

**Otimização do Processo de Torneamento Vertical de Anéis de Pistão de Ferro Fundido  
Cinzento Martensítico Utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR)**

**Geremias Severino**

Mahle Metal Leve S.A.

Mestrando em Eng<sup>a</sup> de Produção na UNIFEI-Universidade Federal de Itajubá-MG

*geremias.severino@yahoo.com.br*

**João Roberto Ferreira** (*jorofo@unifei.edu.br*)

**Anderson Paulo de Paiva** (*andersonppaiva@unifei.com.br*)

**Pedro Paulo Balestrassi** (*pedro@unifei.edu.br*)

Professores e Pesquisadores do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão  
Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG

**Resumo:** O processo de usinagem por torneamento vertical do ferro fundido cinzento martensítico é de grande importância para a indústria automotiva sendo utilizado em muitas aplicações, dentre as quais na fabricação de anéis de pistão. O objetivo deste artigo é otimizar o processo de torneamento vertical de anéis de pistão de ferro fundido cinzento martensítico, a fim de se determinar uma condição de usinagem que conduza a máxima vida da ferramenta de corte, a máxima taxa de produção e o mínimo custo de usinagem por peça. Os fatores investigados nos experimentos são: avanço( $f$ ), rotação( $n$ ) e geometria da ferramenta de corte ( $Gt$ ). Os resultados otimizados foram:  $f = 0,37 \text{ mm/v}$ ,  $n = 265 \text{ rpm}$  e  $Gt = \text{quadrada}$ , comprovando a eficiência da metodologia de otimização empregada.

**Palavras-chave:** Torneamento Vertical, Anéis de pistão; Ferro Fundido Cinzento Martensítico; Projeto de Experimentos.

## 1. Introdução

O 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 desbaste realizada simultaneamente no diâmetro externo e interno das peças. A usinagem ocorre utilizando-se duas ferramentas gêmeas de corte com geometria especial e com refrigeração abundante durante todo o processo de corte. Segundo Tianfu *et al.* (2007) dentre os ferros fundidos, o cinzento é o material mais empregado mundialmente no setor automotivo. Tendo como principais características o baixo ponto de fusão, boa fluidez e resistência ao desgaste (PRADHAN *et al.* 2007; HEJAZI *et al.* 2009). Segundo Souza *et al.* (2009), a usinabilidade do ferro fundido cinzento martensítico é comprometida devido a sua composição química e estrutura metálica. A composição química do ferro fundido cinzento martensítico é formada por elementos grafitizantes, que por sua vez auxiliam na sua usinabilidade e na grande maioria dos casos por elementos formadores de carbonetos duros e abrasivos como nióbio, tungstênio, vanádio, cromo, titânio e molibdênio, além da microestrutura martensítica, que prejudicam a sua usinabilidade. Pereira *et. al* (2006) afirmam que a usinabilidade do ferro fundido pode ser melhorada com a escolha adequada dos parâmetros de corte. Choudhury e Bartarya (2003), Nalbant *et al.* (2007), Al-Ahmari (2007), Lalwani *et al.* (2008) e Chiang *et al.* (2008) estudaram a otimização dos parâmetros de corte e a geometria da ferramenta de corte objetivando-se principalmente o aumento da taxa de produção, redução de custos de usinagem e a melhoria da qualidade dos componentes, que são respostas 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 materiais nos mais diferentes cenários de manufatura. Noordin *et al.* (2004) aplicaram a metodologia de superfície de resposta (MSR) no processo de torneamento do aço AISI 1045. Reddy e Rao (2005) utilizaram o projeto experimentos (Taguchi) juntamente com o algoritmo genético no processo de fresamento do aço AISI 1045. Paiva *et al.* (2007) aplicaram a MSR juntamente com a análise de componentes principais (PCA) e o gradiente reduzido generalizado (GRG) para otimizar múltiplas respostas correlacionadas, no processo de torneamento do aço AISI 52100. Dixit *et al.* (2007) aplicaram a MSR juntamente com Redes Neurais para otimizar os parâmetros de corte no torneamento do ferro fundido cinzento. Kurt *et al.* (2009) utilizaram projeto experimentos (Taguchi) na otimização o processo de furação da liga Al 2024. Todos estes trabalhos objetivam a otimização do processo de usinagem, obtidas a partir de uma pequena, 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, através da 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), alta taxa de produção (T<sub>xp</sub>) e mínimo custo de usinagem por peça (K<sub>p</sub>), utilizando-se a metodologia de superfície de resposta (MSR).

## 2. Metodologia de Superfície de Resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são utilizadas para modelar e analisar problemas nos quais a resposta de interesse é influenciada por muitas variáveis e nos quais a resposta deva alcançar um valor ótimo (MYERS & MONTGOMERY, 2002). A MSR é adequada quando se tem um bom conhecimento do processo estudado e se deseja otimizá-lo. Isto significa que deve ser utilizado um número pequeno de fatores (2-3) nas construções de seus modelos (CHANDRA, 2001; MONTGOMERY & RUNGER, 2002; MASON *et al.* 2003). Geralmente, experimentos exploratórios já devem ter sido executados anteriormente. Usualmente, um polinômio de baixa ordem para qualquer região de interesse é empregado. Sendo a resposta modelada por uma função linear das variáveis independentes, então 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  
xi – Variáveis independentes  
 $\beta_i$  – Coeficientes a serem estimados  
k – Número de variáveis independentes  
 $\varepsilon$  – Erro experimental

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

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_1 x_i + \sum_{i=1}^k \beta_2 x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

Dentro da MSR, o arranjo mais utilizado é o CCD (*Box-Wilson Central Composite Design*), que é utilizado para ajustar 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 (MONTGOMERY, 2000).

### 3. Procedimento Experimental

#### 3.1 Material da peça

Para se realizar o processo de torneamento vertical, as peças 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 os elementos formadores de carbonetos 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, carbonetos e uma matriz martensítica revenida, conforme mostrado na Figura 1 e dureza de 40 HRC.

Tabela 1- Composição Química do Ferro Fundido Cinzento Martensítico

%	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Ti	V	W	Nb
Média	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

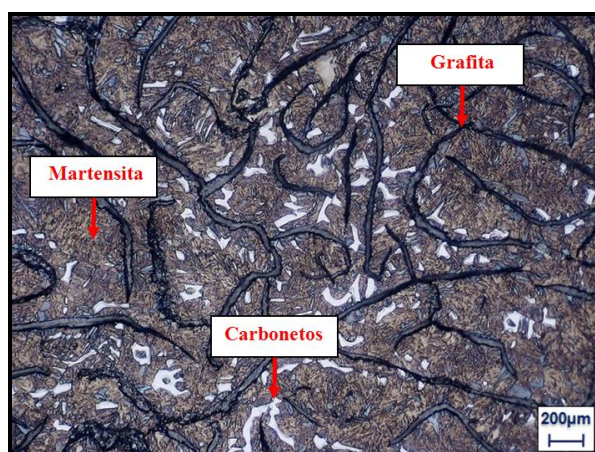


Figura 1 - Matriz Martensítica Revenida

### 3.2 Máquina e Ferramentas

A máquina utilizada nos ensaios é um Torno CNC Vertical adaptado ao processo, conforme Figura 2. Os ensaios são 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 3-a) e quadrada (Figura 3-b) foram utilizadas para estes experimentos. A Tabela 2 apresenta os detalhes das geometrias das ferramentas, sendo que ambas as ferramentas de corte apresentam ângulo de posição da aresta de corte ( $K_r$ ) de  $45^\circ$ .

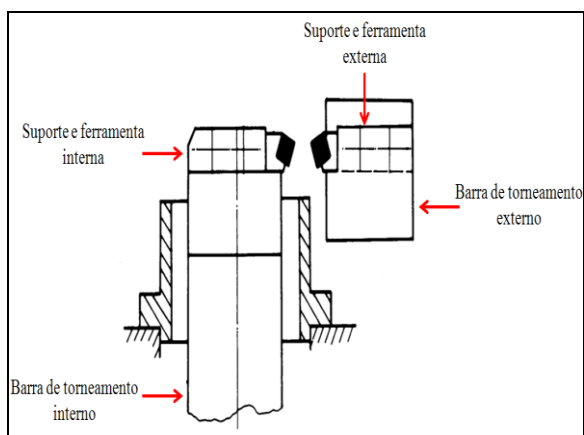


Figura 2 - Processo de Torneamento Vertical

Tabela 2 - Características das Ferramentas de Corte

Descrição	Círculo inscrito (i.C)	Comprimento da aresta (l)	Espessura da ferramenta (s)	Raio da ponta ( $r_\epsilon$ )	Ângulo de folga ( $\alpha_0$ )	Ângulo do quebra cavaco ( $\gamma$ )
Hexagonal	12 mm	7 mm	4,5 mm	1,8 mm	$10^\circ$	$3^\circ$
Quadrada	12 mm	12 mm	4,5 mm	1,3 mm	$10^\circ$	$0^\circ$

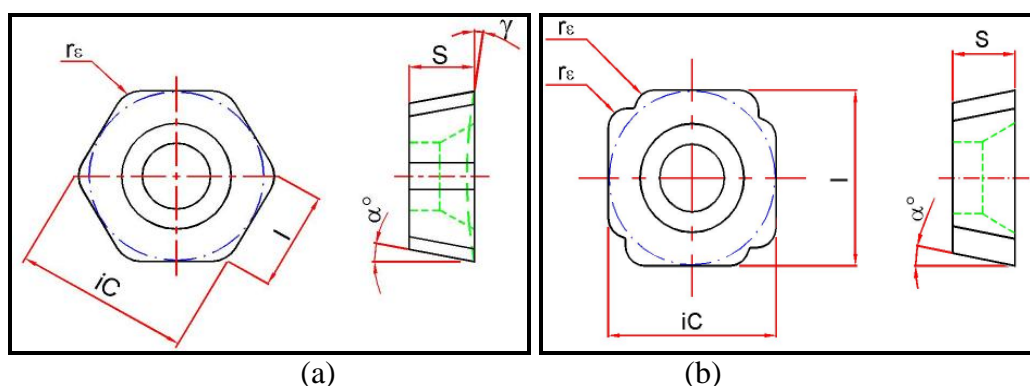


Figura 3 - Ferramenta Hexagonal e Quadrada

### 3.3 Condições de Corte

Primeiramente utilizou-se um planejamento fatorial completo  $2^3$  adotando-se como fatores os parâmetros de corte: geometria da ferramenta (Gt), avanço (f) e rotação (n), conforme mostrado na Tabela 3. Este ensaio tem como objetivo identificar a melhor geometria da ferramenta no

torneamento vertical do anel de ferro fundido cinzento martensítico. Nesta 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 na T, T<sub>xp</sub> e no K<sub>p</sub>. A Tabela 4 apresenta os diversos níveis dos fatores utilizados no arranjo experimental.

Tabela 3: Fatores e Níveis do Fatorial Completo

Parâmetros	Símbolo	Unidade	Níveis (decodificados)	
			-1	1
Avanço	<i>f</i>	mm rot. <sup>-1</sup>	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. <sup>-1</sup>	0,31	0,32	0,35	0,38	0,39
Rotação	<i>n</i>	rpm	227	235	255	275	283

Os critérios de fim de vida da ferramenta foram orientados pelo desgaste de flanco máximo  $VB_{Max} = 0,3$  mm ou 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, nas diversas condições de corte utilizou-se dos dados do processo de torneamento vertical apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Condições Técnicas e Econômicas do Processo.

Parâmetros	Símbolos	Valores
Lote de peças (un.)	Z	15000
Tempo secundário (min)	T <sub>s</sub>	0,003
Tempo aprox. e afastamento ferramenta (min)	T <sub>a</sub>	0,008
Tempo de preparação da máquina (min)	T <sub>p</sub>	25
Tempo de troca da ferramenta (min)	T <sub>ft</sub>	2
Tempo improdutivo (min)	t <sub>l</sub>	0,0125
Custo maquinário + operador (R\$/h)	(S <sub>m</sub> +S <sub>h</sub> )	80
Custo do porta ferramenta (externa+ interna) (R\$)	V <sub>si</sub>	250
Vida média porta ferramentas (externa e interna), arestas	N <sub>fp</sub>	2400
Custo da pastilha Quadrada ( externa + interna) (R\$)	K <sub>pi</sub> qd.	64
Número de arestas Quadrada	N <sub>s</sub> qd.	4
Custo da pastilha Hexagonal (externa + interna) (R\$)	K <sub>pi</sub> hx.	40
Número de arestas Hexagonal	N <sub>s</sub> hx.	6
Percurso de Avanço (mm)	L <sub>f</sub>	1,95
Diâmetro Inicial da peça (mm)	D	81,35
Diâmetro Final da peça (mm)	D	78,98
Diâmetro MédioFinal da peça (mm)	D <sub>m</sub>	80,165

Das respostas obtidas, a vida da ferramenta (T) foi observada durante os ensaios, enquanto que a taxa de produção (T<sub>xp</sub>) e o custo de usinagem por peça (K<sub>p</sub>) foram obtidos pelas Eqs. 3, 4 e 5 (Cauchick-Miguel e Coppini ,1996).

$$T_{xp} = 60. T_t^{-1} \quad (3)$$

$$T_t = t_c + \left( t_a + t_s \frac{t_p}{Z} \right) + \left( \frac{tc}{T} - \frac{1}{Z} \cdot \right) t_{ft} \quad (4)$$

$$K_p = \left( \frac{T_t}{60} - \frac{1}{Z} \right) (S_h + S_m) + \frac{C_t}{60} (S_h + S_m) + \frac{C_t}{T} \left[ \left( \frac{V_{si}}{N_{fp}} + \frac{K_{pi}}{N_s} \right) + t_{ft} (S_h + S_m) \right] \quad (5)$$

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1 Resultados Preliminares da Vida da ferramenta

A Tabela 6 apresenta a vida da ferramenta de corte (T) obtida nos experimentos com o fatorial completo (3 fatores e 2 níveis).

Tabela 6: Planejamento Fatorial para Vida da ferramenta

N	f (mm/v)	n (rpm)	Gt	T (mm)
1	0,32	275	hexagonal	400
2	0,32	235	quadrada	2202
3	0,38	275	hexagonal	1001
4	0,32	235	hexagonal	1351
5	0,32	275	quadrada	1902
6	0,38	235	hexagonal	701
7	0,38	275	quadrada	1802
8	0,38	235	quadrada	3053

Em função dos resultados obtidos para a vida da ferramenta com o planejamento fatorial, uma análise estatística foi realizada com auxílio do software Minitab® 15 obtendo-se um modelo para a vida da ferramenta (T). A Tabela 7 apresenta os resultados do planejamento fatorial.

Tabela 7: Ensaios da Vida da Ferramenta, Planejamento Fatorial

Termos	T (mm)
Constante	1552
f	88
n	-275
Gt	688
f*Gt	100
n*Gt	-113
f*n*Gt	-275
Efeitos Principais	0,000
Interações de Segunda Ordem	0,000
Interações de Terceira Ordem	0,000
Falte de Ajuste	0,141
R - Sq (adj)	<b>97,81%</b>
Análise de Resíduo	0,105

Os resultados apresentados na Tabela 7 mostram que 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 4 apresenta uma análise dos efeitos principais dos fatores sobre a vida da ferramenta. O fator mais representativo para a vida da ferramenta é a geometria da ferramenta, seguido da rotação e por fim o avanço. A ferramenta quadrada apresentou melhor desempenho no processo de usinagem. Pois esta geometria é caracterizada por uma aresta de corte escalonada, o que fraciona a remoção de material durante a operação de corte: 60% do total de material é removido pela primeira parte da aresta, e o restante 40%, com a segunda parte da aresta, fator este que proporciona uma maior vida da ferramenta.

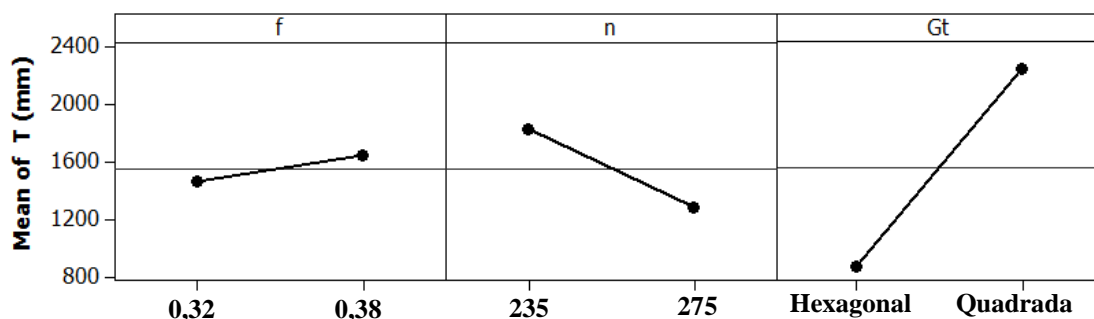


Figura 4: Efeitos Principais para Vida da Ferramenta

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 (1965) e, posteriormente aprimorado por Derringer e Suich (1980), e com auxílio do software Minitab 15 pode-se obter 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/v, rotação de 235 rpm e geometria de corte quadrada para uma vida prevista pelo modelo de 3053 mm.

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	3053

## 4.2 Vida da Ferramenta, Taxa de Produção e Custo por Peça

Com a definição da melhor geometria da ferramenta optou-se por explorar melhor os parâmetros de corte avanço e rotação. Nesta fase do trabalho as respostas analisadas serão: a vida da ferramenta, a taxa de produção e o custo de usinagem por peça. Utilizando MSR com arranjo CCD obtém os resultados conforme a Tabela 9.



Tabela 9: Vida, Taxa produção e Custo usinagem nos Ensaios Obtidos pela MSR.

N	$f$ (mm/v)	n (Rpm)	T (mm)	Txp (Pç/h)	Kp (\$/Pç)
1	0,32	235	2102	1523	0,04686
2	0,38	235	2853	1712	0,03682
3	0,32	275	1802	1677	0,04474
4	0,38	275	1501	1847	0,04413
5	0,31	255	1652	1555	0,05019
6	0,39	255	1802	1813	0,04117
7	0,35	227	2853	1588	0,04047
8	0,35	283	1952	1807	0,03985
9	0,35	255	3153	1714	0,03562
10	0,35	255	3003	1713	0,03620
11	0,35	255	3303	1716	0,03509
12	0,35	255	2703	1709	0,03755
13	0,35	255	2853	1711	0,03684

A Tabela 10 apresenta a análise de variância (ANOVA), a significância dos termos dos modelos e análise do resíduo das respostas estudadas. Os efeitos principais bem como 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 apresentados mostram que os modelos apresentaram excelentes 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, justificando sua adoção neste estudo. A análise de resíduo foi realizada demonstrando-se normal para a vida, taxa de produção e custo.

Tabela 10: Análise de Significância dos Termos Individuais e ANOVA

Termos	T (mm)	Txp (Pç/h)	Kp (\$/Pç)
Constante	3003	1713	0,03626
$f$	<b>83</b>	90	-0,00293
n	-366	75	<b>0,00054</b>
$f*f$	-638	-15	0,00476
$n*n$	-300	-8	0,00200
$f*n$	-263	-5	0,00236
Regressão	0,000	0,000	0,000
Linear	0,003	0,000	0,000
Quadratica	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%	99,90%	94,30%
Análise de resíduo	0,600	0,511	0,552

<sup>1</sup> Valores em negrito representam os termos não significativos do modelo matemático

Após a definição dos modelos matemáticos obtidos pela MSR, inicia-se a etapa de otimização. Esta etapa tem como objetivo determinar quais são os valores que as variáveis de controle devem assumir de modo que os valores alvos das variáveis de resposta sejam atingidos. A primeira atividade da etapa de otimização foi denominada otimização individual das variáveis de resposta, utilizando-se do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG). Neste trabalho, o

emprego da MSR está associado a um algoritmo de otimização não-linear (GRG) com restrições, implementado utilizando-se o aplicativo Microsoft Excel Solver®. Nesta atividade buscou-se para cada modelo matemático seu respectivo ponto ótimo, dentro dos limites de espaço experimental, porém sem influência das demais variáveis de resposta. Todas as variáveis apresentam respostas do tipo “Maior é Melhor” (LTB – *Larger-The-Better*), a exceção fica por conta da variável custo que apresenta resposta do tipo “Menor é Melhor” (STB – *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 orientando-se pela Equação 6.

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

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 parâmetros de corte e respectivos níveis maximizem a T, T<sub>xp</sub> e minimize o K<sub>p</sub> estudado, sujeito a restrição. Através de uma planilha elaborada no software Microsoft Excel® e tendo como ponto de partida [0; 0] executou-se 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, quando considerada a ampla faixa de valores possíveis para as variáveis de controle, cada variável de resposta possui um ponto ótimo específico.

Tabela 11: Modelos Quadráticos e Ponto de Ótimo Individual (T, T<sub>xp</sub> e K<sub>p</sub>)

	<b>T</b> (mm)	<b>T<sub>xp</sub></b> (Pçs/h)	<b>K<sub>p</sub></b> (\$/Pç)
<b>b0</b>	3003	1713	0,0363
<b>b1</b>	83	90	-0,0029
<b>b2</b>	-366	75	0,0005
<b>b11</b>	-638	-15	0,0048
<b>b22</b>	-300	-8	0,0020
<b>b12</b>	-263	-5	0,0024
$\hat{y}_i$	3140	1850	0,03558
<b>f</b>	0,36	0,38	0,38
<b>n</b>	241	235	248

A Figura 5 descreve-se o comportamento da interação entre os parâmetros de corte. Sendo assim, utilizou-se da superfície de resposta conforme Figura 5, para determinar o ponto de ótimo para processo de usinagem dos anéis de pistão.

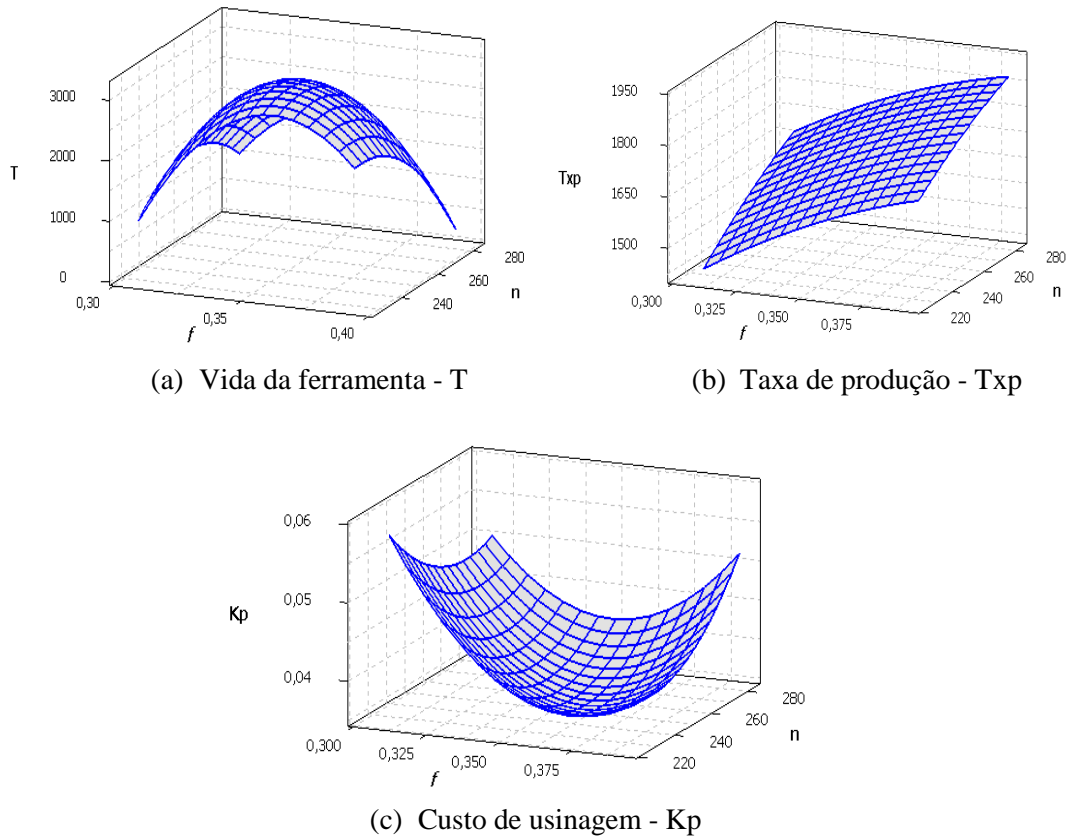


Figura 5: Efeito da Interação entre Avanço e Rotação sobre a T, Txp e Kp

A Figura 7 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. A maior vida da ferramenta conforme Figura (7-a) é explicada pela maior velocidade de avanço que reduz o tempo de contato entre peça e ferramenta. Na Figura 7-b observa-se maior taxa de produção com maiores avanço e rotação em função do menor tempo de usinagem. O menor custo de usinagem por peça usinada observado na Figura (7c) 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 um 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.

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

A primeira e a segunda restrição têm como objetivo partir do ponto encontrado na condição individual e a terceira restrição têm como objetivo 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.

Tabela 12: Modelos Quadráticos e Ponto de Ótimo Comum (T, Txp e Kp)

	<b>T</b> (mm)	<b>Txp</b> (Pcs/h)	<b>Kp</b> (\$/Pç)
<b>b0</b>	3003	1713	0,0363
<b>b1</b>	83	90	-0,0029
<b>b2</b>	-366	75	0,0005
<b>b11</b>	-638	-15	0,0048
<b>b22</b>	-300	-8	0,0020
<b>b12</b>	-263	-5	0,0024
$\hat{y}_i$	2431	1800	0,03797
<b>f</b>		0,37	
<b>n</b>		265	

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 onde as restrições incluídas ao modelo são atendidas, conforme Figura 6.

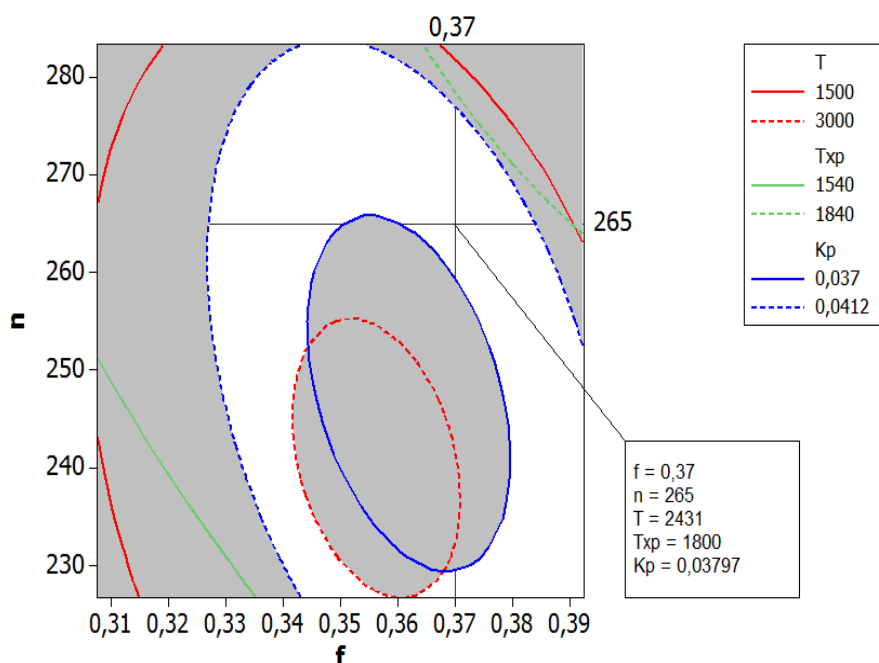


Figura 6: Ponto de Otimização Comum para as Respostas (T, Txp e Kp)

Obtido o ponto de ótimo, para os parâmetros de corte  $f = 0,37$  mm/v e  $n = 265$  rpm, realizou-se o experimento de confirmação, que tem como objetivo 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.

Desta 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 através da MSR é adequado para a melhoria do processo de usinagem. Realizando-se uma análise comparativa da condição de usinagem anterior ao estudo, em função da condição otimizada, com o objetivo de observar o contraste entre os fatores e respostas estudadas

construiu-se a Tabela 13.

Tabela 13: Comparativo entre Condição Anterior *versus* Otimizada

	Parâmetros	Anterior	Otimizada
<b>Fatores</b>	$f$ (mm/rot.)	0,32	0,37
	$n$ (rpm)	235	265
	Gt	Hexagonal	Quadrada
<b>Respostas</b>	T (mm)	1351	2431
	T <sub>xp</sub> (pç/h)	1451	1850
	K <sub>p</sub> (\$/pç)	0,059	0,038

Observa-se que as mudanças nos níveis dos fatores impactaram de forma positiva na vida da ferramenta, na taxa de produção e no custo de usinagem.

## 6. Conclusões

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

- 1) A vida da ferramenta apresentou uma melhoria significativa, fato este explicado pela geometria da ferramenta quadrada. A geometria quadrada favorece uma maior vida útil, devido à construção da aresta de corte ser escalonada e proporcionar a remoção do sobremetal da peça de maneira fracionada. A interação entre os parâmetros de corte diminuiu o tempo de contato entre a peça e a ferramenta, contribuindo para uma maior vida da ferramenta.
- 2) A taxa de produção foi aumentada devido à otimização dos parâmetros de processo (avanço, rotação e geometria da ferramenta), que contribuíram para um menor tempo total de usinagem por peça fabricada e uma maior vida da ferramenta de corte.
- 3) A redução do custo de usinagem por peça foi realizada devido o somatório de benefícios de uma melhor geometria de ferramenta e dos parâmetros de corte ideais, na usinagem do ferro fundido cinzento martensítico na operação de torneamento vertical.
- 4) 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 uma redução custo de usinagem 36,25% por peça.
- 5) 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 na modelagem das condições de usinagem.
- 6) Mesmo considerando a qualidade dos resultados, e os resultados da presente abordagem, estas conclusões não podem ser extrapolados para diferentes materiais, ferramentas ou máquinas e são válidos apenas nos níveis adotados. A abordagem pode, no entanto, ser recomendada para otimizar outros processos de fabricação.

## 7. Agradecimentos

A MAHLE Metal Leve S.A. ao CNPq CAPES e FAPEMIG pelo auxílio despedido neste trabalho.

## 8. Referências

- Al-Ahmari A.M.A. (2007) - *Predictive machinability models for a selected hard material in turning operations - Journal of Materials Processing Technology*, pp. 305–311
- Carlyle W.M. Montgomery D.C. & Runger G.C.(2000) *Optimization Problems and Methods in Quality Control and Improvement. Journal of Quality Technology*. V32 n1 1-31 pp
- Cauchick-Miguel P.A., Coppini N.L.(1996), *Cost per piece determination in machining process: an alternative approach, Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 36 N°. 8 pp 939–946.
- Chiang Ko-Ta, Liu, Nun-Ming, Horng Jenn-Tsong (2008) -*Investigating the machinability evaluation of Hadfield steel in the hard turning with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC mixed ceramic tool based on the response surface methodology - Journal of materials processing technology* pp. 532–541
- Choudhury S.K. ; Bartarya G. (2003); *Role of temperature and surface finish in predicting tool wear using neural network and design of experiments - International Journal of Machine Tools & Manufacture* pp.747–753.
- Cox D.R. & Reid N. (2000) *The Theory of the Design of Experiments* Chapman & Hall/CRC; 1 edition pp.336
- Derringer, G., Suich, R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality Technology*, v 12, n 4, pp.214-219, 1980.
- Ferreira J. R. ; Balestrassi P. P.;Paiva, A. P. (2007) - *A multivariate hybrid approach applied to AISI 52100 hardened steel turning optimization - Journal of Materials Processing Technology* pp.26–35.
- Gaitonde V.N., Karnik S.R., Siddeswarappa B. & Achyutha B.T. (2008) *Integrating Box-Behnken design with genetic algorithm to determine the optimal parametric combination for minimizing burr size in drilling of AISI 316L stainless steel. Int J Adv Manuf Technol* pp.230–240
- Harrington, E. C. The Desirability Function. *Industrial Quality Control*, n 21, pp. 494-498, 1965.
- Hejazi M.M., Divandari M. & Taghaddos E. (2009) *Effect of copper insert on the microstructure of gray iron produced via lost foam casting. Materials and Design* V 30 1085–1092.
- Köksoy, O (2007). *A nonlinear programming solution to robust multiresponse quality problem. Appl. Math. Comput.*, v. 6, n. 23
- Köksoy, O., Doganaksoy, N. (2003) *Joint Optimization of Mean and Standard Deviation Using Response Surface Methods. Journal of Quality Technology*, v 35, n 3, pp. 237-334
- Kurt M., Bagci E. & Kaynak Y. (2009) - *Application of Taguchi methods in the optimization of cutting parameters for surface finish and hole diameter accuracy in dry drilling processes. Int J Adv Manuf Technol* , pp458–469
- Lalwani D.I.,Mehta N.K., Jain P.K.(2008) - *Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel -*

*Journal of materials processing technology*, pp. 167–179

Maio D.P.(1999), *Optimal Central Composite Designs in the Presence of Dispersion Effects* , *Journal of Quality Technology* V31 n4 pp398-407

Mason R.L. , Gunst R.F. , Hess J.L. (2003) *Statistical Design and Analysis of Experiments, with Applications to Engineering and Science* Wiley-Interscience; 2 edition, pp 760

Montgomery D.C. & Runger G.C.(2002) *Applied Statistics and Probability for Engineers* Third Edition.*John Wiley & Sons, Inc.*, pp.720

Montgomery D.C.(2000) *Design and Analysis of Experiments* 5° Edition.*John Wiley & Sons, Inc.*, pp.672

Myers, R. H. & Montgomery, D. C.(2002) *Response Surface Methodology –Process and Product Optimization Using Designed Experiments. Wiley Series in Probability and statistics - John Wiley & Sons, Inc 2ed.*, pp824

Pereira A.A., Boehs L., Guesser L.W.(2006) - The influence of sulfur on the machinability of gray cast iron FC25 - *Journal of Materials Processing Technology*, pp165-171.

Nalbant M, Gokkaya H., Sur G.(2007) - *Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning - Materials and Design*, pp. 1379–1385

Noordin M. Y. , Venkatesh V.C., Sharif S., Elting S, Abdullah A. (2004) - Application of response surface methodology in describing the *performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel.**Journal of Materials Processing Technology*, pp.46–58

Ortiz F. ; Pignatiello, J. J.; Simpson, J R (2004) *A Genetic Algorithm Approach to Multiple-Response Optimization. Journal of Quality Technology*, V36 n4 432-450.

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, October 2007—2363*

Reddy N.S.K. , Rao P. V. (2005) *Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling - Int J Adv Manuf Technol*, pp1202-1210

Sarma D.K., Dixit U.S. (2007) - *A comparison of dry and air-cooled turning of grey cast iron with mixed oxide ceramic tool - Journal of Materials Processing Technology*,pp 160–172

Souza J.V.C. , Nono M.C.A. , Ribeiro M.V, Machado J.P.Ba & Silva O.M.M.(2009) - *Cutting forces in turning of gray cast iron using silicon nitride based cutting tool. Materials and Design* V30 pp2715–2720.

Trent, E. M., Wright, P. K., *Metal Cutting. Fourth Edition* Woburn, MA: Butterworth Heinemann, 2000, 446p.

Wei W., Tianfu J., Yuwei G. , Guiying Q. & Xin Z.(2007) -*Properties of a gray cast iron with oriented graphite flakes.**Journal of Materials Processing Technology* V182 593–597

## **Palestrantes:**

### **Geremias Severino**

Mestrando em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI (2009-2010) com ênfase em Usinagem e Projeto de Experimentos. Pós-Graduação em Qualidade e Produtividade pela Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI (2008-2009). Possui Graduação em Tecnologia de Fabricação Mecânica pela Fundação de Ensino e Pesquisa de Itajubá (2006-2008). Tem experiência na área de Processos de Fabricação por Usinagem. No período 2006-2009 trabalhou no desenvolvimento de ferramentas de corte na Fecial Indústria e Comércio Ltda; Desde 2009 é Tecnólogo de Processos na Mahle Metal Leve S.A. de Itajubá-MG.

### **João Roberto Ferreira**

Possui graduação em Engenharia Mecânica-Produção pela EFEI- Escola Federal de Engenharia de Itajubá (1986), Mestrado e Doutorado em Engenharia Mecânica pela UNICAMP (1992 e 1999). Professor Associado II do Instituto de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá. Ex-membro da CA-TEC Câmara de Tecnologia da FAPEMIG (2005-2009). Pesquisador do CNPq e da Fapemig. Tem experiência na área de Processos de Fabricação por Usinagem, bem como em projeto/análise de experimentos e otimização destes processos.