

## DETERMINAÇÃO DO FIM DA VIDA DE FERRAMENTAS DE CORTE DE DENTES DE ENGRENAGENS DO TIPO CARACOL

**João Batista Quirino**

Eaton Co.

[JoaoBQuirino@eaton.com](mailto:JoaoBQuirino@eaton.com) – Valinhos, SP, Brasil

**Anselmo Eduardo Diniz**

Universidade Estadual de Campinas – Departamento de Engenharia de Fabricação/FEM

[anselmo@fem.unicamp.br](mailto:anselmo@fem.unicamp.br) – Campinas, SP, Brasil

**Resumo.** *O corte de dentes de engrenagem com ferramentas caracol é o processo mais utilizado na produção de engrenagens em larga escala. É um processo que remove grande quantidade de cavaco e a ferramenta que o realiza tem alto custo. Porém, poucos trabalhos de pesquisa versam sobre este assunto. Este trabalho procura preencher um pouco desta lacuna. Seu principal objetivo é o controle de vida da ferramenta Caracol no corte de engrenagens cilíndricas, fornecendo um parâmetro teórico "Vo" que relacione seu desgaste de folga com o número de peças produzidas, através do volume de cavaco removido por dente do cortador. Procura-se provar que este parâmetro é independente das características geométricas da engrenagem. Para isto, lotes de engrenagens diferentes (porém de mesmo material) foram produzidos com cortadores diferentes (de mesmo material) e acompanhados, a fim de que a substituição do cortador fosse realizada sempre seguindo o mesmo critério de troca. Os resultados obtidos provam que a utilização de "Vo" é uma boa estratégia de substituição da ferramenta. Para sua utilização deve-se estabelecer "Vo" para um determinado par cortador-engrenagem e depois utilizá-lo em outros pares, mantendo as condições de usinagem, o número de entradas e o material do cortador e da engrenagem.*

**Palavras-chave:** *corte de dentes de engrenagem, ferramenta caracol, vida da ferramenta*

### 1. INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica e a necessidade de produtos de baixo custo e com qualidade fizeram com que o momento de troca da ferramenta nas máquinas "CNC" se tornasse um aspecto muito importante, pois ele pode proporcionar um melhor aproveitamento da mesma, evitando danos à ferramenta, peça e máquina-ferramenta.

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

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

## **2. O CORTE DE ENGRENAGENS COM FERRAMENTA CARACOL**

O avanço tecnológico e a necessidade de produção contribuíram para o surgimento de novos processos para obtenção do dentado de engrenagens, processos esses que se tornaram mais produtivos e de melhor qualidade que os processos por formação. Os processos por formação foram os primeiros a serem utilizados. Nesse tipo de processo a ferramenta tem o perfil do dente e a peça tem apenas movimento de divisão. Este processo é realizado por fresas-módulo ou por plainas.

Os processos por geração tem como princípio fundamental o fato de que a ferramenta de corte e a peça representam um par engrenado "coroa (peça)/ parafuso-sem-fim (cortador)" associado a um movimento de corte. Naturalmente, sendo o caracol um "parafuso-sem-fim", não de contato contínuo mas sim de arestas cortantes sucessivas, não se tem a curva evolvente teórica, mas sim uma família de tangentes, como mostra a figura 1 (Pfauter, 1996). O perfil teórico evolvente somente seria obtido com um número infinito de arestas e, conseqüentemente, de canais no cortador caracol, o que é fisicamente impossível.

Pode-se comparar o cortador caracol com uma cremalheira que tem a evolvente próxima a um raio de base infinito. O princípio de trabalho de um cortador caracol é a geração de um perfil por rotação de um cilindro (diâmetro primitivo da peça) sobre um plano (reta primitiva da cremalheira do cortador), conforme mostra a figura 2 (Pfauter, 1996).

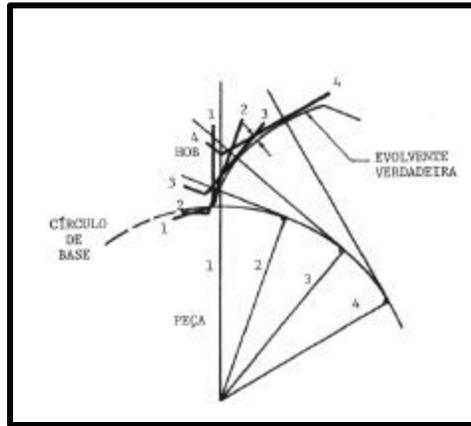


Figura 1 – Família de tangentes formadas no corte com ferramenta caracol

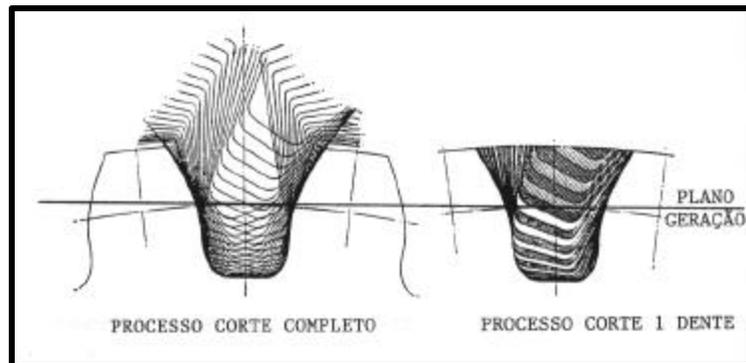


Figura 2 – Processo de Geração de Dentes de Engrenagem

Durante o corte, a ferramenta caracol tem movimento na direção paralela ao eixo da peça. O avanço na direção de profundidade (radial) é realizado, em geral, com a ferramenta fora da peça. A fim de aproveitar todas as arestas de corte da ferramenta, o caracol tem um movimento na direção de seu próprio eixo, logo após o fim do corte de uma peça (shifting), enquanto a mesma ainda não iniciou o corte de uma próxima peça. Para se uniformizar o desgaste da ferramenta após todo o comprimento da mesma ter sido utilizado (shifting total), na próxima peça a ser usinada não se retorna ao ponto inicial de corte da ferramenta, mas desloca-se o mesmo de alguns décimos de milímetro (sub-shifting).

### 3. CÁLCULO DO VOLUME DE CAVACO REMOVIDO POR DENTE DO CORTADOR

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

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

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

$$N_{TSH} = (L_{shf} \div (M_n * \pi)) * (N_T) * \cos \gamma_{ow} \quad (1)$$

$$\text{Volume usinado (} V_{\text{ush}} \text{) no "shifting" total} \\ V_{\text{ush}} = N_{\text{TSH}} * V_o \quad (2)$$

$$\text{Número de peças (} N_p \text{) a serem produzidas por vida do cortador} \\ V_{\text{pz}} = A_v * Z_p * (L_d \div \cos \beta_{\text{on}}) \quad (3)$$

$$N_p = V_{\text{ush}} \div V_{\text{pz}} \quad (4)$$

Onde :

$A_v$  = Área do vão do dente da peça

$L_{\text{shf}}$  = Comprimento do "shifting" total

$\beta_{\text{on}}$  = Ângulo de hélice da peça

$L_d$  = Largura dentada da peça

$M_n$  = Módulo normal

$N_T$  = Número de lâminas do cortador

$\gamma_{\text{on}}$  = Ângulo de hélice do cortador

$V_{\text{pz}}$  = Volume de material removido por dente do cortador em uma peça

$Z_p$  = Número de dentes da peça

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

#### 4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos foram realizados em máquinas cortadoras de engrenagens CNC (Liebherr LC 122 , Liebherr LC 182 e Liebherr LC 282) durante o processo produtivo, possibilitando a monitoração do deslocamento tangencial (Shifting) do cortador caracol. Embora as máquinas permitam cortar as engrenagens em dois ciclos de corte, desbaste e acabamento, optou-se por cortar em um único ciclo visando um processo mais produtivo.

O momento de fim de vida era determinado pelo pesquisador, através de medição do desgaste " $VB_N$ " em microscópio. O desgaste era medido na região de maior influência e em alguns dentes. Quando o desgaste da ferramenta " $VB_N$ " atingia o valor de 0,20 a 0,30 mm, a ferramenta era substituída e o ensaio era considerado como terminado. Esta faixa de desgaste foi escolhida porque ela garante que a qualidade da engrenagem cortada seja compatível com as especificações do projeto. Quando o desgaste da ferramenta ultrapassa esta faixa, corre-se o risco de se fabricar engrenagem fora das especificações de qualidade. Além disso, valores maiores de desgaste implicam em maior volume de material da ferramenta removido na afiação e, conseqüentemente, menor número de vezes que a ferramenta pode ser reafiada. Algumas vezes ocorreu de se verificar o desgaste da ferramenta e ele estar com um valor muito próximo desta faixa ( $VB_N = 0,18$  ou  $0,19$  mm). Nestes casos, preferiu-se não esperar o próximo lote de produção e a ferramenta era então substituída. Cada ensaio foi repetido seis vezes. Então, o que é chamado de 1º. ensaio na tabela 1, na verdade é um conjunto de seis ensaios, o mesmo ocorrendo com os demais.

O material das engrenagens do ensaio era o aço SAE 8620 normalizado, com dureza 163 a 187 HB.

A empresa trabalha com sistema de célula de manufatura com lotes considerados pequenos, sendo que cada tipo de ferramenta basicamente é utilizada em um único tipo de peça. Os ensaios foram realizados com ferramentas de aço rápido sinterizado CPM REX 76 com cobertura de

nitreto de titânio. Após cada afiação os cortadores eram recobertos.

As características das engrenagens, dos cortadores e as condições de usinagem utilizadas nos ensaios estão descritas na tabela 1.

Tabela 1 – Características das Engrenagens, dos Cortadores e Condições de Usinagem Utilizadas nos Ensaios

	1º. Ensaio	2º. Ensaio	3º. Ensaio	4º. Ensaio	5º. Ensaio	6º. Ensaio
Módulo normal	3.65	4.5	3.65	3.65	3.65	3.8484
Ângulo de pressão	20º.	20º.	20º.	20º.	20º.	23º.
Número de dentes da engrenagem	48	16	46	23	24	28
Ângulo de Hélice	25º. Direita	12º. Direita	25º. Direita	25º. Esquerda	25º. Esquerda	23º. Esquerda
Número de lâminas do cortador	15	18	17	18	18	18
Lshf [mm]	83	32	92	48	48	48
Ntsh	108	33	120	75	74	71
Sh [mm]	11.5	7.4	11.5	11.5	11.5	10.9
Avanço [mm/rot]	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Velocidade de corte ( $v_c$ ) [m/min]	90	90	90	90	90	90
Número de Entradas do Cortador	1	1	1	2	2	2

Há que se notar que as características das engrenagens usinadas diferem uma das outras, mas a velocidade de corte o avanço e o material da ferramenta e da peça foram mantidos constantes em todos os ensaios, até o sexto ensaio. Isto foi feito para que se pudesse verificar a influência das características da engrenagem cortada na vida do cortador, medida em volume de cavaco removido. O objetivo final foi verificar se a vida da ferramenta permanecia constante (pelo menos em termos estatísticos) com a variação das características da engrenagem e, assim, poder-se-ia estabelecer um volume de cavaco removido determinado previamente que fosse utilizado para definição da vida da ferramenta de diversas engrenagens com geometrias diferentes, desde que as condições de usinagem, o material da peça e o material da ferramenta fossem mantidos constantes.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 3 mostra o desgaste da ferramenta “ $VB_N$ ” em função do volume de cavaco por dente do cortador “ $Vo$ ”, no momento de sua substituição. Alguns pontos merecem ser destacados nesta figura :

- todos os valores de volume de cavaco removido por dente do cortador quando da sua substituição se mostraram bem próximos, independentemente do tipo de engrenagem usinada. Pode-se dizer que o valor de desgaste “ $VB_N$ ” utilizado como critério de substituição da ferramenta, influenciou o volume de cavaco removido, pois, principalmente para o corte de engrenagens com cortador de uma entrada, em geral tem-se valores de “ $Vo$ ” maiores para “ $VB_N$ ” maiores. É bom lembrar que a ferramenta era substituída quando “ $VB_N$ ” atingia a faixa de 0,20 a 0,30 mm e que, algumas poucas vezes, a ferramenta foi substituída quando “ $VB_N$ ” era 0,18 ou 0,19 mm. Porém, mesmo considerando-se este fator, a variação total de “ $Vo$ ” no fim de vida da

ferramenta foi pequena, menos de 10% para todos os cortadores .

- O fator predominante que influenciou o volume de cavaco removido “Vo” no fim da vida da ferramenta foi o número de entradas do cortador. Pode-se ver na figura 3, que enquanto o “Vo” médio para cortadores com uma entrada foi em torno de  $628 \text{ cm}^3$ , o “Vo” médio para cortadores com duas entradas foi de  $336 \text{ cm}^3$  aproximadamente 54% do anterior. A relação de rotação no engrenamento é função do número de entradas do cortador caracol, dividido pelo número de dentes da peça conforme Rodrigues, Agostinho e Lirani (1978). No caso de cortadores com duas entradas, a rotação da peça dobra comparada com cortadores de uma entrada, para a mesma velocidade de corte. Segundo Brink (1997) um dos fatores predominantes na usinagem de engrenagens com cortador caracol é o desgaste por abrasão. Como a rotação dobra quando se duplica o número de entradas do cortador, dobra também a velocidade de avanço, aumentando o atrito da ferramenta, o que causa o aumento na taxa de desgaste. Sendo assim, este fenômeno pode explicar a diferença de vida dos cortadores, onde o único parâmetro alterado foi o número de entradas do cortador caracol.

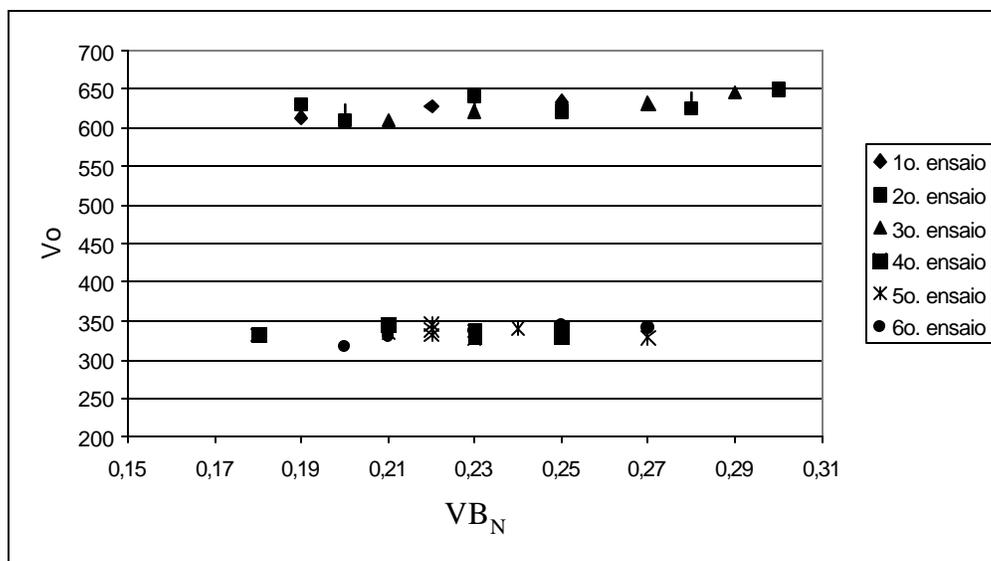


Figura 3 – Volume de cavaco removido por dente do cortador ( $V_o$ ) contra desgaste de flanco no fim da vida do cortador ( $VB_N$ ) para o seis ensaios realizados

A média dos valores de volume de cavaco removido por dente do cortador para os cortadores de uma entrada foi de  $628,07 \text{ cm}^3$  e seu desvio padrão de 11,22. Assim, considerando-se que estes valores estão dispersos seguindo uma distribuição normal (testes foram feitos que comprovam que esta distribuição é normal), pode-se afirmar que 99,7% das vezes, o valor de “Vo” vai estar entre sua média  $\pm 3$  desvios padrões ( $\sigma$ ). Com isto, deve-se substituir a ferramenta quando o volume de cavaco removido por dente do cortador estiver dentro do intervalo 594,41 e 661,73. Como este intervalo é pequeno, não vai causar grande desperdício de ferramenta (substituição prematura) quando o valor de “Vo” escolhido para a substituição estiver próximo ao limite mínimo do intervalo e nem causar deterioração excessiva do cortador e da peça, quando “Vo” escolhido estiver próximo ao limite superior. Comentário similar pode ser feito para os cortadores de duas entradas que tiveram como valor médio de “Vo”  $336,06 \text{ cm}^3$  e desvio padrão de 7,71.

Estes resultados apontam para o fato de que se pode ter um valor específico de volume de cavaco removido por dente do cortador como parâmetro para definição do momento de substituição da ferramenta (fim da vida), independentemente do tipo da engrenagem, desde

que se mantenha constante as características geométricas do cortador, o material da peça e do cortador e as condições de usinagem. Este fato vem demonstrar o potencial desta técnica na previsão da vida da ferramenta, pois para isto necessita-se fazer testes de vida em apenas um tipo de engrenagem e depois extrapolar-se estes resultados para a usinagem de outras engrenagens dentro das características testadas (Mn , Zo, etc.). Assim, no planejamento do processo de corte de um determinado tipo de engrenagem, o planejador deve calcular o número de peças a ser produzida em uma vida da ferramenta, utilizando para isto, as equações de 1 a 4 e o volume de cavaco removido retirado de ensaios semelhantes aos que aqui foram realizados. É lógico, o valor de "Vo" a ser utilizado deve estar dentro da faixa média  $\pm 3$  desvios padrões ( $\sigma$ ).

## 6. CONCLUSÕES

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

1- O parâmetro "Vo" volume de cavaco removido por dente do cortador após já ter ocorrido um dado valor de desgaste de flanco (no caso  $VB_N$  de 0,20 a 0,30 mm) é independente da geometria da peça e do cortador, excetuando-se o número de entradas do cortador.

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

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

## REFERÊNCIAS

- Brink, R., 1997, Manufacturing aspects for coated tools. Switzerland: Balzers Aktiengesellschaft, 78 p.
- Pfauter Machine, 1996, Hobbing machine. Germany : Pfauter GmbH, 162 p.
- Rodrigues, A.C.S., Agostinho, O.L., Lirani, J., 1978, Curso de especialização em engenharia de fabricação e Máquinas Ferramentas. São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

## TOOL LIFE DETERMINATION FOR HOB CUTTERS

**Abstract.** *The cutting process of gear teeth using hob tool is the most used process in large scale production of gears. Besides, it is a process which removes a large amount of chip and which has an expensive tool. However, researches about it are very seldom. This work tries to fill part of this gap. The main objective of this work is to control the hob tool life, when cutting cylindrical gears. This purpose is going to be reached through the use of a theoretical parameter called volume of chip removed by each cutter tooth, which relates tool wear with*

*the number of produced parts. The goal is to prove that this parameter is independent of the gear characteristics. Aiming this goal, several batches of different gears were produced with different tools (both with the same material) and monitored, in order the tool replacement could be done following the same replacing criterion (flank wear ~ 0.20 to 0.30 mm). The results obtained proved that the “Vo” parameter is a good tool replacement strategy. For its utilization, it is necessary to establish the “Vo” value for a given pair “gear-cutter” and later use it for other pairs, since the number of cutter threads, the cutting conditions and the tool and gear material be kept constant.*

**Keywords.** *Hob, Tools for Gears, Gear Manufacturing, Gear Cutting*