

MSR otimiza processo de produção de anéis de pistão de FoFo cinzento

□ G. Severino, J. R. Ferreira, A. P. Paiva e P. P. Balestrassi □

A fabricação de anéis de pistão é uma das muitas aplicações do processo de usinagem por torneamento vertical do ferro fundido cinzento martensítico na indústria automotiva. O objetivo deste artigo é determinar uma condição de produção que conduza à máxima vida da ferramenta de corte, à máxima taxa de produção e ao mínimo custo de usinagem por peça. Os fatores investigados nos experimentos são avanço, rotação e geometria da ferramenta de corte. Os resultados otimizados foram avanço de 0,37 mm/rot, 265 rpm e geometria quadrada, comprovando a eficiência da metodologia de otimização empregada.



torneamento vertical de anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico é um processo de usinagem de relativa complexidade, por se tratar de uma operação de desgaste realizada simultaneamente nos diâmetros externo e interno das peças. A usinagem ocorre utilizando-se duas ferramentas gêmeas de corte com geometria especial e refrigeração abundante.

Entre os ferros fundidos, o cinzento é o mais empregado mundialmente no setor automotivo^[30]. Como principais características, apresenta baixo ponto de fusão,

boa fluidez e resistência ao desgaste^[11,26]. Mas a usinabilidade do ferro fundido cinzento martensítico é comprometida devido à sua composição química e estrutura metálica^[28].

A composição química do ferro fundido cinzento martensítico é formada por elementos grafitizantes (auxiliam a usinabilidade) e, na grande maioria dos casos, por elementos formadores de carbos duros e abrasivos como nióbio, tungstênio, vanádio, cromo, titânio e molibdênio, além da microestrutura martensítica.

No entanto, a usinabilidade do ferro fundido pode ser melhorada com a escolha adequada dos parâmetros de corte^[24]. Choudhury e Bartarya^[5], Nalbant *et al*^[21], Al-Ahmari^[1], Lalwani *et al*^[15] e Chiang *et al*^[4] estudaram a oti- ▶

□ Geremias Severino desenvolveu este trabalho pela empresa Mahle Metal Leve e como mes-trando na Universidade Federal de Itajubá (Unifei, MG). João Roberto Ferreira, Anderson Paulo de Paiva e Pedro Paulo Balestrassi também são da Unifei. Este artigo foi originalmente apresentado como palestra técnica no Congresso Usinagem 2010 realizado de 5 a 7 de outubro em São Paulo (SP). Reprodução autorizada.

Torneamento vertical

mização dos parâmetros de corte e a geometria da ferramenta de corte, tendo como objetivos, principalmente, aumentar a taxa de produção, reduzir os custos de usinagem e melhorar a qualidade dos componentes. Essas respostas são importantes para o processo de usinagem.

Nos últimos anos, diversos pesquisadores têm empregado a técnica de projeto de experimentos (DOE) no estudo da otimização dos mais variados tipos de processos de usinagem e de materiais, nos mais diferentes cenários de manufatura. Noordin *et al*^[22] aplicaram a metodologia de superfície de resposta (MSR) no processo de torneamento do aço AISI 1045. Reddy e Rao^[26] utilizaram o projeto de experimentos (Taguchi) juntamente com o algoritmo genético no processo de fresamento do aço AISI 1045. Ferreira *et al*^[8] aplicaram a MSR juntamente com a análise de componentes principais (PCA) e o gradiente reduzido generalizado (GRG), para otimizar múltiplas respostas correlacionadas no torneamento do aço AISI 52100.

Sarma *et al*^[27] aplicaram a MSR juntamente com redes neurais para otimizar os parâmetros de corte no torneamento do ferro fundido cinzento. Kurt *et al*^[14] também utilizaram o método de Taguchi, mas na otimização do processo de furação da liga Al 2024. Todos estes trabalhos objetivam a otimização do processo de usinagem, obtidas a partir de uma peque-

na, porém eficiente, quantidade de experimentos.

O objetivo deste trabalho é otimizar o processo de torneamento vertical dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico com base na combinação ideal dos parâmetros de corte e geometria da ferramenta, a fim de se determinar uma condição de usinagem que conduza a uma máxima vida da ferramenta de corte T_p , alta taxa de produção T_{xp} e mínimo custo de usinagem por peça K_p , utilizando a metodologia de superfície de resposta (MSR).

Metodologia de superfície de resposta

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas para modelar e analisar problemas nos quais a resposta de interesse é influenciada por muitas variáveis e a resposta deve alcançar um valor ótimo^[20]. Ela é adequada quando se tem um bom conhecimento do processo estudado e se deseja otimizá-lo. Isso significa que deve ser utilizado um número pequeno de fatores (2-3) nas construções de seus modelos^[17,18].

Geralmente, a sua execução deve ser antecedida por experimentos exploratórios. O mais empregado é um polinômio de baixa ordem para qualquer região de interesse. A resposta é modelada por uma função linear das variáveis independentes, e a função de aproximação será o

modelo de primeira ordem (conforme a equação 1).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

Onde:

y = resposta de interesse,

x_i = variáveis independentes,

β_i = coeficientes a serem estimados,

k = número de variáveis independentes e

ε = erro experimental

Entretanto, se existir curvatura no sistema, a função de aproximação mais usada é um polinômio de ordem superior, como o modelo de segunda ordem apresentado pela equação 2.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_2 x_2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

Dentro da MSR, o arranjo mais utilizado é o CCD (*Box-Wilson Central Composite Design*), que ajusta um modelo de superfície de resposta de segunda ordem. O CCD é uma matriz formada por três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo ou fracionado, um conjunto de pontos centrais e, adicionalmente, um grupo de níveis extras denominados pontos axiais^[19].

Procedimento experimental

Material da peça

Para se realizar o processo de torneamento vertical, as peças ►

Torneamento vertical

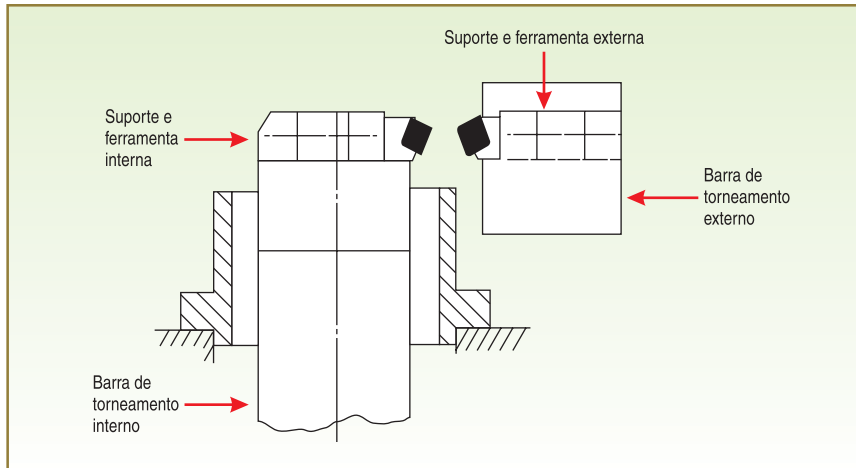


Figura 1 – Processo de torneamento vertical

usinadas neste trabalho são anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico, cuja composição química é formada por elementos grafitizantes (silício, níquel, cobre) que auxiliam a usinabilidade e por elementos formadores de carbeto que prejudicam a usinabilidade (cromo, molibdênio, vanádio, titânio, nióbio, tungstênio, conforme apresentado na tabela 1). O ferro fundido cinzento martensítico é caracterizado por uma microestrutura formada por veios de grafita, carbeto e uma matriz martensítica revenida com dureza de 40 HRC.

Máquina e ferramentas

A máquina utilizada nos ensaios foi um torno CNC vertical adaptado ao processo, conforme figura 1. Os ensaios foram realizados com duas ferramentas de corte gêmeas, que são alojadas na barra interna e externa do torno. As ferramentas de corte são de metal duro classe ISO K10, revestidas com nitreto de titânio (TiN).

As duas ferramentas com geometrias de corte hexagonal (figura 2a) e quadrada (figura 2b) foram utilizadas para estes experimentos. A tabela 2 apresenta os detalhes das geometrias das ferramentas de corte, ambas com ângulo de posição da aresta de corte K_r de 45° .

Condições de corte

Primeiramente, foi utilizado um planejamento fatorial completo 23, adotando-se como fatores os parâmetros de corte geometria da ferramenta G_t , avanço f e rotação n , conforme mostrado na tabela 3 (pág. 240). Este en-

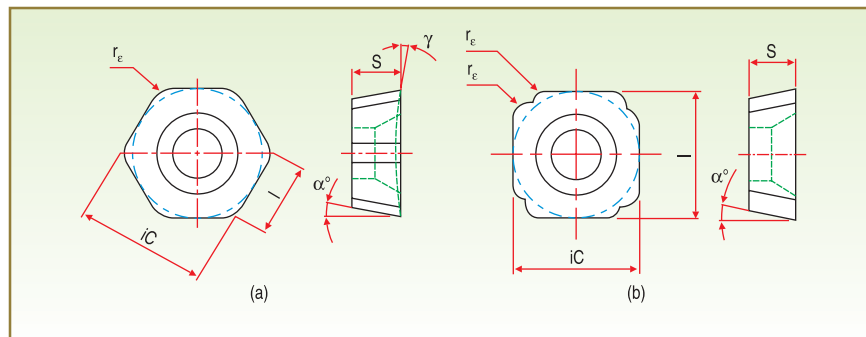


Figura 2 – Ferramenta hexagonal e quadrada

Tabela 1 – Composição química do ferro fundido cinzento martensítico (% médio)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Ti	V	W	Nb
3,4	4,3	0,85	0,18	0,08	1,15	0,4	1,05	1,5	0,15	0,75	0,8	0,65

Tabela 2 – Características das ferramentas de corte

DESCRIÇÃO	CÍRCULO INSCRITO (mm)	COMPRIMENTO DA ARESTA (mm)	ESPESSURA DA FERRAMENTA (mm)	RAIO DA PONTA (mm)	ÂNGULO DE FOLGA ($^\circ$)	ÂNGULO DO QUEBRA-CAVACO ($^\circ$)
Hexagonal	12	7	4,5	1,8	10	3
Quadrada	12	12	4,5	1,3	10	0

Torneamento vertical

Tabela 3 – Fatores e níveis do fatorial completo

PARÂMETROS	SÍMBOLO	UNIDADE	NÍVEIS (DECODIFICADOS)	
			-1	1
Avanço	<i>f</i>	mm/rot	0,32	0,38
Rotação	<i>n</i>	rpm	235	275
Geometria da ferramenta	<i>Gt</i>		Hexagonal	Quadrada

Tabela 4 – Níveis dos fatores da metodologia de superfície de resposta

PARÂMETROS	SÍMBOLO	UNIDADE	NÍVEIS (DECODIFICADOS)				
			-1,41	-1	0	1	1,41
Avanço	<i>f</i>	mm/rot	0,31	0,32	0,35	0,38	0,39
Rotação	<i>n</i>	rpm	227	235	255	275	283

saio tem como objetivo identificar a melhor geometria da ferramenta no torneamento vertical do anel de ferro fundido cinzento martensítico.

Nesa fase inicial, realizou-se um experimento com três réplicas, obtendo-se como resposta a vida da ferramenta. Após a definição da melhor geometria da ferramenta, utilizou-se MSR com arranjo composto central, para analisar a influência do avanço da

ferramenta e da rotação da peça em *T*, *T_{xp}* e *K_p*. A tabela 4 apresenta os diversos níveis dos fatores utilizados no arranjo experimental.

Os critérios de fim de vida da ferramenta foram orientados pelo desgaste de flanco máximo $V_{Bmáx} = 0,3$ mm, pela quebra da ferramenta ou pelo lascamento do anel de pistão. Para obtenção do tempo total de usinagem, da taxa de produção e do custo de usinagem por peça

Tabela 5 – Condições técnicas e econômicas do processo

PARÂMETROS	SÍMBOLOS	VALORES
Lote de peças (unidades)	Z	15.000
Tempo secundário (min)	<i>T_s</i>	0,003
Tempo aproximado e afastamento ferramenta (min)	<i>T_a</i>	0,008
Tempo de preparação da máquina (min)	<i>T_p</i>	25
Tempo de troca da ferramenta (min)	<i>T_{ft}</i>	2
Tempo improdutivo (min)	<i>t₁</i>	0,0125
Custo maquinário + operador (R\$/h)	(<i>S_m</i> + <i>S_h</i>)	80
Custo do porta-ferramenta (externa+ interna) (R\$)	<i>V_{si}</i>	250
Vida média porta-ferramentas (externa e interna), arestas	<i>N_{fp}</i>	2.400
Custo da pastilha quadrada (externa + interna) (R\$)	<i>K_{pi qd.}</i>	64
Número de arestas quadrada	<i>N_{s qd.}</i>	4
Custo da pastilha hexagonal (externa + interna) (R\$)	<i>K_{pi hx.}</i>	40
Número de arestas hexagonal	<i>N_{s hx.}</i>	6
Percurso de avanço (mm)	<i>L_f</i>	1,95
Diâmetro inicial da peça (mm)	<i>D</i>	81,35
Diâmetro final da peça (mm)	<i>D</i>	78,98
Diâmetro médio final da peça (mm)	<i>D_m</i>	80,165

nas diversas condições de corte, utilizou-se os dados do processo de torneamento vertical apresentados na tabela 5 (pág. 240).

Das respostas obtidas, a vida da ferramenta T foi observada durante os ensaios, enquanto a taxa de produção T_{xp} e o custo de usinagem por peça K_p foram obtidos pelas equações 3, 4 e 5^[3], com T_{xp} = 60 · T⁻¹.

$$T_{xp} = 60 \cdot T_i^{-1} \tag{3}$$

$$T_i = t_c + \left(t_a + t_s \frac{t_p}{Z} \right) + \left(\frac{tc}{T} - \frac{1}{Z} \right) t_{it} \tag{4}$$

$$K_p = \left(\frac{T_i}{60} - \frac{1}{Z} \right) (S_h + S_m) + \frac{C_t}{60} (S_h + S_m) + \frac{C_t}{T} \left[\left(\frac{V_{si}}{N_{ip}} + \frac{K_{pi}}{N_s} \right) + t_{it} (S_h + S_m) \right] \tag{5}$$

Resultados e discussão

Resultados preliminares da vida da ferramenta

A tabela 6 apresenta a vida da ferramenta de corte T obtida nos experimentos com o fatorial completo (três fatores e dois níveis).

Em função dos resultados obtidos para a vida da ferra-

Tabela 6 – Planejamento fatorial para vida da ferramenta

Nº	f (mm/rot)	n (rpm)	Gt	T (mm)
1	0,32	275	Hexagonal	400
2	0,32	235	Quadrada	2.202
3	0,38	275	Hexagonal	1.001
4	0,32	235	Hexagonal	1.351
5	0,32	275	Quadrada	1.902
6	0,38	235	Hexagonal	701
7	0,38	275	Quadrada	1.802
8	0,38	235	Quadrada	3.053

menta com o planejamento fatorial, uma análise estatística foi executada com auxílio do software Minitab 15, obtendo-se um modelo para a vida da ferramenta T. A tabela 7 (pág. ▶

Torneamento vertical

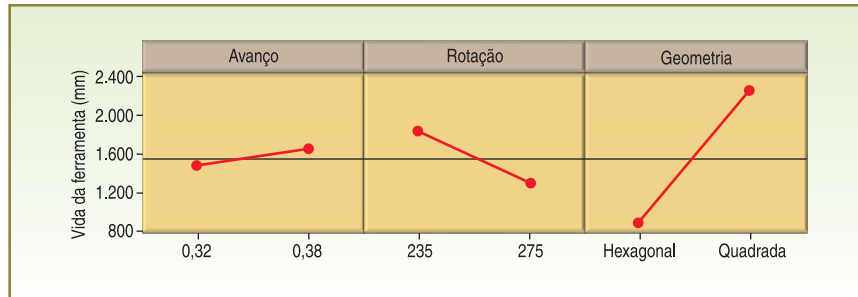


Figura 3 – Efeitos principais para vida da ferramenta

242) apresenta os resultados do planejamento fatorial. De acordo com esses resultados, todos os termos são significativos e o modelo apresenta um excelente ajuste, uma vez que R^2 ajustado é igual a 97,81%.

A figura 3 apresenta uma análise dos efeitos principais dos fatores sobre a vida da ferramenta. O mais representativo deles é a geometria da ferramenta, seguido da rotação e, por fim, do avanço. A ferramenta quadrada apresentou melhor

desempenho no processo de usinagem. Essa geometria, caracterizada por uma aresta de corte escalonada, fraciona a remoção de material durante a operação de corte: 60% do total de material é removido pela primeira parte da aresta, e os restantes 40%, pela segunda parte. É esse fator que proporciona maior vida da ferramenta.

Porém, a análise de efeitos principais sobre a vida da ferramenta não pode ser utilizada para concluir o estudo, uma vez que o modelo apresenta interações significativas, como visto na tabela 7.

Utilizando-se o método *desirability*, algoritmo criado originalmente por Harrington^[10] e apri-

morado por Derringer e Suich^[7], e com auxílio do *software* Minitab 15, podem ser obtidas as condições mais desejáveis que maximizam a vida da ferramenta.

Na tabela 8, observa-se que os níveis dos fatores que maximizam a vida da ferramenta de corte são: avanço de 0,38 mm/rot, rotação de 235 rpm e geometria de corte quadrada, para uma vida prevista pelo modelo de 3.053 mm.

Vida da ferramenta, taxa de produção e custo por peça

Com a definição da melhor geometria, optou-se por explorar mais os parâmetros de corte avanço e rotação. Nesta fase do trabalho, as respostas analisadas

Tabela 7 – Ensaio da vida da ferramenta, planejamento fatorial

TERMOS	T (mm)
Constante	1.552
<i>f</i>	88
<i>n</i>	-275
<i>Gt</i>	688
<i>f</i> * <i>Gt</i>	100
<i>n</i> * <i>Gt</i>	-113
<i>f</i> * <i>n</i> * <i>Gt</i>	-275
Efeitos principais	0,000
Interações de segunda ordem	0,000
Interações de terceira ordem	0,000
Falta de ajuste	0,141
R - Sq (adj) (%)	97,81
Análise de resíduo	0,105

Tabela 8 – Condições de usinagem otimizadas pelo método desirability

<i>f</i>	<i>n</i>	<i>Gt</i>	PREVISÃO DA VIDA (mm)
0,38	235	Quadrada	3.053

Tabela 9 – Vida, taxa, produção e custo usinagem nos ensaios obtidos pela MSR

Nº	<i>f</i> (mm/rot)	<i>N</i> (rpm)	<i>T</i> (mm)	TXP (peças/h)	KP (\$/peça)
1	0,32	235	2.102	1.523	0,04686
2	0,38	235	2.853	1.712	0,03682
3	0,32	275	1.802	1.677	0,04474
4	0,38	275	1.501	1.847	0,04413
5	0,31	255	1.652	1.555	0,05019
6	0,39	255	1.802	1.813	0,04117
7	0,35	227	2.853	1.588	0,04047
8	0,35	283	1.952	1.807	0,03985
9	0,35	255	3.153	1.714	0,03562
10	0,35	255	3.003	1.713	0,03620
11	0,35	255	3.303	1.716	0,03509
12	0,35	255	2.703	1.709	0,03755
13	0,35	255	2.853	1.711	0,03684

Torneamento vertical

Tabela 10 – Análise de significância dos termos individuais e Anova

TERMOS	T (mm)	TXP (peças/h)	KP (\$/peça)
Constante	3.003	1.713	0,03626
<i>f</i>	83	90	-0,00293
<i>n</i>	-366	75	0,00054
<i>f * f</i>	-638	-15	0,00476
<i>n * n</i>	-300	-8	0,00200
<i>f * n</i>	-263	-5	0,00236
Regressão	0,000	0,000	0,000
Linear	0,003	0,000	0,000
Quadrática	0,000	0,000	0,000
Interação	0,027	0,033	0,004
Falta de ajuste	0,926	0,136	0,279
R - Sq (adj) (%)	91,10	99,9	94,3
Análise de resíduo	0,600	0,511	0,552

Valores em negrito representam os termos não significativos do modelo matemático

serão a vida da ferramenta, a taxa de produção e o custo de usinagem por peça. Utilizando MSR com arranjo CCD, são obtidos os resultados conforme a tabela 9 (pág. 242).

A tabela 10 apresenta a análise de variância (Anova), a significância dos termos dos modelos e a análise do resíduo das respostas estudadas. Os efeitos principais e as interações apresentaram significância para os modelos, exceto o termo avanço para a vida da ferramenta e a rotação para o custo de usinagem por peça.

Os resultados mostram que os modelos apresentaram exce-

lentes ajustes, uma vez que os R^2 ajustados foram superiores a 90% para todas as respostas. Embora alguns termos não sejam isoladamente significativos, a sua retirada provoca uma sensível diminuição na explicação do modelo, com conseguinte aumento da variância experimental, o que justifica a sua adoção neste estudo. A análise de resíduo foi realizada demonstrando-se normal para a vida, taxa de produção e custo.

Após a definição dos modelos matemáticos obtidos pela MSR, inicia-se a etapa de otimização. O objetivo é determinar quais

Tabela 11 – Modelos quadráticos e ponto de ótimo individual (T, Txp e Kp)

	T (mm)	Txp (peças/h)	Kp (\$/peça)
b0	3.003	1.713	0,0363
b1	83	90	-0,0029
b2	-366	75	0,0005
b11	-638	-15	0,0048
b22	-300	-8	0,0020
b12	-263	-5	0,0024
\hat{y}_i	3.140	1.850	0,03558
<i>f</i>	0,36	0,38	0,38
<i>n</i>	241	235	248

valores as variáveis de controle devem assumir, de modo que os valores alvo das variáveis de resposta sejam atingidos. A primeira atividade da etapa de otimização foi denominada otimização individual das variáveis de resposta, utilizando o gradiente reduzido generalizado.

Neste trabalho, o emprego da MSR está associado a um algoritmo de otimização não linear com restrições, implementado com o uso do aplicativo Microsoft Excel Solver. Nessa atividade, buscou-se o respectivo ponto ótimo para cada modelo matemático, dentro dos limites de espaço experimental mas sem influência das demais variáveis de resposta.

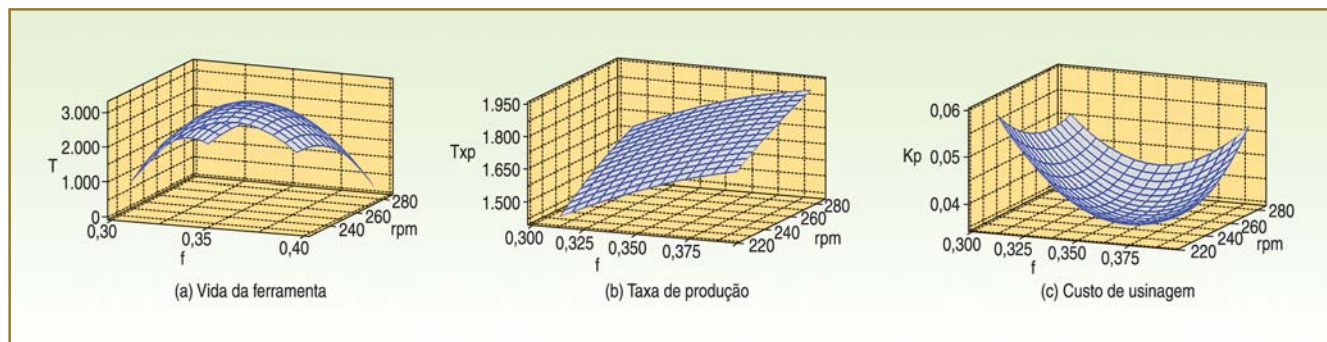


Figura 4 – Efeito da interação entre avanço e rotação sobre T, Txp e Kp

Torneamento vertical

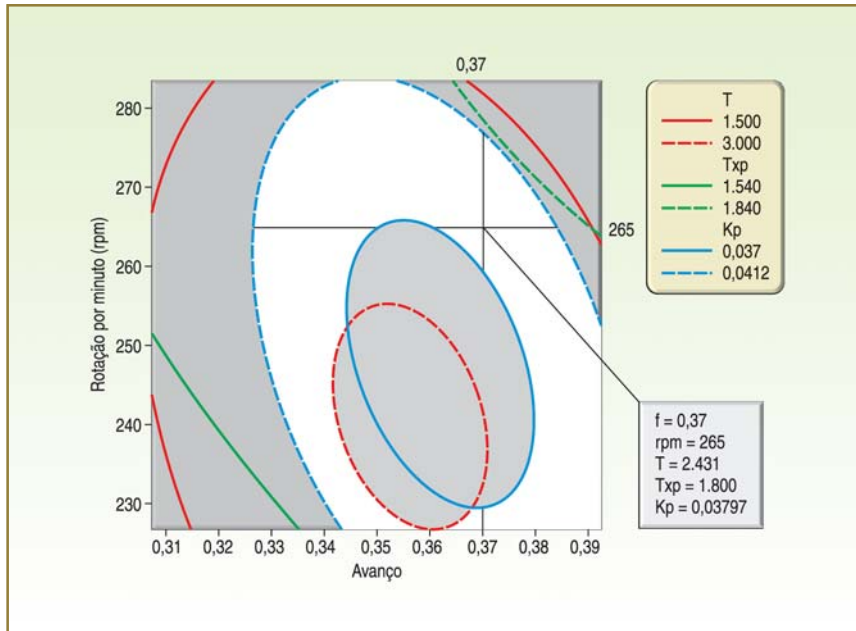


Figura 5 – Ponto de otimização comum para as respostas T, Txp e Kp

Todas as variáveis apresentam respostas do tipo “maior é melhor” (LTB, de *larger-the-better*). A exceção ficou por conta da variável custo, que apresenta resposta do tipo “menor é melhor” (STB, de *smaller-the-better*). Utilizando-se os modelos obtidos para a vida da ferramenta, taxa de produção e custo de usinagem de uma peça conforme a tabela 10, estrutura-se o problema de otimização individual segundo orientação dada pela equação 6.

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximizar } \hat{y}_i, T; T_{xp} \\
 & \text{Minimizar } \hat{y}_i, K_p \quad (6) \\
 & \text{Sujeito a: } x^T x \leq \rho^2
 \end{aligned}$$

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 os pa-

râmetros de corte e respectivos níveis maximizem T e Txp e minimizem o Kp estudado, sujeito a restrição.

Com base em uma planilha elaborada em Microsoft Excel, tendo como ponto de partida [0; 0], foi montada a ferramenta Solver para se obter os pontos ótimos individuais dos modelos matemáticos adotados. Após análise, cada resposta apresentou um ponto de ótimo diferente.

O conflito existente entre as diferentes variáveis de resposta na determinação do ponto ótimo individual fica evidenciado na tabela 11 (pág. 244). Quando considerada a ampla faixa de valores possíveis para as variáveis de controle, cada variável de resposta possui um ponto ótimo específico.

A figura 4 (pág. 244) apresenta o efeito conjunto do avanço e da rotação sobre a vida da ferramenta, taxa de

produção e o custo de usinagem de uma peça. Sendo assim, foi utilizada a superfície de resposta descrita, para determinar o ponto ótimo.

A maior vida da ferramenta (figura 4a) é explicada pela maior velocidade de avanço, que reduz o tempo de contato entre peça e ferramenta. Na figura 4b, observa-se maior taxa de produção com maiores avanço e rotação, em função do menor tempo de usinagem.

Tabela 12 – Modelos quadráticos e ponto de ótimo comum (T, Txp e Kp)

	T (mm)	Txp (peças/h)	Kp (\$/peça)
b0	3.003	1.713	0,0363
b1	83	90	-0,0029
b2	-366	75	0,0005
b11	-638	-15	0,0048
b22	-300	-8	0,0020
b12	-263	-5	0,0024
\hat{y}_i	2,431	1,800	0,03797
f	0,37		
n	265		

Torneamento vertical

Tabela 13 – Comparativo entre condição anterior versus otimizada

	PARÂMETROS	ANTERIOR	OTIMIZADA
Fatores	f (mm/rot.)	0,32	0,37
	n (rpm)	235	265
	Gt	Hexagonal	Quadrada
Respostas	T (mm)	1.351	2.431
	Txp (peça/h)	1.451	1.850
	Kp (\$/peça)	0,059	0,038

O menor custo de usinagem por peça usinada (figura 5c) é obtido em função do desenvolvimento de uma nova geometria de ferramenta, que possibilitou maior vida e menor tempo de usinagem. Uma otimização individual pode não atender todos os requisitos necessários para o bom funcionamento de um processo. Assim, deve-se utilizar a otimização múltipla.

A importância da otimização individual neste estudo foi identificar quais valores serão utilizados como alvos das variáveis de resposta durante a próxima atividade, na qual se executa a otimização múltipla por priorização. Utilizando-se os modelos obtidos para T, Txp e Kp conforme tabela 7, estrutura-se o problema de otimização múltipla orientando-se pela equação 7.

$$\begin{aligned}
 & \text{Maximizar } \hat{y}_i, T \\
 & \text{Sujeito a: } T_{xp} \geq 1800 \\
 & \quad K_p \leq 0,04 \\
 & \quad x^T x \leq \rho^2
 \end{aligned} \tag{7}$$

A primeira e a segunda restrições têm como objetivo partir do ponto encontrado na condição individual, enquanto o objetivo da terceira restrição é evitar que os modelos indiquem

valores, para \hat{y}_i que não sejam fisicamente possíveis para o espaço experimental sugerido. Os valores obtidos para \hat{y}_i passaram a ser considerados alvos dos problemas de otimização simultânea. O resultado da otimização múltipla para todas as respostas está representado na tabela 12 (pág. 246).

O conflito existente entre as diferentes variáveis de resposta na determinação do ponto de ótimo individual fica evidenciado na tabela 10, quando comparado com a otimização múltipla na tabela 11, pois os valores encontrados são distintos. Utilizando-se dos valores de ótimo encontradas pela otimização múltipla, construiu-se um gráfico de contorno no qual as restrições incluídas ao modelo são atendidas, conforme figura 5 (pág. 246).

Obtido o ponto de ótimo para os parâmetros de corte $f = 0,37$ mm/rot e $n = 265$ rpm, realizou-se o experimento de confirmação. O objetivo foi verificar se os modelos matemáticos adotados são adequados e se o ponto ótimo indicado pelo método de otimização proposto realmente resulta nos valores esperados para as variáveis de resposta.

Dessa forma, os ensaios foram repetidos na condição ótima, cujos valores das variáveis de controle foram identificados pelo método de otimização da MSR. Ao final dos testes, o valor previsto pelo modelo encontra-se no intervalo de confiança de 95% construído para os experimentos de confirmação, o que revela que o modelo proposto, obtido experimentalmente com a MSR, é adequado para a melhoria do processo de usinagem. A tabela 13 foi montada com o objetivo de observar o contraste entre os fatores e respostas estudadas. Para isso, foi realizada uma análise comparativa da condição de usinagem anterior ao estudo, em função da condição otimizada.

Observa-se que as mudanças nos níveis dos fatores impactaram de forma positiva a vida da ferramenta, a taxa de produção e o custo de usinagem.

Conclusões

Em função dos resultados obtidos sobre o estudo de otimização do processo de torneamento vertical dos anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico, pode-se concluir que:

- A vida da ferramenta apresentou melhoria significativa, fato explicado pela geometria da ferramenta quadrada. A geometria quadrada favorece maior vida útil, devido ao escalonamento da aresta de corte e por proporcionar a remoção do sobremetal da peça de ►

Torneamento vertical

maneira fracionada. A interação entre os parâmetros de corte diminuiu o tempo de contato entre a peça e a ferramenta, contribuindo para a maior vida da ferramenta.

- A taxa de produção foi aumentada devido à otimização dos parâmetros de processo (avanço, rotação e geometria da ferramenta), que contribuíram para atingir menor tempo total de usinagem por peça fabricada e maior vida da ferramenta de corte.
- A redução do custo de usinagem por peça foi possível pelo

somatório de benefícios proporcionados pela melhor geometria de ferramenta e parâmetros de corte ideais.

- Os resultados foram expressivos para as respostas estudadas: aumento de 79,94% para a vida da ferramenta; 24,05% para a taxa de produção e redução de 36,25% no custo de usinagem por peça.
- A otimização do processo de torneamento vertical com base no projeto de experimentos via metodologia de superfície de resposta (MSR) combinada


com o algoritmo gradiente reduzido generalizado (GRG) formam uma abordagem muito útil no modelamento das condições de usinagem.

- Mesmo considerando a qualidade dos resultados da presente abordagem, estas conclusões não podem ser extrapolados para diferentes materiais, ferramentas ou máquinas; são válidos apenas nos níveis adotados. A abordagem pode, no entanto, ser recomendada para otimizar outros processos de fabricação. ■

Referências

- 1] Al-Ahmari, A. M. A.: *Predictive machinability models for a selected hard material in turning operations*. Journal of Materials Processing Technology, p. 305-311, 2007.
- 2] Carlyle, W. M.; Montgomery, D.C.; Runger G. C.: *Optimization problems and methods in quality control and improvement*. Journal of Quality Technology, v. 32, nº 1, p. 1-31, 2000.
- 3] Cauchick-Miguel, P. A.; Coppini, N. L.: *Cost per piece determination in machining process: an alternative approach*. International Journal of Machining Tools and Manufacture, v. 36, nº 8, p. 939-946, 1996.
- 4] Chiang Ko-Ta, Liu; Nun-Ming, Horng Jenn-Tsong: *Investigating the machinability evaluation of Hadfield steel in the hard turning with Al₂O₃/TiC mixed ceramic tool based on the response surface methodology*. Journal of Materials Processing Technology, p. 532-541, 2008.
- 5] Choudhury, S. K.; Bartarya, G.: *Role of temperature and surface finish in predicting tool wear using neural network and design of experiments*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, p.747-753, 2003.
- 6] Cox, D. R.; Reid, N.: *The theory of the design of experiments* Chapman & Hall/CRC. 1ª ed., p. 336, 2000.
- 7] Derringer, G.; Suich, R.: *Simultaneous optimization of several response variables*. Journal of Quality Technology, v. 12, nº 4, p. 214-219, 1980.
- 8] Ferreira J. R.; Balestrassi P. P.; Paiva, A. P.: *A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization*. Journal of Materials Processing Technology, p. 26-35, 2007.
- 9] Gaitonde, V. N., Karnik, S. R.; Siddeswarappa, B.; Achyutha, B. T.: *Integrating Box-Behnken design with genetic algorithm to determine the optimal parametric combination for minimizing burr size in drilling of AISI 316L stainless steel*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, p. 230-240.
- 10] Harrington, E. C.: *The desirability function*. Industrial Quality Control, nº 21, p. 494-498, 1965.
- 11] Hejazi, M. M.; Divandari, M.; Taghaddos, E.: *Effect of copper insert on the microstructure of gray iron produced via lost foam casting*. Materials and Design, v. 30, p. 1.085-1.092.
- 12] Köksoy, O.: *A nonlinear programming solution to robust* ▶

Torneamento vertical

- multiresponse quality problem. *Applied Mathematics and Computation*, v. 6, n° 23, 2007.
- 13] Köksoy, O.; Doganaksoy, N.: *Joint optimization of mean and standard deviation using response surface methods*. *Journal of Quality Technology*, v. 35, n° 3, p. 237-334, 2003.
- 14] Kurt, M.; Bagci, E.; Kaynak, Y.: *Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 458-469, 2009.
- 15] Lalwani, D. I.; Mehta, N. K.; Jain, P. K.: *Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel*. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 167-179, 2008.
- 16] Maio, D. P.: *Optimal central composite designs in the presence of dispersion effects*. *Journal of Quality Technology*, v. 31, n° 4, p. 398-407, 1999.
- 17] Mason, R. L.; Gunst, R. F.; Hess, J. L.: *Statistical design and analysis of experiments, with applications to engineering and science*. Wiley-Interscience, 2ª ed., p. 760, 2003.
- 18] Montgomery, D. C.; Runger, G. C.: *Applied statistics and probability for engineers*. 3ª ed., John Wiley & Sons, p. 720, 2002.
- 19] Montgomery, D. C.: *Design and analysis of experiments*. 5ª ed., John Wiley & Sons, p. 672, 2000.
- 20] Myers, R. H.; Montgomery, D. C.: *Response surface methodology – process and product optimization using designed experiments* Wiley series in probability and statistics. John Wiley & Sons, 2ª ed., p. 824, 2002.
- 21] Nalbant, M.; Gokkaya; H.; Sur, G.: *Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning*. *Materials and Design*, p. 1.379-1.385, 2007.
- 22] Noordin, M. Y.; Venkatesh, V. C.; Sharif, S.; Elting, S.; Abdullah, A.: *Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel*. *Journal of Materials Processing Technology*, p. 46-58, 2004.
- 23] Ortiz, F.; Pignatiello, J. J.; Simpson, J. R.: *A genetic algorithm approach to multiple-response optimization*. *Journal of Quality Technology*, v. 36, n° 4, p. 432-450.
- 24] Pereira, A. A.; Boehs, L.; 

- Guesser, L. W.: *The influence of sulfur on the machinability of gray cast iron FC25*. Journal of Materials Processing Technology, p. 165-171, 2006.
- 25] Pradhan, S. K.; Nayak, B. B.; Mohapatra, B.,K.; Mishra, B.,K.: *Micro raman spectroscopy and electron probe microanalysis of graphite spherulites and flakes in cast iron*. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2007, Metallurgical and materials transactions a volume 38A, outubro de 2007.
- 26] Reddy, N. S. K.; Rao, P. V.: *Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, p. 1.202-1.210, 2005.
- 27] Sarma, D.,K.; Dixit, U. S.: *A comparison of dry and air-cooled turning of grey cast iron with mixed oxide ceramic tool*. Journal of Materials Processing Technology, p. 160-172, 2007.
- 28] Souza, J. V. C.; Nono, M. C. A.; Ribeiro, M. V.; Machado, J. P. B.; Silva, O. M. M.: *Cutting forces in turning of gray cast iron using silicon nitride based cutting tool*. Materials and Design, v. 30, p. 2.715-2.720, 2009.
- 29] Trent, E. M.; Wright, P. K.: *Metal cutting*. 4^a ed. Woburn, MA: Butterworth Heinemann, 446p., 2000.
- 30] Wei, W.; Tianfu, J.; Yuwei, G.; Guiying, Q.; Xin, Z.: *Properties of a gray cast iron with oriented graphite flakes*. Journal of Materials Processing Technology, v. 182, p. 593-597, 2007. ■