

ESTUDO DA MINIMIZAÇÃO DO CUSTO DE USINAGEM POR TORNEAMENTO DE UM AÇO SAE/ABNT 52100 UTILIZANDO-SE A METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Ronã Rinston Amaury Mendes

rona_rinston@yahoo.com.br

Anderson Paulo de Paiva

andersonppaiva@yahoo.com.br

João Roberto Ferreira

jorofe@unifei.edu.br

Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

Av. BPS, 1303 – Itajubá, MG – Brasil - 37502-148 – Brasil

Resumo: *Este trabalho apresenta um estudo sobre a utilização da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) na modelagem estocástica dos custos de um processo de torneamento de aço duro SAE/ABNT 52100. Em função da natureza não determinística da Vida da ferramenta (T) e da qualidade do acabamento superficial, podem ser estabelecidos modelos matemáticos para estas funções a partir de uma experimentação planejada. Assim, tomando-se modelos quadráticos completos para a Vida da ferramenta (T) e a Rugosidade Média (R_a), escritas em função da velocidade de corte (V_c), do avanço (f_n) e da profundidade de corte (a_p), pode-se obter um modelo similar para o Custo (K_p) do processo. A minimização desta função objetivo não linear é realizada através do algoritmo GRG, promovendo-se variações sucessivas na restrição não-linear de acabamento, o que permite a avaliação desta restrição sobre o comportamento de K_p . Os resultados apontam que a minimização da função Custo é obtida com a adoção de velocidades de corte maiores, para uma faixa de variação da restrição de acabamento superficial entre 0,3 e 0,65 μm , além de proporcionar uma maior taxa de remoção de material (Q).*

Palavras-Chave: *Custos em Usinagem, MSR, GRG.*

1. INTRODUÇÃO

O cenário competitivo atual tem conduzido as diversas organizações a aprimorar a qualidade de seus processos, produtos e serviços oferecidos, sem perder de vista a compatibilidade dos níveis de excelência com os custos mais apropriados possíveis. Dentro deste aspecto, a preocupação em atuar simultaneamente sobre a qualidade e o custo de cada processo obriga as organizações a utilizarem técnicas não triviais de planejamento e melhoria da qualidade. O setor metal-mecânico não é diferente. Para que possam manter-se competitivas e até mesmo sobreviverem, as empresas deste setor devem buscar alternativas viáveis, pautadas pela melhoria da qualidade e a concomitante redução dos custos inerentes. Para atingir tais objetivos, muitos processos têm utilizado a modelagem experimental combinada com métodos de otimização. Assim, considerando-se o caráter estocástico dos processos de

manufatura, modelos matemáticos podem ser construídos a partir da observação e experimentação planejadas. Esta estratégia observacional é conhecida como Metodologia de Projeto de Experimentos (DOE, do inglês *Design of Experiments*).

Diversos pesquisadores têm empregado esta metodologia para o estudo da usinabilidade dos materiais. Noordin⁽¹⁵⁾ et. al. aplicaram o DOE para descrever o desempenho de ferramentas de metal duro no torneamento de um aço AISI 1045. Choudhury e El-Baradie⁽⁴⁾ e Dhavlikar⁽⁶⁾ et al. também empregam a abordagem para modelar a vida de ferramentas utilizadas no torneamento de aços de alta resistência. Alauddin⁽¹⁾ et al. realizaram um trabalho similar. Chouldhury e Bartarya⁽⁵⁾ empregaram fatoriais em três níveis para estudar a influência da temperatura no desgaste de ferramentas. Yih-Fong⁽¹⁶⁾ emprega uma abordagem híbrida entre análise de componentes principais (PCA) e Taguchi para otimizar as múltiplas respostas de um processo de fresamento em HSM (*High-speed Machining*). Todos estes trabalhos objetivam a otimização de variáveis de resposta em processos de usinagem, obtidas a partir de uma pequena, porém, eficiente quantidade de experimentos.

Ao contrário de outras variáveis peculiares aos processos de usinagem, a equação para o cálculo do Custo (K_p), considerada como uma função determinística, por muito tempo, tem sido baseado na curva de vida da ferramenta de Taylor (Ferraresi⁽⁸⁾ e Diniz⁽⁷⁾ et al), desenvolvida no início do século passado. A natureza deste equacionamento que, sem dúvida, tem seus méritos, não leva em consideração o fato de algumas variáveis que o compõem, ou que exerçam influência sobre ele, sejam de natureza estocástica, ou seja, que possuam variação aleatória. Este é o caso da vida das ferramentas, onde cada material ou condição de usinagem podem provocar variações aleatórias nos valores esperados de durabilidade. O mesmo poderia se dizer do desgaste, das forças de corte, do acabamento superficial e dos tempos totais de usinagem. Seguindo uma vertente mais tradicional, o cálculo do custo dos processos de usinagem tem sido realizado pelas empresas utilizando-se a metodologia clássica, amplamente difundida pelos catálogos dos fabricantes de ferramentas.

Contraopondo-se a esta visão determinística, este trabalho pretende ilustrar como é possível considerar o caráter aleatório de algumas variáveis no que tange o cálculo dos custos em processos de torneamento. Para atender a esta pesquisa, o custo de um processo de usinagem (K_p) será estabelecido através da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Para isso, foram utilizados os experimentos realizados por Pereira⁽¹⁴⁾ em corpos de prova em aço SAE/ABNT 52100. Recentes estudos apresentam diferentes metodologias para a otimização do processo de usinagem que proporcionam aumento da competitividade do processo. Entretanto, estes trabalhos não apresentam aplicações específicas para o cálculo dos seus custos (Baptista⁽²⁾, Oliveira⁽¹²⁾ e Paiva⁽¹³⁾).

Neste trabalho, o emprego da MSR está associado a um algoritmo de otimização não linear, implementado a partir do aplicativo Solver[®]. Um arranjo experimental do tipo composto será utilizado para se modelar estatisticamente as variáveis Vida (T) e Rugosidade média (R_a), a partir de variações de velocidades e corte (V_c), avanço (f_n) e profundidade de corte (a_p). Enquanto que o modelo estocástico da Vida (T) da ferramenta seja considerado para a composição da função custo (K_p), a Rugosidade média (R_a) servirá como uma restrição de qualidade para o sistema.

Adicionalmente, para evitar soluções que não tenham sido representadas pelo espaço experimental estudado, uma restrição do tipo esférica, será utilizada de forma auxiliar. Assim, será possível avaliar que parâmetros de corte e respectivos níveis minimizam o custo do processo estudado, sujeito às restrições diferenciadas de rugosidade das peças (R_a) usinadas. Comparativamente, os custos obtidos com a abordagem DOE serão contrapostos àqueles encontrados com a forma tradicional.

2. CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE USINAGEM

O estudo dos custos em um processo de usinagem está intimamente ligado à curva de vida da ferramenta. A vida da ferramenta (T) é o tempo que a mesma trabalha efetivamente, deduzidos os tempos passivos, até perder sua capacidade de corte. Pode ser expressa em minutos, pelo seu percurso

de corte ou avanço ou, em processos que envolvem lotes de peças com grandes volumes, de acordo com a quantidade de peças produzidas (Miranda⁽¹⁰⁾).

De acordo com Ferraresi⁽⁸⁾, seu cálculo foi elaborado a partir de estudos de Taylor, no início do século XX, que a propôs em forma de ábaco, relacionando a vida da ferramenta em função da velocidade de corte, $T = f(V_c)$, geralmente expressa através da Equação 1, em sua forma reduzida.

$$T = k \cdot V_c^{-x} \quad (1)$$

Onde k e x são constantes do material para determinadas condições.

Esta é a metodologia clássica, tradicionalmente empregada nos catálogos dos fabricantes de ferramentas e base para o cálculo dos custos de fabricação envolvidos no processo de usinagem.

O tempo total de usinagem de uma peça (t_t), segundo Ferraresi⁽⁸⁾, o é o tempo gasto em todas as suas etapas ou de um lote de Z peças, conforme Equação 2.

$$t_t = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \frac{N_t}{Z} \cdot t_{ft} \quad (2)$$

Onde t_c é o tempo de corte (ativo), t_s é o tempo secundário, t_a é o tempo de aproximação e afastamento da ferramenta, t_p é o tempo de preparo da máquina e t_{ft} é o tempo de troca da ferramenta.

O custo de um processo de usinagem (K_p) é aquele incorrido diretamente no processo e, de acordo com Diniz⁽⁷⁾ *et al*, é obtido através da soma dos custos da mão-de-obra (K_{us}), de máquina (K_{um}) e da ferramenta (K_{uf}), conforme Equação 3.

$$K_p = K_{us} + K_{um} + K_{uf} \quad (3)$$

Ou ainda, através da Equação 4:

$$K_p = C_1 + \frac{t_c}{60} \cdot C_2 + \frac{t_c}{T} \cdot C_3 \quad (4)$$

Onde C_1 é uma constante independente da velocidade de corte em R\$/peça, C_2 é a soma das despesas com mão-de-obra e com máquina em R\$/hora e C_3 é a constante de custo relativo à ferramenta.

O cálculo da velocidade econômica de corte ou de mínimo custo (V_0) é obtido através da derivação da Equação 4 (Ferraresi⁽⁸⁾) e resulta na Equação 5:

$$V_0 = \sqrt[x]{\frac{C_2 \cdot k}{60 \cdot (x-1) \cdot C_3}} \quad (5)$$

A velocidade de corte de máxima produção (V_{cmxp}) é aquela em que se consegue o menor tempo total (t_t) de usinagem de uma peça (Diniz⁽⁷⁾ *et al*), e pode ser obtida através da Equação 6:

$$V_{cmxp} = \sqrt[x]{\frac{k}{(x-1) \cdot t_{ft}}} \quad (6)$$

O Intervalo de Máxima Eficiência (IME) é o intervalo compreendido entre as velocidades de mínimo custo (V_0) e de máxima produção (V_{cmxp}). Nele se encontram os valores de velocidade de corte ideais a serem utilizados em um processo de usinagem, baseados em valores prévios de avanço, profundidade de corte e tipo da ferramenta.

3. METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

De acordo com Montgomery⁽¹¹⁾, a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas para modelar e analisar problemas no qual a forma de relacionamento entre as variáveis dependentes e independentes, é desconhecida. Usualmente, emprega-se, um polinômio de baixa ordem. Se houver curvatura no processo, então, um polinômio ordem mais elevada se torna necessário, tal como descreve a Equação 7.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (7)$$

Para estimar os parâmetros (β) na Equação (7), emprega-se o método dos mínimos quadrados, que na forma matricial ser escrito como:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (8)$$

A análise de uma superfície de resposta é feita em termos de uma superfície ajustada. Se tal superfície é adequada, sua análise será aproximadamente equivalente à análise da superfície real. Usando-se um projeto de experimentos adequado para coletar os dados da resposta y , os parâmetros do modelo serão estimados eficazmente.

Na maioria dos experimentos, assume-se que o modelo linear é adequado; entretanto, para se confirmar se existe falta de ajuste devem-se utilizar os *Pontos centrais*. Tal procedimento consiste em adicionar ao fatorial completo, pontos que sejam intermediários. Serão adicionados tantos *pontos centrais* quantos forem os k fatores do experimento (Box⁽³⁾ et al).

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho se baseia nos experimentos feitos por Pereira⁽¹⁴⁾ em corpos de prova em aço SAE/ABNT 52100, com dureza de 55 HRC (fabricante Villares), com dimensões de 49 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento.

Foi utilizado um Torno CNC Nardini Logic 175, com potência máxima de eixo de 7,5 CV; rotação máxima se 4000 rpm; torre com oito posições e torque máximo de 200 Kgf.m. Os insertos utilizados foram de cerâmica mista ($Al_2O_3 + TiC$), fabricante Sandvik classe GC 6050, recoberta com TiN, com geometria ISO CNGA 120408 S01525.

Para as medições necessárias, foi utilizado um Rugosímetro Taylor Hobson, modelo Surtronic 3⁺ e um Micrômetro Mitutoyo.

O desgaste da ferramenta foi monitorado após o décimo passe de usinagem, utilizando-se um microscópio óptico. Utilizou-se como critério do fim de vida a quebra da ferramenta.

Foram adotados dois valores distintos mínimos e máximos para cada parâmetro de estudo: Velocidade de corte (V_c) de 200 e 240 m/min; Avanço (f_n) de 0,05 e 0,10 mm/rev. e Profundidade de Corte (a_p) de 0,15 e 0,30 mm.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando a metodologia clássica, baseada na equação reduzida de Taylor, foram realizados os cálculos dos tempos e dos custos nas condições de corte sugeridas pelo catálogo do fabricante de ferramenta ($V_c = 200$ m/min, $f_n = 0,05$ mm/rev e $a_p = 0,15$ mm) e também das velocidades de mínimo custo (V_0) e de máxima produção (V_{cmxp}), conforme parâmetros apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros para o Cálculo de Tempos e Custos de Usinagem.

Parâmetros para o Cálculo de Tempos e Custos de Usinagem			
Parâmetros		Parâmetros	
Lote de peças $Z_{(un.)}$	1.000	Vida média porta ferramentas, arestas N_{fp}	1.000
Tempo secundário t_s (min)	0,5	Custo da pastilha K_{pi} (R\$)	50
Tempo aprox. e afastamento ferramenta t_a (min)	0,1	Número de arestas N_s	4
Tempo de preparo da máquina t_p (min)	60	Percurso de Avanço l_f (mm)	50
Tempo de troca da ferramenta t_{ft} (min)	1	Diâmetro Inicial da peça D (mm)	49
Custo maquinário + operador (Sm+Sh) C_2 (R\$/h)	80	Diâmetro Final da peça d (mm)	46
Custo do porta ferramenta V_{si} (R\$)	200		

Na Tabela 2, são apresentados as variáveis de resultados para a velocidade de mínimo custo, para as condições de catálogo e para a máxima produção.

Tabela 2. Resultados do Cálculo de Tempos e Custos de Usinagem.

Resultados do Cálculo de Tempos e Custos de Usinagem					
Respostas	V_c	t_t	Q	T	K_p
	m/min	min	cm ³ /min	min	R\$/peça
V_0	162	10,0	1,22	49	15,80
Condições do catálogo	200	8,6	1,50	15	17,81
V_{cmxp}	247	8,0	1,85	4,6	27,35

Admitindo-se, por exemplo, que a Vida da ferramenta (T) possa variar dependendo do material a ser usinado e das condições da operação, utilizou-se um arranjo de superfície de resposta do tipo CCD (*Central Composite Design*) para três fatores, como descrito anteriormente, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Arranjo Composto Central para o Custo por peça (K_p).

Arranjo Composto Central para o Custo por peça (K_p)													
n	Bloco	Parâmetros						T	Ra	Passes	Tempo		Custo Peça
		V_c	f_n	a_p	Codificados						t_c	t_t	
		(m/min)	(mm/rot)	(mm)	x_1	x_2	x_3	(min)	(μ m)				
1	1	200	0,05	0,15	-1	-1	-1	16,75	0,33	10	7,70	8,82	17,59
2	1	240	0,05	0,15	1	-1	-1	11,50	0,28	10	6,41	7,63	17,26
3	1	200	0,1	0,15	-1	1	-1	9,85	0,70	10	3,85	4,90	11,49
4	1	240	0,1	0,15	1	1	-1	8,50	0,57	10	3,21	4,24	10,45
5	1	200	0,05	0,3	-1	-1	1	11,50	0,25	5	3,85	4,84	10,71
6	1	240	0,05	0,3	1	-1	1	7,45	0,42	5	3,21	4,30	11,20
7	1	200	0,1	0,3	-1	1	1	8,20	0,57	5	1,92	2,82	6,74
8	1	240	0,1	0,3	1	1	1	6,25	0,61	5	1,60	2,52	6,62
9	1	220	0,075	0,225	0	0	0	8,60	0,36	7	3,11	4,13	10,10
10	1	220	0,075	0,225	0	0	0	6,80	0,42	7	3,11	4,23	11,44
11	2	187,34	0,075	0,225	-1,63	0	0	10,10	0,34	7	3,65	4,67	10,82
12	2	252,66	0,075	0,225	1,633	0	0	7,60	0,45	7	2,71	3,72	9,49
13	2	220	0,03418	0,225	0	-1,63	0	17,50	0,32	7	6,82	7,87	15,45
14	2	220	0,11583	0,225	0	1,633	0	7,20	0,72	7	2,01	2,95	7,49
15	2	220	0,075	0,10253	0	0	-1,63	12,00	0,36	15	6,82	8,05	17,96
16	2	220	0,075	0,34748	0	0	1,633	6,70	0,31	4	2,01	2,97	7,78
17	2	220	0,075	0,225	0	0	0	7,20	0,37	7	3,11	4,20	11,09
18	2	220	0,075	0,225	0	0	0	9,10	0,29	7	3,11	4,11	9,82

Com este arranjo experimental, 18 ensaios realizados em condições controladas foram realizados. Para cada condição experimental foram observadas a vida da ferramenta e a rugosidade média da peça usinada. Considerando-se os valores obtidos, calculou-se, utilizando-se as Equações de (2) a (4), os respectivos tempos de corte (t_c), tempo total de usinagem (t_t) e custo (K_p) de cada condição experimental. Os resultados obtidos estão contemplados na Tabela 3.

A partir dos dados da Tabela 3, realizou-se a análise de significância do modelo quadrático completo para a resposta K_p . Os resultados apresentados na Tabela 4 mostram que este modelo apresenta um excelente ajuste, uma vez que R^2 ajustado é igual a 97,2%. Embora alguns termos não sejam isoladamente significativos, a sua retirada provoca uma sensível diminuição na explicação do modelo, com conseguinte aumento da variância experimental, justificando sua adoção neste trabalho.

Tabela 4 – Análise de Significância do Modelo Completo de Custo (K_p).

Termo	Coef.	Erro Padrão	t_0	p_t
Constant	10,622	0,2975	35,699	0,000
Vc	-0,238	0,1639	-1,451	0,185
fn	-2,584	0,1639	-15,767	0,000
ap	-2,861	0,1639	-17,453	0,000
Vc*Vc	-0,196	0,1752	-1,119	0,296
fn*fn	0,297	0,1752	1,696	0,128
ap*ap	0,822	0,1752	4,693	0,002
Vc*fn	-0,165	0,2116	-0,78	0,458
Vc*ap	0,217	0,2116	1,028	0,334
fn*ap	0,545	0,2116	2,576	0,033
S = 0,5985		$R^2 = 98,7\%$		$R^2(\text{adj}) = 97,2\%$

A ANOVA da Tabela 5 mostra que o modelo completo é significativo, uma vez que o valor de P é menor que o nível de significância adotado, que neste caso é igual a 5%.

Tabela 5. ANOVA do Modelo Completo de Custo (K_p)

Fonte	Graus de Liberdade	Soma de quadrados	Média Quadrática	F_0	p
Regressão	9	211,717	23,524	65,67	0
Linear	3	198,931	66,31	185,11	0
Quadrática	3	9,814	3,271	9,13	0,006
Interação	3	2,972	0,991	2,77	0,111
Erro Residual	8	2,866	0,358		
Falta de Ajuste	5	1,062	0,212	0,35	0,854
Erro Puro	3	1,803	0,601		
Total	17	214,583			

A Figura 1 representa a superfície de resposta para a variável Custo de usinagem por peça (K_p) em função dos parâmetros de corte. Descreve-se o comportamento da resposta em função do avanço e da velocidade de corte (a) e a relação é feita com os parâmetros de profundidade de corte e velocidade (b).

Nota-se claramente que, tanto para a situação (a) quanto para a situação (b), o custo do processo é reduzido com os três fatores escolhidos em seus valores experimentais máximos. Outra constatação

favorável é que, adotando-se valores maiores para os três parâmetros estudados, aumenta-se também a produtividade do processo, a partir do aumento da taxa de remoção de material.

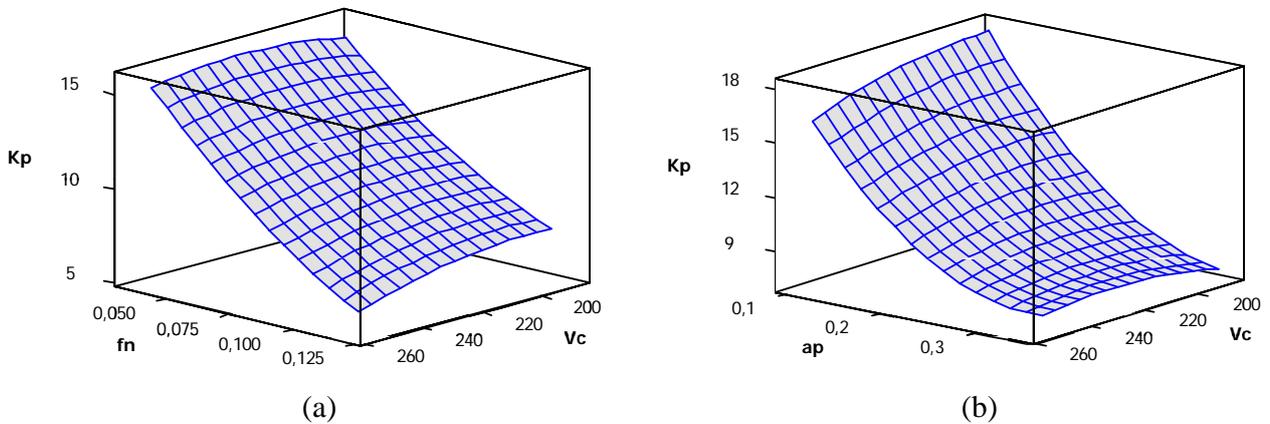


Figura 1 – Superfície de Resposta para o custo (Kp) em função dos parâmetros de corte.

Para localizar o ponto de ótimo que minimiza o custo do processo de usinagem estudado, pode ser utilizado o método de otimização não-linear com restrições do gradiente reduzido generalizado (GRG) (Lasdon⁽⁹⁾). Como se deseja descobrir os valores ótimos dos três parâmetros que minimizam o custo dentro da região experimental utilizada, sujeito a uma restrição de acabamento, pode-se escrever o problema de otimização em questão de acordo com a expressão:

$$\text{Minimizar } y = 10,62 - 0,238 V_c - 2,584 f_n - 2,86 a_p - 0,196 V_c^2 + 0,297 f_n^2 + 0,822 a_p^2 - 0,165 V_c \cdot f_n + 0,217 V_c \cdot a_p + 0,545 f_n \cdot a_p$$

$$\text{Sujeito a: } R_a = 0,356 + 0,0165 V_c + 0,136 f_n - 0,0084 a_p + 0,022780 V_c^2 + 0,0696 f_n^2 + 0,0003 a_p^2 - 0,0262 V_c \cdot f_n + 0,0500 V_c \cdot a_p - 0,0175 f_n \cdot a_p \leq T \quad (9)$$

$$x^T x \leq \left[k \left(1 + \frac{n_{s0}}{n_s} \right) / \left(1 + \frac{n_{c0}}{n_c} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Tabela 6. Otimização do Custo Kp através do aplicativo Solver[®].

Otimização de Kp através do aplicativo Solver [®]							
R _a	V _c	f _n	a _p	t _t	Q	T	K _p
0,30	206	0,08	0,34	3,1	5,29	7,3	7,95
0,35	209	0,08	0,34	2,9	5,86	6,8	7,54
0,40	211	0,09	0,33	2,8	6,29	6,6	7,25
0,45	213	0,09	0,33	2,7	6,63	6,5	7,01
0,50	216	0,10	0,32	2,7	6,89	6,6	6,81
0,55	219	0,10	0,32	2,6	7,08	6,8	6,63
0,60	222	0,11	0,31	2,6	7,16	7,0	6,47
0,65	224	0,11	0,29	2,6	7,10	7,3	6,36

A otimização buscando a minimização do custo do processo de usinagem (k_p) foi processada através da utilização do aplicativo Solver[®] do Excel, sujeito a uma restrição de rugosidade (R_a), e tem seus resultados expressos na Tabela 6.

Comparando os resultados da Tabela 6 com os apresentados na Tabela 2, diante de condições restritivas de qualidade, as velocidades de corte (V_c) obtidas se encontram dentro do Intervalo de Máxima Eficiência (IME). As vidas da ferramenta (T) atingem valores próximos aos da velocidade de máxima produção (V_{cmaxp}), embora inferiores ao obtido na condição de catálogo. Avanço e profundidade têm comportamentos contrários onde, à medida em que se diminui as restrições de rugosidade, o avanço aumenta acompanhando o aumento da velocidade de corte enquanto que a profundidade de corte diminui, favorecendo um cenário de maior produtividade, expresso na taxa de remoção de cavaco (Q) crescente, com tempos de processos menores (t_c e t_t).

Os custos (K_p), por sua vez, se encontram em uma faixa inferior ao IME ($V_0 = R\$ 16,28$ e $V_{cmaxp} = R\$ 28,18$), variando entre R\$ 6,36 e R\$ 7,95; o que representa uma redução comparativa de quase 50%. O comportamento de queda dos custos mostrou-se evidente à medida que a velocidade de corte (V_c) apresentou um aumento (Figura 2), devido a índices mais flexíveis de restrição de rugosidade da peça (R_a). Nota-se, que o ponto de ótimo de custos nesta situação é naturalmente deslocado para valores maiores de avanço (f_n) e taxa de remoção de cavaco (Q), principalmente quanto à velocidade de corte (V_c).

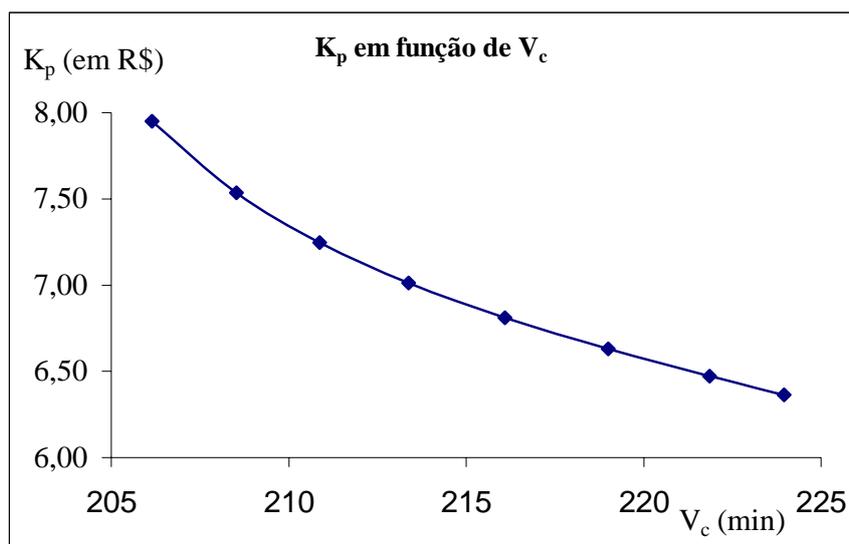


Figura 2. Variação de K_p em função de V_c .

6. CONCLUSÃO

Constatou-se que a Metodologia de Superfície de Resposta combinada com o algoritmo GRG, disponível no aplicativo de otimização Solver[®], formam uma abordagem muito útil na modelagem estocástica dos custos do processo de torneamento para o caso estudado.

Diante de condições irrestritas de qualidade, a minimização da resposta custo de usinagem (K_p) em função dos parâmetros avanço, profundidade e velocidade de corte, é obtida quando esses três parâmetros atingem seus valores experimentais máximos, significando uma maior produtividade para o processo, mediante uma taxa de remoção de material maior.

Adotando-se restrições de acabamento, os custos crescem. Entretanto, à medida que se flexibilizou essa restrição, parâmetros envolvendo velocidades de corte crescentes em combinação com o aumento do avanço e a diminuição da profundidade de corte foram obtidos, sinalizando uma direção semelhante

à do cenário irrestrito, favorecendo a adoção de parâmetros de corte que proporcionem maior produtividade. Conforme demonstrado, foi possível inclusive uma redução na variável de resposta custos (K_p) de quase 50%, em comparação com os valores obtidos através da metodologia clássica, com relação à velocidade de mínimo custo (V_0).

Estas conclusões não devem ser extrapoladas para outros tipos de materiais e ferramentas, bem como só tem validade para amplitude de níveis adotados neste estudo. Porém, pode-se recomendar a adequação da metodologia para quaisquer outros processos de manufatura.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALAUDDIN, M., EL-BARADIE, M. A., HASHMI, M. S. J., 1997, Prediction of tool life in end milling by response surface methodology, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 71, pp.457-465.
2. BAPTISTA, E.A. Desenvolvimento de um Sistema Especialista para a Otimização do Processo de Usinagem. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção – Universidade Metodista de Piracicaba UNIMEP. Santa Bárbara do Oeste-SP, 194p. 2000.
3. BOX, G. E. P., HUNTER, W. G. and HUNTER, J. S., 1978, *Statistics for Experimenters*, John Wiley & Sons, New York.
4. CHOUDHURY, I. A., EL-BARADIE, 1998, Tool-life prediction model by design of experiments for turning high strength steel (290 BHN), *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 77, pp.319-326.
5. CHOUDHURY, S.K., BARTARYA,G., 2003, Role of temperature and surface finish in prediction tool wear using neural network and design of experiments, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 43, pp. 747-753.
6. DHAFLIKAR, M. N., KULKARNI, M. S., MARIAPPAN, V., 2003, Combined Taguchi and dual response method for optimization of a centerless grinding operation, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 132, pp. 90-94.
7. DINIZ, A.E., MARCONCES, F.C., COPPINI, N.L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 3ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2001.
8. FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.
9. LASDON, L. S., WARREN, A. D., JAIN, A., RATNER, M., 1978, “Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming”, *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol. 4, No. 1, pp. 34-50.
10. MIRANDA, W.A.M. *Uma Contribuição ao Processo de Furação sem Fluido de Corte com Broca de Metal Duro Revestida com TiAlN*. Campinas, 182p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, 2003.
11. MONTGOMERY, D.C. *Design and Analysis of Experiments*. New York, NY. John Wiley & Sons, 2001.
12. OLIVEIRA, A.J. Otimização das Condições de Usinagem Visando o Torneamento a Seco do Aço ABNT 1045 em Operação de Desbaste. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP, 115p, 2003.
13. PAIVA, A.P., CESCO, J.C., FERREIRA, J.R., BALESTRASSI, P.P. *Application of Design of Experiments (DOE) methodology in machining conditions of the SAE/ABNT 52100 hardened steel*. Anais do XVIII COBEM - International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, MG, Brasil, 2005.
14. PEREIRA, J. C. C. *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 (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá-MG, 139p. 2006.

15. NOORDIN, M. Y., VENKATESH, V. C., SHARIF, S., ELTING, S. and Abdullah, A., 2004, Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel, Journal of Materials Processing Technology, vol. 145, pp.46-58.
16. YIH-FONG, T. (2005), A Hybrid approach to optimize multiple performance characteristics of high-speed computerized numerical control milling tool steels, Materials and Design. Article in Press. Disponível *online* em 15 de agosto de 2005.

STUDY OF MACHINING COST MINIMIZATION BY TURN OF STEEL SAE/ABNT 52100 USING RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

Abstract: *This paper presents a study about the utilization of Response Surface Methodology (RSM) in costs stochastic modeling by a turning process of a hardened steel SAE/ABNT 52100. In function of the random nature of the tool life (T) and the superficial finishing quality, could be established mathematical models for this functions since a planned experimentation. Thus, taking full quadratic models for the tool life (T) and the medium surface roughness (R_a), wrote in function of the cutting speed, feed rate and depth of cut, it can get a similar model for the process cost. The minimization of this non-linear objective function is realized by the GRG algorithm, promoting successive variations in the finishing non-linear constraints that allow the evaluation of this constraint about the cost behavior. The results show that the minimization of cost function is achieved with the adoption of higher levels of cutting speed, for a band of superficial finishing constraints variation between 0,3 and 0,65 μm , beyond to provide a great material removing rate.*

Keywords: *Machining costs, RSM, GRG.*