

## PROJETO DE PARÂMETROS ROBUSTOS PARA O FRESAMENTO DE TOPO DO AÇO ABNT 1045

Tarcísio Gonçalves de Brito, [engtarc.gb@ig.com.br](mailto:engtarc.gb@ig.com.br)

José Henrique de Freitas Gomes, [ze\\_henriquefg@yahoo.com.br](mailto:ze_henriquefg@yahoo.com.br)

João Roberto Ferreira, [jorofe@unifei.edu.br](mailto:jorofe@unifei.edu.br)

Anderson Paulo de Paiva, [andersonppaiva@unifei.edu.br](mailto:andersonppaiva@unifei.edu.br)

Wesley Suzuki, [wesleysuzuki@hotmail.com](mailto:wesleysuzuki@hotmail.com)

**Resumo:** *A indústria metal mecânica é caracterizada pela elevada qualidade em seus componentes, sendo a usinagem responsável por uma parcela considerável de busca por melhorias em seus produtos. Na fabricação de peças para o setor, o emprego do aço ABNT 1045 destaca-se pelas suas boas propriedades mecânicas e baixo custo. No entanto, as superfícies das peças apresentam irregularidades quando observadas em detalhes, sendo estas irregularidades provocadas por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta. Sendo assim, este trabalho enfoca a aplicação de um método experimental para determinar as condições ótimas da rugosidade superficial Ra no fresamento de topo do aço ABNT 1045. Para isso, desenvolveu-se um modelo matemático utilizando o projeto de parâmetros robustos (RobustParameter Design – RPD), através de um arranjo combinado que considerou quatro variáveis de controle e três variáveis de ruído. As variáveis de controle analisadas foram o avanço por dente, profundidade de corte, velocidade de corte e largura de corte. As variáveis de ruído incluíram o desgaste de flanco da ferramenta, concentração do fluido de corte e vazão do fluido de corte. A partir da modelagem dual do processo, a otimização foi baseada na minimização do erro quadrático médio. Os resultados mostraram que o método utilizado foi eficiente para a estimativa dos parâmetros robustos da rugosidade Ra, otimizada com um valor médio de 0,281  $\mu\text{m}$  e variância de 0,005  $\mu\text{m}^2$ .*

*Palavras-chave: Fresamento de topo, Projeto robusto, Metodologia de Superfície de Resposta.*

## **1. INTRODUÇÃO**

O fresamento é um processo que se diferencia das demais operações de usinagem principalmente por apresentar as mais variadas formas e geometrias possíveis de serem geradas (Diniz et al., 2008). No entanto, um aspecto crítico para o processo diz respeito aos diversos tipos de desgaste e avarias das ferramentas de corte, que conseqüentemente diminuem sua vida útil, além de possuírem influência direta sobre os custos e o acabamento da peça usinada (Sandvik, 2011; Davim, 2008; Teles, 2007; Ferraresi, 1970). Na medida em que o desgaste das ferramentas se caracteriza como uma variável de difícil controle, a busca por condições de fresamento que propiciem um melhor acabamento superficial e uma melhor integridade da superfície usinada tem sido o alvo dos trabalhos de vários pesquisadores (KopacandKrajnik, 2007; Reddyand Rao, 2005; Ghani et al., 2004).

Em relação às demais variáveis do processo, o uso de fluidos de corte em operações de fresamento também tem sido estudado com grande intensidade. Os fluidos de corte atuam na refrigeração do cavaco, ferramenta e peça, sobretudo quando o processo opera em altas velocidades de corte. Outras vantagens da utilização dos fluidos de corte incluem a lubrificação da região usinada, a redução da força de corte, a melhoria da vida da ferramenta, do acabamento superficial e da precisão dimensional da peça, e a proteção da superfície usinada devido à quebra e transporte dos cavacos (Tawakoliet al., 2010; Machado et al., 2009; Diniz et al., 2008; Trent and Wright, 2000). Entretanto, o emprego dos fluidos de corte pode estar sujeito a variações incontroladas em sua concentração e vazão de operação, o que, de certa forma, pode acabar influenciando a qualidade final do produto usinado.

Portanto, considerando que os resultados do processo de fresamento, muitas vezes representados pelo acabamento superficial, podem ser afetados por variações inerentes às ferramentas e ao fluido de corte, torna-se de grande relevância que a operação seja

configurada para responder com o mínimo de sensibilidade a tais variações. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo a determinação de parâmetros robustos para a otimização da rugosidade Ra no fresamento de topo do aço ABNT 1045. Dado que o aço ABNT 1045 é visto como um material relevante para a indústria metal mecânica (possui boas propriedades mecânicas e baixo custo), deseja-se obter um ajuste ótimo para as variáveis de controle de modo que a rugosidade média seja a menor possível e apresente o mínimo de variabilidade em relação às inconsistências observadas nas ferramentas e no fluido de corte. Sendo assim, a otimização robusta foi desenvolvida através da minimização do erro quadrático médio construído para a rugosidade Ra, sendo as equações de média e variância desenvolvidas a partir de um arranjo combinado projetado para experimentos com quatro variáveis de controle (avanço por dente, profundidade de corte, velocidade de corte e largura de corte) e três ruídos (desgaste de flanco da ferramenta, concentração do fluido de corte e vazão do fluido de corte). A estratégia utilizada para a modelagem e otimização do fresamento de topo considerado neste trabalho é apresentada em maiores detalhes na seção seguinte.

## **2. PROJETO DE PARÂMETROS ROBUSTOS**

O projeto de parâmetros robustos (RobustParameter Design – RPD), segundo Montgomery (2005), é uma abordagem para a análise e melhoria de processos cujo foco é a determinação dos níveis das variáveis de controle visando os seguintes objetivos: (1) garantir que a média das respostas do processo se estabeleça em um nível desejado (alvo) e (2) garantir que a variabilidade em torno dos valores alvo seja a menor possível. Quanto às técnicas utilizadas para a modelagem e análise dos dados, Montgomery (2005) afirma que a Metodologia de Superfície de Resposta tem se mostrado como uma estratégia eficiente para a abordagem RPD e, nesse sentido, o método de análise é desenvolvido a partir de um dos seguintes arranjos experimentais: os arranjos cruzados ou os arranjos combinados. Para o presente trabalho, a estratégia experimental foi baseada em um arranjo combinado.

Os arranjos combinados são definidos como o sequenciamento de experimentos nos quais as variáveis de ruído, para fins de experimentação, são tratadas como variáveis de controle e, dessa forma, variáveis de controle e ruídos são combinadas em um único arranjo experimental. Com isso, a partir das informações coletadas nos experimentos, torna-se possível a construção de um modelo de superfície de resposta que relaciona as variáveis de controle, os ruídos e suas respectivas interações. A Eq. (1) descreve o modelo de segunda ordem desenvolvido a partir de um arranjo combinado.

$$y(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^r \gamma_i z_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \delta_{ij} x_i z_j + \varepsilon \quad (1)$$

onde:  $y$  – Resposta de interesse

$x_i$  – Variáveis de controle

$z_i$  – Variáveis de ruído

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}, \gamma_i, \delta_{ij}$  – Coeficientes a serem estimados

$k$  – Número de variáveis de controle

$r$  – Número de variáveis de ruído

$\varepsilon$  – Erro experimental

Na Eq. (1), os coeficientes  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}, \gamma_i$  e  $\delta_{ij}$  são estimados através do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (*OrdinaryLeastSquares* – OLS). Uma vez que o modelo de superfície de resposta representado pela Eq. (1) foi estabelecido, a equação para a média da resposta  $y$  pode ser extraída diretamente do modelo combinado. Para isso, utiliza-se o seguinte critério:

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

O modelo de variância é desenvolvido utilizando o princípio da propagação de erro, através da seguinte derivação:

$$\sigma^2(y) = \sum_{i=1}^r \left[ \frac{\partial y(\mathbf{x}, \mathbf{z})}{\partial z_i} \right]^2 \cdot \sigma_{z_i}^2 + \sigma^2 \quad (3)$$

Para a Eq. (3), Montgomery (2005) sugere adotar  $\sigma_{z_i}^2 = 1$  e a variável  $\sigma^2$  corresponde ao erro residual (*MS*) do modelo de superfície de resposta descrito na Eq. (1). Uma observação importante sobre as Eqs. (2) e (3) é que os modelos de média e variância descrevem a resposta *y* apenas como função das variáveis de controle  $x_i$ , possibilitando, assim, que o processo seja configurado para que a variabilidade transmitida pelas variáveis de ruído seja a menor possível.

Com o desenvolvimento das equações de média e variância, a otimização dual do processo pode ser conduzida empregando-se as diversas técnicas de otimização de múltiplos objetivos disponíveis na literatura. Neste trabalho, utilizou-se o conceito do erro quadrático médio (EQM), que é apresentado por Köksoy (2006) como a soma da variância com a diferença quadrática entre a média da resposta e o seu valor alvo. Sendo assim, a minimização do erro quadrático médio garante, então, que o valor médio da resposta se estabeleça o mais próximo possível do seu alvo, apresentando ao mesmo tempo o mínimo de variabilidade. Tal otimização é obtida a partir da seguinte formulação:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } EQM(y) &= [\mu(y) - T_y]^2 + \sigma^2(y) \\ \text{Sujeito a: } \mathbf{x}^T \mathbf{x} &\leq \alpha^2 \end{aligned} \quad (4)$$

onde: *EQM*(*y*) – Erro quadrático médio da resposta *y*

$\mu(y)$  – Modelo para a média da resposta *y*

$T_y$  – Alvo da resposta *y*

$\sigma^2(y)$  – Modelo para a variância da resposta *y*

$\mathbf{x}^T \mathbf{x} \leq \alpha^2$  – Restrição esférica para o espaço experimental

Vale destacar que o conceito do erro quadrático médio tem sido empregado para a otimização robusta de diferentes processos de fabricação, como pode ser observado em Paiva et al. (2012) e Gomes et al. (2012).

Para a determinação dos parâmetros robustos otimizados, resolve-se o problema definido pela Eq. (4) através do emprego de algoritmos de otimização. O algoritmo Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) (Rao, 1996) foi utilizado neste trabalho para este propósito.

### **3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Para a coleta dos dados, experimentos de fresamento de topo do aço ABNT 1045 foram planejados através de um arranjo combinado. Dessa forma, um arranjo composto central (central composite design – CCD) foi criado para sete variáveis, sendo quatro delas as variáveis de controle e três as variáveis de ruído. Considerando que os níveis extremos das variáveis de ruído (pontos axiais) foram desconsiderados, conforme recomendado por Montgomery (2005), e adotando 10 experimentos para os pontos centrais, o arranjo combinado ficou então composto por 82 experimentos. A Tab. 1 e a Tab. 2 apresentam as variáveis de controle e os ruídos do processo, juntamente com os seus respectivos níveis de operação.

**Tabela 1. Variáveis de controle e seus níveis.**

Parâmetros de fresamento	Unidade	Notação	Níveis				
			- 2,828	-1	0	+1	+2,828
Avanço por dente	mm/dente	<i>fz</i>	0,01	0,10	0,15	0,20	0,29
Profundidade de corte	mm	<i>ap</i>	0,064	0,750	1,125	1,500	2,186
Velocidade de corte	m/min	<i>Vc</i>	254	300	325	350	396
Largura de corte	mm	<i>ae</i>	12,26	15,00	16,50	18,00	20,74

**Tabela 2. Variáveis de ruído e seus níveis.**

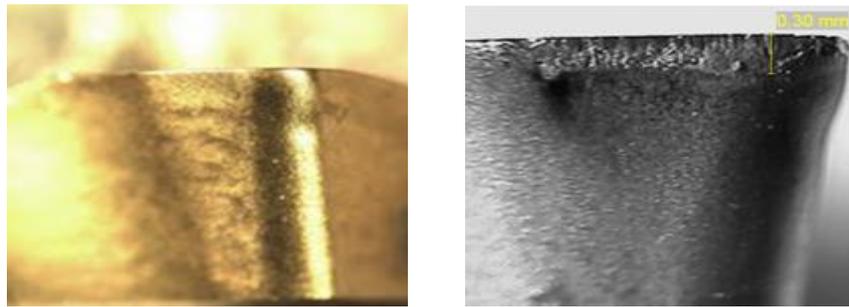
Ruídos	Unidade	Notação	Níveis		
			-1	0	+1
Desgaste de flanco da ferramenta	mm	<i>VB</i>	0,00	0,15	0,30
Concentração do fluido de corte	%	<i>C</i>	5	10	15
Vazão do fluido de corte	l/min	<i>Q</i>	0	10	20

Quanto aos equipamentos utilizados, os experimentos foram conduzidos em um centro de usinagem CNC da marca Fadal, com 15 kW de potência e rotação máxima de 7.500 rpm. O material usinado foi o aço ABNT 1045, forjado em blocos de dimensões 100 x 100 x 300 mm e com dureza média de 180 HB. A ferramenta utilizada se constituiu de uma fresa de topo código R390-025A25-11M, com diâmetro de 25 mm, ângulo de posição  $\chi_r = 90^\circ$ , haste cilíndrica, passo médio com 3 insertos e fixação mecânica por pinça. Os insertos foram de metal duro ISO P25, código R390-11T308M-PM GC 1025 (Sandvik-Coromant), revestidos com nitreto de titânio (TiN). Como fluido de corte, empregou-se o óleo sintético Quimatic MEII. As Figs. 1 e 2 ilustram, respectivamente, o processo de usinagem considerado e a ferramenta de corte.

**Figura 1. Fresamento de topo do aço ABNT 1045.****Figura 2. Ferramenta de corte (fresa de topo).**

A avaliação do desgaste da ferramenta foi realizada através de um microscópio estereoscópico modelo Magnification, com aumento de 40x e com uma câmera digital acoplada para aquisição de imagens. O critério adotado para o fim de vida da ferramenta foi o desgaste de flanco  $VB_{max} = 0,30$  mm, conforme ilustra a Fig. 3.

Após o fresamento do bloco de aço ABNT 1045 (sentido concordante) utilizando os parâmetros definidos pelo arranjo experimental, a rugosidade média  $R_a$  foi medida na superfície usinada através de um rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-201 M/P (Fig. 4). A medição de  $R_a$  ocorreu em três pontos do bloco, sendo um no centro e um em cada extremidade, a fim de se considerar o valor médio das leituras. Com isso, após a execução e medição de todos os experimentos, foi construída a matriz experimental (Tab. 3), utilizada como fonte de dados para a modelagem e otimização do processo. Em função da grande quantidade de dados, optou-se por apresentar neste trabalho somente parte da matriz de experimentos.



(a)

(b)

**Figura 3. Avaliação do desgaste da ferramenta: (a) ferramenta nova; (b) ferramenta desgastada (fim de vida).**



**Figura 4. Medição da rugosidade Ra na superfície usinada.**

**Tabela 3. Matriz experimental.**

Teste	Variáveis de controle codificadas				Ruídos codificados			Ra ( $\mu\text{m}$ )
	<i>fz</i>	<i>ap</i>	<i>Vc</i>	<i>ae</i>	<i>VB</i>	<i>C</i>	<i>Q</i>	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0,297
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1,807
3	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	0,657
4	1	1	-1	-1	-1	-1	1	2,573
5	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0,353
6	1	-1	1	-1	-1	-1	1	3,013
7	-1	1	1	-1	-1	-1	1	0,270
8	1	1	1	-1	-1	-1	-1	2,417
9	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	0,320
10	1	-1	-1	1	-1	-1	1	3,170
11	-1	1	-1	1	-1	-1	1	0,280
12	1	1	-1	1	-1	-1	-1	2,877
13	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,270
14	1	-1	1	1	-1	-1	-1	3,030
15	-1	1	1	1	-1	-1	-1	0,550
16	1	1	1	1	-1	-1	1	1,520
17	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0,497
18	1	-1	-1	-1	1	-1	1	2,770
19	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,383
20	1	1	-1	-1	1	-1	-1	3,247
:	:	:	:	:	:	:	:	:
65	-2,828	0	0	0	0	0	0	0,100
66	2,828	0	0	0	0	0	0	*
67	0	-2,828	0	0	0	0	0	0,350
68	0	2,828	0	0	0	0	0	1,573
69	0	0	-2,828	0	0	0	0	0,650
70	0	0	2,828	0	0	0	0	0,440

71	0	0	0	-2,828	0	0	0	0,390
72	0	0	0	2,828	0	0	0	1,183
73	0	0	0	0	0	0	0	0,343
74	0	0	0	0	0	0	0	0,540
75	0	0	0	0	0	0	0	0,680
76	0	0	0	0	0	0	0	0,520
77	0	0	0	0	0	0	0	0,540
78	0	0	0	0	0	0	0	0,323
79	0	0	0	0	0	0	0	0,527
80	0	0	0	0	0	0	0	0,607
81	0	0	0	0	0	0	0	0,697
82	0	0	0	0	0	0	0	0,430

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Eq. (5) apresenta o modelo de superfície de resposta do arranjo combinado escrito em termos das variáveis de controle e ruído consideradas neste trabalho.

$$\begin{aligned}
 Ra(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = & \beta_0 + \beta_1 fz + \beta_2 ap + \beta_3 Vc + \beta_4 ae + \beta_{11} fz^2 + \beta_{22} ap^2 + \beta_{33} Vc^2 + \beta_{44} ae^2 + \beta_{12} fz \cdot ap + \beta_{13} fz \cdot Vc \\
 & + \beta_{14} fz \cdot ae + \beta_{23} ap \cdot Vc + \beta_{24} ap \cdot ae + \beta_{34} Vc \cdot ae + \gamma_1 VB + \gamma_2 C + \gamma_3 Q + \delta_{11} fz \cdot VB + \delta_{12} fz \cdot C \\
 & + \delta_{13} fz \cdot Q + \delta_{21} ap \cdot VB + \delta_{22} ap \cdot C + \delta_{23} ap \cdot Q + \delta_{31} Vc \cdot VB + \delta_{32} Vc \cdot C + \delta_{33} Vc \cdot Q + \delta_{41} ae \cdot VB \\
 & + \delta_{42} ae \cdot C + \delta_{43} ae \cdot Q
 \end{aligned}$$

(5)

Na equação anterior, as variáveis  $fz$ ,  $ap$ ,  $Vc$  e  $ae$  são expressas em sua forma codificada. Os coeficientes do modelo foram estimados utilizando o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) através do software estatístico *Minitab*®. Sendo assim, chegou-se à seguinte expressão:

$$\begin{aligned}
 Ra(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = & 0,689 + 0,898fz + 0,041ap - 0,066Vc - 0,004ae + 0,493fz^2 + 0,096ap^2 + 0,010Vc^2 + 0,064ae^2 \\
 & + 0,074fz \cdot ap - 0,087fz \cdot Vc + 0,030fz \cdot ae - 0,039ap \cdot Vc + 0,018ap \cdot ae + 0,043Vc \cdot ae + 0,102VB \\
 & + 0,002C + 0,005Q + 0,048fz \cdot VB - 0,086fz \cdot C + 0,042fz \cdot Q + 0,013ap \cdot VB - 0,073ap \cdot C \\
 & - 0,012ap \cdot Q + 0,020Vc \cdot VB - 0,034Vc \cdot C - 0,041Vc \cdot Q - 0,052ae \cdot VB - 0,013ae \cdot C - 0,025ae \cdot Q
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Inicialmente, os coeficientes estimados para a Eq. (5) proporcionaram um ajuste do modelo ( $R^2$  *adj.*) correspondente a 70,08%. Dessa forma, visando aumentar a capacidade de representação dos dados, o modelo foi corrigido utilizando a ponderação pelo inverso do quadrado dos resíduos ( $1/e^2$ ). Após a correção, foram obtidos os valores apresentados pela Eq. (6), sendo o novo ajuste igual a 99,9%.

Com a construção do modelo para o arranjo combinado, as equações de média e variância da rugosidade Ra foram extraídas utilizando as Eqs. (2) e (3). Tal procedimento gerou os seguintes resultados:

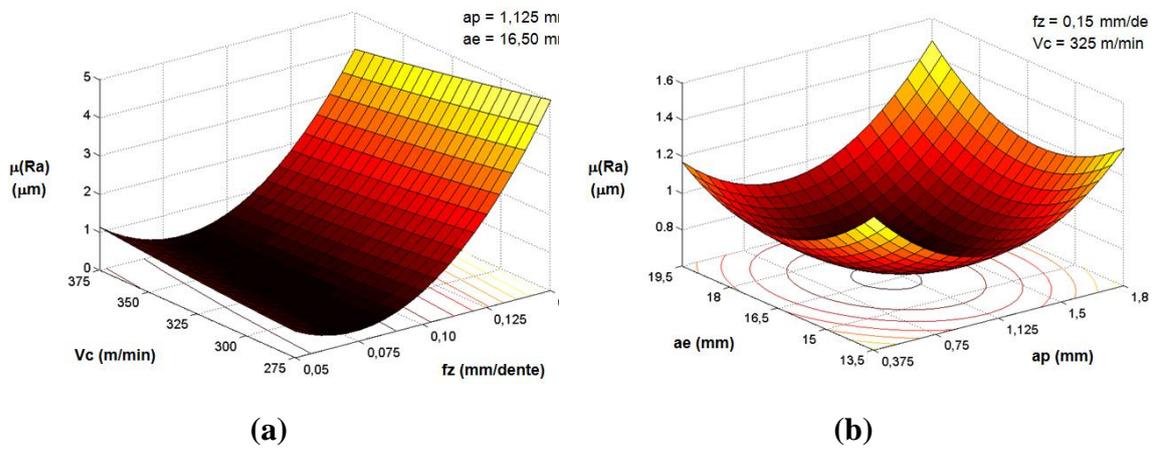
$$\begin{aligned}
 \mu(Ra) = & 0,689 + 0,898fz + 0,041ap - 0,066Vc - 0,004ae + 0,493fz^2 + 0,096ap^2 + 0,010Vc^2 + 0,064ae^2 \\
 & + 0,074fz \cdot ap - 0,087fz \cdot Vc + 0,030fz \cdot ae - 0,039ap \cdot Vc + 0,018ap \cdot ae + 0,043Vc \cdot ae
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma^2(Ra) = & 0,010 + 0,010fz + 0,002ap + 0,004Vc - 0,011ae + 0,011fz^2 + 0,006ap^2 + 0,003Vc^2 + 0,004ae^2 \\
 & + 0,013fz \cdot ap + 0,004fz \cdot Vc - 0,005fz \cdot ae + 0,006ap \cdot Vc + 0,001ap \cdot ae + 0,001Vc \cdot ae
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

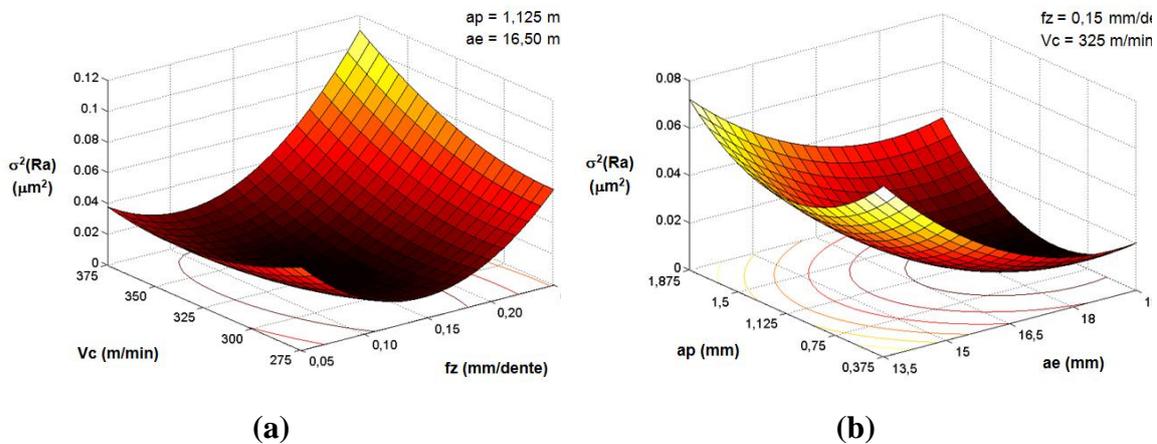
De acordo com o que foi discutido na seção 2, os modelos de média e variância desenvolvidos através de um arranjo combinado são escritos como função apenas das variáveis de controle, embora as variáveis de ruído sejam testadas em diferentes níveis durante os experimentos. No entanto, dado que a derivação da equação de variância leva em consideração os efeitos provocados pelas variáveis de ruído, o ajuste das variáveis de controle para se ter o mínimo de variabilidade garante a robustez do processo em relação a estes efeitos.

As Figs. 5 e 6 mostram as superfícies de resposta para a média e variância da rugosidade Ra, construídas a partir das Eqs. (7) e (8). Como pode ser observado, todos

os gráficos representados apresentam um ponto de curvatura no qual existe um valor mínimo para a média e a variância de Ra.



**Figura 5. Superfícies de resposta para a média de Ra: (a) interação entre avanço por dente e velocidade de corte; (b) interação entre profundidade de corte e largura de corte.**



**Figura 6. Superfícies de resposta para a variância de Ra: (a) interação entre avanço por dente e velocidade de corte; (b) interação entre largura de corte e profundidade de corte.**

Uma vez que as equações de média e variância foram estabelecidas, partiu-se para a otimização do processo através da minimização do erro quadrático médio. No entanto, para a construção da formulação apresentada pela Eq. (4), torna-se necessário que o valor alvo da rugosidade seja especificado. A fixação deste valor foi então baseada na otimização individual do valor médio de Ra, com a minimização da Eq. (7). Assim, adotou-se como alvo de Ra o valor de 0,23  $\mu\text{m}$  e a formulação do problema foi escrita como:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } EQM(Ra) &= [\mu(Ra) - 0,23]^2 + \sigma^2(Ra) \\ \text{Sujeito a: } fz^2 + ap^2 + Vc^2 + ae^2 &\leq 4,0 \end{aligned} \quad (9)$$

onde:  $EQM(Ra)$  – Erro quadrático médio para a rugosidade Ra

$\mu(Ra)$  – Modelo para a média de Ra, descrito na Eq. (7)

$\sigma^2(y)$  – Modelo para a variância de Ra, descrito na Eq. (8)

A determinação dos parâmetros robustos para o fresamento de topo do aço ABNT 1045 foi então obtida com o emprego do algoritmo GRG na formulação anterior. Para isso, utilizou-se o suplemento *Solver* do *Microsoft Excel*®, após o problema de otimização ser devidamente programado na planilha do software. A Tab. 4 apresenta os resultados ótimos.

**Tabela 4. Parâmetros robustos ótimos para o fresamento de topo do aço ABNT 1045.**

	Variáveis de controle				$\mu(Ra)$	$\sigma^2(Ra)$	EQM(Ra)
	$fz$	$ap$	$Vc$	$ae$			
Resultado ótimo	0,11	1,265	310	17,39	0,281	0,005	0,008
Unidade	mm/dente	mm	m/min	mm	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}^2$	-

Os parâmetros robustos determinados para o fresamento do aço ABNT 1045 caracterizam o ponto de ótimo como uma condição satisfatória para o processo, na medida em que o resultado esperado para a média da rugosidade Ra se mostra como um valor baixo em relação às medidas observadas nos experimentos. Além disso, a variabilidade de 0,005  $\mu\text{m}^2$  se traduz em um desvio-padrão de 0,073  $\mu\text{m}$ , também considerado um valor satisfatório em comparação às medidas experimentais.

Para os casos nos quais se tornar necessário ajustar o processo atribuindo ponderações diferentes entre a média e a variância de Ra, a Tab. 5 e a Fig. 7 apresentam a fronteira de Pareto construída para este problema. Dessa forma, chega-se a um conjunto de parâmetros robustos otimizados nos quais o processo pode ser configurado, de modo a se ter o melhor resultado para as respostas em diferentes cenários.

**Tabela 5. Parâmetros robustos determinados pela fronteira de Pareto.**

Peso $\mu(Ra)$	Peso $\sigma^2(Ra)$	$fz$ (mm/dente)	$ap$ (mm)	$Vc$ (m/min)	$ae$ (mm)	$\mu(Ra)$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma^2(Ra)$ ( $\mu\text{m}^2$ )
0,90	0,10	0,10	1,168	294	17,58	0,248	0,012
0,80	0,20	0,10	1,198	302	17,43	0,260	0,009
0,70	0,30	0,10	1,223	307	17,37	0,268	0,007
0,60	0,40	0,10	1,244	309	17,37	0,275	0,006

0,50	0,50	0,11	1,265	310	17,39	0,281	0,005
0,40	0,60	0,11	1,286	310	17,43	0,289	0,005
0,30	0,70	0,11	1,310	309	17,49	0,299	0,004
0,20	0,80	0,11	1,341	308	17,58	0,315	0,003
0,10	0,90	0,11	1,390	304	17,71	0,347	0,002

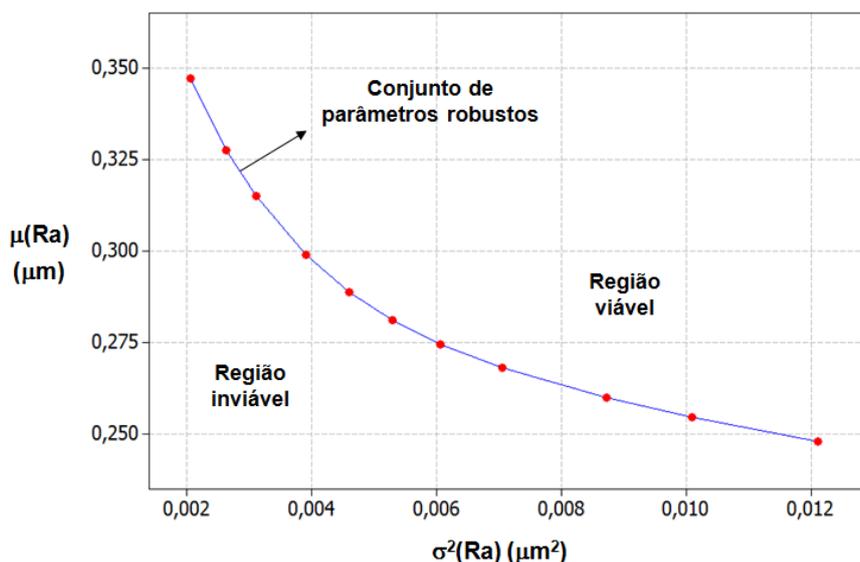


Figura 7. Fronteira de Pareto.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a determinação dos parâmetros robustos para a rugosidade Ra no processo de fresamento de topo do aço ABNT 1045, visando à minimização dos efeitos das variáveis que são dificilmente controladas e que neste estudo foram representadas pelo desgaste de flanco da ferramenta, pela concentração e pela vazão do fluido de corte. Dessa forma, buscou-se a otimização através da minimização do erro quadrático médio, calculado a partir dos modelos de média e variância estabelecidos para Ra. O modelo de superfície de resposta desenvolvido para

o arranjo combinado foi capaz de representar adequadamente as condições operacionais do processo, na medida em que seu ajuste inicial foi de 70,08%, chegando a 99,9% após o procedimento de correção. As superfícies de resposta construídas identificaram regiões nas quais a média e a variância da rugosidade  $R_a$  apresentaram valores mínimos e onde o método de otimização empregado foi capaz de localizar um ponto de ótimo satisfatório. Sendo assim, a condição robusta para a otimização da média e variância de  $R_a$  ocorre quando o fresamento do aço ABNT 1045 é configurado com as seguintes variáveis de controle:  $f_z = 0,11$  mm/dente;  $a_p = 1,265$  mm;  $V_c = 310$  m/min e  $a_e = 17,39$  mm. Nessa condição, a rugosidade apresenta um valor médio de  $0,281$   $\mu\text{m}$  com variância de  $0,005$   $\mu\text{m}^2$  (desvio-padrão de  $0,073$   $\mu\text{m}$ ). Após da definição do ponto de ótimo anterior, estabeleceu-se através da construção da fronteira de Pareto um conjunto de parâmetros robustos otimizados, úteis para a configuração do processo quando houver a necessidade de tratar as características duais de  $R_a$  com diferentes graus de importância.

## 6. REFERÊNCIAS

Davim, J.P., 2008, “Machining: Fundamentals and Recent Advances”, Ed. Springer, London, 375p.

Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L., 2008, “Tecnologia da usinagem dos materiais”, Artliber Editora, São Paulo, 262 p.

Ferraresi, D., 1970, “Fundamentos da usinagem dos metais”, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 751p.

Ghani, J.A., Choudhury, I.A., Hassan, H.H., 2004, “Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 145, No. 1, pp. 84-92.

Gomes, J.H.F., Campos, P.H.S., Lopes, L.G.D., Costa, S.C., Paiva, A.P., 2012, “Otimização robusta da diluição e da largura do cordão na soldagem com arame tubular para aplicações de revestimento do aço carbono ABNT 1020 com aço inoxidável ABNT 316L”, Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), São Luís (MA), Brasil.

Köksoy, O., 2006, “Multiresponse robust design: Mean square error (MSE) criterion”, Applied Mathematics and Computation, Vol. 175, No. 2, pp. 1716-1729.

Kopac, J. and Krajnik, P., 2007, “Robust design of flank milling parameters based on grey-Taguchi method”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 191, No. 1-3, pp. 400-403.

Machado, A.R., Coelho, R.T., Abrão, A.M, Silva, M.B., 2009, “Teoria da Usinagem dos Materiais”, Ed. EdgardBlücher, São Paulo, 384 p.

Montgomery, D.C., 2005, “Design and Analysis of Experiments”, Ed. John Wiley, New York, 643 p.

Paiva, A.P., Campos, P.H., Ferreira, J.R., Lopes, L.G.D., Paiva, E.J. and Balestrassi, P.P., 2012, “A multivariate robust parameter design approach for optimization of AISI 52100 hardened steel turning with wiper mixed ceramic tool”, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Vol. 30, No. 1, pp.152-163.

Rao, S.S., 1996, “Engineering optimization: theory and practice”, Ed. John Wiley & Sons, New Jersey, 903 p.

Reddy, N.S.K. and Rao, P.V., 2005, “A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model in dry milling”, Machining Science and Technology, Vol. 9, No. 1, pp. 63-84.

SandvikCoromant, 2011, “Manual técnico de usinagem”, Sandviken, Suécia.

Tawakoli, T., Hadad, M.J., Sadeghi, M.H., 2010, “Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication – MQL grinding process”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 50, No. 6, pp. 521-531.

Teles, J.M., 2007, “Torneamento de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio utilizando ferramentas de metal duro”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 106 p.

Trent, E.M. and Wright, P.K., 2000, “Metal cutting”, Ed. Butterworth-Heinemann, Boston, USA, 446p.