

## OTIMIZAÇÃO DA RUGOSIDADE DE UM PROCESSO DE TORNEAMENTO: UMA VARIÁVEL DE QUALIDADE

Tháles Luiz Renó (FAI)

thaleslreno@outlook.com

Claudio Gilberto Dias Borges Júnior (FAI)

claudio\_borgesjr@hotmail.com

Juliana Helena Daroz Gaudêncio (FAI)

julianagaudencio@fai-mg.br

### Resumo

Focando na determinação das condições ótimas de operação que tendem à realização de processos produtivos com mínima variabilidade, este trabalho tem por objetivo otimizar a resposta que representa uma característica de qualidade do processo de torneamento do aço de corte fácil 12L14 em relação as variáveis de entrada: velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f_n$ ) e profundidade ( $a_p$ ). A resposta analisada foi a rugosidade média ( $R_a$ ) do corpo de prova que tem a finalidade de ser minimizada. Nesse contexto, o ponto ótimo do problema é determinado por meio da otimização do Erro Quadrático Médio (EQM) que visa com que a medida de centralidade obtida do conjunto de dados de  $R_a$  seja a mais próxima possível do seu valor alvo enquanto que a variabilidade seja a menor possível e, desse modo, proporcionando com que o problema se torne insensível à ação de ruídos. Como resultado, obtiveram-se os valores de  $V_c = 286,185$  m/min;  $f_n = 0,087$  mm/rev e  $a_p = 0,562$  mm que foram considerados ideais para os parâmetros de entrada do processo quando o objetivo for a minimização da rugosidade que é considerada uma característica de qualidade do processo.

**Palavras-Chaves:** Otimização, Torneamento, Erro Quadrático Médio (EQM).

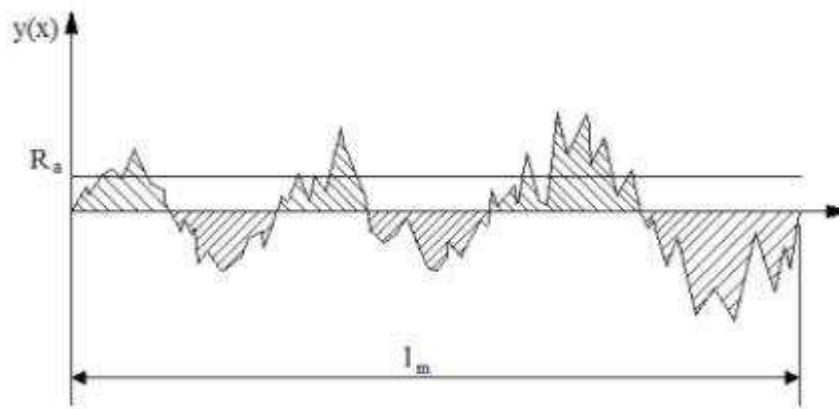
### 1. Introdução

Os programas de melhorias contínuas que focam em condições ótimas de operação é o meio pelo qual as empresas buscam garantir a qualidade de seus produtos e processos. A qualidade dos produtos obtidos a partir de processos de fabricação como a usinagem, está diretamente relacionada à maneira como as múltiplas características do produto atendem às especificações impostas pelos clientes. Considerando que o processo de usinagem é uma relação entre as variáveis de entrada do processo ( $x$ ) com as variáveis de saída ( $y$ ) que representam as

características de qualidade, tal que  $y = f(x)$ , se conclui que uma melhora na qualidade possa ser atingida com a definição do melhor conjunto dos parâmetros de entrada ( $x$ ).

Neste contexto, foi considerado o processo de torneamento do aço de corte fácil 12L14 que possui três parâmetros de entrada: Velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f_n$ ) e profundidade ( $a_p$ ) e uma variável de saída: rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) que representa o valor aritmético de todos os desvios do perfil de rugosidade em relação à linha média dentro do comprimento de medição ( $l_m$ ) conforme exemplificado pela Figura 1.

Figura 1 – Representação da obtenção de  $R_a$



Fonte: Gaudêncio (2015)

A rugosidade é considerada uma característica de qualidade do processo de torneamento, pois quanto menor for a rugosidade gerada no corpo de prova, melhor será o seu acabamento. Diante deste fato, este trabalho tem o objetivo de otimizar a rugosidade média  $R_a$  a fim de que o seu valor seja o menor possível e, assim, satisfazendo as características impostas pelo processo e, conseqüentemente, definindo os valores ótimos das variáveis de controle.

Para a realização da otimização, foi utilizado o Erro Quadrático Médio (EQM), do inglês, Mean Squared Error (MSE), que segundo Köksoy (2006) é um critério efetivo para combinar a média e as respostas de desvio padrão na otimização de respostas duais. Com a realização da otimização, o trabalho é finalizado por meio da obtenção do valor mínimo da rugosidade média  $R_a$  que satisfaz todas as condições impostas pelo processo. Como consequência, também são definidos os valores das variáveis de controle –  $V_c$ ,  $f_n$  e  $a_p$  – que são ideais para o processo atingir o alvo definido para  $R_a$ . Juntamente com o Projeto de Experimento (do inglês, *Design of Experiments* (DOE) que é uma técnica utilizada para definir quais dados, em que quantidade e condições devem ser coletadas durante um determinado experimento,

buscando satisfazer dois grandes objetivos: a precisão estatística da resposta e o menor custo (SANTOS, et al, 2016 apud ARANDA, 2008).

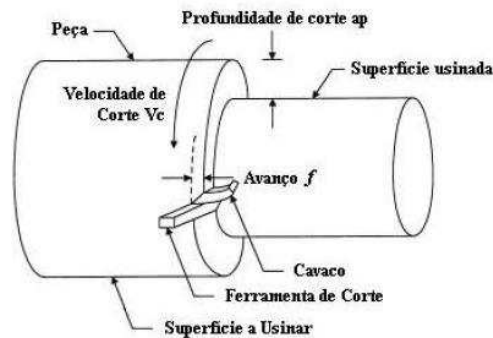
## 2. O Processo de torneamento

De acordo com Amorim (2002), torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo.

Existem, no torneamento, dois fatores cuja influência (independente de material de peça e ferramenta) determina o resultado final do processo: os parâmetros de corte e a geometria da aresta de corte.

Entre os parâmetros de corte, a velocidade de corte ( $V_c$ ) é a taxa na qual a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta, expressa normalmente em m/min. O avanço ( $f_n$ ) é a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça, e a profundidade de corte ( $a_p$ ) é a espessura ou profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e ( $V_c$ ) da ferramenta.

Figura 2 - Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo



Fonte: Amorim (2002)

### 2.1 - Planejamento de experimentos

Segundo Montgomery (2005), a experimentação possui um papel importante na área da engenharia como, por exemplo, no desenvolvimento de novos produtos, no processo de fabricação ou mesmo em sua melhoria com o objetivo, na maioria dos casos, de desenvolver um processo robusto que é minimamente afetado por fontes externas de variabilidade. O Projeto e Análise de Experimentos, é definido como o processo de planejamento dos

experimentos para que dados apropriados sejam coletados e depois analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas.

Dessa forma, qualquer problema experimental deve ser sustentado por dois elementos: o projeto dos experimentos e a análise estatística dos dados. Para auxiliar no desenvolvimento dos experimentos, a Metodologia de Superfície de Resposta é uma das técnicas utilizadas.

### 2.1.1 - Metodologia de superfície de resposta

Segundo Montgomery (2008), a metodologia de superfície de resposta (MSR) é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são úteis para modelagem e análise em aplicações onde uma resposta de interesse é influenciada por várias variáveis e o objetivo é otimizar essa resposta. Na maioria dos problemas de MSR, a forma da relação entre a resposta e as variáveis independentes é desconhecida. Assim, o primeiro passo no MSR é encontrar uma aproximação adequada para a relação verdadeira entre  $y$  e as variáveis independentes. Geralmente, emprega-se um polinômio de segunda ordem de acordo com o modelo da Equação (1).

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

Para qualquer um dos modelos polinomiais utilizados, os parâmetros ( $\beta$ ) podem ser estimados utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários, do inglês, *Ordinary Least Squares* (OLS) que visa encontrar o melhor ajuste do modelo aos dados observados. O método dos mínimos quadrados baseia-se na escolha dos valores de  $\beta$  na Equação (1) com o intuito de que a soma dos quadrados dos erros seja minimizada (MONTGOMERY, 2008).

Apesar de eficaz, a maioria dos trabalhos em MSR têm utilizado a metodologia para a modelagem e a otimização de uma única característica (CAMPOS, et al, 2012 apud KOKSOY, 2008), solução esta que raramente é suficiente para atender a várias respostas simultaneamente.

## 3. Metodologia de Pesquisa

A pesquisa pode ser classificada sob diversos pontos de vista como quanto a sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos. Assim, sob o ponto de vista da sua natureza, este trabalho pode ser classificado como uma pesquisa aplicada uma vez que objetiva gerar conhecimentos para fins práticos, dirigidos à solução de problemas específicos. Sob o ponto

de vista da abordagem, este trabalho é especificado como quantitativo por visar à mensuração de variáveis com ênfase no raciocínio dedutivo. Quanto à ótica dos objetivos, este trabalho classifica-se como uma pesquisa de classe axiomática uma vez que utiliza os resultados de um experimento obtido na literatura e dentre a classe axiomática, caracteriza-se como normativa, pois possui o propósito de melhorar os resultados experimentais por meio de uma solução ótima explorando o uso de métodos matemáticos, estatísticos e computacionais.

Por fim, quanto aos procedimentos ou método de pesquisa a se utilizar, foi adotado a modelagem e simulação dentre as demais modalidades de pesquisas existentes. A escolha desse método explica-se pelo fato do uso de dados experimentais encontrados na literatura e provenientes do experimento de torneamento do aço de corte fácil ABNT/SAE 12L14.

Logo, a pesquisa realizada neste trabalho é classificada como uma modelagem quantitativa axiomática normativa.

#### **4. Objeto de estudo: Torneamento do aço de corte fácil 12L14**

Para a realização deste trabalho, utilizaram-se os dados experimentais disponibilizados em Gaudêncio (2015) que foi baseado em um planejamento de experimentos. As variáveis de controle adotadas para esse procedimento foram velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f_n$ ) e profundidade de usinagem ( $a_p$ ). Essas variáveis influenciam fortemente o processo de torneamento, principalmente no acabamento superficial da peça e no desgaste da ferramenta. Após a definição das variáveis de controle, definiu-se a faixa de valores adotados para cada um dos níveis dessas variáveis conforme mencionados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros das variáveis de controle

Variáveis de controle	Níveis		
	-1	0	+1
Velocidade de corte (m/min)	220	280	340
Avanço da ferramenta (mm/rev)	0,08	0,10	0,12
Profundidade de corte (mm)	0,70	0,95	1,20

Fonte: Gaudêncio (2015)

Segundo Gaudêncio (2015), no Brasil, os conceitos de rugosidade superficial são definidos pela norma ABNT NBR 6405/1988 e o sistema adotado pelas normas brasileiras compreendem o sistema de medição da linha média.

Para a composição deste experimento foi utilizado à rugosidade média aritmética ( $R_a$ ), que é o valor médio aritmético de todos os desvios do perfil de rugosidade em relação à linha média dentro do comprimento de medição.

#### 4.1 - Variáveis de ruído ou não controláveis

Este trabalho considera três variáveis de ruído no processo torneamento as quais são: esbeltez da peça (E), o desgaste da ferramenta (VB) e a posição da medição (P) que são responsáveis por gerar variação em múltiplas condições de ensaio.

A esbeltez da peça (E) é uma propriedade que associa o diâmetro (D) do corpo de prova e seu comprimento (L) de acordo com a relação  $E = L/D$ . A admissão desta variável de ruído constitui na hipótese de que corpos de prova mais esbeltos sofram maiores influência da vibração no decorrer do processo de usinagem e manifestam valores maiores de rugosidade superficial.

A posição de medição (P) é uma variável que tenta analisar indiretamente o efeito da vibração em relação a rugosidade superficial da peça ao longo do processo de torneamento. Com essa hipótese, aguarda-se que a vibração próxima ao ponto de fixação do corpo de prova na máquina seja baixa e a rugosidade superficial também e, desse modo, quanto maior a distância do ponto de fixação do corpo de prova, maior a vibração e a rugosidade superficial.

#### 4.2 - Materiais, máquinas, ferramentas e instrumentos de medição

Os corpos de prova utilizados neste experimento possuem dimensões que variam de 30 a 50 mm de diâmetro por 295 mm de comprimento. Os corpos de prova são feitos de aço de corte fácil de acordo com a especificação ABNT 12L14 seguindo a composição química descrita na Tabela 2:

Tabela 2 – Composição química do aço ABNT 12L14

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Cu	%Al	%Mo	%Pb	%N
0,090	0,030	1,240	0,046	0,273	0,150	0,080	0,260	0,001	0,020	0,280	0,0079

Fonte: Gaudêncio (2015)

Os experimentos foram efetuados em um torno de CNC da marca NARDINI, modelo LOGIC 175, comando numérico CNC MCS Série 500, potência de 7,5 CV, rotação máxima de eixo árvore 4000 rpm, torre porta-ferramenta com 8 posições, diâmetro máximo de 100 mm e comprimento máximo torneável de 300 mm entre pontas.

A ferramenta de corte empregada nesse processo foi o metal duro classe ISO P35 revestido com três coberturas (Ti(C,N), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiN), (GC 4035 Sandvik) na geometria ISSO SNMG 09 03 04 – PM e com suporte designação ISO DSBNL 1616H 09.

### 4.3 - Arranjo experimental

O experimento em questão aborda um arranjo cruzado composto por um arranjo interno representado pelas variáveis de controle e, também, por um arranjo externo representado pelas variáveis de ruído. A Tabela 3 exemplifica o arranjo cruzado proposto para o torneamento do aço de corte fácil ABNT/SAE 12L14 para obter os valores da variável de resposta  $R_a$ . Posteriormente, é possível visualizar na tabela 4 os valores das 17 condições experimentais as quais consideraram 12 condições de ruído propostas pelo arranjo cruzado.

Tabela 3 – Planejamento do experimento utilizando arranjo cruzado

		Arranjo Externo															
		k			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
		Esbeltez	Desgaste	Posição	G	G	G	G	G	G	F	F	F	F	F	F	
					CP	CE	CA	CP	CE	CA	CP	CE	CA	CP	CE	CA	
Arranjo Interno (CCD)	i	Vc	Fn	Ap	Yij1	Yij2	Yij3	Yij4	Yij5	Yij6	Yij7	Yij8	Yij9	Yij10	Yij11	Yij12	
	1	220	0,08	0,7													
	2	340	0,08	0,7													
	3	220	0,12	0,7													
	4	340	0,12	0,7													
	5	220	0,08	1,2													
	6	340	0,08	1,2													
	7	220	0,12	1,2													
	8	340	0,12	1,2													
	9	180	0,10	0,95													
	10	380	0,10	0,95													
	11	280	0,07	0,95													
	12	280	0,13	0,95													
	13	280	0,10	0,53													
	14	280	0,10	1,37													
	15	280	0,10	0,95													
	16	280	0,10	0,95													
	17	280	0,10	0,95													

Fonte: Gaudêncio (2015)

Tabela 4 – Valores obtidos no experimento para  $R_a$  em cada condição de ruído

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
i	$R_{a1}$	$R_{a2}$	$R_{a3}$	$R_{a4}$	$R_{a5}$	$R_{a6}$	$R_{a7}$	$R_{a8}$	$R_{a9}$	$R_{a10}$	$R_{a11}$	$R_{a12}$
1	0,747	0,816	0,831	1,528	1,776	2,320	3,829	0,984	1,046	0,869	0,748	0,781
2	0,733	0,752	0,801	1,364	2,059	2,249	3,970	0,974	1,021	3,136	1,869	0,847
3	1,093	1,155	1,168	1,844	2,296	2,153	3,505	1,413	1,483	1,796	1,736	1,744
4	1,163	1,146	1,260	1,865	2,557	2,431	1,574	1,498	1,485	3,280	1,832	1,981
5	1,139	1,320	1,258	1,304	1,593	2,111	9,694	1,471	1,693	2,235	1,380	1,449
6	1,169	0,950	0,856	1,472	1,359	1,803	4,177	1,438	1,600	7,148	3,151	1,263
7	1,553	1,583	1,589	1,686	1,677	1,729	1,949	1,538	1,576	3,100	1,952	1,873
8	1,557	1,693	1,623	1,542	1,637	1,649	3,450	1,574	1,617	5,533	3,132	1,813
9	1,300	1,109	1,129	1,399	1,707	1,531	4,797	1,309	1,368	3,627	1,842	1,649
10	1,009	0,850	1,044	1,962	1,866	1,735	5,441	1,526	1,413	4,353	2,387	1,363
11	1,471	1,271	1,323	2,158	2,005	1,868	4,129	2,083	1,263	2,828	1,904	0,661
12	1,363	1,387	1,460	2,329	1,998	1,918	3,409	1,554	1,524	1,783	1,709	1,733
13	1,160	1,218	1,273	2,226	2,345	2,486	1,265	1,065	1,102	2,602	1,667	1,758
14	1,470	1,363	1,403	2,088	2,464	2,493	5,220	1,322	1,262	3,368	2,658	2,508
15	1,255	1,313	1,420	2,418	2,176	2,197	6,688	1,214	1,201	3,101	2,783	2,061
16	1,143	1,304	1,323	2,191	2,234	2,286	6,275	1,145	1,136	2,789	3,013	1,960
17	0,917	1,075	1,148	2,533	2,366	2,371	6,064	1,152	1,165	3,196	2,993	2,106

Fonte: Gaudêncio (2015)

### 5. Otimização da variável de qualidade do processo

Como dito anteriormente, para a otimização foi utilizado o Erro Quadrático Médio (EQM) que integra uma tolerância entre a resposta média e o valor alvo, denominado de bias, de tal forma que a função EQM seja minimizada conforme representado a seguir:

$$EQM = (Média - T)^2 + (Desvio^2) \quad (2)$$

A otimização das condições de produção sempre foi um dos objetivos básicos da indústria manufatureira, sendo um fator determinante da evolução das máquinas e das ferramentas de corte. Desse modo, implica em ter um bom conjunto de soluções comprometidas com os objetivos desejados (MYERS, MONTGOMERY E ANDERSON-COOK, 2009).

Com base nos experimentos obtidos, o método dos mínimos quadrados ordinários é aplicado nas respostas experimentais de média e variância de  $R_a$  com o intuito de se obter os coeficientes de cada modelo. Essa etapa foi realizada com o auxílio do software Minitab®. Os coeficientes obtidos para o modelo completo estão listados na Tabela 5.

Tabela 5 - Modelo de Otimização Completo

Coeficientes		
	Média	Desvio
b0	2,272	1,452
Vc	0,077	0,060
fn	0,018	-0,280
ap	0,212	0,258
Vc*Vc	-0,107	-0,022
fn*fn	-0,157	-0,207
ap*ap	-0,106	-0,165
Vc*fn	0,026	0,149
Vc*ap	0,006	0,018
fn*ap	-0,123	-0,236
<b>T = alvo*</b>	<b>1,444</b>	

Após a obtenção dos coeficientes dos modelos de centralidade e dispersão de  $R_a$ , a otimização individual (T) da medida de centralidade é realizada. A otimização individual é realizada por meio do algoritmo do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) o qual está disponível no aplicativo Solver do Microsoft Excel®. O resultado dessa otimização também é apresentado na Tabela 5. Em sequência, a otimização da formulação do EQM também é realizada por meio do algoritmo GRG. Juntamente com o EQM calcula-se o bias que é o valor da tolerância entre a resposta média e o valor alvo (T) da rugosidade  $R_a$ .



Tabela 6 - EQM e Bias para o Modelo Completo

<b>EQM</b>	0,260
<b>Bias</b>	0,048

Com o modelo completo calculado repete-se o processo para a o modelo reduzido que consiste basicamente nas retiradas dos termos não significativos do modelo. Neste trabalho, retirou-se a interação da Velocidade de corte com a Profundidade de corte ( $V_c * a_p$ ). Os mesmos passos realizados na otimização do modelo completo, foram realizados para o modelo reduzido. A Tabela 7 informa os coeficientes obtidos para os modelos de centralidade e dispersão para o modelo reduzido.

Tabela 7 - Otimização para o Modelo Reduzido

Coeficientes		
	Média	Desvio
b0	2,272	1,452
Vc	0,077	0,060
fn	0,018	-0,280
ap	0,212	0,258
Vc*Vc	-0,107	-0,022
fn*fn	-0,157	-0,207
ap*ap	-0,106	-0,165
Vc*fn	0,026	0,149
Vc*ap	--	--
fn*ap	-0,123	-0,236
<b>T = alvo*</b>	<b>1,443</b>	

Em sequência, é realizada a otimização individual da medida de centralidade de  $R_a$  por meio do algoritmo GRG para que após, a otimização da equação do EQM seja concluída. A Tabela 8 apresenta os valores obtidos na otimização para o EQM e para o bias do modelo reduzido.

Tabela 8 - EQM e Bias do Modelo Reduzido

<b>EQM</b>	0,327
<b>Bias</b>	0,347

Desse modo, conclui-se que os valores obtidos na otimização para o EQM e para o Bias do Modelo Reduzido foram maiores em relação aos obtidos para o Modelo Completo e o modelo que apresentar o valor de EQM mais próximo de zero é aquele que tem a melhor otimização, ou seja, o menor erro de previsão.

Assumindo que a otimização do modelo completo proporciona uma menor variação do erro quadrático médio, o mínimo valor obtido para  $R_a$  é igual a 1,493.

Como consequência, a Tabela 9 apresenta os valores ótimos das variáveis de controle do processo de torneamento que devem ser consideradas para se obter o mínimo valor encontrado para a variável de qualidade do processo – rugosidade média  $R_a$ .

Tabela 9 - Variáveis de controle do Modelo Completo

<b>Resposta decodificada</b>		
<b>Resultados da Otimização - Solver</b>		
<b>Vc</b>	<b>fn</b>	<b>ap</b>
286,185	0,087	0,562

## 6. Conclusão

A composição dessa pesquisa enfatizou a busca por melhorias, algo muito desejado por organizações, que procuram sempre criarem seus produtos com maior qualidade. Segundo Gaudêncio (2015) os processos industriais exibem uma elevada variabilidade devido à presença de ruídos e, assim, originando observações altamente variáveis.

A rugosidade no processo de torneamento é uma das falhas mais presenciais e por isso deve ser estudado de modo a ser minimizada, assim oferecendo maior produtividade, qualidade e melhoria no trabalho.

O método proposto neste trabalho permite que se estude de forma satisfatória as interações das variáveis de entrada: Velocidade de corte, Avanço da Ferramenta, Profundidade do Corte, de modo que, elas atinxissem seus valores ótimos para que a saída (rugosidade) seja mínima.

O método EQM dá a possibilidade de estudar dois modelos de comparação e visualizar qual modelo é mais viável para que a variável de saída possa ser minimizada. O modelo completo estuda todas as interações das variáveis de entrada e o modelo reduzido, por sua vez, retira-se uma ou mais interação do projeto a fim de reduzir os ruídos do processo e otimizá-lo.

Após os estudos conclui-se que os valores encontrados no modelo reduzido não foram os melhores valores possíveis quando comparado aos valores do modelo completo. O valor do EQM obtido para o modelo reduzido é maior do que o obtido para o modelo completo e, assim, proporcionando um maior erro de previsão da variável de saída  $R_a$ . Mas apesar disso,

seu uso não é descartado, uma vez que em estudos futuros, podem contribuir com outras pesquisas.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo apoio concedido a esta pesquisa.

### **Referências**

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro.** Tese (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

BAPTISTA, Elesandro Antonio; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Otimização de processos de usinagem: uma abordagem para sistemas de fabricação flexível que foi implementada em um sistema baseado na Web.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Cobef. 2006.

CAMPOS, P. H. S., ARCOS, J. I. L., FERREIRA, J. R., PAULA, V. R., BALESTRASSI, P. P. **Parâmetro robusto multivariado na Otimização do torneamento do aço ABNT 52100 endurecido.** In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), XXXIII, 2012, Bento Gonçalves. Anais... Bento Gonçalves, 2012.

DINIZ, Anselmo Eduardo. **A Rugosidade Superficial da Peça em Processo de Torneamento: Critério de Fim de Vida da Ferramenta e Fatores de influência.** Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1989.

GAUDÊNCIO, J. H. D. **Influência dos estimadores robustos sobre a convexidade e equiespaçamento das Fronteiras de Pareto para problemas duais.** 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

KÖKSOY, O. **Multiresponse robust design: Mean square error (MSE) criterion.** Applied Mathematics and Computation, 2006.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments.** Sixth ed., Wiley, New York, 2008.

RAO, Dilbag Singh. P. Venkateswara. **A Surface Roughness Prediction Model for Hard Turning Process.** Int J Adv Manuf Technol, Março, 2006.

SALGADO JÚNIOR, A. R. **Otimização de múltiplos duais correlacionados no processo de torneamento do aço de corte fácil ABNT 12L14.** Universidade Federal de Itajubá, MG, 2010.

SANTOS, J. A. G., BRITO, A. C., PENTEADO, R. B., SILVA, M. B., OLIVEIRA, R. F. T. **Otimização de um processo de torneamento com múltiplas respostas.** In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), XXXVI, 2016, João Pessoa. Anais... João Pessoa, 2016.

VILELLA, R. C. **“Metodologia prática visando a otimização das condições de usinagem em células de fabricação”** Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 1988. 105p. Dissertação (Mestrado).

WERKEMA, Maria Cristina Catarino; AGUIAR, Silvio. **Análise de regressão: como entender o relacionamento entre as variáveis de um processo.** UFMG, Escola de Engenharia, Fundação Christiano Ottoni, 1996.