

# DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS E SEQUÊNCIA DE CORTE PARA A MÁXIMA PRODUÇÃO EM TORNOS CNC.

**Patrick Leloup**

**Noemia Gomes de Mattos de Mesquita**

**Hugo Marcelo Bezerra de Carvalho**

**Sérgio Murilo Veríssimo de Andrade**

Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e de Geociências, Departamento de Engenharia Mecânica, 50740-530, Recife, PE, Brasil. E-mail: [ngmm@npd.ufpe.br](mailto:ngmm@npd.ufpe.br)

## Resumo

Neste trabalho foi desenvolvido um método para a determinação dos parâmetros otimizados, na a máxima produção, utilizando a fórmula expandida de Taylor, assim como, para a obtenção dos tempos de usinagem, tanto no torneamento axial como no radial, em peças cilíndricas e cônicas. Dando-se assim uma contribuição para a automatização do programa em linguagem CN com parâmetros de corte otimizados.

**Palavras-chave:** Máxima produção, Sequência de corte, Torno CNC.

## 1. INTRODUÇÃO

O planejamento da usinagem é uma das áreas mais deficitárias na fabricação, pois este setor não tem acompanhado o ritmo de modernização e desenvolvimento dos demais segmentos que compõem o sistema de produção.

O ponto primordial para a programação de uma máquina operatriz com comando numérico (CN) é a determinação dos parâmetros otimizados de usinagem (velocidade de corte, avanço e profundidade) assim como a melhor sequência de usinagem (Prasad et al, 1997; Kayacan et al, 1996; Younis et al, 1997).

Neste trabalho está sendo desenvolvido um método para a obtenção dos parâmetros e da sequência de corte para a máxima produção a fim de que possa ser integrado no desenvolvimento de um sistema CAM.

## 2. OBJETIVOS E METODOLOGIA UTILIZADA

Este trabalho está sendo desenvolvido em parceria com o SENAI/PE, que adquiriu recentemente um torno CNC modelo CENTUR-30 da empresa ROMI. Inicialmente, a determinação dos parâmetros de corte para a máxima produção, assim como as equações para a determinação do tempo de usinagem de uma peça, deverão ser obtidas para atender às necessidades específicas desta máquina, podendo posteriormente ser estendidas à qualquer máquina CNC (N.N., 1999).

O objetivo deste trabalho é determinar o tempo de usinagem para diferentes seqüências de corte, torneamentos axial e radial, de forma a se estabelecer a seqüência mais rápida.

Para o torno especificado temos como dados essenciais a potência máxima de 10 CV com um rendimento de 0.8, rotação máxima de 3500 rpm, velocidade de avanço e retorno

máximas de 10000 e 7500 mm/s respectivamente. As velocidades de rotação não assumem valores decimais, a sua variação é de uma rotação por minuto, só assumindo valores inteiros.

O trabalho está sendo desenvolvido com o auxílio do programa Mathcad, mas pretende-se desenvolver um software em linguagem C++ (Pohl, 1991).

Os resultados obtidos a partir do programa deverão ser comparados com os tempos reais de usinagem medidos na máquina CNC. Será possível assim, efetuar certas correções no equacionamento pois há sempre perdas de potência, através de, por exemplo, atrito, deflexões ou desgastes, aumentando o tempo real de usinagem.

### 3. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE PARA A MÁXIMA PRODUÇÃO

Na determinação dos parâmetros de corte, para a condição de máxima produção, enfrenta-se o seguinte problema: a velocidade de máxima produção é função dos parâmetros de Taylor  $x$  e  $K$  (veja equação 01) que variam com o avanço e a profundidade de corte.

$$V_c = \left[ \frac{K}{(x-1) \times T_t} \right]^{\frac{1}{x}} \quad (01)$$

onde  $V_c$  é a velocidade de corte,  $x$  e  $K$  são constantes que dependem do avanço e da profundidade de corte e  $T_t$  é o tempo de troca da ferramenta, estimado em 2 minutos.

Por outro lado a profundidade de corte, calculada através da equação de Kienzle depende do valor da velocidade de corte, como mostra a equação (02)

$$p_{max} = \frac{N_c \times 60 \times 75 \times \eta \times \sin(\chi)}{K_s \times V_c \times (f \times \sin(\chi))^{1-z}} \quad (02)$$

onde  $N_c$  é a potência da máquina,  $\eta$  é o seu rendimento,  $\chi$  é o ângulo de posição da ferramenta,  $K_s$  é a resistência específica de corte  $f$  o avanço e  $V_c$  a velocidade de corte.

Para solucionar este problema procedeu-se da seguinte maneira: as constantes  $K$  e  $x$  podem ser identificadas comparando-se a fórmula expandida de Taylor (04) com a equação (03)

$$V_c = K^{\frac{1}{x}} \times T^{\frac{-1}{x}} \quad (03)$$

$$V_c = C \times f^E \times p^F \times V_b^H \times T^G \quad (04)$$

obtendo-se assim (Mesquita, 1980):

$$x = \frac{-1}{G} \quad (05)$$

$$K = [C \times f^E \times p^F \times V_b^H]^x \quad (06)$$

onde C, E, F, H, G são constantes da fórmula expandida de Taylor e  $V_b$  é o desgaste de flanco que para operações de desbaste pode variar até 1.2 mm e para operações de acabamento é calculado em função da tolerância desejada.

Para um dado avanço, faz-se variar a profundidade de corte de 0.001 até a profundidade máxima permitida pela ferramenta. Calcula-se a velocidade de corte para cada profundidade, calculando em seguida a profundidade de corte máxima. Compara-se estas duas profundidades de corte, deve-se escolher a profundidade que seja igual à profundidade máxima. Faz-se variar o avanço e calcula-se a profundidade e a velocidade de corte. Calcula-se então o tempo de usinagem para esses parâmetros, escolhendo-se os que derem o menor resultado.

A tabela 1 apresenta os valores parciais das profundidades de corte  $p_i$ , das profundidades de corte máximas  $p_{max_i}$  e das respectivas velocidades de corte  $V_{c_i}$ , obtidas através do Mathcad, para um avanço de mm/volta, um ângulo de posição da ferramenta de  $95^\circ$ , desgaste de flanco igual a 0.8 mm e constantes de Taylor determinadas para um aço ABNT 1038 dadas por:  $C=910.64$ ,  $E=-0.3297$ ,  $F=-0.0366$ ,  $H=0.8936$ ,  $x=2.6261$  e para  $1/h=0.85$ ,  $K_s=180.612$   $N/mm^2$ .

**Tabela 1.** Valores de  $p_i$ ,  $p_{max_i}$  e  $V_{c_i}$

$p_i$ (mm)	$p_{max_i}$ (mm)	$V_{c_i}$ (m/s)
⋮	⋮	⋮
0.337	0.339	533.281
0.338	0.339	533.223
0.339	0.339	533.165
0.340	0.339	533.108
0.341	0.339	533.05
⋮	⋮	⋮

## 4. CÁLCULO DOS TEMPOS DE USINAGEM

### 4.1 Usinagem Cilíndrica

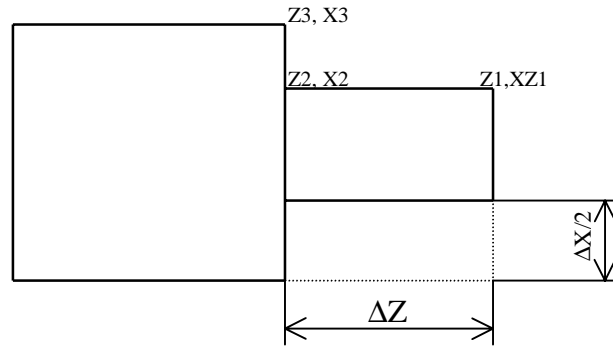
Para a usinagem de uma peça como a mostrada abaixo, devemos identificar os três pontos  $(Z_1, X_1)$ ,  $(Z_2, X_2)$ ,  $(Z_3, X_3)$ , onde X é dado em diâmetro.

O número de passes ( $ndp$ ) é dado pela parte inteira da divisão da diferença dos diâmetros pela profundidade de corte ( $p$ ).

$$ndp = \text{floor} \left( \frac{X_3 - X_1}{2 \times p} \right) \quad (07)$$

O material que deixará de ser usinado será retirado com um passe pela mesma ferramenta de desbaste para um pré-acabamento. A sua espessura pode ser calculada por

$$e = \frac{X_3 - X_1}{2} - \left[ \text{floor} \left( \frac{X_3 - X_1}{2 \times p} \right) \right] \times p \quad (08)$$



**Figura 1.** Peça a ser torneada

Para  $i$  variando de 1 à  $ndp$ , a velocidade de rotação ( $n$ ) da peça em rotações por minuto será dada por

$$n_i = \text{floor} \left( \frac{1000 \times Vc}{\pi \times (180 - i \times 2 \times p)} \right) \quad (09)$$

A velocidade de avanço da ferramenta ( $Va$ ) será dada por

$$Va_i = n_i \times f \quad (10)$$

Deve-se verificar se a rotação máxima de 3500 rpm não é ultrapassada. Caso  $n_i > 3500$  então adotar como rotação  $n_i = 3500$

O tempo de um passe será:

$$T_i = \frac{Z_2 - Z_1 + 2}{Va_i} + \frac{2}{7500} + \frac{Z_2 - Z_1 + 2 - 2}{10000} + \frac{p + 2}{7500} \quad (11)$$

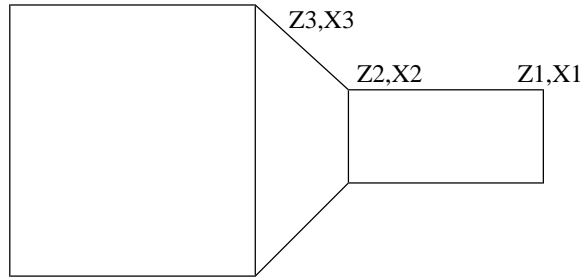
Onde o primeiro termo é o tempo de corte com uma folga de 2 milímetros da peça, o segundo é o tempo de afastamento da ferramenta com uma inclinação de  $45^\circ$  até se distanciar de 2 milímetros da peça, o terceiro é o tempo de recuo da ferramenta e o quarto é o tempo de posicionamento da peça para o próximo corte. Sendo então o tempo total dado por:

$$\text{Tempo} = \sum_{i=1}^{ndp} T_i - \frac{2 + p}{7500} \quad (12)$$

Para a usinagem de uma peça cônica devemos identificar também três pontos,  $(Z_1, X_1)$ ,  $(Z_2, X_2)$ ,  $(Z_3, X_3)$ , como mostra a figura 2.

A velocidade de avanço será dada pela mesma expressão. A diferença será a distância a ser usinada assim como a distância do recuo da ferramenta que mudarão a cada passe. Tem-se que a distância a ser usinada para a parte cônica a cada passe é dada por

$$dist_i = \frac{Z_3 - Z_2}{X_3 - X_2} \times \left[ \left( \frac{X_3 - X_2}{2} \right) - i \times p \right] \quad (13)$$



**Figura 2.** Peça cilíndrica

A velocidade de avanço será dada pela mesma expressão. A diferença será a distância a ser usinada assim como a distância do recuo da ferramenta que mudarão a cada passe. Tem-se que a distância a ser usinada para a parte cônica a cada passe é dada por

$$dist_i = \frac{Z_3 - Z_2}{X_3 - X_2} \times \left[ \left( \frac{X_3 - X_2}{2} \right) - i \times p \right] \quad (13)$$

O tempo de um passe será dado por

$$T_i = \frac{dist_i + Z_2 - Z_1 + 2}{Va_i} + \frac{2}{7500} + \frac{dist_i + Z_2 - Z_1 + 2 - 2}{10000} + \frac{2 + p}{7500} \quad (14)$$

O tempo total é dado então pela equação (12).

#### 4.2-Usinagem Radial

Para o desbaste radial, deve-se ter a usinagem dividida em pequenos intervalos nos quais a rotação é constante, já que as rotações só assumem números inteiros.

Tomando-se como exemplo a peça da figura 1, tem-se que a rotação inicial é dada por

$$n_{inic} = floor \left( \frac{1000 \times Vc}{\pi \times (X_3 + 4)} \right) \quad (15)$$

O número de intervalos (N) nos quais a rotação é constante é dado por

$$N = ceil \left( \frac{1000 \times Vc}{\pi \times X_2} \right) - floor \left( \frac{1000 \times Vc}{\pi \times (X_3 + 4)} \right) \quad (16)$$

Deve-se aqui levar em conta a rotação máxima da máquina que é de 3.500 rpm. Logo devemos inicialmente calcular o diâmetro para o qual a rotação máxima é atingida e comparar com X<sub>2</sub>.

$$D_{max} = \frac{1000 \times Vc}{\pi \times 3500} \quad (17)$$

Se  $D_{max}$  estiver compreendido entre  $(X_3+2)$  e  $X_2$ , no cálculo do número de intervalos devemos substituir  $X_2$  por  $D_{max}$  e haverá um outro intervalo entre  $D_{max}$  e  $X_2$  com rotação constante de 3.500 rpm. Se  $(X_3+2)$  for menor que  $D_{max}$  a usinagem será toda com rotação constante de 3.500 rpm. Se  $X_2$  for maior que  $D_{max}$  vale a equação dada.

Deve-se ainda determinar os diâmetros que limitam cada intervalo

$$d_1 = X_3 + 4 \quad (18)$$

$$d_{N+1} = X_2 \quad (19)$$

$$d_i = \frac{1000 \times Vc}{\pi \times (n_{mic} + i - 1)} \quad (20)$$

Para  $i$  variando de 2 à N.

O número de passes é dado por

$$ndp = floor\left(\frac{Z_1 - Z_2}{P}\right) \quad (21)$$

O tempo de um passe é:

$$T_i = \sum_{j=1}^n \left( \frac{d_j - d_{j+1}}{2} \times \frac{1}{(n_{mic} + i - 1) \times f} \right) + \frac{2}{7500} + \left( \frac{d_1 - d_{N+1}}{2} - 2 \right) \times \frac{1}{7500} + \frac{2 + P}{10000} \quad (22)$$

O tempo total de usinagem é:

$$Tempo = \sum_{i=1}^{ndp} T_i - \frac{2 + p}{10000} \quad (23)$$

Para o caso de uma peça cônica, como a mostrada na figura 2, a parte cônica é a única que nos interessa pois a outra parte é resolvida como mostrado acima.

Para este caso a distância a ser usinada variará a cada passe.

$$dist_i = \frac{X_3 - X_2}{2} - \left( \frac{X_3 - X_2}{2} \right) \times i \times \frac{p}{Z_3 - Z_2} \quad (24)$$

O número de intervalos nos quais a rotação é constante dependerá também do passe que estamos efetuando.

$$N_i = ceil\left(\frac{1000 \times Vc}{\pi \times (d_1 - 2 \times dist_i)}\right) - floor\left(\frac{1000 \times Vc}{\pi \times d_1}\right) \quad (25)$$

O tempo de um passe é dado por:

$$T_i = \sum \left( \frac{d_j - d_{j+1}}{2} \times \frac{1}{(n_{mic} + i - 1) \times f} \right) + \frac{2}{7500} + \left( \frac{d_1 - d_{N_i+1}}{2} - 2 \right) \times \frac{1}{7500} + \frac{2+p}{10000} \quad (26)$$

O tempo total é dado pela equação (23).

## 5. COMPARAÇÃO ENTRE USINAGEM AXIAL E RADIAL

É de grande interesse encontrar uma relação entre as dimensões da peça a ser usinada que pudesse determinar qual o modo de usinagem mais rápido, o axial ou o radial.

Quanto menor for a relação  $\Delta X/\Delta Z$  mais propícia a usinagem axial. Por exemplo: deseje-se desbastar uma peça a fim de obter o perfil da figura 1, dado pelos pontos  $(Z_1, X_1)=(100,80)$ ,  $(Z_2, X_2)=(60,80)$ ,  $(Z_3, X_3)=(60,120)$ .

Tem-se  $\Delta X/\Delta Z=1$ . Testando para  $p=1.5$  mm,  $f=0.4$  mm/rot e  $V_c=400$  m/s encontramos 1.188 min para o desbaste axial e 1.319 min para o desbaste radial.

Fazendo-se agora  $(Z_3, X_3)=(60,140)$ ,  $\Delta X/\Delta Z=1.5$ , encontra-se os seguintes resultados: 1.984 min para o desbaste axial e 1.829 min para o desbaste radial. Sendo o desbaste radial mais vantajoso.

Para se estabelecer uma relação  $\Delta X/\Delta Z$  para a qual seria mais interessante a usinagem radial ou axial deve-se levar em consideração a que distância do eixo da peça está se usinando. Quanto mais excêntrico for o torneamento, menor será a velocidade de rotação e mais propício ao torneamento axial será, como mostra o seguinte exemplo: seja a peça  $(Z_1, X_1)=(100,120)$ ,  $(Z_2, X_2)=(60,120)$ ,  $(Z_3, X_3)=(60,180)$ , os tempos encontrados são: 2.644 min para o torneamento axial e 2.715 para o radial. Portanto comparando-se com o exemplo anterior, onde tem-se a mesma relação  $\Delta X/\Delta Z=1.5$ , neste exemplo o torneamento axial passa a ser melhor, só pelo fato de estar mais distante do eixo de rotação da peça.

Observa-se também que o avanço escolhido também influencia. Quanto menor o avanço, mais rápido o torneamento axial em relação ao radial. Tomando-se o exemplo  $(Z_3, X_3)=(60,140)$  agora com um avanço de 0.2 mm/rot, obtêm-se: 1.354 min para o torneamento axial e 1.493 min para o radial. Sendo agora o desbaste axial mais vantajoso.

## 6-CONCLUSÃO

No estágio atual do trabalho, ainda não se encontrou uma relação exata entre as dimensões da peça para se determinar a melhor direção de torneamento. No entanto, já se pode observar que quanto menor a relação  $\Delta X/\Delta Z$ , mais propício ao torneamento axial, porém, quanto maior o avanço e quanto mais próximo o material a ser retirado estiver do centro de rotação, mais propício ao torneamento radial. As equações encontradas neste trabalho podem ser associadas para calcular os tempos de usinagem das diferentes seqüências possíveis para o desbaste de uma peça, utilizando os parâmetros de máxima produção, podendo ser facilmente aproveitado em um programador de máquinas CN.

Certos ajustes, porém, devem ser feitos nas equações pois não foi considerada nenhuma perda, como, por exemplo, atrito. Comparações com medidas experimentais mostraram um erro de 6.9% para o desbaste radial e 4% para o axial. Esta disparidade relativa às medições experimentais, todavia, não interferem em nada nas conclusões tiradas neste trabalho.

Estas diferenças podem ser devido a um pequeno intervalo de tempo na mudança de direção da ferramenta, a uma aceleração da ferramenta até atingir sua velocidade máxima ou

então a velocidade máxima da ferramenta não é atingida. Novas medições serão efetuadas para adequar as equações da melhor maneira possível aos resultados práticos.

Na programação de tornos CN, em operações de desbaste tem-se a opção de se retirar o sobremetal movimentando-se a ferramenta de corte no sentido axial ou radial. Este trabalho contribui para se escolher qual das duas opções é a melhor para diferentes tipos de peças, diminuindo-se desta forma o tempo necessário para a programação.

## **7 REFERÊNCIAS**

- Ferraresi, D., 1977, “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, São Paulo, Brasil.
- Kayacan M.C., Filiz I.H., Sonnez A.I., Baykasoglu A. and Dereli T., 1996, “OPPSROT: An Optimised Process Planning System For Rotational Parts”, Computers in Industry, vol. 32, pp.181 – 195.
- Mesquita, N.G.M., 1980, “Determinação dos Parâmetros da Fórmula de Taylor Expandida”, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, S.C., Brasil.
- N.N., 1999, “Manual de Programação e Operação CNC Mach 9 R 9001D”, São Paulo.
- Pohl, I., 1991, “C++ Para Programadores de PASCAL”, Ed. Berkeley, Rio de Janeiro, Brasil.
- Prasad, A.V.S.R.K., Rao P.N. and Rao U.R.K., 1997, “Computer Optimization of Multi-Pass Turning”, International Journal of Production Research, vol. 9, nº 2, Taylor & Francis LTD, London, England, pp. 247 – 259.
- Younis M.A. and Wahab M.A.A., 1997, “A CAPP ExpertSystem For Rotational Components”, Computers & Industrial Engineering, vol. 33, pp. 505 – 512.