum durante o *setup* de uma célula de produção de engrenagens é realizar a aprovação da engrenagem em laboratório, equipado para análises dimensionais, onde será realizada uma inspeção de varredura do perfil e do passo da engrenagem em uma máquina de medição tridimensional, tanto para especificações de fresamento quanto para as especificações de *shaving* (processo subsequente ao fresamento, que dá acabamento superficial ao dentado antes do tratamento térmico). A aprovação do processo de *shaving* se torna mais fácil quando as características de passo e perfil já foram atendidas no fresamento. Caso contrário, o tempo de aprovação de *shaving* pode ser muito longo, levando horas de tentativas e erros nas alterações dos parâmetros de usinagem.

A figura 6 apresenta a máquina de medição em coordenadas tridimensional do laboratório que realiza essa inspeção na engrenagem.

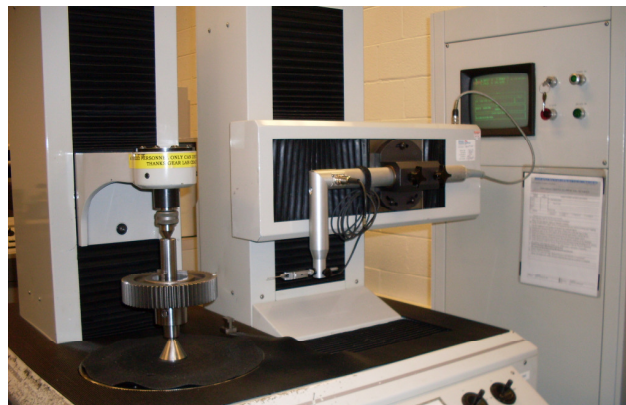


Figura 16 - Máquina de medição em coordenadas tridimensionais.

2.3 Desgaste de Ferramentas de corte

As ferramentas de corte em usinagem sofrem desgastes devidos à sua utilização. Alguns tipos de ferramentas de corte podem ser reafiadas, a fim de eliminar esse desgaste e ser utilizada novamente. Esse procedimento pode ser repetido até chegar ao fim de vida da ferramenta, ou seja, até o momento onde não é mais possível realizar a afiação.

Para que o conceito de desgaste seja melhor entendido, os autores Diniz *et al.* (2003) descrevem os tipos de desgastes e avarias de ferramentas, os mecanismos causadores do desgaste das ferramentas, os fatores que influenciam no desgaste da ferramenta e as curvas que determinam a vida da ferramenta.

2.3.1 Tipos de desgastes e avarias das ferramentas

Desgaste Frontal (flanco). Causado devido o contato entre a peça e a ferramenta, ocorre na superfície de folga da ferramenta e é o desgaste mais comum. Esse tipo de desgaste prejudica o acabamento superficial da peça por ter a forma da sua aresta de corte modificada e provoca alteração dimensional da peça (pode fazer com que a medida ultrapasse a tolerância estabelecida). A velocidade de corte é o principal fator que incentiva esse tipo de desgaste, pois com o aumento da velocidade de corte, há o aumento da temperatura na região de contato da ferramenta com a peça, o que provoca o aumento do desgaste na ferramenta. A figura 07 representa o desgaste frontal em uma ferramenta de corte, indicado pela letra “a” e desgaste de entalhes, representados pela letra “b” e “c”.

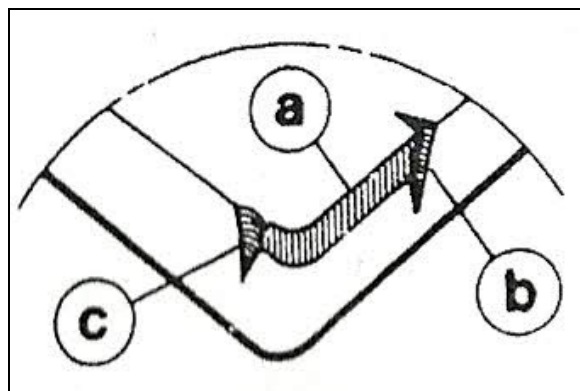


Figura 17 - Desgaste frontal em ferramenta de corte (Diniz *et al.*, 2003)

Desgaste de Cratera. Desgaste causado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco, e caracterizado por ocorrer na superfície de saída da ferramenta. Pode não ocorrer em todos os processos de usinagem, em especial quando se utilizam ferramentas com revestimentos, por exemplo de (TiN), em ferramentas de cerâmica, ou quando o material da peça é frágil, pois tende a gerar cavacos quebradiços. Pode ocorrer a quebra da ferramenta se o desgaste de cratera crescer em demasia e se encontrar com o desgaste frontal. A figura 08 mostra a formação do desgaste de cratera na superfície de saída do cavaco.

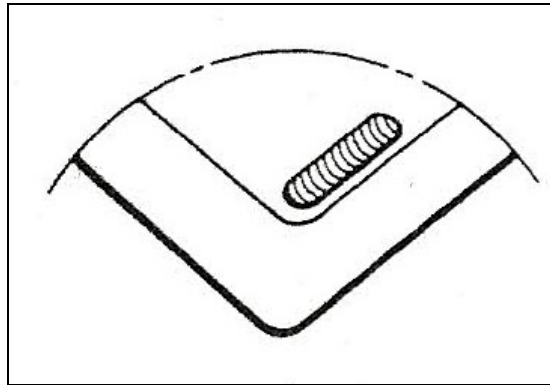


Figura 18 - Desgaste de cratera em ferramenta de corte (Diniz *et al.*, 2003)

Deformação Plástica. Tipo de avaria gerada pela combinação entre as altas temperaturas de usinagem e a pressão exercida na ponta da ferramenta. Formando uma deformação bem típica, provocando deficiências na formação do cavaco e também deterioração do acabamento superficial da peça. O aumento dessa deformação pode levar a ferramenta à quebra, pois pode formar aresta postiça (acumulo de material na aresta de corte). Para evitar a quebra da ferramenta, pode ser utilizada uma ferramenta com maior dureza a quente e resistência à deformação plástica, visando à redução dos esforços e da temperatura de corte. A figura 09, mostra a deformação plástica.

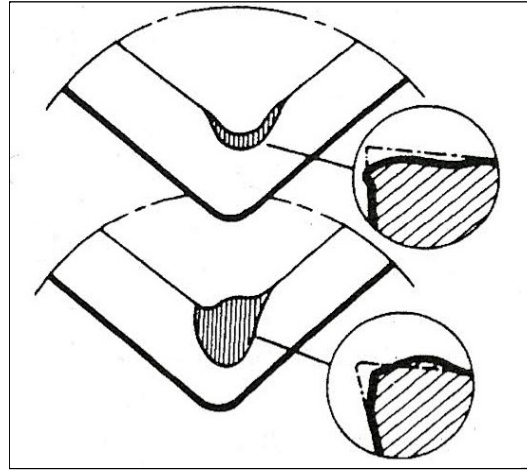


Figura 19 - Deformação plástica da ferramenta de corte (Diniz *et al.*, 2003)

Lascamento. Também é conhecido como um tipo de avaria da ferramenta, tem seu processo de ocorrência diferente dos desgastes frontal e por cratera, já que estes são caracterizados por remover pequenas partículas de material ao longo da usinagem. Por outro lado o lascamento é caracterizado por remover partículas maiores de uma só vez. Ocorrem em ferramentas de material frágil ou quando há pouco reforço na aresta de corte. Prejudicam o acabamento superficial e continuam crescendo até que provoquem a quebra da ferramenta. A figura 10, mostra a ocorrência do lascamento na aresta de corte.

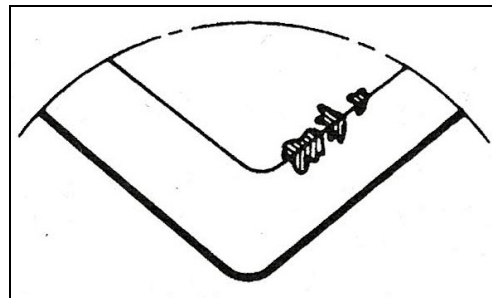


Figura 20 - Lascamento da ferramenta de corte (Diniz *et al.*, 2003)

Trincas. É considerada como uma avaria da ferramenta, e pode ocorrer pela variação da temperatura de usinagem ou dos esforços mecânicos. O formato da trinca pode dizer a origem da mesma: se for de origem térmica, a trinca ocorre perpendicularmente à aresta de corte (figura 11-a) e se for de origem mecânica, ela ocorre paralela a aresta de corte (figura 11-b). A variação de temperatura ou dos esforços de corte pode ser oriunda dos seguintes fatores: corte interrompido, acesso irregular do fluido de corte, variação da espessura de corte ou solda da pastilha no suporte da ferramenta.

O crescimento da trinca leva a ferramenta a quebrar e pode ser evitado utilizando uma ferramenta mais tenaz, ou diminuindo o avanço ou ainda melhorando o posicionamento da peça. A figura 25, mostra as trincas – a) Trincas Térmicas – b) Trincas mecânicas.

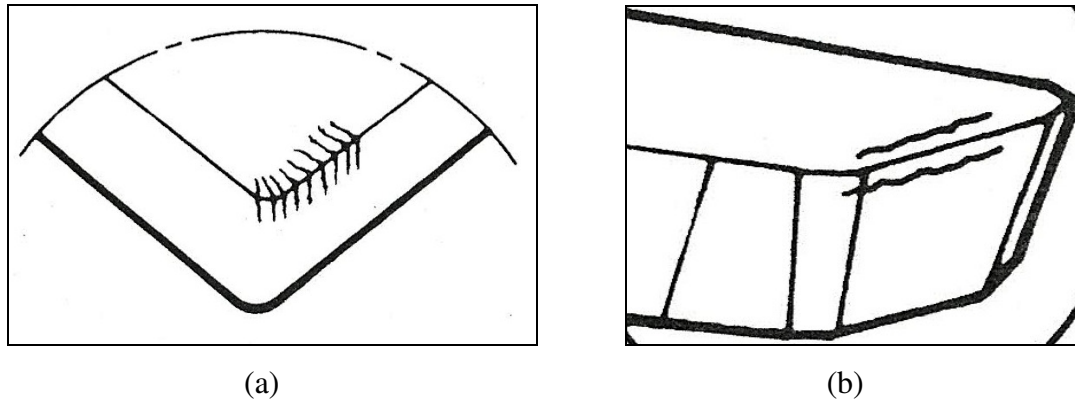


Figura 21 - a) Trincas Térmicas b) Trincas mecânicas (Diniz *et al.*, 2003)

Quebra. Os desgastes e avarias crescem até culminar na quebra da ferramenta, mas ela também pode ocorrer sem que possa ser prevista, devido a alguns fatores: ferramenta muito dura (quanto maior a dureza, mais resistente ao desgaste, porém menos tenaz e menos resistente a choques), carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponta, ângulo de ponta e/ou ângulo de cunha pequeno, corte interrompido, parada instantânea do movimento de corte, entupimento dos canais ou bolsões de escoamento do cavaco. A quebra da ferramenta provoca danos à ferramenta, à peça que está sendo usinada e à máquina.

Diniz *et al* (2003), tomou por convenção, medir o desgaste da ferramenta no plano ortogonal da mesma, distinguindo-se o desgaste na superfície de saída e na superfície de folga da ferramenta.

Na superfície de saída tem-se o desgaste de cratera, onde (KT) é a profundidade da cratera, (KB) a largura da cratera, (KM) a distância entre o centro da cratera até à aresta de corte, (KF) a largura do lábio do desgaste de cratera e (SV γ) deslocamento lateral do gume na direção da face.

Na superfície de folga tem-se o desgaste frontal ou flanco, onde (VB) é um valor médio do desgaste da superfície de folga, (VB m_{\max}) é a largura máxima do desgaste de flanco e (VS α) é o deslocamento lateral do gume na direção flanco

A figura 12, podem ser observadas todas as variáveis do desgaste mencionadas, tanto de cratera como de flanco e ainda observar os entalhes.

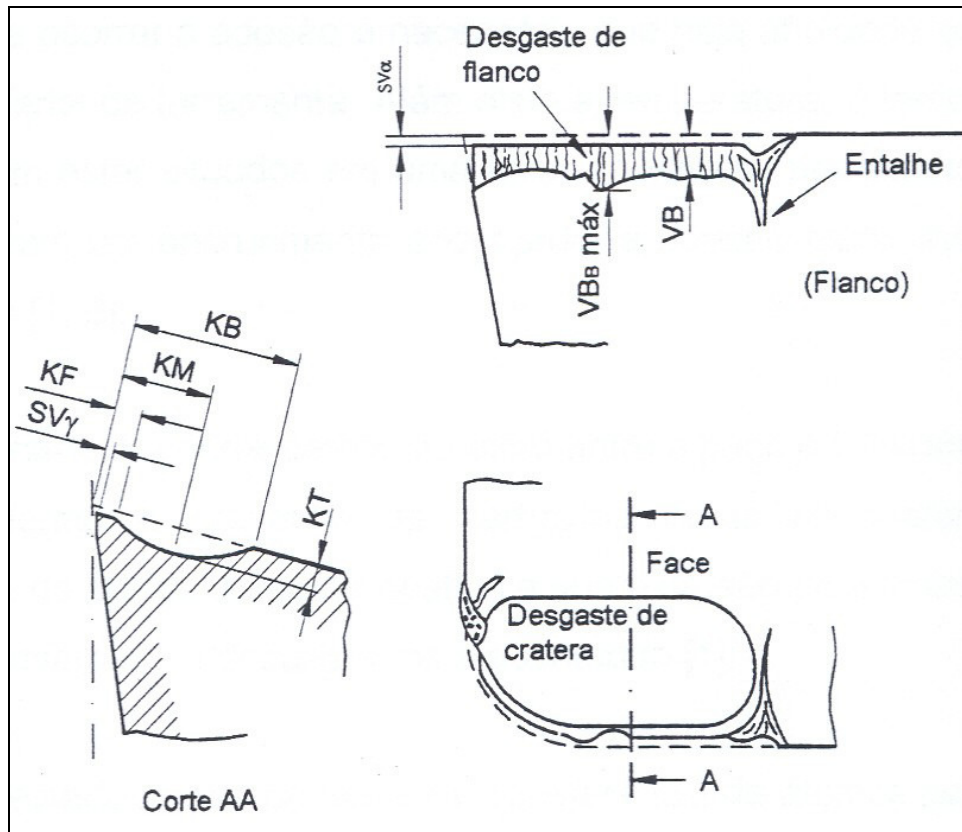


Figura 22 - Desgaste de ferramentas e suas medidas (Stoeterau, 2009)

2.3.2 Mecanismos causadores do desgastes das ferramentas

Aresta Postiça. Durante a usinagem pode ocorrer a aderência de uma camada de cavaco a superfície de corte da ferramenta, a qual modifica o seu comportamento com relação a força de corte, desgaste da peça e acabamento superficial. Costuma ocorrer em baixas velocidades de corte, pois a parte inferior do cavaco em contato com a ferramenta, sob pressão de corte na zona de aderência, mantém esse contato sem movimento relativo por um espaço de tempo suficiente para se soldar a ferramenta. Esta tende a crescer e se romper bruscamente. Nesse instante, parte da aresta que se rompe é carregada com o cavaco e a outra parte se prende a peça, causando danos ao acabamento superficial da mesma. Esse rompimento também provoca uma ruptura frontal na ferramenta. Por outro lado quase não ocorre o desgaste de cratera, já que a superfície de saída se encontra protegida pela aresta postiça. A figura 13, mostra a formação da aresta postiça.

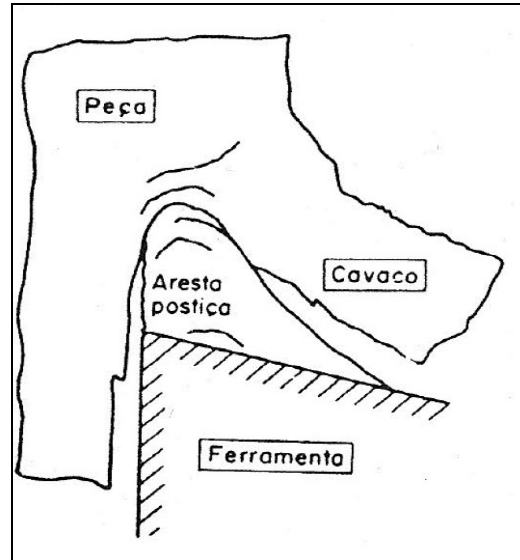


Figura 23 - Aresta postiça da ferramenta (Diniz *et al.*, 2003)

Abrasão Mecânica. Um dos principais causadores de desgaste nas ferramentas, a abrasão (ou atrito) pode ocorrer tanto no desgaste frontal como no desgaste de cratera, mas esse se faz mais forte no desgaste frontal, onde há o contato entre a ferramenta e um elemento rígido que é a peça, enquanto o desgaste de cratera sofre atrito por um elemento flexível que é o cavaco. Sua proeminência ocorre devido à presença de partículas duras no material e pela alta temperatura de corte, assim quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior a resistência ao desgaste abrasivo.

Aderência: Um extrato metálico é formado quando duas superfícies metálicas são colocadas em contato sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte. Esse extrato metálico possui resistência tão elevada que se tentar separar as duas superfícies ocorre a ruptura em um dos metais e não na superfície de contato. Está muito presente na formação da aresta postiça, mas também pode ocorrer sem que haja tal formação. Pode ter seu efeito reduzido pela utilização adequada do fluido de corte (principalmente pelo fator lubrificante) e o recobrimento da ferramenta com materiais de baixo coeficiente de atrito como o nitreto de titânio.

Difusão: A difusão no estado sólido consiste na transferência de átomos de um material para outro, ocorre entre a ferramenta e o cavaco e é um fenômeno microscópico. As reações químicas, no caso do metal duro, formam carbonetos complexos (FeWC_{26}), que são menos resistentes e rapidamente removidos por abrasão. A ferramenta de diamante é um

exemplo clássico de desgaste por difusão: ao usar ligas ferrosas, devido à elevada afinidade entre o diamante e o carbono do ferro, o processo de difusão é gradativamente incentivado. A difusão provoca o desgaste de cratera, induzido pelo processo em altas temperaturas.

Oxidação: Devido à presença de água e ar nos fluídos de corte e de elevadas temperaturas, pode ocorrer a geração de oxidação na maioria dos metais. A oxidação favorece o desgaste principalmente nas extremidades entre cavaco-ferramenta, devido ao excesso de ar nessa região, o que explica também o aparecimento de desgaste de entalhe.

2.3.3 Desgaste e Vida da Ferramenta

É considerada vida da ferramenta o tempo efetivo que a mesma fica em contato com a peça, até perder a sua capacidade de corte. Ao atingir o tempo determinado, é indicado a reafiação da ferramenta ou a reposição da mesma.

As ferramentas devem ser substituídas ou reafiadas quando:

- Os desgastes atingirem proporções elevadas que se receie a quebra;
- O desgaste da ferramenta não garantir mais o dimensional da peça;
- Temperatura elevadas que decompõe a aresta de corte;
- Aumento da força de usinagem em função do desgaste.

O desgaste das ferramentas pode ser superior ao esperado, que precipitará na quebra da ferramenta. Mas isso deve ser evitado devido aos inúmeros danos que uma quebra de ferramenta pode causar ao processo. Essa quebra é caracterizada para muito materiais, de ferramentas quando VB atinge valores de 0,8 a 1,5 mm.

Então considerando que nenhuma ferramenta deve ser levada ao desgaste excessivo, o qual provocará a quebra da mesma, a substituição da mesma deve ocorrer bem antes disso a fim de se evitar outros problemas como mau acabamento superficial e imprecisão da peça. Nesse caso recomenda-se a troca da ferramenta quando $VB=0,2$ a $0,3$ mm de acordo com o acabamento esperado.

Quando se utiliza revestimento nas ferramentas, os desgastes de cratera ocorrem muito dificilmente. Porém, o desgaste de flanco ocorre lentamente até atingir valores de $VB= 0,3$ a $0,4$ mm. Ao atingir esses valores de desgaste, a camada de cobertura da ferramenta já não existe mais, o que faz com que o desgaste de flanco cresça muito rapidamente, provocando

danos a ferramenta com desgastes de $VB= 0,8$ a $1,0$ mm, vindo a quebrar ou perdendo área útil de afiação.

Portanto, observar o crescimento dos desgastes é o fator mais importante para detectar o momento da troca da ferramenta. Porém, no meio industrial, isso é muito complicado e fica a critério do operador. Em operações de desbaste, por temer a quebra da ferramenta ou desgaste excessivo, o operador tende a trocar a ferramenta antes do momento adequado. Já nas operações de acabamento para se verificar o momento de troca, basta observar o acabamento superficial da peça bem como se as tolerâncias requisitadas no processo estão sendo atendidas. A troca da ferramenta não é necessária nesse caso, às vezes é possível realizar uma correção na usinagem para compensar o valor do desgaste.

O julgamento correto do acabamento superficial é fundamental para estabelecer o momento de troca. Porém, no processo de usinagem não é comum utilizar rugosímetros sua utilização é mais comum em processos de acabamento, então uma sugestão é colocar uma peça com acabamento superficial padrão para a operação de usinagem à disposição do operador em cada máquina e treiná-lo para que possa comparar o acabamento da peça produzida por ele com a peça padrão, realizando uma análise visual.

Esse método gera um grande desperdício de ferramentas, pois faz com que o conservadorismo para não provocar a quebra e o desgaste excessivo da ferramenta, ocorre a substituição da mesma de forma prematura.

Diniz *et al.* (2003) sugere algumas técnicas para auxiliar o operador na detecção do desgaste da ferramenta: uso de sensores de vibração, emissão acústica, parâmetros elétricos da máquina (corrente elétrica), a força de usinagem e treino do operador para utilização desses sistemas. A obra cita que em um trabalho realizado em uma determinada empresa de usinagem média e pesada constatou-se que 68% das arestas de corte dos insertos eram descartadas ainda com capacidade de uso, implementando a utilização do monitoramento da corrente elétrica do motor, conseguiu-se uma redução para 16,6% de descarte precoce. As demais ferramentas de corte (ex. cortador caracol) podem ser analisadas utilizando os mesmos conceitos aplicados as ferramentas de torneamento, apresentadas nesse capítulo.

2.3.4 Fatores que influenciam no desgastes das ferramentas

Para a operação de torneamento foram realizados estudos e já existem teorias desenvolvidas. Então a seguir será descrito o conteúdo de desgaste e vida de ferramenta segundo os testes realizados nas operações de torneamento e isso posteriormente será

transferido para os conhecimentos a serem aplicados nas ferramentas de corte especial para dentados.

Portanto, os fatores que mais influenciam na vida da ferramenta são as condições de usinagem e a geometria da ferramenta. Na sequência de fatores mais impactantes tem-se a velocidade de corte, o avanço e por último a profundidade de corte. De acordo com a variação no ângulo de saída, pode-se variar também a taxa de calor exercida sobre a ferramenta e quanto maior for a transferência do calor para a ferramenta, mais rápido ocorrerá o desgaste da mesma.

2.3.5 Curvas que determinam a vida da ferramenta

Diniz *et al* (2003), apresenta curvas de vida para ferramentas a partir da equação de Taylor (2.1)

$$T=K.v_c^{-x} \quad (2.1)$$

Onde K e x são constantes do material para determinadas condições de usinagem,

T = tempo de vida da ferramenta [min]

vc = velocidade de corte [m/min]

Com base nessa equação 2.1 de Taylor criou algumas curvas que relacionam variáveis do processo. A figura 14, mostra curvas de desgaste em função do tempo de usinagem para diferentes velocidades de corte em determinadas condições de usinagem.

Os pontos m, n e o, representados nas figuras 14 e 15, nas curvas para diferentes velocidades, as quais os fornecerão os tempos de efetivo corte, ou seja, as vidas da ferramenta para as velocidade de 180, 144 e 128 m/min.

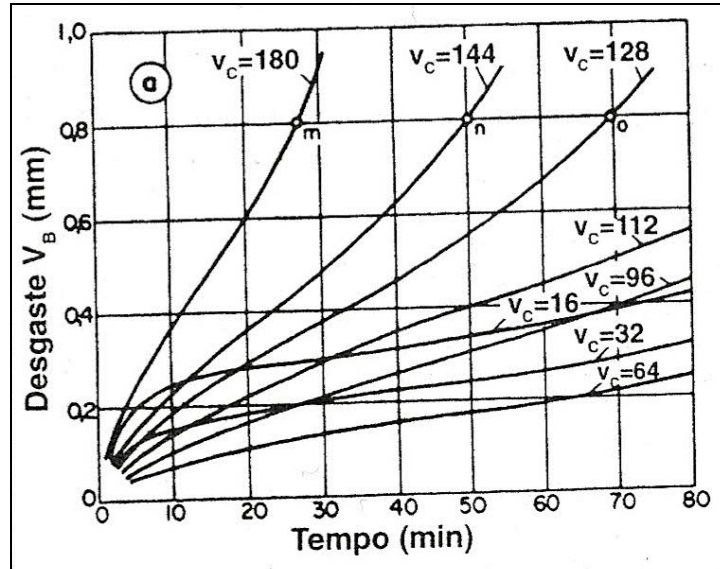


Figura 24 - Desgaste V_B (mm) x Vida T (min)

A figura 15, relaciona a variação da velocidade de corte em função da vida da ferramenta (minutos), para um desgaste fixo com $V_b=0,8$ mm. (Diniz *et al.*, 2003)

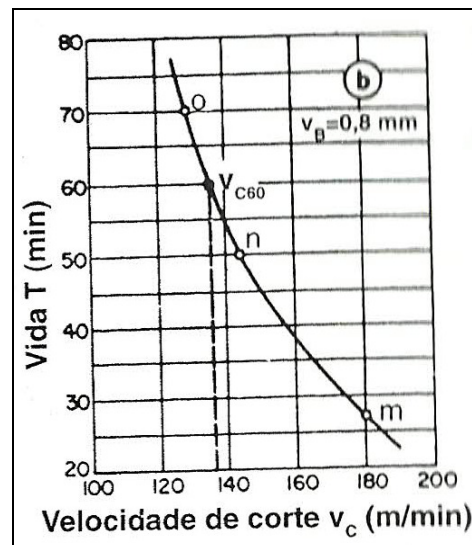


Figura 25 - Vida T (min) x Velocidade de Corte V_c (m/min). (Diniz *et al.*, 2003)

O desgastes da ferramenta em função da velocidade de corte para um determinado tempo de usinagem, é representado na figura 16.

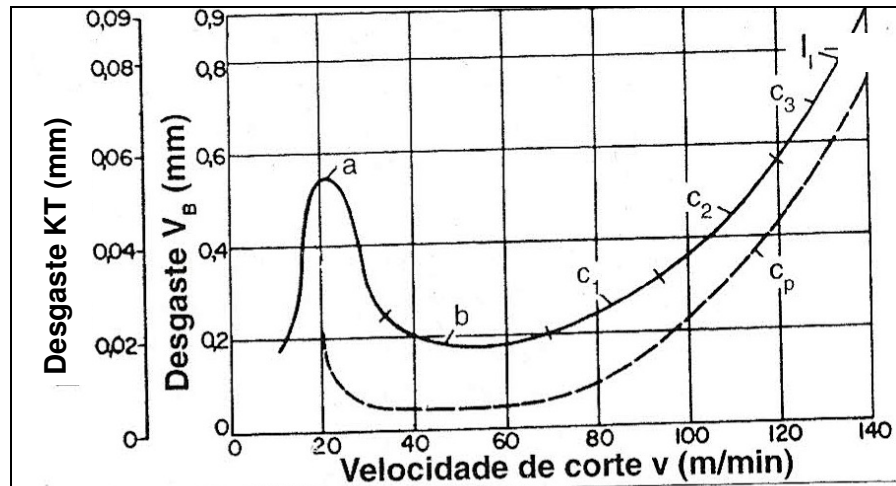


Figura 26 - Desgaste KT (mm) x velocidade de corte (m/min). (Diniz *et al.*, 2003)

Uma observação interessante da figura 32 é o fato de que a região c expressa a condição mais econômica do processo, mesmo sendo mais alta do que a região b onde o desgaste é menor, pois na região c utiliza-se uma velocidade de corte maior que aumenta a produtividade e a vida da ferramenta. A região a deve ser evitada, pois é a região onde se formam as arestas postiças de corte.

Machado *et al.* (2009) afirmam que em um processo de usinagem todos os mecanismos de desgastes podem ser observados, porém um deles irá sobressair sobre os demais. A análise do desgaste de ferramentas é uma atividade complexa, onde se deve observar o material da peça o material da ferramenta e as condições de corte.

A velocidade de corte é sem dúvida o parâmetro de maior influência no desgaste de ferramentas de corte, pois é responsável diretamente pelo aumento de temperatura na região de formação de cavacos. Devido a esse fator, as curvas de vida de ferramentas são elaboradas em função da velocidade de corte.

Machado *et al.* (2009) utilizam a equação de Taylor (2.1) para determinar a vida das ferramentas. Porém, destacam que embora a velocidade de corte seja um fator muito importante na análise de desgaste de ferramentas. Os autores consideram a influência da profundidade de corte e do avanço na vida da ferramenta, e propõem a equação estendida de Taylor 2.2, que apresenta esses dois fatores agregados.

$$vc^x \cdot f^y \cdot a_p^z \cdot T = Q \quad (2.2)$$

Onde x , y , z e Q , são constantes em função do material a ser utilizados e podem ser encontrados os valores em publicações recentes ou determinados.

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| v_c = velocidade de corte | [m/min] |
| f = avanço de corte | [m/min] |
| a_p = profundidade de corte | [mm/rot] |
| T = Tempo de vida da ferramenta | [min] |

2.4 Métodos de Detecção da Vida da Ferramenta

2.4.1 Método Linear

Del Vecchio (2007) utiliza para determinar a vida dos cortadores a teoria do método linear, que consiste em utilizar um comprimento útil da ferramenta, bem como o sistema de *shift* (movimento tangencial do cortador) utilizando uma constante K (variável de acordo com o material e cobertura da ferramenta).

A figura 17, representa a utilização do cortador caracol e algumas variáveis que devem ser observadas para determinar a vida do cortador pelo método linear, onde:

L_1 = região inicial do cortador – não deve ser utilizada

L_2 = região final do cortador – não deve ser usada

L_3 = comprimento útil do cortador

L_u = comprimento total do cortador

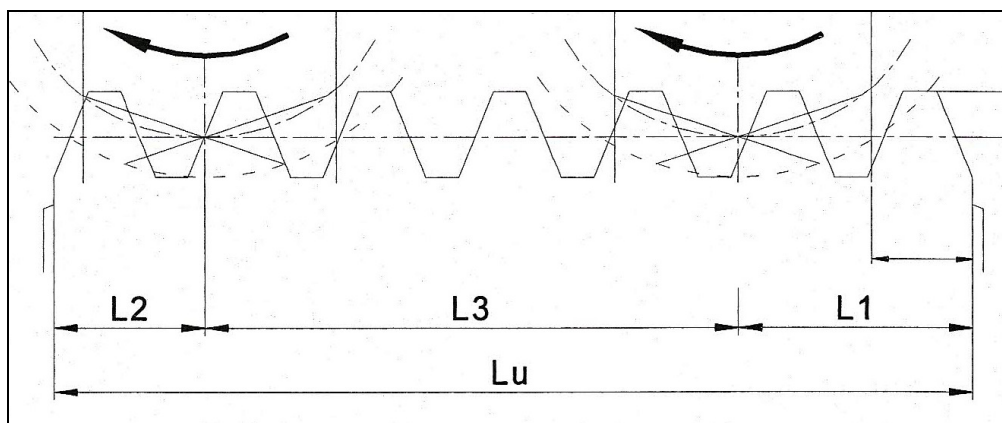


Figura 27 - Utilização do cortador caracol no sentido vertical (Dell Vecchio, 2007)

A figura 18, mostra a utilização do cortador com relação ao curso, onde:

X_1 = curso de entrada do cortador

X_2 = curso de saída do cortador

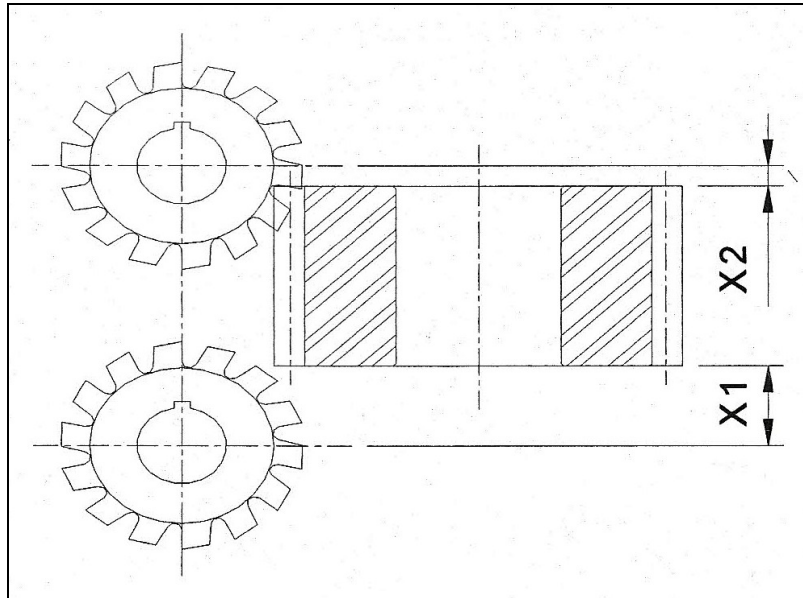


Figura 28 - Utilização do cortador caracol no sentido horizontal (Dell Vecchio, 2007)

Utilizando as equações 2.3 e 2.4, pode-se determina a quantidade de peças por afiação.

$$VPA = Z_c \cdot K \quad (2.3)$$

$$QPA = (VPA \cdot q) / bd \quad (2.4)$$

Onde:

VPA = vida por afiação [m]

Z_c = Número de dentes úteis do caracol no comprimento L3

K = Vida em metros lineares por metro de caracol

QAP = Quantidade de peças por afiação

q = quantidade de engrenagens a serem cortadas

bd = comprimento total dos dentes da engrenagem em metros lineares

É importante também discriminar os valores de K. Para isso a tabela 1 mostra os valores estimados para K (Cobertura de Titânio e $V_{c_{max}} = 90$ m/min)

Tabela 1 – Valores Estimados de K (Dell Vecchio, 2007)

| Cobertura | Tipo do Material da Ferramenta | |
|---|--------------------------------|---------|
| | M35 | ASP30 |
| Sem cobertura de titânio | K = 0,3 | K=0,6 |
| Com cobertura de titânio primeira utilização | K = 2,5 | K = 5,0 |
| Com cobertura de titânio, nas demais utilizações, quando não houver retitanização | K = 1,0 | K = 2,0 |
| Com cobertura de titânio com retitanização | K = 2,5 | K = 5,0 |

2.4.2 Método pelo cálculo do volume de material removido

João Quirino (2000) desenvolveu sua dissertação de mestrado no tema de controle de vida da ferramenta de corte caracol, o principal fator de diferenciação é o objetivo de que a obtenção do parâmetro de vida deve se dar de forma prática para utilização diária na fábrica, reforçado em uma realidade de alto volume de *setups*, uma fábrica com grande variedade de itens a serem fabricados, onde a mesma ferramenta corta diversos tipos de peças.

No desenvolvimento de sua dissertação, João Quirino (2000), monitorou o desgaste da ferramenta até o limite recomendado $VB=0,2$ mm a $VB=0,3$ mm e acompanhou se existia alguma relação com o volume de material removido por dente do cortador caracol (V_o), (independente de características da engrenagem como módulo, diâmetro e número de dentes). Antecipadamente ele fez testes para determinar quantas peças podiam ser produzidas com aquela ferramenta até atingir o desgaste pré-determinado. Ainda optou por realizar o ensaio em um único corte realizando desbaste e acabamento ao mesmo tempo, para melhorar a produtividade.

Utilizando a técnica de deslocamento de *shift* (movimento tangencial do cortador em relação a peça, para garantir que o cortador se desgaste homogeneamente em toda a sua extensão). As condições de usinagem se mantiveram inalteradas desde a primeira peça até o momento da retirada da ferramenta, para se realizar a análise em microscópio, onde se procurava evidenciar o desgaste VB, fator que determina o fim de vida e a necessidade de

afiação da ferramenta. Após a afiação, a ferramenta recebe revestimento de titânio novamente e o resultado dos teste podem ser observados na figura 19.

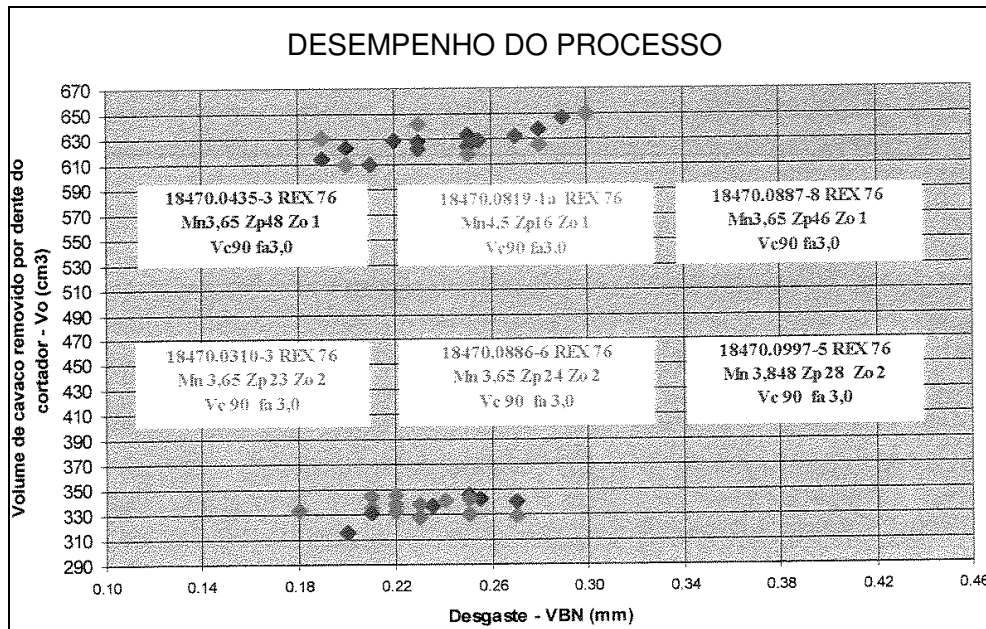


Figura 29 - Desgastes do cortador no momento da substituição versus o volume de cavaco removido. (Quirino, 2000)

As observações destacadas por Quirino (2000) foram: os valores do volume de cavaco removido são bem próximos, valores de 330 cm^3 , mesmo para engrenagens diferentes; a variação de V_o para esses casos foi pequena, menor que 10%; o fator de diferenciação na remoção do volume de cavaco se deu com a alteração do número de entradas do cortador; com uma entrada o material removido foi o dobro, valores de 650 cm^3 , do que com duas entradas.

Com a análise dos resultados obtidos em seus experimentos, Quirino (2000) apresentou as seguintes conclusões: após já ter ocorrido um dado desgaste $VB=0,20$ a $0,25$ mm, o parâmetro do volume de material removido (V_o) por dente do cortador é independente da geometria da peça e do cortador e sofre variações quanto à utilização de uma ou duas entradas; mantendo o material da peça e do cortador, bem como as condições de usinagem, a dispersão do (V_o) é muito baixa; o volume de material removido (V_o) pode ser usado como fator para determinar o momento de troca do cortador, desde que mantidas as condições de usinagem (o número de entradas, o material da peça e do cortador, em outros pares que tenham diferenciados o seu módulo, número de dentes, ângulo de hélice, ângulo de pressão).

Dentre os parâmetros ensaiados a velocidade de avanço influencia mais o (V_o) do que a velocidade de corte. Já o aumento da velocidade de corte diminui a vida do cortador. Mas se comparado com outros processos de usinagem como torneamento, fresamento e furação, os efeitos da velocidade de corte são menores.

2.4.3 Método pelo aumento da corrente elétrica

A dissertação de mestrado desenvolvida por Lima (1995) buscava monitorar as variações da corrente elétrica do motor de acionamento do eixo-árvore da máquina-ferramenta onde se usinavam engrenagens e verificar a existência de uma correlação com o desgaste da ferramenta e por fim poder determinar o seu momento de troca, baseado na análise dos parâmetros elétricos.

Lima (1995) realizou os testes em duas etapas, a primeira em máquina convencional e a segunda em máquina com CNC. Antes de iniciarem os testes, foi monitorada a corrente elétrica da máquina em vazio, ou seja, sem que haja esforços de corte atuando, pois a máquina está movimentando sem haver o corte efetivo da peça, por meio do uso de um osciloscópio.

Na realização dos ensaios, Lima (1995) utilizou o cortador travado (onde não há deslocamento tangencial da ferramenta em relação à peça, não há *shift*) com a intenção de acelerar o desgaste em uma faixa do cortador (embora não seja o sistema convencional de trabalho, mas espera-se interligação entre eles).

As condições de usinagem foram mantidas constantes até o momento de troca da ferramenta, determinado pelo operador baseado na inspeção visual do desgaste. No caso dos testes conduzidos por Lima (1995), a ferramenta só possui cobertura de titânio quando nova. Após a afiação, a cobertura que havia sido removida não era reaplicada, o que tornava a inspeção de ferramentas novas (início da remoção do titânio) diferenciada da inspeção de ferramentas afiadas (desgaste de cratera, muito nítido).

A figura 20, mostra o aumento da corrente elétrica, quando ocorre o aumento do desgaste da ferramenta, no ensaio realizado em máquina CNC.

Baseado na análise dos ensaios realizados, Lima (1995) concluiu que nas máquinas convencionais, o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p) têm forte influência sobre a potência de corte, mas que entre os dois, a profundidade de corte tem uma maior parcela de contribuição. Além disso, os resultados em máquinas convencionais não podem servir para determinar o fim de vida da ferramenta, pois nesses tipos de máquinas tem-se apenas um

motor responsável por todos os movimentos da máquina e, portanto a variação da potência em função do desgaste seria muito sutilmente percebida.

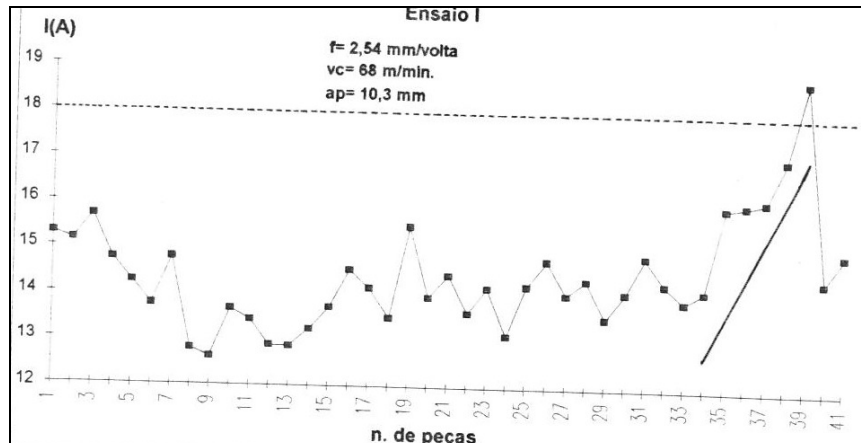


Figura 30 - Gráfico do sinal de corrente elétrica do motor de acionamento da máquina versus o número de peças (Máquina com CNC). (Lima, 1995)

Nas máquinas CNC de fato ocorre uma grande variação na corrente elétrica à medida que aumenta o desgaste da ferramenta (Figura 20). O monitoramento da corrente com um amperímetro facilmente instalado na máquina é muito útil ao operador que ao detectar o aumento da corrente de uma peça para outra entende que é o momento de se fazer a análise da ferramenta. Existe a possibilidade de que esse monitoramento seja automático (independente do operador). Para isso seria necessário definir um valor fixo de corrente e quando esse valor, fosse ultrapassado, a máquina parasse, mas seria necessário desenvolver mais estudos, pois esse valor poderia ser afetado pela variação das condições de usinagem. Esse procedimento poderia ser mais eficiente por meio da utilização de redes neurais que monitorassem e analisassem os dados para determinar o fim de vida do cortador.

2.4.4 Desgaste de ferramentas de puncionamento

Dal Bianco (2003), em sua dissertação de mestrado, apresenta uma sugestão para controle do desgaste das ferramentas de corte de puncionadeiras. Sua teoria parte do princípio da análise do incremento do arredondamento da aresta de corte do punção em relação à quantidade de puncionamentos executados. O texto abrange informações teóricas como fundamentos do processo de corte e puncionamento de chapas metálicas, análises das especificações do fabricante, métodos práticos para análise do desgaste da ferramenta, afiações da ferramenta e revestimento das ferramentas.

Dal Bianco (2003), realiza o experimento, considerando todas as variáveis envolvidas como, por exemplo, o tipo de material da chapa, a máquina onde será executado o teste e a folga entre o punção e a matriz. Na análise do desgaste da ferramenta, ele utiliza o método de controlar a quantidade de material removido do punção no momento da afiação em uma máquina afiadora ou em uma retificadora. Para confirmação da medida encontrada Dal Bianco (2003) utilizou um projetor de perfil para realizar nova medição.

Os dados levantados com esse procedimento são apresentados na figura abaixo, onde consta a quantidade de puncionamentos executados pelos cinco punções selecionados e em seguida a média aritmética dos mesmos. A figura 21, mostra os dados coletados por Dal Bianco (2003) considerando o número de puncionamento de cada ferramenta com a quantidade de material removido na afiação da ferramenta.

| Punção 1 | | Punção 2 | | Punção 3 | |
|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Punciona- mentos | Material removido | Punciona- mentos | Material removido | Punciona- mentos | Material removido |
| 40.079 | 0,05 | 43.874 | 0,05 | 38.879 | 0,05 |
| 64.114 | 0,07 | 62.752 | 0,06 | 68.514 | 0,06 |
| 81.269 | 0,08 | 80.653 | 0,06 | 80.006 | 0,06 |
| 101.347 | 0,11 | 102.076 | 0,12 | 107.590 | 0,11 |
| Punção 4 | | Punção 5 | | Média Punções | |
| Punciona- mentos | Material removido | Punciona- mentos | Material removido | Punciona- mentos | Material removido |
| 46.280 | 0,05 | 39.694 | 0,05 | 41.761 | 0,05 |
| 58.914 | 0,06 | 60.201 | 0,06 | 62.899 | 0,06 |
| 80.062 | 0,07 | 80.618 | 0,07 | 80.522 | 0,07 |
| 98.225 | 0,08 | 102.726 | 0,08 | 102.393 | 0,10 |

O material removido está expresso em milímetros

Figura 31 - Dados coletados no experimento de puncionamento (Dal Bianco, 2003)

Como análise dos dados obtidos, Dal Bianco (2003), primeiramente avalia o ponto onde o rendimento da ferramenta deixa de ser linear e que a degradação da aresta da ferramenta possa ser facilmente percebida. A fim de acelerar a obtenção das informações para a análise do desgaste, ele utiliza a progressão matemática dos dados encontrados e em seguida aplica a distribuição de Weibull usando o software weibull ++6.0. No módulo de degradação é possível obter uma curva exponencial $y=b*\exp(a*x)$, que descreve o desgaste da aresta de corte (y) em função do número de puncionamentos (x). Segue a figura 22, ilustra as curvas elaboradas baseadas nos dados coletados e na distribuição de Weibull.

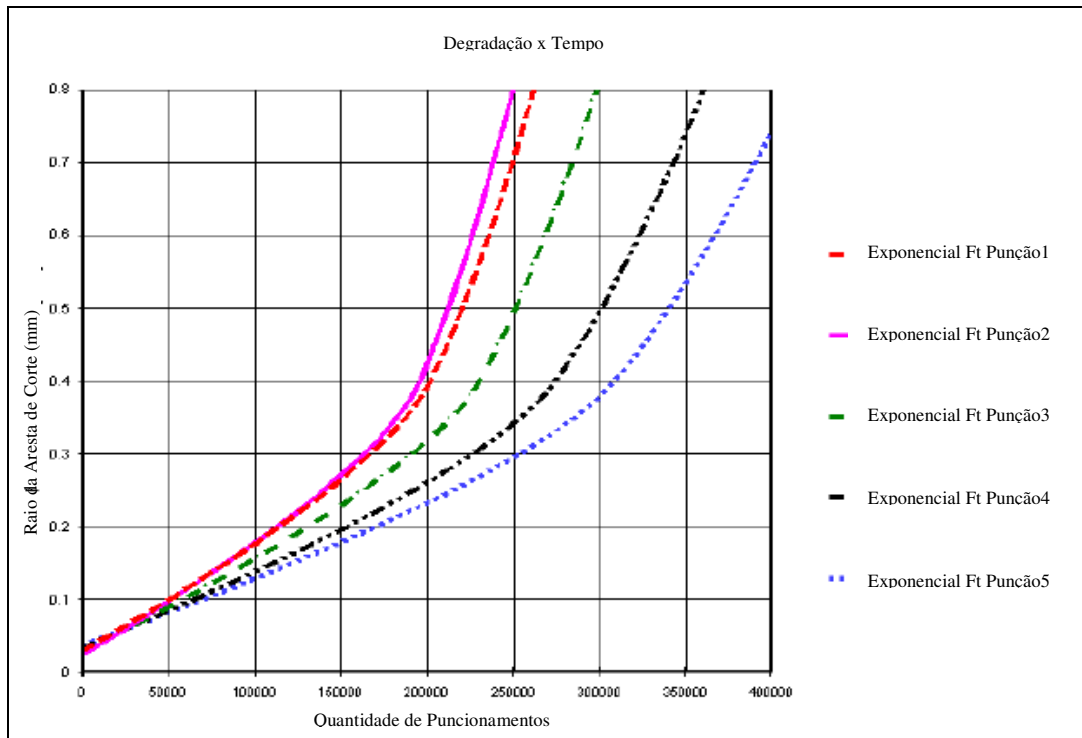


Figura 32 - Gráfico do desgaste da ferramenta em função da quantidade de puncionamento (Dal Bianco, 2003)

De modo geral, Dal Bianco (2003), concluiu que se pode utilizar como referência para o desgaste crítico ou ponto de afiação da ferramenta quando o valor de arredondamento da aresta de corte da ferramenta for igual ou inferior a 0,3 mm, ou em uma faixa de ciclo de 220000 a 230000 ciclos de trabalho.

Existem variáveis que podem ser inerentes ao processo, como ter espessura da chapa maior que o especificado, ter material com resistência ao cisalhamento acima do especificado, ter chapa com rugosidade maior que o especificado, ou com superfície oxidada, ou com outros abrasivos, utilização de folgas não apropriadas ou a qualidade da ferramenta.

Dal Bianco (2003), também realiza uma análise econômica quanto ao custo da afiação da ferramenta e desta análise ele concluiu que o ponto ideal de afiação da ferramenta se dá quando o raio de arredondamento da aresta de corte é igual ou inferior a 0,50 mm.

Dal Bianco (2003), faz uma correlação entre os pontos ótimos de análise de desgaste e a análise econômica. E desta última análise concluiu que o desgaste de arredondamento de 0,3 mm atende os dois critérios e por isso o mesmo deve ser adotado. Além disso, os resultados obtidos são totalmente compatíveis com as recomendações dos fabricantes e com o que de fato ocorre na prática.

2.5 Análise Comparativa entre os Métodos Apresentados

Considerando que o estudo de desgaste de ferramentas caracol não é muito difundido, os métodos encontrados apresentam algumas vantagens na obtenção do desgaste da ferramenta, porém trazem também alguns fatores que se tornam inaplicáveis em atividades fabris com elevada variedade de itens fabricados e baixo volume, como é o caso apresentado para a proposta desse estudo.

Para o método linear (seção 2.4.1), observou-se como vantagem o fato de se utilizar variáveis bem simples como o comprimento da ferramenta caracol, o uso do deslocamento do *shift*, a constante K e o comprimento linear da circunferência da engrenagem. Como desvantagem esse método apresenta a dificuldade em se controlar a utilização do comprimento total da ferramenta, onde seria necessária a instalação de réguas junto ao mandril de fixação do cortador, formulários que discriminassem a utilização sucessiva da ferramenta em várias peças e a montagem padronizada da ferramenta no eixo do mandril e ainda nem todas as máquinas possuem sistema de deslocamento de *shift* automático, o que concentra grande número de informações a serem coletadas e administradas pelo operador, que, no entanto têm inúmeras outras preocupações no momento da usinagem, como garantir a qualidade dimensional e visual da engrenagem no tempo de ciclo da célula.

Já o método que visa detectar o momento da troca da ferramenta a partir do cálculo do volume (seção 2.4.2) de material removido, tem forte probabilidade de ser um método aplicável, pois apresentou resultados com variações muito pequenas, na ordem de 10%. Mas apresenta como desvantagem ser um método que necessita de softwares especiais para determinação do volume a ser removido e que sofre variações de acordo com inconstâncias do processo como alterações nos parâmetros de corte. Sabendo-se ainda que a velocidade de corte tenha forte influência no desgaste da ferramenta, esse método apresentou mais susceptibilidade à velocidade de avanço do que a velocidade de corte.

Fazendo a análise do método baseado no aumento da corrente elétrica (seção 2.4.3), significa que quando há desgaste na ferramenta, aumentam-se as forças de usinagem do processo e por conseqüência aumenta também a potência necessária na máquina; esta consumindo maior corrente elétrica indica que é momento de realizar a troca da ferramenta. Esse método parece ser o mais eficiente, pois utiliza como critério de troca da ferramenta um fator que ocorre no exato momento da usinagem, o que significa melhor aproveitamento da ferramenta, ou seja, o risco de substituí-la antes ou após o determinado é pequeno. Por outro lado é um método que ainda necessita de mais estudos e apresentou deficiência quando

aplicado em máquinas convencionais, pois como essas máquinas possuem um único motor para várias funções, a percepção da variação da corrente elétrica em função do desgaste nesse caso é quase imperceptível.

O processo de fabricação por puncionamento (seção 2.4.4) tem algumas diferenças dos outros métodos utilizados como base para esse estudo, mas suas particularidades na análise do arredondamento da aresta podem facilmente serem comparadas com o desgaste das ferramentas caracol. O fator mais interessante do trabalho apresentado pelo autor é a análise estatística, utilizando o fator de arredondamento da aresta de corte do punção *versus* a quantidade de peças produzidas por meio de um software baseado na distribuição de *Weibull*, que é uma distribuição que apresenta bons resultados na análise de falhas de equipamentos. E leva em consideração o momento em que o comportamento do arredondamento da aresta de corte do punção deixa de ter progressão linear. Esse método poderia ser facilmente aplicado para análise de desgaste de ferramentas, se não houvesse o complicador da alta variedade de engrenagens e parâmetros de corte que influenciam diretamente no processo. Esse trabalho busca uma análise prática que englobe a diversidade do processo.

2.6 Conceitos Estatísticos

Para análise estatística dos dados que serão estudados nesse trabalho, alguns conceitos estatísticos e métodos de análises são de grande importância. O método estatístico que será usado é o da correlação e da regressão, em seguida análise da média e desvio padrão da diferença percentual encontrada entre o valor estimado e o valor real.

Stevenson (1981) afirma que a regressão e a correlação são duas técnicas estreitamente relacionadas que envolvem uma forma de estimação. Especificamente a análise da correlação e da regressão compreende a análise de dados amostrais para saber se e como duas ou mais variáveis estão relacionadas uma com a outra numa população.

Stevenson (1981) define que a correlação mede a força, ou o grau, de relacionamento entre duas variáveis e a regressão dá uma equação que descreve o relacionamento em termos matemáticos.

2.6.1 Correlação

Triola (2005) define o método da correlação como o resultado da análise de um coeficiente de correlação que possa determinar se há relação entre duas variáveis. Esse

coeficiente de correlação é conhecido como “r de Pearson”, em homenagem ao matemático Karl Pearson, que desenvolveu a técnica.

Para se analisar o coeficiente de correlação linear “r”, o mesmo possui duas características, uma é o seu sinal (+ ou -) e a outra é a sua magnitude. A figura 33, mostra a interação dessas duas características com o diagrama de dispersão adotado para uma amostra aleatória com variáveis “x” e “y”.

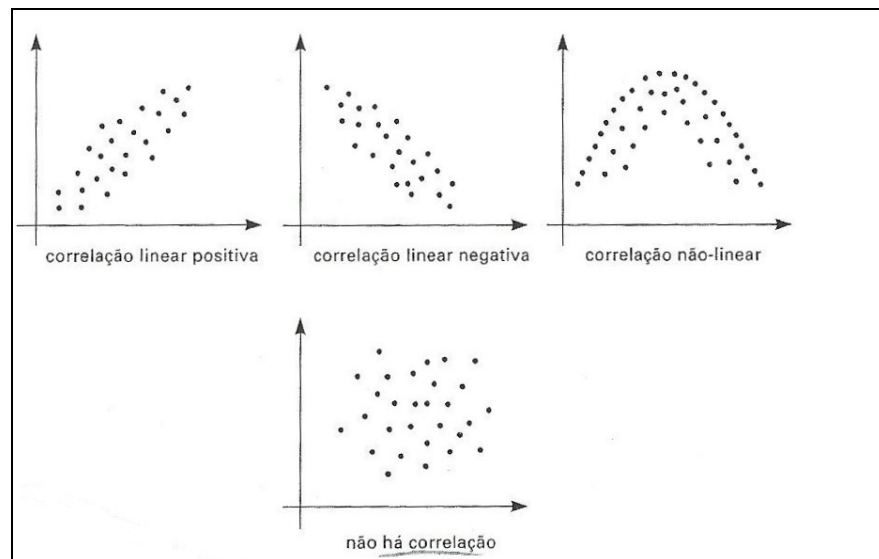


Figura 33 – Diagrama de dispersão e análise do coeficiente de correlação (Triola, 2005)

O coeficiente de correlação, pode ser calculado pela equação 2.5 ou usando ferramentas estatísticas, como por exemplo no caso desse trabalho Excel, que proporcionará o R2 (coeficiente de determinação, que deve ser interpretado como a proporção da variação total da variável dependente “y” que é explicada pela variação da variável independente “x”) e obtendo-se a raiz desse valor, encontra-se o coeficiente de correlação “r”, como representado na equação 2.6

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (2.5)$$

$$r = \sqrt{R^2} \quad (2.6)$$

Onde:

n = número da amostra.

R^2 = coeficiente de determinação.

r = coeficiente de correlação.

Lapponi (200) considera o coeficiente de determinação (R^2) adequado para explicar a regressão, já o coeficiente de correlação é indicado para medir a força de relação entre as variáveis.

Crespo (2002), apresenta a faixa de valores para que r possa ser interpretado, ou seja, como verificar se há correlação entre as variáveis, e utiliza faixa de valores para a correlação linear e uma outra faixa de valores para uma correlação curvilínea.

Para correlação linear, “ r ” deve ser analisado da seguinte maneira:

Se $r = +1$ = Há uma correlação perfeita e positiva entre as variáveis

Se $r = -1$ = Há uma correlação perfeita e negativa entre as variáveis

Se $r = 0$ = Não há correlação entre as variáveis, ou a relação não é linear.

Para correlação curvilínea, “ r ” deve ser analisado da seguinte maneira:

$0,0 < |r| < 0,3 \rightarrow$ Correlação muito fraca, quase nula.

$0,3 < |r| < 0,6 \rightarrow$ Correlação relativamente fraca.

$0,6 < |r| < 1,0 \rightarrow$ Há correlação.

2.6.2 Regressão

Para Stevenson (1981) a regressão linear simples é uma tentativa de estabelecer uma equação matemática linear (linha reta), que descreva o relacionamento entre duas variáveis. A finalidade da regressão é poder estimar valores de uma variável, com base em valores conhecidos de outra variável.

Duas características importantes na equação linear são o coeficiente angular e a reta, e tem a forma:

$$y = a + bx \quad (2.7)$$

Onde:

y = é a variável que deve ser predita.

x = é a variável com valor preditor.

a e b = são valores determinados com base nos dados amostrais.

Stevenson (1981) alerta que nem sempre a regressão linear é apropriada para a amostra, então recomenda que antes de se optar pelo métodos pode-se graficar os dados da amostra e observar o comportamento da dispersão dos pontos, e a partir desses decidir qual tipo de equação melhor o representa.

Lapponi (2002), apresenta técnicas para a determinação das equações de regressão, utilizando ferramentas estatísticas contidas no Excel, utilizando a aplicação de linha de tendência, a qual será empregada nesse trabalho, dado a sua praticidade em se obter a equação de regressão.

Stevenson (1981) ao analisar a equação de regressão considera que para cada valor possível de “x” há uma distribuição de “y”, e estes servirão para estimar a variável dependente dessa amostra.

2.6.3 Desvio Padrão e Média

Stevenson (1981) lembra que existem erros nos valores estimados a partir da equação de regressão. Para que esses erros possam ser analisados, pode-se calcular a diferença ou erro percentual entre o valor real e o valor estimado, conforme a equação 2.8.

$$\text{Diferença \%} = (a-b)/b \quad (2.8)$$

Onde:

a = valor de “y” estimado pela equação de regressão

b = valor de “y” real

O desvio padrão aplicado a diferença percentual dos valores da amostra, dará a dimensão da precisão da equação de regressão encontrada, para isso, as equações 2.9 e 2.10, definem o desvio padrão e a média respectivamente.

$$S = \sqrt{[\sum (x_i - \bar{X})^2] / n} \quad (2.9)$$

$$\text{Diferença \%} = (a-b)/b \quad (2.10)$$

3 PROPOSTA PARA DETERMINAR A VIDA DO CORTADOR CARACOL

O desenvolvimento teórico sobre a determinação da vida da ferramenta do cortador caracol mostrou diferentes técnicas para se chegar à vida do cortador, mas também ficaram evidentes as dificuldades para implementação dos mesmos.

Aliado a essas dificuldades, identificou-se a necessidade de se desenvolver um método de determinação da vida do cortador mais prático. Embora a fábrica de produção de engrenagens para transmissões agrícolas da região de Caxias do Sul, pratique a produção seriada, ou seja, produção de lotes iguais, essa empresa produz lotes pequenos (lotes com poucas peças), o que sugere que existam vários *setups* (troca do ferramental para produção de um novo lote) e por consequência um cortador não é utilizado até o seu fim de vida para que seja necessária a afiação do mesmo.

Sendo assim, se o cortador foi utilizado e não foi necessária a afiação, o mesmo será guardado até nova oportunidade de utilização do mesmo. É então que surgem as duas principais dificuldades que estão relacionadas em utilizar o mesmo cortador para uma peça diferente e poder a partir daí determinar quantas peças de outro modelo de engrenagem ainda podem ser produzidas com esse cortador já utilizado anteriormente.

E mesmo que essa ferramenta não seja utilizada sequencialmente em duas engrenagens diferentes, isso ocorre com frequência após a afiação, onde existem casos de uma mesma ferramenta ser utilizada em 76 itens (modelos de engrenagens) fabricados.

Objetiva-se portanto reduzir os efeitos dessa utilização comum de uma ferramenta em vários itens e ainda obter a máxima utilização da ferramenta sem causar desgaste excessivo da mesma, ou seja, superior a 0,20 mm. A proposta desse trabalho é criar uma correlação entre uma característica dimensional da engrenagem com a quantidade de peças capaz de serem produzidas pela ferramenta até atingir o desgaste de 0,2 mm.

Para isso serão utilizadas as informações obtidas no estudo teórico desse trabalho, como por exemplo a utilização de características dimensionais da peça que foram utilizadas no método linear e no método por volume de material removido e a análise estatística apresentada para determinar o desgaste das ferramentas de puncionamento. Busca-se uma maneira prática de determinar a quantidade de peças a serem produzidas nesse ambiente diversificado sem que ocorram desgastes excessivos da ferramenta.

Para melhor ilustrar como será realizado o procedimento experimental, segue a figura 34 com as fases de execução do procedimento.

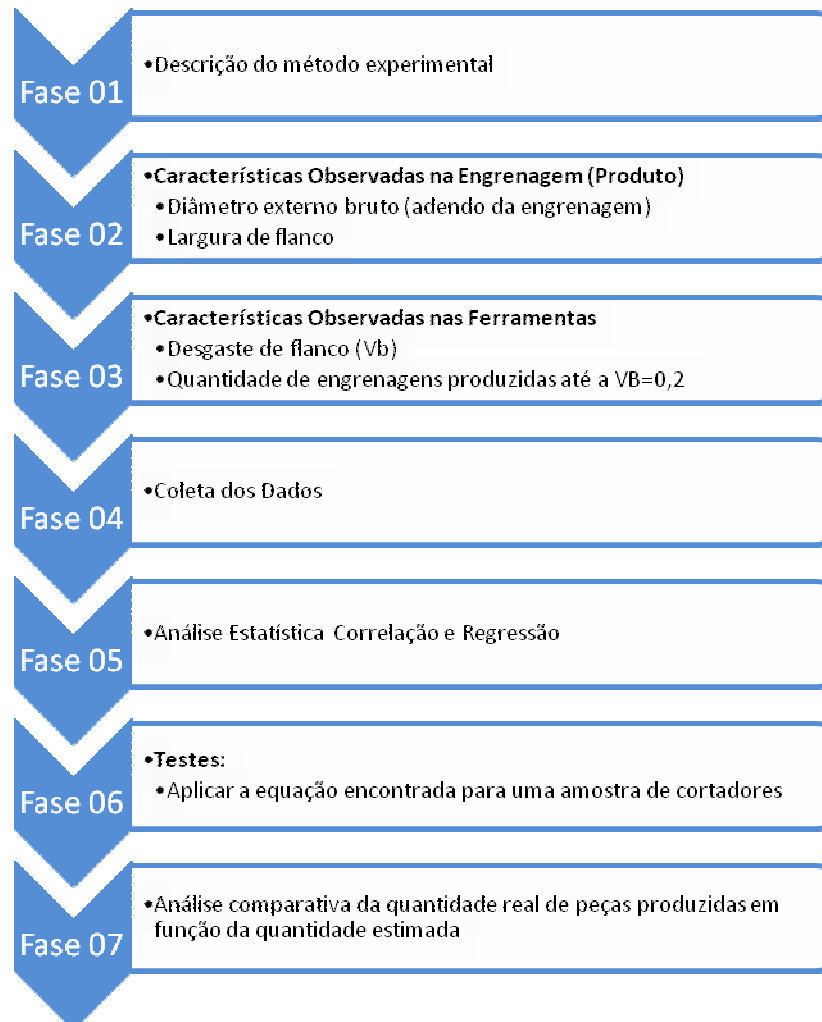


Figura 34 - Fluxograma do Procedimento Experimental

3.1 Descrição do Método Experimental

O método experimental desse trabalho, baseia-se nos passos a seguir:

- 1 – Coletar dados (quantidade de peças produzidas por ferramenta, até $V_B=0,2$ mm).
- 2 – Coletar dados (diâmetro da engrenagem e a largura de flanco).
- 3 – Calcular a área formada pelo diâmetro da engrenagem e a largura de flanco.
- 4 – Gráfico de dispersão (área da engrenagem em função da quantidade de peças).
- 5 – Determinar o R^2 e o r para verificar se há correlação entre as variáveis.
- 6 – Determinar uma equação de regressão.
- 7 – Aplicar essa equação para nova amostra de ferramentas utilizadas até $V_B=0,2$ mm.

- 8 – Verificar para essa amostra o erro percentual entre o valor esperado e o valor real.
- 9 – Determinar a média e o desvio padrão do erro percentual entre o valor esperado e o valor real.
- 10 – Realizar análise do valor da média e desvio padrão encontrados para a amostra.

3.2 Características das Engrenagens

Para realizar a análise do comportamento das engrenagens, só serão considerados dois fatores das mesmas, que são o diâmetro externo bruto do dentado (D) e a largura de flanco do dente (e). Todas as engrenagens estudadas são fabricadas em material aço CL18, semelhante ao SAE 8620, Apêndice A, com dureza na faixa de 163 HB a 187 HB, forjadas com a pré-forma da engrenagem, posteriormente normalizadas e jateadas para eliminação da carepa de forjamento e então encaminhada para a usinagem.

A figura 35 ilustra as duas características das engrenagens que serão consideradas para realização desse estudo.

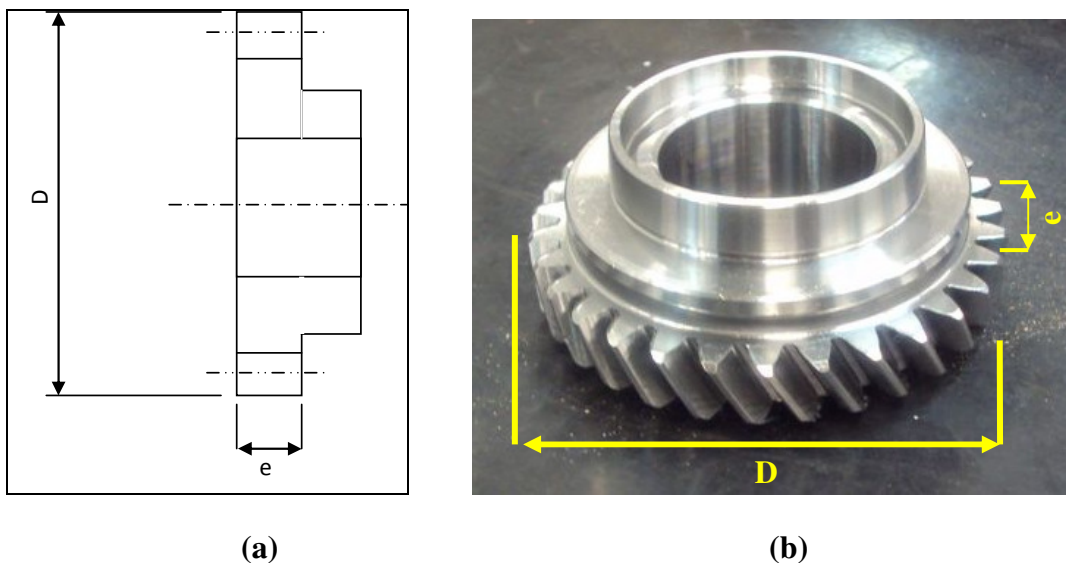


Figura 35 - a) Croqui b) Foto de um exemplo de engrenagem

3.3 Características da Ferramenta Caracol

Os dados a serem analisados relacionados à ferramenta caracol estão exclusivamente ligados ao desgaste de flanco (VB). Outras características da ferramenta, como geometria,

ângulo de pressão, módulo, diâmetro e comprimento não compreendem o objeto desse estudo, bem como os parâmetros de corte como rotação, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte serão considerados como em condições ideais calculados para cada caso por peça-ferramenta. Algumas características que não variam de uma ferramenta para outra podem ser descritas aqui como o material da ferramenta de aço sinterizado com revestimento de nitreto de titânio (TiN) - de cor amarela, como mostra a figura 36.



Figura 36 - Cortador caracol com revestimento de TiN

Para melhor demonstrar a característica que será analisada na ferramenta, a figura 37, mostra o desgaste de flanco (VB):

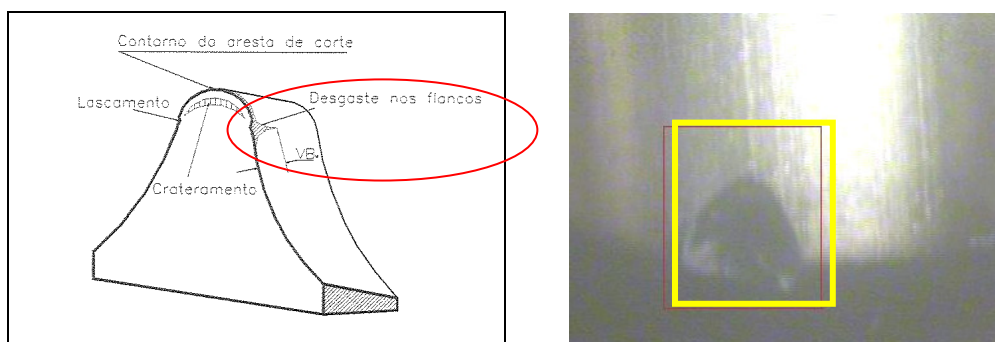


Figura 37 - Desgaste de flanco VB no dente da ferramenta caracol

Cada cortador caracol entra em produção acompanhado de uma ficha, denominada “Controle de Vida da Ferramenta”. Este documento possui informações básicas referentes à ferramenta, como: código, número de série, diâmetro, comprimento total, comprimento útil, número de entradas, ângulo de hélice e revestimento da ferramenta. É nesse documento que o operador irá registrar o código da engrenagem que está sendo produzida, bem como a quantidade de engrenagens daquele modelo produzidas com esse cortador. E então após

analisado pelo analista essa ferramenta é enviada para um fornecedor de serviços de afiação, onde esse por sua vez, faz análise microscópica da ferramenta para determinar o valor do desgaste de flanco (VB) e a quantidade de material a ser removido. A figura 38 mostra um exemplo desse documento.

| | | | | | | |
|----------------|--------|------------------|----------------|---------------|------------------|--------------|
| | | NUMERO DO SHAPER | | NA | SERIE | |
| | | | | | # | |
| FABRICANTE | O.F. | MATERIAL | Z | A.P. | ANG. HEL. | SENTIDO |
| | | | | | | |
| DIAMETRO | DIM. W | H. UTIL | ANG. AFIACAO | PREV. USIN. | ANG. CONIC. MAQ. | |
| | - | | | | | |
| DESBASTE | | | PRÉ-ACABAMENTO | | | ACABAMENTO |
| Vc | Nv | | Vc | Nv | Vc | Nv |
| Sra | Sr | Sw | Sra | Sr | Sw | Sra |
| | | | | | | |
| | | | | | | REVESTIMENTO |
| | | | | | | FABRICANTE |
| | | | | | | |
| NÚMERO DA PEÇA | | Zp | MÁQUINA | CHAPA / TURNO | PEÇAS PRODUZIDAS | DATA |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Figura 38 - Ficha controle de vida da ferramenta

O microscópio utilizado para se determinar o desgaste de flanco (VB) é um microscópio estéreo trinocular da marca “Topcon”, fabricado no Japão, com ampliação de 10 a 40 vezes, com ajuste mecânico de foco macrométrico e uma câmera de vídeo de alta definição colorida com processador “Sony” 570 linhas. A imagem captada é analisada por um software de medição chamado “Atunus”. Todo esse sistema é facilmente manuseado no ambiente operacional do *Windows* 2000 ou XP. A figura 39 ilustra o microscópio utilizado.



Figura 39 - Microscópio para medição do desgaste de flanco (VB)

3.4 Dados Coletados

A coleta de dados baseia-se em levantar as seguintes informações: diâmetro externo da engrenagem (adendo), a largura de flanco e a quantidade de engrenagens produzidas por essa ferramenta até atingir o desgaste de flanco $VB= 0,2$ mm.

Com base nos dados coletados de diâmetro (D) da engrenagem e largura de flanco (e), calcula-se a área formada por essas variáveis, de acordo com a equação 3.1

$$A = \pi.D.e \quad [mm^2] \quad (3.1)$$

Onde:

A = área do cilindro do dentado $[mm^2]$

D = diâmetro da engrenagem $[mm]$

e = largura de flanco da engrenagem $[mm]$

A tabela 2 apresenta os dados coletados e o valor da área calculada para cada item da amostra

Tabela 2 – Dados coletados da ferramenta e da engrenagem

| Ferramenta | D [mm] | Largura de Flanco [mm] | Área (mm ²) | Qt. real de peças produzidas |
|------------|--------|------------------------|-------------------------|------------------------------|
| 1 | 148 | 17 | 2700 | 700 |
| 2 | 175 | 15 | 9030 | 1280 |
| 3 | 121 | 22,5 | 7350 | 952 |

3.5 Análise Estatística dos Dados

Baseado nos dados coletados na tabela 2, foi criado o gráfico de dispersão desses dados e exibido no gráfico o r^2 , que será responsável por estabelecer se há correlação entre as variáveis e a equação de regressão desses dados, A figura 40, representam essas informações: para que posteriormente possa ser aplicada essa equação em uma nova amostra e verificar o seu comportamento.

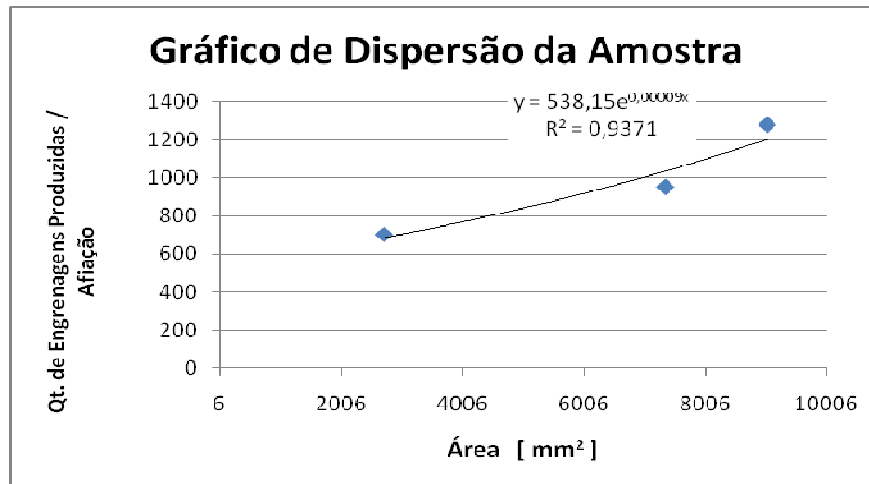


Figura 40 - Gráfico de dispersão da amostra

$$y = 538,15e^{0,00009x} \quad [\text{Engrenagens/Afição}] \quad (3.2)$$

$$R^2 = 0,9371 \quad (3.3)$$

Para se determinar se há correlação entre as variáveis calcula-se a raiz do R^2 e se compara com a regra apresentada na seção 2.6, para correlações curvilíneas.

$0,0 < |r| < 0,3 \rightarrow$ Correlação muito fraca, quase nula.

$0,3 < |r| < 0,6 \rightarrow$ Correlação relativamente fraca.

$0,6 < |r| < 1,0 \rightarrow$ Há correlação.

$$r = \sqrt{R^2} \rightarrow r = \sqrt{0,9371} \rightarrow r = 0,96$$

Encontrar valor de $r=0,96$, significa que há correlação entre as variáveis.

Para a equação de regressão encontrada, os valores de “x” representam a área lateral do dentado da engrenagem e o valor de “y” representa a quantidade de peças que se estima produzir com um cortador caracol.

3.6 Testes

Por haver correlação entre as variáveis, pode-se determinar uma equação de regressão curvilínea, representada pela equação 3.2, a partir dessa equação, será aplicada em uma nova

amostra de dados, onde se obteve previamente o diâmetro da engrenagem (D), a largura de flanco (e) e a quantidade de peças produzidas por ferramenta, até o desgaste $VB=0,2\text{mm}$, em seguida foi calculada a área para cada engrenagem produzida e os dados representados na tabela 3.

Tabela 3 – Teste realizado a partir da curva padrão

| Ferramenta | D [mm] | Largura de Flanco [mm] | Área (mm ²) | Qt. Estimada $y = 538,15e9E-05x$ | Qt. Real | Diferença |
|------------|--------|------------------------|-------------------------|-------------------------------------|----------|-----------|
| 1 | 194,33 | 16,1 | 9829 | 588 | 450 | 31% |
| 2 | 150,1 | 18 | 8488 | 581 | 380 | 53% |
| 3 | 121,63 | 17,3 | 6611 | 571 | 660 | -13% |
| 4 | 93,03 | 21,8 | 6371 | 570 | 730 | -22% |
| 5 | 60 | 45 | 8482 | 581 | 565 | 3% |
| 6 | 92 | 25 | 7226 | 574 | 380 | 51% |
| 7 | 55 | 55 | 9503 | 586 | 830 | -29% |
| 8 | 138 | 20 | 8671 | 582 | 800 | -27% |
| 9 | 106 | 25 | 8325 | 580 | 650 | -11% |
| 10 | 59 | 50 | 9268 | 585 | 565 | 4% |
| 11 | 121 | 22,5 | 8553 | 581 | 460 | 26% |
| 12 | 115 | 20 | 7226 | 574 | 660 | -13% |
| 13 | 59 | 60 | 11121 | 595 | 587 | 1% |
| 14 | 45 | 54 | 7634 | 576 | 730 | -21% |
| 15 | 94 | 50 | 14766 | 615 | 600 | 2% |
| 16 | 135 | 26 | 11027 | 594 | 445 | 34% |
| 17 | 75 | 30 | 7069 | 573 | 450 | 27% |

Para a coluna da diferença, calculou-se a média e o desvio padrão, e para esses, segue o valor encontrado nas equações 3.4 e 3.5 respectivamente.

$$\text{Média} \quad \rightarrow \bar{X} = 6\% \quad (3.4)$$

$$\text{Desvio Padrão} \quad \rightarrow S = 27\% \quad (3.5)$$

3.7 Análise dos Testes

Analisando os resultados obtidos nos testes, pode-se observar que em média houve um diferença percentual de 6% entre o valor estimado para a quantidade de peças a serem produzidas e o valor real, porém o desvio padrão para esse mesmo grupo de dados, apresentou 27%. O desvio padrão pode ser um valor relativo de acordo com a grandeza a que está sendo

aplicado, mas como nesse caso, aplicou-se o desvio padrão a unidade percentual, entende-se que há uma variação de $\pm 27\%$ de diferença percentual para os erros encontrados.

4 DISCUSSÕES

Como principal dificuldade operacional, pode-se citar a seleção das ferramentas com o desgaste indicado de 0,2 mm, pois há muita variação de uma ferramenta para outra.

Quanto aos resultados obtidos, esperava-se que o desvio padrão da diferença percentual fosse de aproximadamente 10%, o que seria totalmente aceitável para a gama de itens relacionados. Porém o desvio padrão encontrado foi de 27%.

Embora o valor encontrado para o desvio padrão tenha sido superior ao esperado, entende-se que já é uma boa aproximação da estimativa da quantidade de peças a serem produzidas por um cortador caracol, considerando que anteriormente a esse estudo, não havia nenhum parâmetro de correlação prático.

A diferença se deu pela diversidade de itens relacionados tanto de engrenagens como ferramentas, e as muitas variáveis envolvidas no processo. Então num universo tão heterogêneo, buscar uma equação que o representasse era um grande desafio.

Como sugestão para se restringir a variação dos resultados alcançados, é realizar o mesmo método de estudo, porém aplicado para famílias de engrenagens e de ferramentas, ou seja, que apresentem maior semelhança entre si, e considerar fixa algumas variáveis do processo como a velocidade de corte.

5 CONCLUSÕES

Ao findar dos testes e análises estatísticas realizadas nesse trabalho, chega-se a algumas conclusões finais, que estarão sendo relatadas a seguir:

O método proposto se mostra aplicável à prática industrial no que se diz respeito fácil implementação nas atividades diárias da fábrica, utilizando uma equação com apenas duas variáveis (área lateral do cilindro onde será formado o dentado) e a quantidade de peças que se deseja estimar. Proporcionando ganhos de produtividade, vida da ferramenta, qualidade no acabamento superficial da engrenagem, redução do tempo de setup, cálculo da quantidade ferramentas necessárias para a produção e tempo necessário para giro de afiação com base na análise estatística.

O desvio padrão encontrado de 27% da diferença percentual, não satisfaz plenamente o objetivo desse trabalho. Porém, sabendo-se que o processo de usinagem com a ferramenta caracol possui inúmeras variáveis que interferem no desgaste da ferramenta e que dificilmente poderiam ser controladas simultaneamente de forma prática a se obter a estimativa da quantidade de peças a serem produzidas. A equação de regressão, considerando o desvio padrão encontrado nesse trabalho, proporciona um caminho que atende as expectativas consideravelmente.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHERKAN, N. V. PUSCH. **Machine Tool Design**. N. Ignatyev, Moscow, 1968.
- COLLINS, A. JACK. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas**, LTC, Columbus, Ohio, 2002.
- CRESPO, A. ANTONIO. **Estatística Fácil**, Ed. Saraiva, São Paulo, 2002.
- DINIZ, A. EDUARDO – MARCONDES, C. FRANCISCO – COPPINI, L. NIVALDO. **Tecnologia de Usinagem dos Materiais**. Artliber, São Paulo, 2003.
- DINIZ, A. EDUARDO; FILHO, J. CALDEIRANI. **Influence of Cutting Conditions on Tool Life, Tool Wear and Surface Finish in the Face Milling Process**. Portal da Capes acessado em 30/10/10.
- DELL, VECHIO. **Memorial de Cálculo**. Sampaensili, São Paulo, 2007.
- DAL BIANCO, L. DIRCEU. **Desgaste de Ferramentas de Puncionamento**. Dissertação de Mestrado, UFRGS, 2003
- DAROIT, CARLOS. **Análise da Influência de Parâmetros de Processo no Desgaste de Insertos de Corte Utilizados para o Descascamento de Barras Laminadas**. Dissertação de Mestrado UFRGS, 2009
- JOÃO, L. T. VICTOR. **Determinação da Curva de Vida de uma Ferramenta**. Artigo, Unimep, Piracicaba, 2007.
- LAHUE, C. KALTON. **Basic Clutches & Transmissions**. Peterson Publishing, USA, 1979.
- LAPPONI, C. JUAN. **Estatística Usando Excel**. Laponi Treinamento e Editora Ltda, São Paulo, 2000.
- LIMA, JOÃO **Monitoramento do Corte de Dentes de Engrenagem com Ferramenta Hob via Corrente Elétrica do Motor da Máquina** - Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas – Campinas - São Paulo, 1995.
- NIEMANN, GUSTAV. **Elementos de Máquinas Volume II**. . Edgar Blücher, São Paulo, 1971.
- NORTON, L ROBERT. **Projeto de Máquinas**. Bookman, 2004.

MACHADO, ÁLISSON ROCHA; ABRÃO, ALEXANDRE MENDES; COELHO, REGILNALDO TEXEIRA; SILVA, MÁRCIO BACCI. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Edgar Blücher, São Paulo, 2009.

QUIRINO, JOÃO B. **Controle de Vida da Ferramenta Caracol – Parâmetro Teórico**. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas – Campinas - São Paulo, 2000.

SHIGLEY, J. EDWARD. **Cinemática dos Mecanismos**. Edgar Blücher, São Paulo, 1970.

STIPKOVIK, F. **Engrenagens**. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1973.

STEVENSON, J. WILLIAM. **Estatística Aplicada à Administração**. Editora Harbra Ltda, São Paulo, 1981

STOETERAU, RODRIGO LIMA. **Desgaste de Ferramentas**. Escola Politécnica - São Paulo, 2009.

TRIOLA, F. MARIO. **Introdução à Estatística**. Editora LTC – Rio de Janeiro, 2005.

VIDOSSICH, FRANCO. **Catálogo de Máquinas Ferramentas Brasileiras**. Abimaq, São Paulo, 1986

Catálogo “**Máquinas Ferramentas Brasileiras**” - ABIMAQ 1976

“**Colheita aquece venda de máquinas agrícolas**” no site de economia www.agrolink.com.br, acessado em 05/05/10

APÊNDICE A – Composição Química do CL 18

| GRADE DESIGNATION | COMPOSITION RANGES AND LIMITS, WT% | | | | |
|----------------------|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | C | Mn | NI | Cr | Mo |
| 4118RH | 0.18-0.23 | 0.70-0.90 | — | 0.40-0.60 | 0.08-0.15 |
| 4120RH (PS-15) | 0.18-0.23 | 0.90-1.20 | — | 0.40-0.60 | 0.13-0.20 |
| 4317M2# | 0.15-0.20 | 0.70-1.00 | 1.65-2.00 | 0.45-0.65 | 0.65-0.80 |
| 4320RH | 0.17-0.22 | 0.45-0.65 | 1.65-2.00 | 0.40-0.60 | 0.20-0.30 |
| 4620RH | 0.17-0.22 | 0.45-0.65 | 1.65-2.00 | — | 0.20-0.30 |
| 4718RH | 0.16-0.21 | 0.70-0.90 | 0.90-1.20 | 0.35-0.55 | 0.30-0.40 |
| 4817RH | 0.15-0.20 | 0.40-0.60 | 3.25-3.75 | — | 0.20-0.30 |
| 4820RH | 0.18-0.23 | 0.50-0.70 | 3.25-3.75 | — | 0.20-0.30 |
| 8615 | 0.13-0.18 | 0.70-0.90 | 0.40-0.70 | 0.40-0.60 | 0.15-0.25 |
| PS-20 | 0.13-0.18 | 0.90-1.20 | — | 0.40-0.60 | 0.13-0.20 |
| 8617RH | 0.15-0.20 | 0.70-0.90 | 0.40-0.70 | 0.40-0.60 | 0.15-0.25 |
| PS-21RH | 0.15-0.20 | 0.90-1.20 | — | 0.40-0.60 | 0.13-0.20 |
| 8620RH | 0.18-0.23 | 0.70-0.90 | 0.40-0.70 | 0.40-0.60 | 0.15-0.25 |
| ETN-22 *** | 0.19-0.24 | 0.90-1.20 | — | 0.40-0.60 | 0.12-0.18 |
| 8622RH | 0.20-0.25 | 0.70-0.90 | 0.40-0.70 | 0.40-0.60 | 0.15-0.25 |
| PS-16RH | 0.20-0.25 | 0.90-1.20 | — | 0.40-0.60 | 0.13-0.20 |
| ETN-25 *** | 0.22-0.27 | 0.90-1.20 | — | 0.40-0.60 | 0.12-0.18 |
| 8625RH | 0.23-0.28 | 0.70-0.90 | 0.40-0.70 | 0.40-0.60 | 0.15-0.25 |
| PS-17RH | 0.23-0.28 | 0.90-1.20 | — | 0.40-0.60 | 0.13-0.20 |
| ETN-27 *** | 0.25-0.30 | 0.90-1.20 | — | 0.40-0.70 | 0.12-0.18 |
| 8627RH | 0.25-0.30 | 0.70-0.90 | 0.40-0.70 | 0.40-0.60 | 0.15-0.25 |
| PS-18RH | 0.25-0.30 | 0.90-1.20 | — | 0.40-0.60 | 0.13-0.20 |
| 8720RH | 0.18-0.23 | 0.70-0.90 | 0.40-0.70 | 0.40-0.60 | 0.20-0.30 |
| 8822RH | 0.20-0.25 | 0.75-1.00 | 0.40-0.70 | 0.40-0.60 | 0.30-0.40 |
| 655H13 * | 0.10-0.16 | 0.35-0.60 | 3.00-3.75 | 0.70-1.00 | — |
| 815H17 * | 0.14-0.20 | 0.60-0.90 | 1.20-1.70 | 0.80-1.20 | 0.10-0.20 |
| 820H17 * | 0.14-0.20 | 0.60-0.90 | 1.50-2.00 | 0.80-1.20 | 0.10-0.20 |
| 832H13 * | 0.10-0.16 | 0.35-0.60 | 3.00-3.75 | 0.70-1.00 | 0.10-0.25 |
| 16MnCr5 ** | 0.14-0.19 | 1.00-1.30 | — | 0.80-1.10 | — |
| 20MnCr5 ** | 0.17-0.22 | 1.10-1.40 | — | 1.00-1.30 | — |
| 20MnCr5RH** | 0.17-0.19 | 1.10-1.40 | — | 1.00-1.30 | — |
| CL18 | 0.18-0.23 | 0.90-1.30 | — | 0.35-0.70 | 0.10-0.20 |
| CL23 | 0.23-0.28 | 0.90-1.30 | — | 0.35-0.70 | 0.10-0.20 |
| CL25 | 0.23-0.28 | 0.90-1.30 | — | 0.35-0.70 | 0.10-0.20 |
| ETN-17NiCrMo2 | 0.18-0.23 | 0.60-0.90 | 1.40-1.80 | 0.60-0.90 | 0.30-0.45 |

Figura 41 – Composição química do aço AISI CL18 (Departamento de Metalurgia Eaton)