

APLICATIVO COMPUTACIONAL DE OTIMIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE PARÂMETROS DE USINAGEM

Marco Aurélio da Fontoura Gonçalves, marcoctism@gmail.com¹

Flavio José Lorini, lorini@mecanica.ufrgs.br²

Moacir Eckhardt, moacir@ctism.ufsm.br¹

¹Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Laboratório de Tecnologias CAX, Santa Maria/RS

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Laboratório de Automação, Porto Alegre/RS

Resumo: Este trabalho tem como objetivo analisar os resultados obtidos com um algoritmo computacional de otimização de parâmetros de corte denominado de MOPC. O sistema utiliza a equação de Taylor reduzida para relacionar a influência das condições de usinagem sobre o tempo de vida e o desgaste da ferramenta. O aplicativo possui uma técnica para filtrar parâmetros de usinagem, que possibilita variadas combinações de condições de corte. Técnicas descritas em trabalhos científicos já publicados são comparadas com simulações utilizando a metodologia proposta. Os resultados foram analisados com o objetivo de demonstrar a viabilidade em processos produtivos, onde a variação e a quantidade de informações necessárias para se obter uma boa precisão na identificação dos parâmetros do modelo são facilmente atingidas.

Palavras-chave: Velocidade de corte, otimização parâmetros corte, usinagem, Equação Taylor

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de sistemas computacionais como ferramenta de apoio a processos produtivos tem se mostrado indispensável para aumentar a qualidade e a produtividade. A fabricação assistida por computador CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) envolve técnicas para apoiar e integrar as etapas do projeto, planejamento de processos, controle de produção, garantia de qualidade e programação de máquinas CNC (*Computer Numeric Control*).

Otimizar condições de corte para processos de fabricação por usinagem tem papel de importância nesta cadeia. Embora pesquisas nesta área já tenham atingido um bom nível de desenvolvimento, nem sempre estes resultados são empregados em ambiente industrial. A dificuldade em determinar valores ótimos das condições de corte, limita-se a utilização de valores recomendados e adaptados aos processos em que serão aplicados e que raramente são melhorados pela realização de ensaios prévios de usinabilidade ou por consideração de critérios de otimização. O conhecimento e a experiência acumulada sobre o processo e suas restrições permanecem, entretanto como fatores decisivos nesta tarefa (Groover, 2011).

Davim (2008) explica que o grande número de variáveis envolvidas na usinagem torna complexo o equacionamento da influência das condições de corte tais como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte sobre as variáveis de estado do processo como vida da ferramenta, forças, forma de cavaco e acabamento.

A literatura mostra que equações básicas relacionadas à economia em usinagem permitem calcular quantitativamente custos e tempos de produção para operações de usinagem. A velocidade de corte pode ser otimizada considerando, máxima produção ou mínimo custo (Diniz *et al.*, 2000; Ferraresi, 1982; Machado *et al.*, 2009).

Este trabalho contém os resultados analíticos da utilização de um aplicativo computacional de otimização automática de parâmetros de usinagem (Gonçalves *et al.*, 2011; Gonçalves *et al.*, 2012). Este aplicativo tem como característica reunir em um banco de dados informações de condições de usinagem adotadas em um sistema produtivo específico com os respectivos resultados. Com o objetivo de analisar o algoritmo, sistemas produtivos são simulados neste trabalho através de dados obtidos em publicações científicas que utilizam diferentes metodologias para modelamento do processo através da equação de Taylor. Na análise dos dados também é avaliada a aplicação do filtro do sistema computacional que possibilita selecionar condições de usinagem para processamento.

2. METODOLOGIA

A velocidade de corte é o parâmetro de maior influência no desgaste em uma ferramenta de corte de usinagem. A curva da vida da ferramenta define-se como sendo o gráfico de tempo de vida (T) em função da velocidade de corte (v_c). Foi primeiramente proposta por F.W.Taylor que observou que o tempo de vida da ferramenta de corte em usinagem

mantém relação direta com a velocidade de corte. A obtenção dessa relação é experimental e depende do par ferramenta-peça com valores fixos de avanço e de profundidade de usinagem (Machado *et al.*, 2009). Se a curva de vida for colocada em um gráfico bilogarítmico, terá uma representação próxima da linear, o que indica uma relação exponencial entre T e v_c . Taylor adotou a equação que atualmente leva seu nome, Eq. (1).

$$T = K \cdot v_c^{-x} \quad (1)$$

Onde:

v_c = velocidade de corte (m/min);

T = tempo de vida da ferramenta (min);

K, x = coeficientes da equação.

Embora a velocidade de corte seja fator preponderante para a vida de uma aresta de corte, investigações são constantes da influência do avanço e da profundidade na usinagem. Assim, a equação de Taylor expandida é mostrada na Eq. (2).

$$v_c^x \cdot f^y \cdot a_p^z \cdot T = Q \quad (2)$$

Onde:

x, y, z, Q = coeficientes da equação;

v_c = velocidade de corte (m/min);

T = tempo de vida da ferramenta (min);

a_p = profundidade de corte (mm);

f = avanço (mm/rot).

Considerando a influência de vários fatores na vida da ferramenta, o sistema utiliza uma equação, orientada para a prática, generalizando a equação de Taylor para torneamento Eq. (3) (Stemmer, 2007; Dos Santos *et al.*, 1999).

$$v_c = C_e \cdot T^G \cdot f^E \cdot a_p^F \cdot V_B^H \quad (3)$$

Onde:

v_c = velocidade de corte (m/min);

T = tempo de vida da ferramenta (min);

f = avanço (mm/rot);

a_p = profundidade corte (mm);

V_B = largura média da marca de desgaste (mm);

E, F, G, H = expoentes determinados experimentalmente.

Considerando como constantes os parâmetros f, a_p e V_B em um determinado processo, conforme a Eq. (4), obtém-se a equação reduzida de Taylor Eq. (5). Aplicada na base de cálculo do sistema analisado (Stemmer, 2007).

$$C = C_e \cdot f^E \cdot a_p^F \cdot V_B^H \quad (4)$$

$$v_c = C \cdot T^G \quad (5)$$

Onde:

$$C = K^{-1/-x}$$

$$G = 1/-x$$

O processamento de dados no sistema em análise é inicializado pela especificação do material da ferramenta e da peça usinada. Para cada combinação ferramenta/peça, os parâmetros de usinagem cadastrados são: Velocidade de corte (v_c), Profundidade de corte (a_p) e Avanço (f). O tempo de vida da ferramenta (T) resultante dessas condições completam os dados de entrada. O algoritmo também está configurado para cadastrar os dados complementares: tipo de máquina, critério de fim de vida da ferramenta - largura média da marca de desgaste de flanco (V_B), codificação da geometria da ferramenta, rugosidade média obtida (R_a), força de corte (F_c) e força avanço (F_f).

Considerando que o aplicativo tem como modelamento do processo de usinagem a equação reduzida de Taylor, as informações mínimas cadastradas são a velocidade de corte e a vida correspondente. A profundidade de corte, o avanço e os dados complementares, são restrições a serem manipuladas para selecionar os dados para processamento. Dessa forma, o algoritmo se caracteriza pela capacidade de oferecer ao usuário a possibilidade de filtrar as informações do banco de dados, de acordo com os itens que julgar de interesse. O sistema processa somente as ocorrências que cumprem as condições especificadas e retorna como saída os valores de velocidade de corte e vida da ferramenta correspondente. As condições de entrada selecionadas influenciam a precisão no cálculo das constantes C e G da equação reduzida de Taylor.

Os valores são logaritmados para realizar uma linearização dos dados com o método de mínimos quadrados, e plotados em um gráfico bilogarítmico de $\log(v_c)$ por $\log(T)$, originando a equação da reta, em que seus coeficientes serão as constantes da equação reduzida de Taylor. No ajuste linear pelo método dos mínimos quadrados, quando o erro nos dados “y” seja substancialmente maior que os dados em “x”, o método da regressão linear possibilita calcular a linha $y(x) = a \cdot x + b$ que minimiza os erros quadráticos entre o valor ajustado e os valores experimentais.

Com o objetivo de dar uma orientação sobre a dispersão dos dados em relação à reta ajustada, o sistema indica o coeficiente de correlação r^2 , Eq. (6), que dá uma indicação da precisão do alinhamento dos pontos no gráfico $\log(v_c)$ por $\log(T)$ (quanto mais próximo de 1 o valor de r^2 , melhor o ajuste).

$$r^2 = a \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2} \quad (6)$$

Com as constantes da equação de Taylor calculadas, o algoritmo usa equações básicas da economia em usinagem, que permite calcular quantitativamente custos e tempos de produção para operações de usinagem. As Equações (7) e (8) representam respectivamente a velocidade de corte e a vida da ferramenta para máxima produção e mínimo custo (Stemmer, 2007).

$$v_{otm,p} = \left\{ - \left(1 + \frac{1}{G} \right) \cdot \frac{tc}{C^{-1/G}} \right\}^G ; v_{otm,c} = \left\{ - \left(1 + \frac{1}{G} \right) \cdot \frac{\left(tc + \frac{C_t}{C_m} \right)}{C^{-1/G}} \right\}^G \quad (7)$$

$$T_{otm,p} = - \left(1 + \frac{1}{G} \right) \cdot tc ; T_{otm,c} = - \left(1 + \frac{1}{G} \right) \cdot \left(tc + \frac{C_t}{C_m} \right) \quad (8)$$

Onde:

G, C = coeficientes da equação de Taylor;

tc = tempo de troca da ferramenta;

Ct = custo por gume;

Cm = custo de utilização da máquina-ferramenta.

A Figura 1 mostra o fluxograma do algoritmo que possibilita ilustrar a lógica empregada no aplicativo.

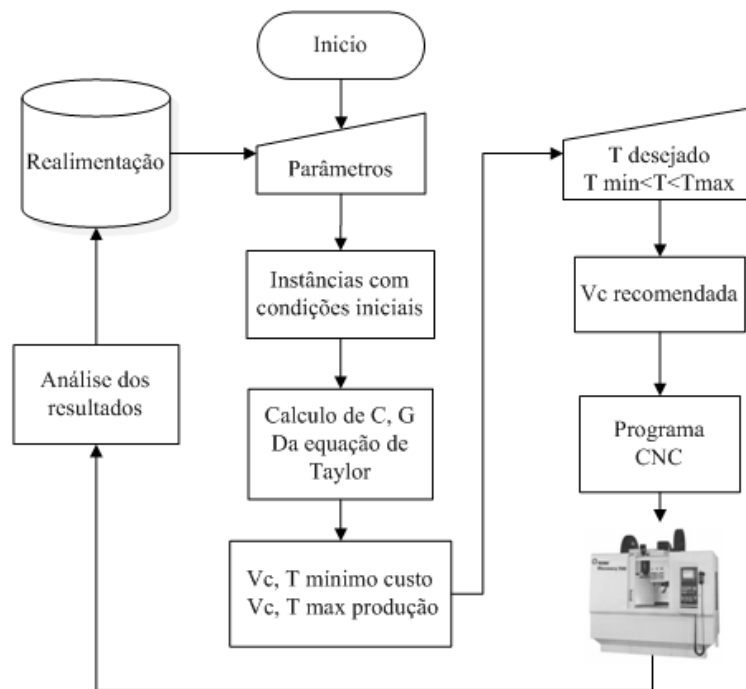


Figura 1. Fluxograma da otimização de dados.

O aplicativo computacional foi desenvolvido no software Delphi7 utilizando o banco de dados FireBird. A Figura 2 mostra o conjunto de interfaces de configuração e cadastramento dos itens básicos no sistema, ancoradas no formulário principal.

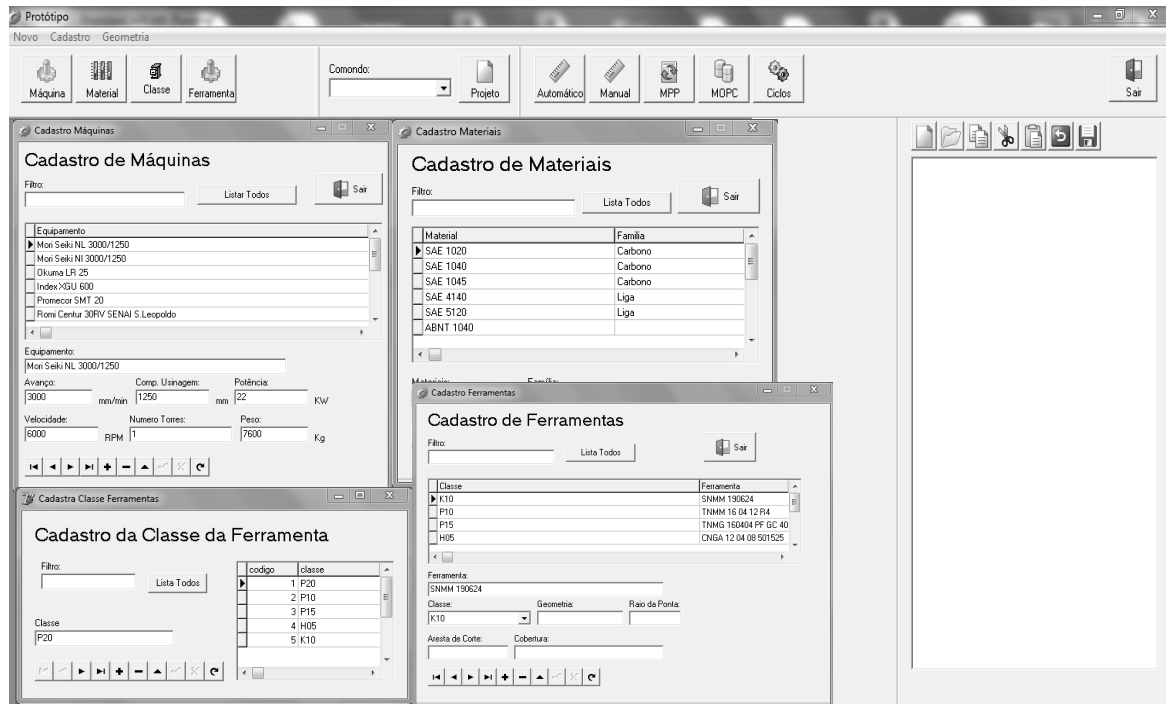


Figura 2. Interface de configuração do MOPC.

A Figura 3 mostra a interface do aplicativo com os campos de cadastro dos dados de corte e a grade de visualização das informações gravadas no sistema, onde o registro dos campos referente à velocidade de corte e vida da ferramenta são obrigatórios. Os restantes dos dados são complementares e servem para definir os critérios do filtro.

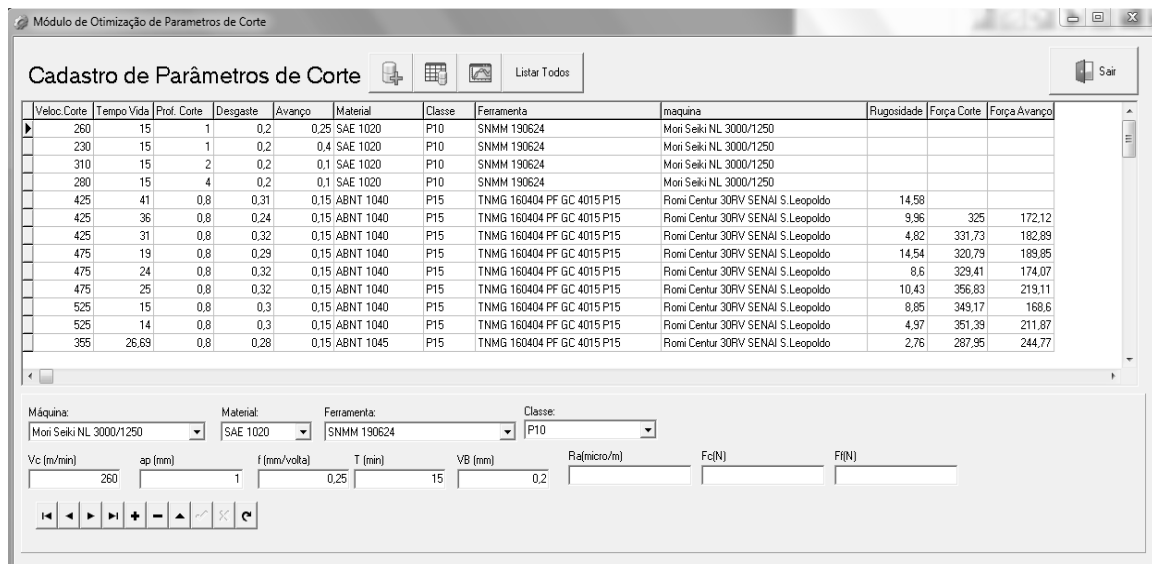


Figura 3. Interface para inserir parâmetros de usinagem no sistema.

A interface de filtro do aplicativo permite determinar margens de valores para os parâmetros selecionados como mostrado na Fig. 4. A classe da ferramenta e material da peça a ser usinado são dados iniciais de processamento e os parâmetros na caixa de filtro ficam a critério do usuário. Com esta interface é possível montar várias combinações de condições de usinagem para estudos.

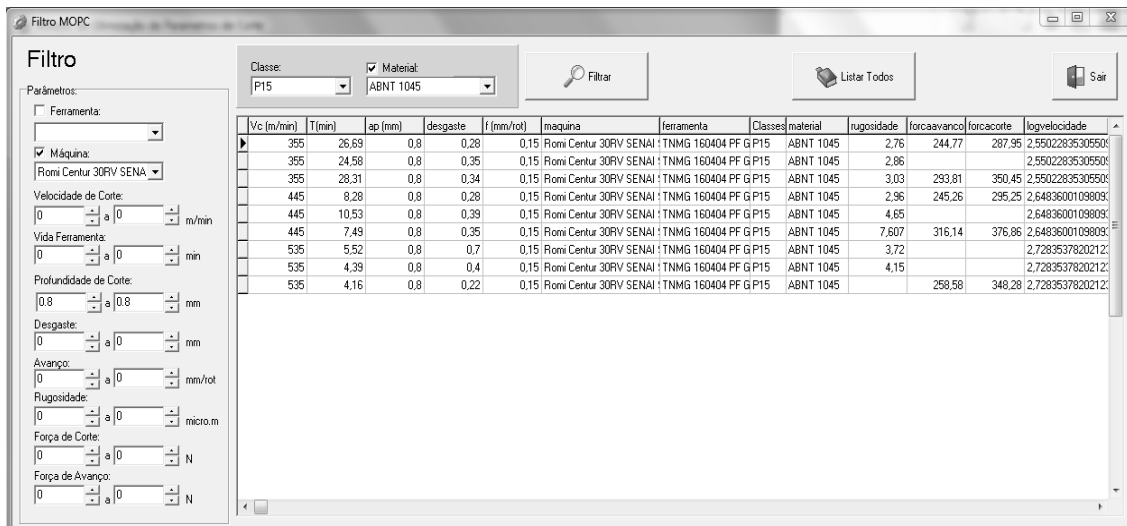


Figura 4. Interface para filtro de parâmetros de usinagem no sistema.

Com os valores de velocidade de corte e vida da ferramenta correspondente extraídos dos dados do banco de dados, considerando os parâmetros escolhidos na filtragem, a interface de otimização calcula as constantes da equação de Taylor, fornecendo os Intervalos de Máxima Eficiência e permite calcular a vida da ferramenta para uma velocidade de corte específica, e vice-versa. A Figura 5 mostra a interface de otimização.

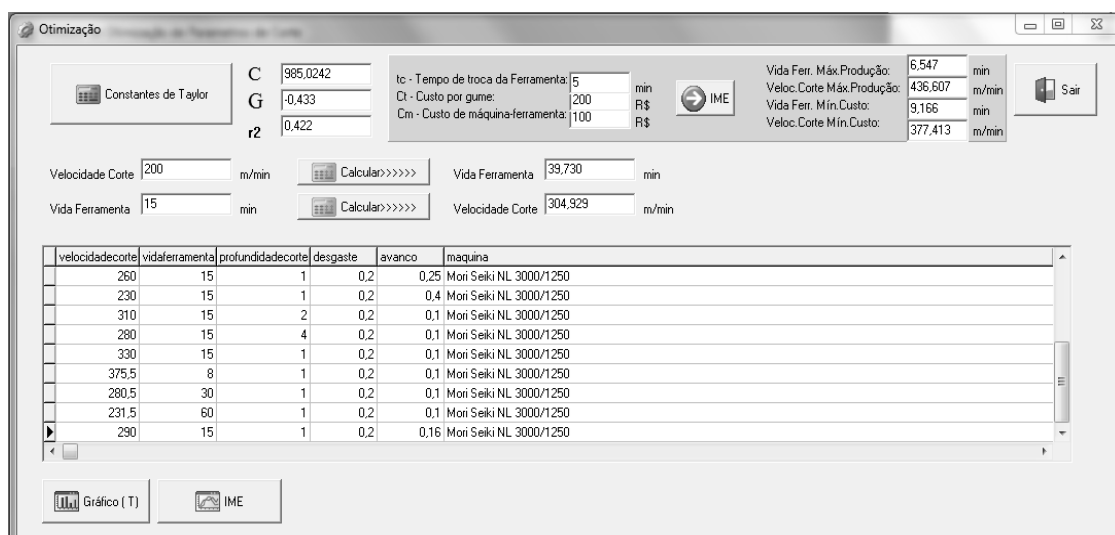


Figura 5. Interface de otimização do sistema.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo é realizado um estudo comparativo entre os resultados obtidos através do sistema computacional proposto, com os obtidos em trabalhos científicos que utilizam técnicas alternativas no cálculo das constantes de Taylor e/ou tempo de vida da ferramenta.

3.1. Estudos relacionados no cálculo do banco de dados CINFUS

As numerosas variáveis que envolvem os processos de usinagem podem levar a resultados diversificados. Além da possibilidade da especificação de condições de usinagem através da orientação em catálogos de fabricantes de ferramentas, também é recomendado recorrer a bancos de dados de usinagem, como METCUT (*Machining Data Handbook - Metcut Research Associates Inc.*) nos Estados Unidos, da SANDVIK na Suécia, INFOS da Sociedade EXAPT na Alemanha (Stemmer, 2007). Banco de dados análogo para as condições brasileiras foi desenvolvido por Boehs (1988), no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Este banco, denominado CINFUS, baseia-se na equação generalizada de Taylor. A Tabela 1, adaptada de Stemmer (2007), mostra dados de usinagem, obtidos no CINFUS, para o material ABNT (FC_100), ferramenta de código ISO SNUN120408 e classe K10. Os coeficientes para a Eq. (4) indicados para estas condições são $C_e = 529,10$; $G = -0,199$; $E = -0,181$; $F = -0,144$; $H = 0,299$.

Tabela 1 Cálculo do tempo de vida da ferramenta para dados do CINFUS.

v_c (m/min)	a_p (mm)	f (mm)	VB (mm)	T (min)	T Calculado (min)
250,0	1	0,25	0,3	20	25,01151694
236,5	2	0,25	0,3	20	20,01978228
223,1	3	0,25	0,3	20	20,01386081
214,1	4	0,25	0,3	20	19,98880261
207,3	5	0,25	0,3	20	20,00322232
201,9	6	0,25	0,3	20	20,01731900
197,5	7	0,25	0,3	20	20,00085354
193,7	8	0,25	0,3	20	20,02091404

Foi calculado o tempo de vida da ferramenta da Tab. 1 utilizando a Eq. (4) sendo os seus resultados adicionados na última coluna. Verifica-se que somente para a primeira linha os valores dos tempos de vida da ferramenta são significativamente diferente. Nos demais itens, o resultado valida as constantes indicadas para a equação de Taylor pelo sistema CINFUS.

O valor de “C” usado na Eq. (3) que é base de cálculo do MOPC é extraído da Eq. (4) quando se estabelece como constantes os demais termos, como mostra a Eq. (9).

$$C = C_e \cdot f^E \cdot a_p^F \cdot VB^H \quad (9)$$

A Figura 6 mostra a interface de filtro dos dados do módulo MOPC, onde estão selecionados os parâmetros para extrair os dados do banco CINFUS. A profundidade de corte está configurada para filtrar de 2 a 8 mm, eliminando a primeira linha que contém resultado significativamente diferente para a vida da ferramenta.

Figura 6. Interface com filtro de dados CINFUS.

A Figura 7 mostra a interface de otimização de dados do módulo MOPC, com os valores calculados de “C” e “G”, coeficientes de Taylor da Eq. (3).

Figura 7. Cálculo dos coeficientes “C” e “G” de Taylor.

A Tabela 2 mostra um comparativo dos resultados.

Tabela 2. Resultados obtidos pelo CINFUS e MOPC.

Constantes da Equação de Taylor	Resultados
Valor da constante "Ce" calculado pelo CINFUS =	529,1
Aplicando a Eq. (13) para determinar "C" =	388,574
Valor calculado para "C" pelo MOPC =	388,573
Valor da constante "G" calculado pelo CINFUS =	-0,199
Valor calculado para "G" pelo MOPC =	-0,199

Os valores calculados pelos dois sistemas geram valores praticamente iguais, mostrando que as metodologias de cálculo estão corretas, dando validação aos resultados do módulo MOPC.

A interface de filtro faz com que o sistema tenha recursos de simulação como uma ferramenta diferenciada. Como exemplo pode-se ter mais dados de $a_p = 4$ mm, mas com f diferente de 0,25, mas como experimento poder-se-ia fazer novo filtro sem fixar valor para profundidade de corte. Os valores das constantes seriam diferentes e poderíamos estabelecer os limites de influência destes parâmetros no projeto estudado.

3.2. Estudos relacionados ao cálculo do tempo de vida da ferramenta

Pereira (2006) determinou modelos de cálculo do tempo de vida de ferramenta no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta (DOE), que é um conjunto de técnicas estatísticas que permite a análise de vários fatores de influência de um processo de maneira simultânea. Modelos de cálculos semelhantes foram utilizados por Sahin (2009), para a comparação da vida útil da ferramenta de CBN (*Cubic Boron Nitride*) e de Cerâmica, e Asilturk *et al.* (2011) para determinar o efeito de parâmetros de corte sobre a rugosidade de superfície dura no torneamento usando o método Taguchi.

Os ensaios de Pereira (2004) foram realizados em um Torno CNC Nardini Logic 175, empregando insertos intercambiáveis de cerâmica mista (Sandvik) recoberta com uma camada de Nitreto de Titânio (TiN), com geometria ISO CNGA120408 S01525, chanfrado para evitar grandes choques e quebra de ferramenta, classe H05. Foi adotado como critério de fim de vida da ferramenta, o desgaste de flanco VB = 0,3 mm.

Através da elaboração de um arranjo fatorial completo com quatro center points foi realizada a análise dos dados obtidos experimentalmente mostrados na Tab. 3, adaptada de Pereira (2006). Nestes ensaios foram alternados os parâmetros de usinagem, com velocidade de corte (v_c) entre os níveis 200 m/min e 240 m/min, avanço de usinagem (f) entre os níveis 0,05 mm/rot e 0,10 mm/rot e profundidade de usinagem (a_p) entre os níveis 0,15 mm e 0,30 mm.

Tabela 3. Dados experimentais.

v_c (m/min)	200	240	200	240	200	240	200	240	200	240	200	240	200	240	200	240
f (mm/rot)	0,05	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05	0,1	0,1
a_p (mm)	0,15	0,15	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,15	0,15	0,15	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
T (min)	15,8	10,9	9,2	8,5	12,4	7,2	7,9	6,8	17,7	12,1	10,5	8,5	10,6	7,7	8,5	5,7

A Equação (10) mostra a formulação obtida pelo modelo estatístico DOE para previsão da vida da ferramenta, a partir do modelo quadrático completo gerado pelo *Central Composite Design*. Substituindo os valores para a condição de ótimo, $v_c = 200$ m/min, $f = 0,05$ mm/rot e $a_p = 0,15$ mm (Tab. 3), que permitem que seja alcançada uma maior vida da ferramenta $T = 17,7$ min, obtém-se uma estimativa experimental (Pereira, 2004).

$$T = 115,1474 - 0,4687 \cdot v_c - 862,7411 \cdot f - 94,3462 \cdot a_p + 0,0006 \cdot v_c^2 + 2392,1875 \cdot f^2 + 77,2368 \cdot a_p^2 + 1,5 \cdot v_c \cdot f + 0,05 \cdot v_c \cdot a_p + 360 \cdot f \cdot a_p \quad (10)$$

Substituindo os valores por ótimos (Tab. 3), $v_c = 200$ m/min, $f = 0,05$ mm/rot e $a_p = 0,15$ mm, obtém-se:

$$T = 15,3671 \text{ min}$$

A Figura 8 mostra a interface de filtro dos dados do módulo MOPC, onde estão selecionados os parâmetros para extrair dados conforme experimento, fixando $a_p = 0,15$ mm e $f = 0,05$ mm/rot.

Figura 8. Filtro das condições de corte.

Com as condições de corte estabelecida no filtro é realizado o cálculo das constantes da equação de Taylor possibilitando a entrada específica da velocidade de corte de 200 m/min, tendo como resultado o tempo de vida estimado para a ferramenta de 16,738 min, como apresentado na interface da Fig. 9.

Figura 9. Interface de otimização com resultados.

A Tabela 4 compara o resultado do método proposto, com valores para a condição de ótimo, ou seja, os níveis inferiores dos fatores v_c , f e a_p que permitem que seja alcançada uma estimativa experimental para maior vida da ferramenta (Pereira, 2006), com valores obtidos pelo MOPC para as mesmas condições de corte. Combinações de restrições na profundidade e velocidade de corte são realizadas através do recurso de filtragem do banco de dados.

Tabela 4. Comparativo dos resultados.

Valor Experimental	Método DOE	MOPC
$v_c=200, f=0,05, a_p=0,15$	$v_c=200, f=0,05, a_p=0,15$	$v_c=200, f=0,05, a_p=0,15$
$T = 17,7 \text{ min}$	$T = 15,4 \text{ min}$	$T = 16,7 \text{ min}$

Os resultados mostram uma aproximação dos resultados obtidos por Pereira (2006) e o sistema computacional MOPC. Mesmo sendo uma aproximação estatística do tempo de vida da ferramenta para os dados experimentais apresentados, foi validado pela metodologia do sistema MOPC.

3.3. Estudos relacionados ao cálculo das constantes da equação de Taylor

Dos Santos *et al.* (1999) utiliza projeto experimental para calcular os coeficientes da equação de Taylor expandida para usinagem. Utilizou um critério ideal experimental para identificação de parâmetros de usinagem de modelos não lineares de sistemas dinâmicos, baseada na minimização da razão entre máximos e mínimos valores singulares da matriz de sensibilidade (Duarte, 1993). Esta técnica permite calcular o melhor conjunto de parâmetros de usinagem (velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade do corte) a ser utilizada para estimar os coeficientes da equação de Taylor.

Logaritmos devem ser tomados em ambos os lados da Eq. (11), a fim de transformá-la em uma estimativa linear Eq. (12).

$$Y = Xb = \begin{Bmatrix} \ln VB_{MAX1} \\ \ln VB_{MAX2} \\ \ln VB_{MAX2} \\ \vdots \\ \ln VB_{MAXn} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \ln v_1 & \ln f_1 & \ln a_1 & \ln T_1 \\ 1 & \ln v_2 & \ln f_2 & \ln a_2 & \ln T_2 \\ 1 & \ln v_3 & \ln f_3 & \ln a_3 & \ln T_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \ln v_n & \ln f_n & \ln a_n & \ln T_n \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} C \\ H \\ E \\ F \\ G \end{Bmatrix} \quad (11)$$

Utilizando o método dos mínimos quadrados em “b” da Eq.(11) pode ser estimado pela Eq. (12).

$$b = (X^T X)^{-1} (X^T Y) = V (X^T Y) \quad (12)$$

O problema da variável tempo “T” na matriz não ser conhecido para as condições de usinagem selecionadas é resolvido determinando “VB” como limite do tempo de vida da ferramenta transformando a variável em independente.

Quatro conjuntos de condições de corte são selecionados inicialmente, que é o número mínimo de testes necessário para determinar os coeficientes da Eq. (4). Isto é realizado por um *software*. Com os coeficientes determinados, é possível, para um determinado conjunto de parâmetros de corte, o cálculo da estimativa da vida útil da ferramenta para um critério “VB” dado.

Para o procedimento experimental foi usado aço AISI 1045, uma fresa Sandvik R 260.22.080, classe ISO P45-M35, fresadora CNC Romi-Interact com 15 kW de potência, e critério final de vida da ferramenta de VB = 0,7 mm.

No trabalho original foram elaboradas duas tabelas de dados; a primeira com dados obtidos do experimento e a segunda com dados fornecidos pelo fabricante da ferramenta. Os resultados da técnica aplicada às duas tabelas de dados foram plotados em gráficos para análise.

Neste trabalho são utilizados os dados experimentais com as constantes de Taylor calculadas respectivamente e comparadas com resultados do sistema MOPC. A Tabela 5 mostra os parâmetros obtidos no experimento com as respectivas constantes, e usando a Eq. (4) foi incluída a coluna de tempos de vida de ferramentas.

Tabela 5. Tempo Calculado para os dados experimentais.

Nº	Parâmetros				Constante Taylor Expandida					Vida Ferramenta
	v_c	f	a_p	VB	H	E	F	G	C	T
1	116,52	0,068	2,246	0,7	0,456	-0,0136	-0,1997	-0,274	475,1671	59,14818243
2	179,91	0,17	1,379	0,7	0,4448	-0,0276	-0,1588	-0,2811	474,1528	17,73398024
3	250	0,121	1,603	0,7	0,4349	-0,0249	-0,1692	-0,284	470,6264	4,880873576
4	171,89	0,155	1,482	0,7	0,4351	-0,0497	-0,2895	-0,2895	482,4394	19,20894606
5	204,47	0,142	1,541	0,7	0,4346	-0,0521	-0,2954	-0,2954	491,8895	10,57780448
6	207,65	0,148	1,516	0,7	0,4415	-0,0472	-0,3064	-0,3064	523,8937	10,85520049

Os dados da Tab. 5 são lançados no banco de dados do MOPC para cálculo das constantes da equação reduzida de Taylor. Para o primeiro cálculo pelo sistema, selecionou-se todas as velocidades e tempos de vida da ferramenta correspondentes sem restrições dos outros parâmetros.

A Tabela 6 mostra um comparativo entre os valores calculado pelo método de Dos Santos *et al.* (1999), e os resultados obtidos pelo MOPC.

Tabela 6. Comparando método com MOPC.

Nº	Coeficiente "G"			Coeficiente "C"			
	Método	MOPC	ERRO%	Método	Corrigido/Reduzida	MOPC	ERRO%
1	-0,274	-0,312	12%	475,1671	356,3793	427,5106	17%
2	-0,2811	-0,312	10%	474,1528	403,7334	427,5106	6%
3	-0,284	-0,312	9%	470,6264	392,1690	427,5106	8%
4	-0,2895	-0,312	7%	482,4394	404,4128	427,5106	5%
5	-0,2954	-0,312	5%	491,8895	410,4271	427,5106	4%
6	-0,3064	-0,312	2%	523,8937	431,1728	427,5106	-1%

As constantes obtidas pelo método matemático de Dos Santos *et al.* (1999), calcula as constantes para cada conjunto de parâmetros e a o MOPC é um valor geral para as condições estabelecidas no sistema de filtro. A Tabela 6 indica que o conjunto de valores estabelecido pelo experimento de número (1) teve o maior erro percentual.

Calculando as constantes restringindo no filtro de dados às condições de menores velocidades de avanço entre 0,068mm a 0,142 mm, e maiores condições de avanço entre 0,148 mm a 0,17 mm, obtêm-se os resultados observados na Tab. 7.

Tabela 7. MOPC (f máximo e mínimo).

Coeficiente "C"						
MÉTODO	MOPC	ERRO%	MOPC	ERRO%	MOPC	ERRO%
			f = 0,068-0,142		f = 0,148-0,17	
356,3793	427,5106	17%	415,5701	14%	447,4066	20%
403,7334	427,5106	6%	415,5701	3%	447,4066	10%
392,1690	427,5106	8%	415,5701	6%	447,4066	12%
404,4128	427,5106	5%	415,5701	3%	447,4066	10%
410,4271	427,5106	4%	415,5701	1%	447,4066	8%
431,1728	427,5106	-1%	415,5701	-4%	447,4066	4%

A Tabela 7 mostra uma diminuição do erro percentual para a condição onde foram filtrados os dados com uma faixa de velocidade de avanço de valores mínimos. A Figura 10 mostra a interface do MOPC com o cálculo das constantes obtidas filtrando valores de velocidade de avanço do intervalo mínimos. A Figura 11 mostra um comparativo entre os valores calculados para o Intervalo de Máxima Eficiência com as condições de filtro para menores avanços e os obtidos pelo método de Dos Santos *et al.* (1999). As condições usadas são: $T_c = 5$ min, $C_t = 100$ e $C_m = 200$.

Otimização

Constantes de Taylor

C: 415,5701
G: -0,310
r2: 0,997

tc - Tempo de troca da Ferramenta: 5 min
Ct - Custo por gume: 100 R\$
Cm - Custo de máquina-ferramenta: 200 R\$

Vida Ferr. Máx. Produção: 11,129 min
Veloc. Corte Máx. Produção: 196,899 m/min
Vida Ferr. Mín. Custo: 12,242 min
Veloc. Corte Mín. Custo: 191,166 m/min

Velocidade Corte: m/min
Vida Ferramenta: min

Calcular>>>>>>

Calcular>>>>>>

velocidadecorte	vidaferramenta	profundidadecorte	desgaste	avanco	maquina
116,52	59,14	2,246	0,7	0,068	
250	4,88	1,603	0,7	0,121	
204,47	10,57	1,541	0,7	0,142	

Figura 10. Interface cálculo das constantes.

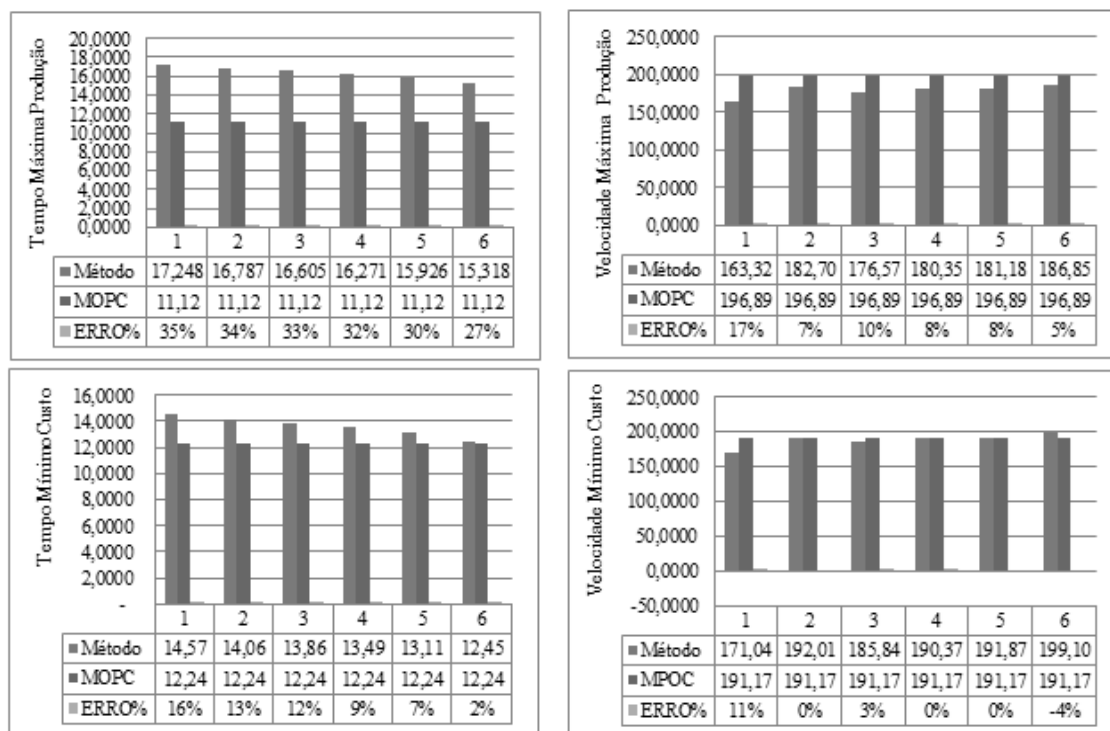


Figura 11. Gráficos comparativos das melhores condições de corte.

4. CONCLUSÃO

O algoritmo é eficiente para manter o histórico de uma máquina-ferramenta operando em produção industrial, onde a otimização pela equação de Taylor reduzida pode servir de instrumento para o desenvolvimento de estratégias de usinagem para a máquina.

O algoritmo tem estrutura para armazenamento de outros parâmetros de corte que compõem a equação expandida de Taylor, e podendo por outros métodos estatísticos calcular os coeficientes.

Trabalhos científicos publicados com propostas de técnicas diferentes de cálculo das constantes de Taylor foram comparados ao sistema MOPC, os resultados obtidos obtiveram erros percentuais mínimo validando os resultados.

O sistema mostra uma variedade de opções para filtrar do banco de dados os valores do tempo de vida de ferramenta e velocidade de corte, com uma vasta combinação de parâmetros. Com esta possibilidade é possível à combinação de condições de usinagem mais variadas, tendo como resultado variadas projeções do comportamento da vida da ferramenta.

Os resultados confirmam a validação dos cálculos do aplicativo computacional, considera-se que o método é coerente com as técnicas diferenciadas.

5. REFERÊNCIAS

- Asilturk, I., Akkus, H., 2011, "Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method", Journal Elsevier Measurement, Vol. 44, pp. 1697–1704.
- Boehs, L., 1988, "Projeto e implantação de um sistema computadorizado de banco de dados de usinagem (CINFUS), Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Davim, J.P., 2008, "Manufacturing: Fundamentals and recent advances", London, Springer, 361 p.
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L., 2000, "Tecnologia da Usinagem dos Materiais", Ed. Artliber, São Paulo, Brasil, 244 p.
- Dos Santos, A.L.B., Duarte, M.A.V., Abrão A.M., Machado, A.R., 1999, "An optimisation procedure to determine the coefficients of the extended Taylor's equation in machining", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, pp. 17-31.
- Duarte, M.A.V., Arruda, J.R.F., 1993, "Updating rotor-bearing finite element models using experimental frequency response functions", RBCM-Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, Vol 15, pp. 136–149.
- Ferraresi, D., 1982, "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 800 p.
- Gonçalves, M.A.F., Silva, A.D., Souza, A.J., Lorini, F.J., 2012, "Metodologia para otimização automática de parâmetros de usinagem. Revista Máquinas e Metais", Vol. 560, p. 52-63.
- Gonçalves, M.A.F., Silva, A.D., Souza, A.J., Lorini, F.J., 2011, "Metodologia para otimização automática de parâmetros de usinagem". In: 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Caxias do Sul - RS. Anais do VI COBEF (CD-ROM).

- Groover, M., 2011, "Automação Industrial e Sistemas de Manufatura", Pearson Prentice Hall, 3ª ed, São Paulo, 840 p.
- Machado, A. R., Silva, M. B., Coelho, R. T., Abrão, A. M., 2009, "Teoria da Usinagem dos Materiais", Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 384 p.
- Pereira, J. C., 2006, "Determinação de Modelos de Vida de Ferramenta e Rugosidade no Torneamento do Aço ABNT 52100 Endurecido Utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta (DOE)", Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 140 p.
- Sahin, Y., 2009, "Comparison of tool life between ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools when machining hardened steels", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 3478 - 3489.
- Stemmer, C. E., 2007, "Ferramentas de Corte I", 7.ed. Ed. da UFSC, Florianópolis, 250 p.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

"O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho".

COMPUTATIONAL APPLICATION OF AUTOMATIC OPTIMIZATION OF MACHINING PARAMETERS

Marco Aurélio da Fontoura Gonçalves, marcoctism@gmail.com¹

Flavio José Lorini, lorini@mecanica.ufrgs.br²

Moacir Eckhardt, moacir@ctism.ufsm.br¹

¹University of Santa Maria (UFSM)

²University of Rio Grande do Sul (UFRGS)

Abstract. *This work aims to analyze the results obtained with a computational algorithm for the optimization of cutting parameters. The system uses the Taylor equation reduced to relate the influence of the machining conditions on the life and wear of the tool. The application has a technique for filtering machining parameters, which enables various combinations of cutting conditions. Techniques described in published scientific papers are compared with simulations using the proposed methodology. The results were analyzed with the purpose of demonstrating the feasibility in productive processes, where the variation and the amount of information needed to obtain a good precision in the identification of the parameters of the model are easily achieved.*

Keywords: *Cutting speed, cutting parameters optimization, machining, Taylor equation*