

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NA MANUFATURA DO FERRO FUNDIDO

OPTIMIZATION OF MACHINING PARAMETERS IN THE MANUFACTURE OF IRON

Anderson Melo* E-mail: meloanders@gmail.com
Carla Schwengber ten Caten* E-mail: tencaten@producao.ufrgs.br
Angelo M. O. Sant'Anna** E-mail: angelo.santanna@pucpr.br
* Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS
** Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC), Curitiba, PR

Resumo: A rugosidade da superfície é um dos requisitos mais importante no processo de usinagem. A determinação dos parâmetros de usinagem é uma etapa relevante para o processo de fabricação e longa vida da ferramenta. Este trabalho objetiva otimizar os parâmetros de usinagem do ferro fundido no processo de fresamento de uma planta industrial utilizando a metodologia de superfície de resposta (*Response Surface Methodology*). Foram avaliados os efeitos dos parâmetros de usinagem: velocidade, avanço e profundidade de corte sobre as variáveis respostas rugosidade e tempo de ciclo da operação. A aplicação da RSM permitiu planejar e executar os ensaios de forma eficiente, modelar o comportamento das variáveis resposta em função do ajuste dos parâmetros do processo e determinar o ajuste ótimo dos parâmetros que otimiza simultaneamente a rugosidade e o tempo de usinagem, permitindo avaliar a perda de material e o custo de operação.

Palavras-chave: Otimização. Metodologia superfície de resposta. Usinagem. Processo de fresamento.

Abstract: The surface roughness is one most important requirement in the machining process. The determination of machining parameters is an important stage in the manufacturing process and tool life. In this paper we propose to optimize machining parameters of iron in milling process in an industrial plant agricultural machine using response surface methodology (RSM). We calculated the effects of machining parameters: speed, feed and depth of cut on the response variables about surface roughness and cycle time of the milling operation. Applying this RSM allowed to plan and execute test efficiently, modeling the response variables according to adjustment of process parameters and thus determine the optimal setting of parameters that optimizes simultaneously the surface roughness and cycle time, providing to evaluate the material loss and cost of operation.

Keywords: Optimization; response surface methodology; machining; milling process.

1 INTRODUÇÃO

A partir da década de 90, o mercado de máquinas agrícolas automotrizes tem mostrado grande capacidade de crescimento, tanto no mercado interno, quanto no resultado das exportações. Tal cenário obrigou as montadoras a apostarem alto na

melhoria dos seus processos e a trazer para o Brasil, tecnologias avançadas de produção. No contexto dos processos de fabricação, o aumento da produtividade impulsionado por técnicas inovadoras, padronização e uso de ferramentas estatísticas, transformaram-se em um dos objetivos contínuos das grandes indústrias. Especificamente, na área de usinagem destas empresas, a otimização dos processos tem sido alvo permanente, pois busca através de análise refinada de algumas variáveis que influenciam no processo, um produto que resulte em alta produtividade e qualidade aliadas a baixo custo (IEA, 2009).

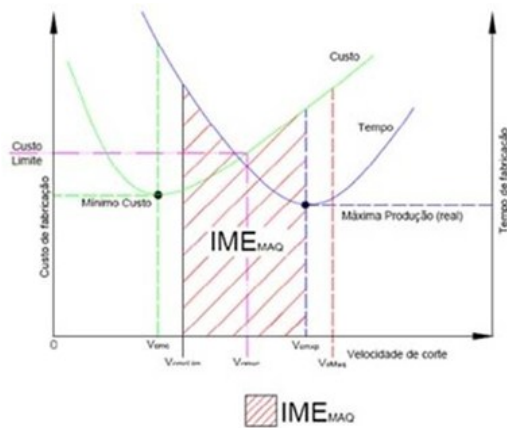
A necessidade de ser altamente produtivo por meio de um processo de baixo custo tem colocado lado a lado, pesquisadores, fornecedores, fabricantes e empresas de usinagem, os quais procuram através de testes e técnicas estatísticas desenvolver soluções para diferentes cenários de fabricação. Considerando o caráter estocástico dos processos de manufatura, a determinação dos parâmetros de usinagem é uma etapa relevante para o processo de fabricação e longa vida da ferramenta.

Coppini e Baptista (1998) destaca que a utilização do IME é eficiente em cenários ideais de laboratório e apresentam alternativas de controlar a velocidade de corte variando os parâmetros avanço e profundidade. Gravalos et al. (2007) investigam o efeito da velocidade de corte utilizando os parâmetros de corte fixos no encruamento superficial de aços inoxidáveis superausteníticos, verificando o aumento da dureza superficial no processo de usinagem. Enquanto, Alves *et al.* (2008) analisa a velocidade de avanço nos danos de aços endurecidos, destacando que uma adequada refrigeração e lubrificação minimiza os danos térmicos ao aço. Com proposta similar, Ngyua (2003) sugere a utilização de ar frio e óleo vegetal para reduzir o desgaste do aço carbono no processo de polimento. Kadirgama *et al.* (2008) sugere que a velocidade e a profundidade de corte aumenta a rugosidade superficial de ligas de alumínio no processo de fresamento. Ginta *et al.* (2009) analisa a velocidade, a profundidade e o avanço de corte no processo de fresamento de ligas de titânio para suavizar a superfície das ligas.

Os trabalhos comumente abordados na literatura propõem avaliar a velocidade de corte, e outros parâmetros como: avanço e profundidade de corte;

utilizando o intervalo de máxima eficiência (ver Figura 1) para seleção da ferramenta de usinagem.

Figura 1 - Intervalo de máxima eficiência (IME)



A utilização de técnicas estatísticas no desenvolvimento de metodologias permite avaliar e otimizar o efeito dos parâmetros de um processo de manufatura, desta forma, este trabalho objetiva otimizar os parâmetros de usinagem do ferro fundido no processo de fresamento de uma planta industrial utilizando a metodologia de superfície de resposta (*Response Surface Methodology*).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Projeto de Experimentos

A metodologia de Projetos de Experimentos (DOE – *Design of Experiments*) foi desenvolvida entre 1920 e 1930 por Sir Ronald A. Fisher sendo estudada e melhorada por diversos pesquisadores da área estatística (PRVAN; STREET, 2002). Um processo de manufatura pode ser determinado a partir do ajuste entre máquinas, métodos e pessoas, os quais combinados transformam um material de entrada em um produto de saída, que pode conter uma ou diversas características observáveis. Dentre as variáveis de entrada do processo, algumas são controláveis, ou seja, podem ser controlados pelo executor do experimento e outras são conhecidas como ruídos, ou seja, não há como controlá-las durante a execução do

experimento, entretanto devem ser consideradas no resultado (MONTGOMERY, 2004).

Alguns objetivos do experimento podem incluir: 1) Deliberar as variáveis mais influentes no resultado; 2) Determinar o valor a ser atribuído aos fatores controláveis de modo que a resposta esteja perto da nominal; 3) Determinar o valor a ser atribuído aos fatores controláveis de modo que a variabilidade seja pequena; 4) Determinar o valor a ser atribuído aos fatores controláveis de modo que o efeito dos ruídos seja minimizado. Deste modo, o planejamento experimental pode ser empregado tanto no desenvolvimento quanto na resolução de problemas do processo, para melhorar o seu desempenho ou obter um processo que seja robusto ou não sensível a fontes externas de variabilidade (DIETER, 2000). Uma vez definido o conjunto adequado de variáveis de um processo, a próxima etapa, comumente estabelecida é a determinação de um conjunto de condições de operação para tais variáveis, que resultem no melhor desempenho. Para tal continuidade do experimento, utiliza-se a metodologia da superfície de resposta (Montgomery, 2004) exposta na seqüência do trabalho.

2.2 Metodologia de Superfície de Resposta

A Metodologia da Superfície de Resposta (RSM), defendida por Box & Wilson em 1951, tem atraído a atenção de pesquisadores e usuários de ferramentas estatísticas, como uma técnica de otimização no campo das análises numéricas (MYERS et al., 2009). A RSM tem atraído a atenção de pesquisadores como uma técnica de otimização no campo das análises numéricas, que consiste em equações matemáticas úteis na modelagem e na redução de variabilidade dos processos (MONTGOMERY, 2004). Essa metodologia fornece maior credibilidade aos experimentos, devido à obtenção de resultados mais precisos e confiáveis, permitindo a redução do número de ensaios, tempo de execução e custos (DIETER, 2000).

Silva et al. (2007) utilizam equações matemáticas para otimizar a quantidade de substâncias em medicamentos, destacando a viabilidade do controle de

qualidade no processo fabril. Para Diniz e Oliveira (2009), o modelo de regressão permitiu analisar e identificar a influência das fontes de alumínio na geração de escórias sólidas. Enquanto Pedrini et al. (2011), aborda o modelo de regressão para analisar a taxa de corrosão de tubos de aço carbono em um processo de fundição. Castellano et al. (2010) descrevem a influência da temperatura de cura, volume de escória granulada, composição da mistura e teor de água na resistência a compressão de corpos de cimento, utilizando um *design* experimental 2^k . Contudo, os estudos apresentados não exploram os níveis ótimos das variáveis e a perda monetária para o processo.

Myers et al. (2009) exemplificam a idéia geral da MSR, por meio de um processo na qual se deseja encontrar os níveis de temperatura de reação (x_1) e do tempo de reação (x_2) que maximizem o rendimento de um processo (y). O produto (y) é encontrado através da seguinte equação: $y = f(x_1, x_2) + \varepsilon$, onde ε representa o erro que é observado no produto y . Esta metodologia utiliza planejamento fatorial e modelos de regressão para a determinação de uma condição ótima de operação em uma superfície de resposta e a relação entre os parâmetros do processo. Santos et al., (2012) sugerem que os modelos estatísticas proporcionam modelagens mais precisas e realista do processo.

Seu principal objetivo é determinar com um experimento, a região ótima da superfície de resposta através de uma equação matemática (PRVAN e STREET, 2002), e a equação matemática obtida da RSM, permite determinar os níveis adequados para os parâmetros e, baseado na Função de Perda Multivariada (ver Eq.1), permite obter o valor monetário dos parâmetros de processo (MASON *et al.*, 2003). Esta função é empregada na quantificação da perda que um determinado erro de precisão impõe ao processo pela falta de qualidade.

$$Z = \sum_{i=1}^I k_i \cdot [(\bar{Y}_i - \tau_i)^2 + \sigma_i^2] \quad (1)$$

onde: Z é a perda associada com o desvio da variável resposta do seu valor-alvo, para a unidade i ; \bar{Y}_i = valor médio medido na i -ésima variável resposta em estudo; σ_i^2 = desvio-padrão medido na i -ésima variável resposta em estudo; τ_i = valor-alvo para a i -ésima variável resposta e k_i = coeficiente de perda da qualidade, que converte o desvio do valor-alvo em valor monetário.

3 ESTUDO EXPERIMENTAL

A empresa objeto de estudo é uma multinacional americana, situada no município de Montenegro/RS desde 2005, especializada na manufatura do ferro fundido para produção de maquinários que abrangem potências entre 50 e 200cv, os quais atendem a demanda interna, América Latina e Caribe. O parque fabril desta planta conta com 20 centros de usinagem e 6 tornos do tipo comandos numéricos computadorizados (CNC), estes são destinados a montagem do sistema de transmissão e chassis dos tratores.

O processo a ser otimizado consiste no processo de fresamento de blocos de ferro fundido cinzento para produção e montagem de sistemas de transmissão utilizando-se a metodologia de superfície de resposta (RSM). A primeira fase da metodologia de superfície de resposta consiste em definir as variáveis respostas e em seguida definir os fatores controláveis (parâmetros do processo).

Para a realização do experimento foram definidas as seguintes variáveis respostas: acabamento superficial do ferro usinado (y_1) e tempo total do ciclo de fresamento do ferro (y_2), os fatores controláveis: velocidade de corte (x_1), avanço de corte (x_2) e profundidade de corte (x_3), conforme Tabelas 1 e 2. O tipo de fresa normalmente pode afetar as variáveis respostas, no entanto, foi mantido constante ao longo dos experimentos trocando o inserto de acabamento para toda peça que entrar na máquina, evitando o desgaste que poderia influenciar nos resultados. Ademais, a habilidade do operador, oscilação do material e turno de operação não foram analisados.

Os insertos utilizados durante o experimento foram: Sandvik – R245-12 M-KM 3220 (metal duro revestido titânio para fresamento médio em desbaste de ferros fundidos cinzentos) e Sandvik – R245-12 E-W 3020 (metal duro com cobertura titânio para alisamento no acabamento), ver Figuras 2(a) e (b). A Figura 2(c) apresenta o desenho da peça fresada com indicação da área mensurada.

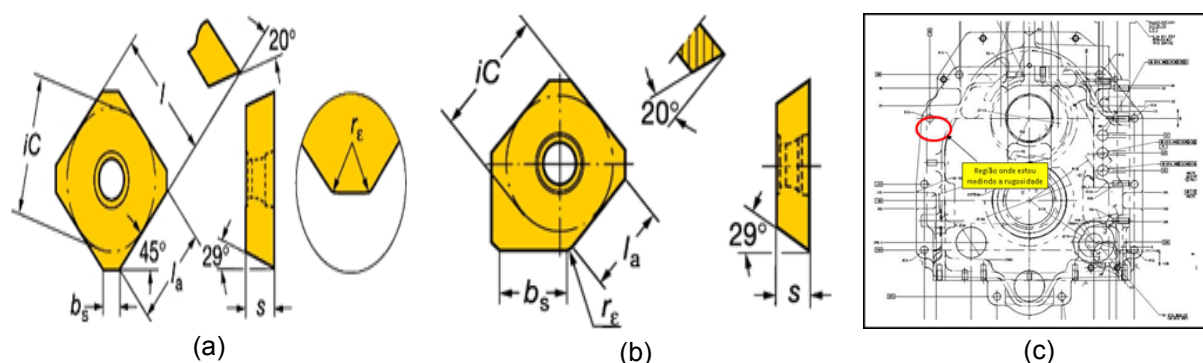
Tabela 1 - Valores de referência para as variáveis respostas

Variáveis Respostas	Tipo	Especificações		
		Valor-alvo	LSE	Und
y_1 :Rugosidade	Menor-é-melhor	0,00	3,20	Ra
y_2 :Tempo total	Menor-é-melhor	4,50	6,00	min

Tabela 2 - Valores testados para os fatores controláveis

Fatores controláveis	Níveis		
	Mín	Máx	Und
x_1 :Velocidade de corte	220	225	m/min
x_2 :Avanço de corte	0,15	0,21	mm
x_3 :Profundidade de corte	0,30	0,50	Mm/volta

Figura 2 - Insertos utilizados na operação de desbaste(a), acabamento(b) e desenho da área mensurada(c)



3.1 Planejamento Experimental

A matriz experimental foi definida com o auxílio do *software* Minitab 15.0®. Foi elaborado um design fatorial composto de segunda ordem (PCSO) que contempla um projeto fatorial 2^k ($2^3 = 8$), que permite o cálculo dos efeitos principais e de interação, mais pontos estrelas $2k$ ($2 \times 3 = 6$), que permite o cálculo do efeito quadrático dos fatores, além de 6 pontos centrais, totalizando 20 ensaios (combinação dos níveis dos fatores). A Tabela 3 apresenta a matriz experimental do PCSO com os níveis reais e codificados dos fatores controláveis e respectivas mensurações das variáveis respostas para cada ensaio, coletadas por um

rugosímetro e um cronômetro. As peças foram usinadas em ordem seqüencial por operadores de máquina, registrando o tempo de usinagem da operação e a rugosidade da área pré-definida da peça.

Foram usinadas e mensuradas 20 amostras do item R123456 (Figura 3(a)) em 5 pallets segregados no processo de fresamento para execução do experimento, com identificações para rastreamento e realização das medições. As peças foram usinadas na ordem seqüencial do design experimental conforme a combinação dos níveis de velocidade, avanço e profundidade de corte. Enquanto a peça era usinada, o técnico cronometrava o tempo de usinagem da operação e registrava na planilha de dados. Ao término da operação, o operador do processo retirava a peça para avaliar a rugosidade (ver Figura 3(b)) da área determinada.

Tabela 3 - Matriz experimental do PCSO

n	Fatores Controláveis						Variáveis Respostas	
	níveis reais			níveis codificados			Rugosidade (y ₁)	Tempo total (y ₂)
	Velocidade de corte (x ₁)	Avanço de corte (x ₂)	Profundidade de corte (x ₃)	x ₁	x ₂	x ₃		
1	220	0,15	0,30	-1	-1	-1	0.50	5.40
2	225	0,15	0,30	1	-1	-1	0.52	5.26
3	220	0,21	0,30	-1	1	-1	0.65	3.90
4	225	0,21	0,30	1	1	-1	0.73	3.83
5	220	0,15	0,50	-1	-1	1	0.36	5.40
6	225	0,15	0,50	1	-1	1	0.44	5.27
7	220	0,21	0,50	-1	1	1	0.41	3.90
8	225	0,21	0,50	1	1	1	0.45	3.83
9	218	0,18	0,40	-1,68	0	0	0.43	4.55
10	226	0,18	0,40	1,68	0	0	0.52	4.42
11	222	0,12	0,40	0	-1,68	0	0.27	5.90
12	222	0,23	0,40	0	1,68	0	0.56	3.56
13	222	0,18	0,23	0	0	-1,68	0.58	4.50
14	222	0,18	0,56	0	0	1,68	0.39	4.50
15	222	0,18	0,40	0	0	0	0.40	4.50
16	222	0,18	0,40	0	0	0	0.36	4.46
17	222	0,18	0,40	0	0	0	0.42	4.53
18	222	0,18	0,40	0	0	0	0.33	4.48
19	222	0,18	0,40	0	0	0	0.46	4.46
20	222	0,18	0,40	0	0	0	0.48	4.50

Figura 3 - Peça de ferro fundido cinzento(a) e medição da peça pelo rugosímetro(b)



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise experimental

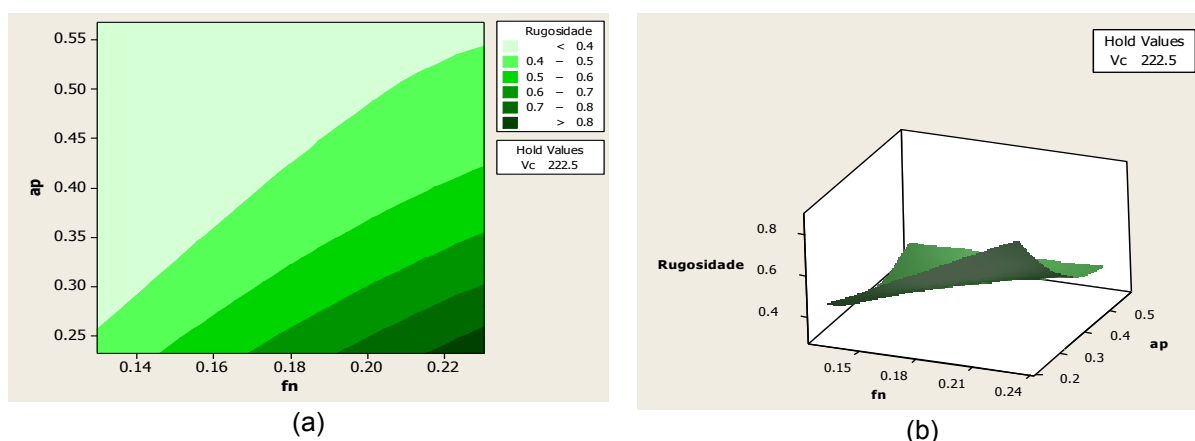
A partir dos resultados do experimento planejado foram obtidos os modelos de regressão, relacionando as variáveis respostas com os parâmetros do processo. A tabela 4 apresenta a análise do modelo de regressão para a rugosidade. Observa-se que os fatores controláveis: velocidade de corte (V_c), avanço de corte (f_n), profundidade de corte (a_p), a interação ($f_n \cdot a_p$) e os efeitos quadráticos da velocidade ($V_c \cdot V_c$) e profundidade ($a_p \cdot a_p$) mostraram-se significativas ($p < 0,05$), com $R^2 = 84,83\%$ que representa um bom ajuste do modelo. A equação matemática que descreve a rugosidade é: $R_a = 0,416 + 0,111 \cdot f_n - 0,130 \cdot a_p - 0,106 \cdot f_n \cdot a_p + 0,090 \cdot V_c \cdot V_c + 0,100 \cdot a_p \cdot a_p$ Na análise gráfica da Superfície de resposta, observa-se que a rugosidade diminui à medida que avanço de corte (f_n) diminui e a profundidade de corte (a_p) aumenta, conforme Figuras 4(a) e (b).

Tabela 4 - Análise de variância do modelo de regressão para a Rugosidade

Parâmetro	Estimativa	Erro-padrão	t	Valor-p
Intercepto	0,416	0,0179	23,26	0,000*
Vc	0,045	0,0235	1,94	0,074
fn	0,111	0,0235	4,74	0,000*
ap	-0,130	0,0235	-5,54	0,000*
Vc*Vc	0,090	0,0383	2,36	0,034*
fn*fn	0,034	0,0425	0,80	0,440
ap*ap	0,100	0,0383	2,62	0,021*
Vc*fn	0,007	0,0570	0,12	0,904
Vc*ap	0,007	0,0570	0,12	0,904
fn*ap	-0,106	0,0517	-2,05	0,061
R^2	84,83%			

*Nível de significância "Teste t-Student": $p < 0,05$

Figura 4 - Gráfico da Superfície de resposta (a) e Contorno (b) para a Rugosidade



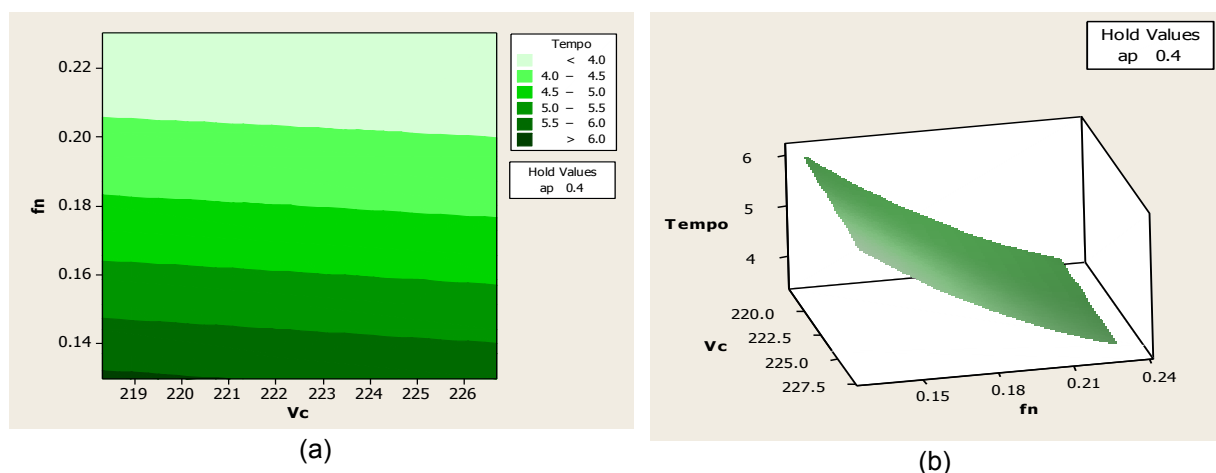
A tabela 5 apresenta a análise do modelo de regressão para o tempo total de fresamento. Observa-se que as variáveis de entrada velocidade de corte (Vc), avanço de corte (fn), a interação (Vc*fn) e o efeito quadrático do avanço (fn*fn) e interações mostraram-se significativas ($p < 0,05$), com $R^2 = 99,95\%$ que representa um bom ajuste do modelo. A equação matemática que descreve o tempo total é: $Tt = 4,496 - 0,078 \cdot Vc - 1,206 \cdot fn + 0,077 \cdot Vc \cdot fn + 0,252 \cdot fn \cdot fn$. Na análise gráfica da Superfície de resposta, observa-se que o tempo total diminui à medida que a velocidade (Vc) e o avanço de corte (fn) aumentam, conforme figuras 4(a)e(b).

Tabela 5 - Análise de variância do modelo de regressão para o Tempo total

Parâmetro	Estimativa	Erro-padrão	t	Valor-p
Intercepto	4,496	0,0082	547,17	0,000*
Vc	-0,078	0,0130	-5,99	0,000*
fn	-1,206	0,0130	-92,26	0,000*
ap	0,0003	0,0146	0,02	0,980
Vc*Vc	0,008	0,0239	0,34	0,741
fn*fn	0,252	0,0212	11,88	0,000*
ap*ap	0,025	0,0239	1,05	0,319
Vc*fn	0,077	0,0287	2,68	0,114
Vc*ap	0,001	0,0321	0,033	0,974
fn*ap	-0,003	0,0321	-0,099	0,923
R ²	99,86%			

*Nível de significância "Teste t-Student": p < 0,05

Figura 5 - Gráfico da Superfície de resposta (a) e Contorno (b) para o Tempo total



4.2 Otimização experimental

A metodologia utilizada na otimização multivariada do processo de fresamento, baseou-se na Função de Perda Multivariada, apresentada na equação (1), com objetivo de otimizar simultaneamente os fatores controláveis e as variáveis respostas e minimizar a perda do processo (Z_i) associando os custos de operação.

A otimização experimental foi realizada com o auxílio do *software* Minitab 15.0®, definindo os valores dos parâmetros para as variáveis respostas: Rugosidade (modelo 1) e tempo total (modelo 2), para os fatores controláveis: Velocidade de corte (218,3 – 226,7 rpm), Avanço de corte (0,13 – 0,23 mm/s) e Profundidade de

corte (0,23 – 0,57 mm) e para os custos de operação: Rugosidade R\$ 1,20/peça e Tempo de Fresamento R\$ 10,35/peça. As estimativas otimizadas para os fatores controláveis otimizados foram: Velocidade de corte = 221,7 rpm, Avanço de corte = 0,18 mm/s e Profundidade de corte = 0,50 mm que determina uma Rugosidade de 0,369 Ra e tempo total de 4,50 minutos, o que permite uma redução de 58% na perda de material e de R\$ 6,50 no custo de processo do ferro fundido.

$$Z = R\$1,20 \cdot [(0,369 - 0,32)^2 + (0,109)^2] + R\$10,20 \cdot [(4,5 - 4,0)^2 + (0,615)^2] = R\$6,50 \quad (2)$$

5 CONCLUSÕES

Este artigo propôs uma otimização experimental dos parâmetros de usinagem (acabamento superficial e o tempo total) no processo de fresamento de uma planta industrial utilizando a metodologia de superfície de resposta. A fim de determinar o ajuste ótimo dos parâmetros de usinagem no processo de fresamento de carcaças produzidas em ferro fundido cinzento e a perda de material e custo.

Os modelos de regressão desenvolvidos para a rugosidade e o tempo total em função da velocidade, avanço e profundidade de corte apresentaram boa adequação ($R^2 > 90\%$), refletindo a relação entre as variáveis e possibilidade de previsão do efeito dos parâmetros do processo.

A otimização global do processo de fresamento do ferro fundido foi obtida com os seguintes valores ótimos para os fatores controláveis: velocidade de corte no nível baixo (221,7 rpm), o avanço de corte no nível médio (0,18 mm/s) e a profundidade de corte no nível máximo (0,50 mm). Outro dado importante resultante deste trabalho foi à verificação dos menores valores das variáveis respostas simultaneamente: rugosidade 0,369 Ra e tempo total 4,50 minutos de usinagem e um custo de R\$6,50, quando ajustados os parâmetros citados acima.

Este estudo destaca a relevância em realizar uma otimização experimental dos parâmetros de usinagem de um processo de fresamento de ferro fundido cinzento fundamentado em ensaios planejados, permitindo avaliar a perda de material e custo de operação. O método utilizado para otimização experimental proporciona resultados importantes que auxiliam o engenheiro de produção ou de processo na análise de diagnóstico do processo de manufatura.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M.C.S., BIANCHI, E.C., AGUIAR, P.R., Influencia da velocidade de avanço do rebolo nos danos de aços endurecidos retificados. **Revista Matéria**, v.13, n.43, p.636-642, 2008.
- CASTELLANO, C. C., BONAVETTI, V. L., IRASSAR, E. F., Influencia de la temperatura de curado: hidratación y resistencia de pastas de cemento con scoria. **Revista Matéria**, v.15, n.4, p.516-526, 2010.
- COPPINI, N.L., BAPTISTA, E.A., Alternativas de otimização dos parâmetros de corte para cenários de fabricação em usinagem. In: *ENC. NAC. ENG. PROD.*, **Anais**. Rio de Janeiro: ABEPRO, v.2, p. 28-36, 1998.
- DIETER, G., **Engineering design: a materials and processing approach**. 3ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 721p.
- DINIZ, A.G.F., OLIVEIRA, I.L., Influência das fontes de alumínio secundário na geração de escória: uma análise estatística. **Revista Produção Online**, v. 9, n.2, p. 284-302, 2009.
- GINTA, T.L., AMIN, A.K.M.N., RADZI, H.C.D.M., LAJIS, M.A., Development of surface roughness models in end milling titanium alloy ti-6al-4v using uncoated tungsten carbide inserts. **European Journal of Scientific Research**, n.4, p.542-551, 2009.
- GRAVALOS, M.T., MARTINS, M., DINIZ, A.E., MEI, P.R., Efeito da usinagem na estrutura e propriedades mecânicas do aço superaustenítico ASTM A351 CN3MN. **Revista Esc. Minas**, n.60, p.83-88, 2007.
- INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA (IEA). Crise Mundial e Agronegócio. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/index.php>>. Acesso em: abr. 2009.
- KADIRGAMA, K., NOOR, M.M., ZUKI, N.M., RAHMAN, M.M., REJAB, M.R.B., DAUD, R., ABOU-EL-HOSSEIN, K.A., Optimization of surface roughness in end milling on mould aluminium alloys (AA6061-T6) using response surface method and radian basis function network. **Journal of Mechanical and Industrial Engineering**, n.4, p.209-214, 2008.
- MASON, L.R., GUNST F.R., HESS L.J., **Statistical design and analysis of experiments**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 665p, 2003.
- MONTGOMERY, D.C., **Design and analysis of experiments**. 6. Ed. New York: John Wiley & Sons, 2004. 684p.
- MYERS, R.H., MONTGOMERY, D.C. ANDERSON-COOK, C.M., **Response surface methodology**. 3. ed, New York: John Wiley & Sons, 2009. 677p.

NGUYEN, T., ZHANG, L.C., An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 140, n. 1, p. 224-230, 2003.

PEDRINI, D.C., SANT'ANNA, A.M.O., CATEN, C.S., Gráfico EWMAREG aplicado no monitoramento de processos industriais. **Revista Produção Online**, v.11, n. 4, p. 1141-1159, 2011.

PRVAN, T., STREET, D.J., An annotated bibliography of application papers using certain classes of fractional factorial and related designs. **Journal of Statistical Planning and Inference**, n.106, p.245-269, 2002.

RYAN, T.P., **Statistical methods for quality improvement**. New York: John Wiley & Sons, 446p, 1989.

SANTOS, R.F., SOUZA Jr, E.C., BOUZADA, M.A.C., A aplicação da programação inteira na solução logística do transporte de carga: o solver e suas limitações na busca pela solução ótima. **Revista Produção Online**, v.12, n. 1, p. 185-204, jan./mar. 2012.

SILVA, F.E.B, SABIN, G.P., MÜLLER, E.I., PARISOTTO, G., FLORES, E.M.M., FERRÃO, M.F., Otimização de métodos de regressão multivariada para quantificação de sulfametoxazol e trimetoprima em medicamentos. **Revista Produção Online**, v.7, n. Especial, p. 30-47, 2007.



Artigo recebido em 07/12/2011 e aceito para publicação em 13/08/2012.