

# DETERMINAÇÃO AUTOMÁTICA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM E GERAÇÃO DO PROGRAMA NC NUM SISTEMA CAD/CAPP/CAM / AUTOMATIC DETERMINATION OF MACHINING PARAMETERS AND NC PROGRAM GENERATION IN A CAD/CAPP/CAM SYSTEM

JOÃO CARLOS E. FERREIRA, CÉSAR R. K. STRADIOTTO & ADILSON U. BUTZKE  
*Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, GRIMA/GRUCON  
Caixa Postal 476, 88040-900, Florianópolis, SC - E-mail: jcf@grucon.ufsc.br*

## Abstract

Described within this paper is a technique for determining the optimum machining parameters for turned components modeled in a CAD/CAPP/CAM system. This technique considers initially the area of good chip control, given by a pair of values of feed and depth of cut, which is usually found in catalogs of tool manufacturers. Then, the restrictions for machining, such as cutting forces, clamping rigidity and spindle power are considered within the area of good chip control. The pair which leads to the minimum machining cost is selected as the optimum machining parameters. Finally, the NC program for machining the given part is generated through a commercial CAM software.

## Keywords

CAM, Parâmetros de Usinagem, Otimização, CAPP, "Features"/CAM, *Machining Parameters, Optimization, CAPP, Features*

## 1. INTRODUÇÃO

Devido à globalização do mercado, a competição entre as empresas de manufatura tem se tornado cada vez maior. O consumidor tem cada vez mais opções para a compra de um determinado produto, e alguns dos fatores fundamentais para a sua decisão são o preço, a qualidade e a confiabilidade. Como o mercado está voltado para o consumidor, as empresas têm buscado incorporar características de flexibilidade à fabricação, pois as mudanças nos produtos, e por conseguinte a variedade de peças, é muito grande.

Uma das atividades que torna-se um gargalo neste contexto é o *planejamento dos processos* ("PP"), onde são tomadas decisões sobre "como" fabricar uma peça de acordo com as especificações. Dentre as decisões tomadas no PP tem-se a seleção de máquinas, seleção das ferramentas, seleção dos dispositivos de fixação e determinação das operações. Portanto, ela é uma atividade complexa, mesmo para uma só peça, e certamente quanto maior a variedade de peças, mais complexa ela se torna. Além disso, esta atividade é feita nas empresas geralmente de forma manual, por profissionais experientes chamados *processistas*.

Tendo em vista o problema acima, os autores iniciaram o desenvolvimento de um sistema computacional de auxílio ao planejamento dos processos ("CAPP"). A abordagem deste sistema CAPP é generativa, onde o plano de processos é gerado através de um sistema especialista, cuja base de conhecimento é composta por regras que correspondem à experiência do processista. Uma descrição deste sistema CAPP é dada em Rezende (1996). O domínio escolhido para a solução deste problema foi o de peças rotacionais, escalonadas num sentido, que possam ser usinadas numa só fixação num torno CNC com alimentador de barras. Para a modelagem das peças a serem usinadas, foi desenvolvido um sistema CAD, baseado em "features", o qual é descrito em Ferreira et al. (1995).

O procedimento de obtenção do plano de processos consiste inicialmente em modelar-se no CAD a peça que se deseja fabricar, e então ela é enviada para o CAPP, e este gera o plano

de processos para a peça em poucos segundos. Entretanto, o plano de processos gerado não contém informações sobre a velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, e portanto o programa NC não pode ser gerado diretamente deste plano. Portanto, isto foi considerado uma lacuna neste sistema, e os autores passaram a desenvolver técnicas para solucionar este problema, e estas são descritas neste artigo.

Os métodos para determinar-se, através do computador, os parâmetros de usinagem para torneamento, classificam-se basicamente em três categorias: (i) *extração de dados*, onde informações contidas em catálogos de fabricantes de ferramentas são cadastradas em bancos de dados, podendo ser extraídas diretamente pelo sistema. Estes são frequentemente chamados “catálogos eletrônicos”. Eles apresentam as desvantagens da elevada quantidade de memória necessária, e de serem valores conservativos; (ii) *métodos de otimização*, onde procura-se determinar os parâmetros de forma a minimizar o custo ou o tempo de produção, sujeito às restrições ao processo. Dentre estas técnicas, inclui-se métodos baseados em programação geométrica (Gopalakrishnan e Al-Khayyal, 1991), programação dinâmica (Agapiou, 1992) e otimização referente à área de bom controle de cavaco (Chen et al., 1989); (iii) *métodos baseados em sistemas especialistas*, onde os parâmetros são determinados a partir de uma base de conhecimento contendo regras correspondentes a uma usinagem eficiente (Wang e Wysk, 1986).

O método aplicado no presente sistema é o de otimização considerando-se a área de bom controle de cavaco (gráfico *profundidade de corte* ( $a_p$ )  $\times$  *avanço* ( $f$ )). É um método cuja execução é rápida, e todas as restrições ao processo de usinagem podem ser incluídas. Nesta implementação, três possíveis valores de velocidade de corte são considerados, incluindo a máxima velocidade fornecida pelos fabricantes da ferramenta e da máquina. Com relação à força de corte, utiliza-se a equação de Kienzle (Stemmer, 1995) para relacionar a força ao avanço e à profundidade de corte.

De posse dos parâmetros de usinagem, gera-se o programa NC com o auxílio de um software CAM comercial.

## 2. ESTRUTURA BÁSICA DO SISTEMA CAD/CAPP/CAM DESENVOLVIDO

A figura 1 ilustra os principais módulos do sistema CAD/CAPP/CAM desenvolvido. Nota-se que as informações introduzidas no módulo CAM consistem das máquinas, ferramentas e dispositivos de fixação, que compõem o Banco de Dados de Manufatura. Além disso, as informações referentes à peça (“features” e seus atributos), e o plano de processos gerado pelo módulo CAPP, são enviados para o módulo CAM. Na figura 2 é ilustrada uma peça para a qual o módulo CAPP gerou o plano de processos ilustrado na figura 3.

Na figura 4 ilustram-se os sub-módulos que compõem o sistema CAM. Este sub-módulos são os seguintes: (i) otimização e (ii) geração do programa NC. Uma descrição destes módulos é dada a seguir.

## 3. O MÓDULO CAM

### 3.1. Sub-Módulo de Otimização

A técnica aplicada para a otimização das condições de usinagem consiste na determinação do par  $a_p \times f$  que resulta num mínimo custo de usinagem, considerando-se as várias restrições ao processo. Esta otimização é feita no gráfico  $a_p \times f$ , onde os fabricantes de ferramentas em geral incluem em seus catálogos a área de melhor controle de cavaco (Sandvik, 1993). Esta área tem o formato semelhante a um trapézio, e as linhas que a delimitam são restrições

referentes a um bom controle de cavaco. Outras restrições que são consideradas são as seguintes (Huang, 1988):

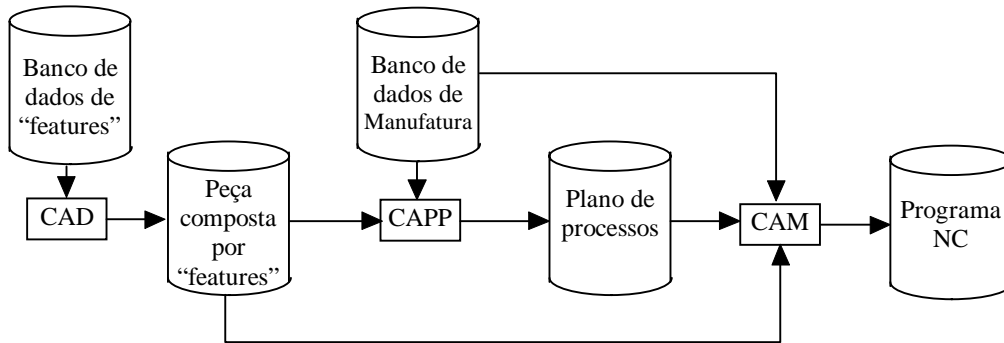


Figura 1 - Módulos do sistema CAD/CAPP/CAM.

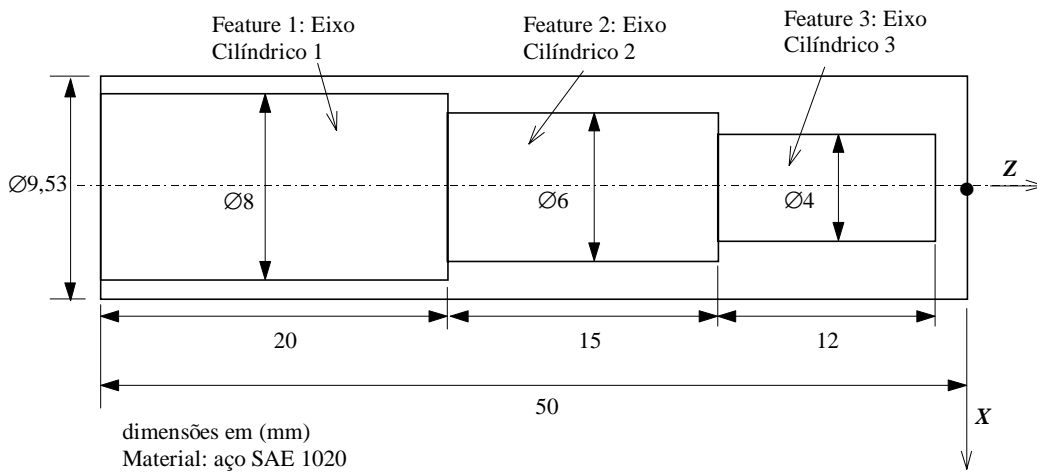


Figura 2 - Exemplo de peça rotacional.

"Feature"	Operações	Ferramenta	Máquina	Disp.Fixaçã o
Eixo Cilíndrico 3	Faceamento à direita	CNMG-120408-QM-GC415-PCLNL-2020K12	Torno CNC c/alim.barras	Pinça_9.53
	Cilindramento	CNMG-120408-QM-GC415-PCLNL-2020K12	Torno CNC c/alim.barras	Pinça_9.53
Eixo Cilíndrico 2	Cilindramento	CNMG-120408-QM-GC415-PCLNL-2020K12	Torno CNC c/alim.barras	Pinça_9.53
Eixo Cilíndrico 1	Cilindramento	CNMG-120408-QM-GC415-PCLNL-2020K12	Torno CNC c/alim.barras	Pinça_9.53
	Sangramento à esquerda	L151.2-250-08-5F-GC235-LF151.23-2020-25	Torno CNC c/alim.barras	Pinça_9.53

Figura 3 - Plano de processos para a fabricação da peça da figura 2.

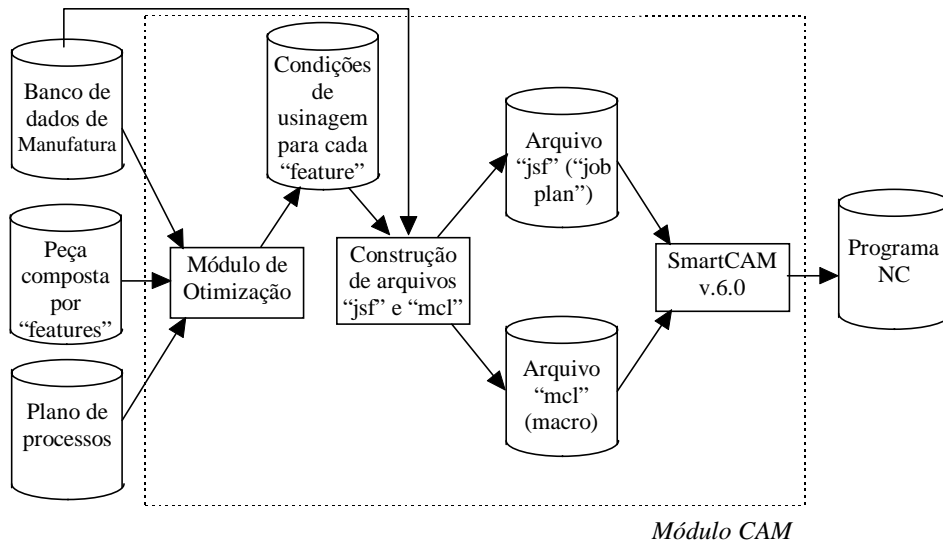


Figura 4 - Elementos que compõem o módulo CAM.

(a) Comprimento da aresta de corte (“ $l_{ac}$ ”):

$$a_{p_{max}} \leq \frac{y \cdot l_{ac}}{\text{sen} \kappa_r} \quad (1)$$

onde:  $\kappa_r$  = ângulo de posição da ferramenta (graus)

$y=0,75$  (pastilha quadrada);  $y=0,50$  (pastilha triangular);  $y=0,40$  (pastilha redonda)

(b) Raio de quina da ferramenta (“ $r_\epsilon$ ”):

$$a_{p_{min}} \geq r_\epsilon \quad (2)$$

$$f_{max} \leq 0,80 \cdot r_\epsilon \quad (3)$$

(c) Força de escorregamento axial (“ $F_{ax}$ ”)

Esta é a força aplicada pela ferramenta que provoca o escorregamento da peça em relação às castanhas/pinça, no sentido axial.

$$F_{ax} = \mu_c \cdot F_{suj} \quad (4)$$

onde:  $\mu_c$  = coeficiente de atrito estático entre o dispositivo de fixação e a peça

$F_{suj}$  = força de sujeição (N)

(d) Força de escorregamento superficial (“ $F_{es}$ ”)

Esta é a força que desloca a peça em relação às castanhas/pinça no sentido tangencial.

$$F_{es} = \mu_c \cdot F_{suj} \cdot \left( \frac{D_{fix}}{D} \right) \quad (5)$$

onde:  $D_{fix}$  = diâmetro da fixação (mm)

$D$  = diâmetro da “feature” sendo usinada (mm)

(e) Força de expulsão da peça (“ $F_{ex}$ ”)

Esta é a força que tende a lançar a peça para fora das castanhas/pinça.

$$F_{ex} = F_{suj} \cdot \left( \frac{L_p + \mu_c \cdot D_{fix}}{2\sqrt{3} \cdot L_d} \right) \quad (6)$$

onde:  $L_p$  = comprimento da peça para fora das castanhas/pinça (mm)

$L_d$  = comprimento da peça para dentro das castanhas/pinça (mm)

Para a determinação da curva correspondente à força de corte no gráfico  $a_p \times f$ , aplica-se a fórmula de Kienzle para cada uma das forças. A fórmula de Kienzle é rearranjada de forma a

obter o avanço em função da força e da profundidade de corte, e este rearranjo resulta na equação (7) (Stemmer, 1995):

$$f = (\text{sen } \kappa_r)^{\frac{m_c}{1-m_c}} \left( \frac{F}{K_{1.1} \cdot a_p} \right)^{\frac{1}{1-m_c}} \quad (7)$$

onde:  $F$  = força de corte correspondente (N), poderá corresponder a  $F_{ax}$ ,  $F_{es}$  ou  $F_{ex}$   
 $K_{1.1}$  = pressão específica de corte para uma seção de cavaco  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  ( $\text{N/mm}^2$ )  
 $m_c$  = expoente da equação de Kienzle

Os valores de  $K_{1.1}$  e  $m_c$  dependem dos materiais da peça e da ferramenta. O valor de  $K_{1.1}$  também depende da direção da força considerada. A componente da força de corte na direção tangencial é a que possui maior magnitude (i.e.  $K_{c1.1}$ ), e portanto neste trabalho considera-se para quaisquer das forças acima o valor de  $K_{1.1} = K_{c1.1}$ .

Para a execução do método de otimização, inicialmente a “feature” de fabricação mais externa é introduzida ao módulo de otimização. Por exemplo, se a operação na “feature” for torneamento cilíndrico externo (ver figura 5(a)), introduz-se o comprimento total (“ $L_f$ ”) e a profundidade no raio (“ $p_f$ ”) ao módulo de otimização.

Considera-se numa primeira tentativa que toda a “feature” será removida num só passe, isto é,  $[a_p]_1 = p_f$ . Isto corresponde à linha horizontal na parte superior do gráfico da figura 5(b).

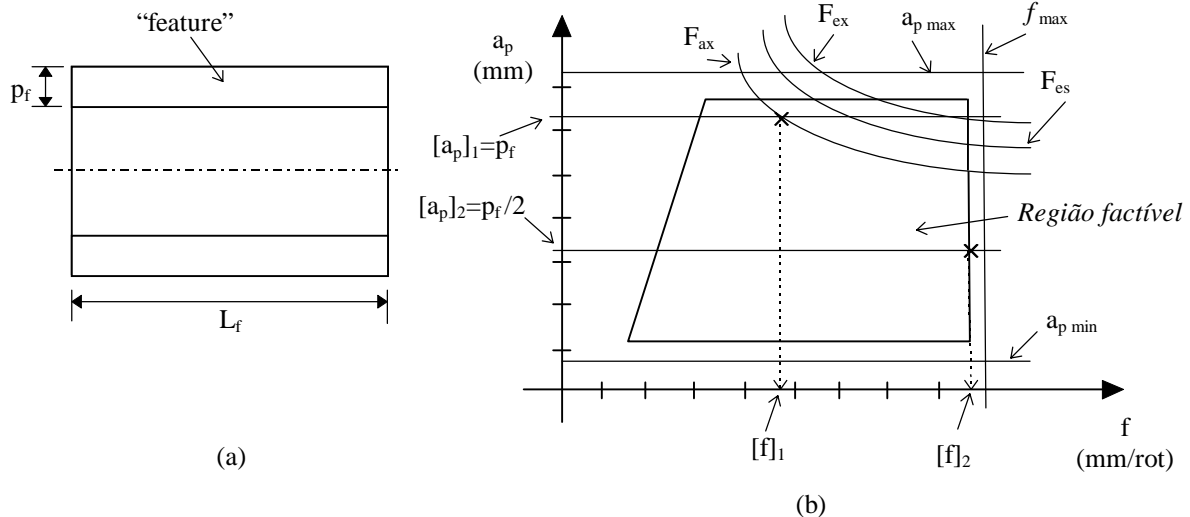


Figura 5 - Descrição da determinação do par  $a_p \times f$  para uma “feature”, levando-se em conta as restrições de usinagem.

Para este valor de profundidade de corte, obtém-se o avanço máximo possível intersectando-se esta linha com as restrições ao processo de usinagem, obtendo-se neste caso o avanço  $[f]_1$ . Para este par, calcula-se o custo de produção através das seguintes equações:

$$C = C_{utm} \cdot t_u \cdot \left( 1 + \frac{t_{tf}}{T_o} \right) + C_{fac} \cdot \left( \frac{t_u}{T_o} \right) \quad (8)$$

onde:  $C$  = custo do processo (\$)  
 $C_{utm}$  = custo médio de utilização da máquina (\$/min)  
 $t_u$  = tempo de usinagem (min)  
 $t_{tf}$  = tempo de troca de ferramenta (min)  
 $C_{fac}$  = custo da ferramenta por aresta de corte (\$)

$T_o$  = tempo de vida ótimo da ferramenta, que poderá corresponder a um mínimo custo ou a uma máxima produção (min)

$$T_{o \text{ min custo}} = \left( -\frac{1}{E_v} - 1 \right) \cdot \left( t_{tf} + \frac{C_{fac}}{C_{utm}} \right) \quad (9)$$

onde:  $E_v$  = expoente da velocidade de corte na equação de Taylor expandida.

$$T_{o \text{ max producao}} = \left( -\frac{1}{E_v} - 1 \right) \cdot (t_{tf}) \quad (10)$$

A equação de Taylor expandida é dada por:

$$T = C_t \cdot f^{E_f} \cdot a_p^{E_a} \cdot V_c^{E_v} \cdot VB^{E_B} \quad (11)$$

onde:  $T$  = tempo de vida da ferramenta (min)

$C_t$  = constante

$VB$  = desgaste do flanco da ferramenta (mm)

$E_n$  = expoente referente a cada fator que influencia a vida da ferramenta, onde “n” pode corresponder ao avanço, à profundidade, à velocidade e ao desgaste de flanco.

Uma vez calculado o custo para o par  $a_p X f$ , incrementa-se o  $n^o$  de passes de 1, determina-se o avanço correspondente, e para este novo par calcula-se o custo. Caso o novo custo seja menor, este passa a ser o par ótimo, e o  $n^o$  de passes é incrementado novamente, e um novo cálculo é efetuado. Caso contrário, termina-se as iterações para aquela “feature”, e então inicia-se a otimização para a próxima “feature”.

Para determinar-se a velocidade de corte a ser utilizada, seleciona-se o menor dentre os três valores de velocidade seguintes:

- (i) velocidade máxima permitida pela máquina, obtida do fabricante da máquina
- (ii) velocidade máxima permitida para a ferramenta, obtida do catálogo do fabricante da ferramenta
- (iii) velocidade calculada pela equação de Taylor expandida (eq. (11)).

### 3.2. Geração do programa NC

De posse dos parâmetros de usinagem, passa-se então para a geração do programa NC. Optou-se pela utilização de um software comercial (SmartCAM v6.0), que contém os seguintes módulos, dentre outros (Point Control, 1992): geração da trajetória da ferramenta, simulação gráfica da trajetória da ferramenta na tela do computador, e geração do programa NC para o comando da máquina desejada

Para gerar-se a trajetória da ferramenta no SmartCAM, procurou-se reduzir ao mínimo a quantidade de intervenções do usuário na entrada de dados para aquele software. Para isto, desenvolveu-se programas na linguagem C que geram os seguintes arquivos, que são lidos pelo SmartCAM: (i) o “job plan”, que contém informações sobre as operações a serem executadas, as especificações das ferramentas a serem utilizadas, as velocidades de corte e os avanços.; (ii) o arquivo “macro”, que contém as informações sobre a matéria-prima, o perfil da peça, as ferramentas e o número de passes.

Estes dois arquivos são introduzidos no SmartCAM, e as trajetórias das ferramentas são geradas automaticamente, e também o programa NC.

### 4. EXEMPLO

Para a peça ilustrada na figura 2, foi feita a otimização dos parâmetros de usinagem e a geração do programa NC, e os resultados obtidos estão ilustrados na Tabela 1. Os valores dos parâmetros para a execução da otimização são ilustrados na figura 6. O programa NC gerado para a usinagem desta peça está ilustrado na figura 7.

Tabela 1: Parâmetros de usinagem resultantes da otimização.

Operação	Cilindramento	Cilindramento	Cilindramento	Faceamento	Sangramento
Ferramenta	CNMG-120408-QM-GC415	CNMG-120408-QM-GC415	CNMG-120408-QM-GC415	CNMG-120408-QM-GC415	L151.2-250-08-5F-GC235
$a_p$ ótima (mm)	0,765	1,0	1,0	3,0	2,0
$n^o$ de passes	1	1	1	1	1
$f$ ótimo (mm/rot)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,205
sentido do avanço	esquerda	esquerda	esquerda	radial p/ dentro	radial p/ dentro
$V_c$ ótima (m/min)	119,8	100,5	75,4	50,3	119,8
$\varnothing$ inicial (mm)	9,53	8,0	6,0	4,0	9,53
$\varnothing$ final (mm)	8,0	6,0	4,0	0,0	-0,1
Rotação (rpm)	4000	4000	4000	4000	4000
Pos. Z inicial (mm)	0,0	0,0	0,0	-3,0	-52,0
Pos. Z final (mm)	-50,0	-30,0	-15,0	-3,0	-52,0
Força limitante (N)	757,2 ( $F_{es}$ )	757,2 ( $F_{es}$ )	757,2 ( $F_{es}$ )	880,0 ( $F_{ax}$ )	880,0 ( $F_{ax}$ )
Pot. de acion. (kW)	2,02	1,69	1,27	0,98	2,34
$t_u$ (minutos)	0,0200	0,0090	0,0030	0,0018	0,0270
C (\$)	0,124	0,056	0,019	0,011	0,312

$K_{c1.1}=180 \text{ N/mm}^2$ ;  $(1-m_c)=0,23$ ;  $\mu_c=0,11$ ;  $C_t = 550$ ;  $E_f=-0,112$ ;  $E_a=-0,09$ ;  $E_v=-0,132$ ;  $E_B=0,012$ ;  $VB=0,7\text{mm}$ ;  $C_{fac}=\$ 5,7$ ;  $F_{suj}=8000 \text{ N}$ ;  $t_{if}=0,05 \text{ min}$ ;  $C_{utm}=1,5 \text{ \$/min}$ ; Potência da máquina=10,0 kW; Rotação máxima=4000 rpm

Figura 6 - Alguns valores dos parâmetros do problema.

%	N180 X6.0	N270 M08
N100 G90	N185 G01 Z-30.0 F0.6	N275 G00 X4.0 Z0.1 T104104
N105 G00 X9.73 Z0.1	N190 G00 X10.4 Z-28.2	N280 Z-2.7
N110 T101000 M06	N195 X8.0 Z0.1	N285 G01 X0.0 F0.6
N115 G96 S4	N205 T103000 M06	N290 G00 X7.2 Z2.9
N120 M03	N210 G96 S4	N295 X4.0 Z0.1
N125 M08	N215 M03	N300 G00 X9.73 Z0.1
N130 G00 X9.73 Z0.1 T101101	N220 M08	N305 T105000 M06
N135 X8.0	N225 G00 X6.0 Z0.1 T103103	N310 G96 S4
N140 G01 Z-50.0 F0.6	N230 X4.0	N315 M03
N145 G00 X9.73 Z0.1	N235 G01 Z-15.0 F0.6	N320 M08
N150 G00 X8.0 Z0.1	N240 G00 X8.0 Z-13.2	N325 G00 X9.53 Z-51.9 T105105
N155 T102000 M06	N245 X6.0 Z0.1	N330 G01 X-0.1 F0.205
N160 G96 S4	N255 T104000 M06	N335 G00 X9.53
N165 M03	N260 G96 S4	N340 G00 X9.73 Z0.1 T0000 M09
N170 M08	N265 M03	N345 M02
N175 G00 X8.0 Z0.1 T102102		%

Figura 7 - Programa NC gerado.

## 5. CONCLUSÕES

Trabalhos de pesquisa na área de otimização de parâmetros de usinagem são de extrema importância, pois pode-se adaptar os resultados recomendados por fabricantes às condições específicas da empresa de manufatura, podendo-se obter avanços e profundidades maiores do que os recomendados, mas mesmo assim produzindo peças de acordo com as especificações, neste caso então aumentando-se a produtividade.

Com relação aos resultados obtidos, percebe-se que não foi utilizada toda a potência disponível na máquina, apesar de ter-se atingido a sua máxima rotação. Contribuiu para isto os pequenos diâmetros da peça exemplo, e também o fato de que a abordagem apresentada não considerar diretamente no gráfico  $a_p \times f$  as limitações de potência e rotação da máquina. Pretende-se fazer esta consideração em futuros trabalhos.

A presente versão do módulo CAM não inclui a execução de furos no torno, que envolve outras geometrias de ferramentas e equações, o que será desenvolvido em futuros trabalhos.

A utilização do software SmartCAM facilitou a geração das trajetórias e do programa NC, mas o usuário na presente versão precisa sair do sistema CAD/CAPP/CAM, e depois executar o SmartCAM, o qual lê os arquivos “jsf” e “mcl”. Apesar deste procedimento ser considerado satisfatório, seria melhor e mais rápido se o usuário tivesse como opção dentro do ambiente do sistema CAD/CAPP/CAM a geração dos parâmetros de usinagem e do programa NC, isto é, o SmartCAM ou qualquer outro software comercial de CAM deveria ficar transparente para o usuário.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

## 7. REFERÊNCIAS

- AGAPIOU, J.S. The Optimization of Machining Operations Based on a Combined Criterion, Part 2: Multipass Operations, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, vol. 114, pp. 508-513, novembro 1992.
- CHEN, S.J., HINDUJA, S. & BARROW, G. Automatic Tool Selection for Rough Turning Operations, *International Journal of Machine Tools and Manuf.*, vol. 29, nº 4, pp. 535-553, 1989.
- FERREIRA, J.C.E., BUTZKE, A. & FURLAN NETO, F. Um Sistema de Projeto de Peças Usinadas Baseado em “Features” Aplicado à Realidade Industrial, *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*, vol. 17, nº 2, pp. 209-218, 1995.
- GOPALAKRISHNAN, B. & AL-KHAYYAL, F. Machine Parameter Selection for Turning with Constraints: an Analytical Approach Based on Geometric Programming, *International Journal of Production Research*, vol. 29, nº 9, pp. 1897-1908, 1991.
- HUANG, H. *A Generative Process Planning System for Turned Components*, Tese de Doutorado, UMIST, Manchester, Inglaterra, 1988.
- POINT CONTROL *SmartCAM CNC Process Modeling: Turning User Manual*, EUA, outubro 1992.
- REZENDE, D.F. *Planejamento de Processos de Fabricação Assistido por Computador Através de um Sistema Especialista Baseado na Tecnologia de “Features”: um Modelo de Desenvolvimento Voltado para a Realidade Industrial*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, setembro 1996.
- SANDVIK *Herramientas de Tornear*, Catálogo Anual, 1993.
- STEMMER, C.E. *Ferramentas de Corte I*, 4ª edição, Editora da UFSC, Florianópolis, 1995.
- WANG, H.-P. & WYSK, R. An Expert System for Machining Data Selection, *Comput. & Indust. Engineering*, vol. 10, nº 2, pp. 99-107, 1986.