

OTIMIZAÇÃO DO TORNEAMENTO CURVILÍNEO DE ANÉIS DE PISTÃO DE FERRO FUNDIDO NODULAR COM FERRAMENTA ESPECIAL DE METAL DURO

Lucio Albino Amaro da Silva, lucioalbino@yahoo.com.br¹
João Roberto Ferreira, jorofe@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá, MG, CEP 37500-903

Resumo: *Este trabalho apresenta um estudo de caso onde a vida útil de uma ferramenta especial de metal duro classe K-10 foi significativamente aumentada com a aplicação de um projeto de experimentos. Esta ferramenta é usada no torneamento curvilíneo de anéis de pistão de ferro fundido nodular. Este material é largamente utilizado pelas indústrias devido aos seus resultados superiores de tenacidade e ductilidade. Contudo, sua usinabilidade é registrada como inferior a dos ferros fundidos cinzentos. Quando o processo de usinagem do anel requer uma redução no ângulo de ponta da ferramenta, a sua vida útil se torna crítica. Isso ocorre, pois um ângulo de ponta menor na ferramenta resulta em menor quantidade de material na aresta de corte, o que reduz sua resistência aos esforços de corte e se agrava devido a baixa usinabilidade relativa deste material. Objetivando melhorar a vida desta ferramenta, realizou-se neste trabalho um projeto de experimentos com 2 níveis e 3 fatores visando otimizar as condições de usinagem. Estes 3 fatores são as principais variáveis deste processo de torneamento: velocidade de avanço radial, velocidade de avanço axial e rotação da peça. Os resultados finais apresentaram uma vida útil da ferramenta 157% maior do que a condição inicial do processo.*

Palavras-chave: *Torneamento curvilíneo, ferro fundido nodular, ferramenta com geometria especial, projeto de experimentos.*

1. INTRODUÇÃO

O torneamento curvilíneo numa peça metálica é uma operação empregada quando um componente mecânico assim o requer devido às suas características funcionais. Este trabalho propõe obter um aumento na vida útil da ferramenta especial de metal duro utilizada na operação de torneamento curvilíneo quando este é aplicado na manufatura de anéis de pistão com metal base em ferro fundido nodular. Neste produto, os contínuos avanços tecnológicos têm focado na redução da emissão de poluentes e no aumento da vida útil dos motores de combustão interna. Os fabricantes de motores têm alcançado isso, entre outros fatores, com a utilização de anéis de pistão cujo metal base tenha melhores propriedades mecânicas e com mudanças no seu perfil.

Quando comparado com o ferro fundido cinzento, o ferro fundido nodular tem maior resistência ao desgaste. Os flocos de grafita, presentes no ferro fundido cinzento, atuam como amplificadores da tensão no plano de cisalhamento, facilitando o corte. No ferro fundido nodular as esferas de grafita são menos efetivas como elevadores da tensão para rompimento do material no plano de cisalhamento, assim a zona de deformação pode ser extremamente dúctil. Em conjunto com as demais propriedades temos como resultado uma pior usinabilidade comparada ao ferro fundido cinzento, tendo este material grande aplicação na fabricação de anéis de pistão (Yigit et al., 2008). Além das melhorias no material, o metal base dos anéis de pistão passou a nos últimos anos de uma face plana para uma face curvilínea, onde apenas parte do metal base apresenta revestimento. Esta configuração reduz o tempo requerido para amaciamento do motor e melhora a retenção de óleo lubrificante junto ao cilindro, o que reduz a passagem do óleo do Carter para a câmara de combustão e ao mesmo tempo, deixa uma fina camada de óleo na parede do cilindro, o que reduz o atrito do anel de pistão com o cilindro (Valente, 2008).

A usinagem do perfil requerido no metal base geralmente é realizada em um torno CNC. Esta operação requer que a geometria da ferramenta tenha um contorno especial, inviabilizando a utilização de uma ferramenta convencional. Além disso, este perfil especial varia para cada tipo específico de anel de pistão. Considerando que este perfil resulta em menor quantidade de material na aresta de corte da ferramenta (menor ângulo de ponta), há uma significativa redução na vida útil da mesma quando se compara com um torneamento retilíneo, considerando-se uma mesma quantidade de material removido usando uma ferramenta convencional. A análise e a obtenção de parâmetros ótimos para esse processo, objetivando obter um melhor desempenho da ferramenta no torneamento curvilíneo de uma peça em ferro fundido nodular, é o principal escopo deste trabalho. Considerando que uma redução no ângulo do perfil da ferramenta

é favorável para reduzir o refugo em etapas posteriores do processo de fabricação, a viabilização da utilização de uma ferramenta com ângulo menor o que torna o grande desafio deste estudo.

Este tipo de problema é um típico processo de obtenção de fatores ótimos que demanda a aplicação da metodologia de projeto de experimentos (Montgomery, 2005). O mais simples, mas o mais efetivo DOE utilizado é o de dois níveis de fatores. Cada parâmetro de entrada é avaliado em níveis alto e baixo e a saída é observada para verificar as mudanças no resultado. É um problema simples de processamento paralelo (projeto fatorial) versus um processo serial (Anderson and Kraber, 1999). Neste trabalho será utilizado um projeto fatorial completo com dois níveis e três fatores. Os fatores escolhidos são as principais variáveis do processo: velocidade de avanço radial, velocidade de avanço axial e rotação da peça. Neste estudo se verificará a vida da ferramenta para cada condição de ensaio e o custo ferramenta por peça antes e depois do estudo.

2. DETALHES EXPERIMENTAIS

2.1. Ferramenta perfilada

O material da ferramenta é metal duro, classe ISO K-10 (WC + Co), com alta resistência ao desgaste, sendo indicado para torneamento acabado de materiais com cavacos curtos como é o caso do ferro fundido nodular e dos aços endurecidos. A dureza média deste metal duro é de 79,3 HRC. O perfil dessa ferramenta é mostrado na Fig. 1 sendo obtido através de retificação. Como resultado, a rugosidade da superfície superior atinge um valor de Ra que varia de 0,2 a 0,5 μm . Na condição inicial do processo estudado, o ângulo (α), mostrado na Fig. 1 (b) é 30°, mas o mesmo foi alterado para 20° neste estudo. As dimensões W e D indicadas na Fig. 1 (b) são tabeladas e variam conforme as características específicas de cada anel de pistão.

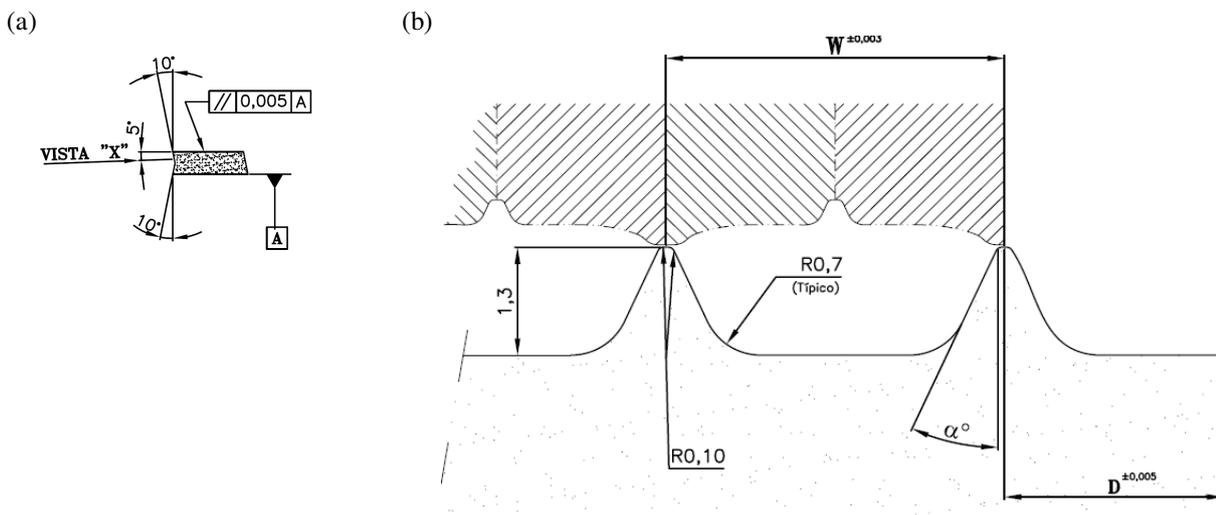


Figura 1. Ferramenta perfilada: (a) Vista lateral, (b) Vista frontal ("X") com representação da região usinada.

A justificativa para reduzir o ângulo (α) da ferramenta, mostrado na Fig. 1 (b), de 30° para 20°, é a obtenção de uma camada menor de cromo no fundo do chanfro do anel. No fluxo de processo de um anel de pistão, após o torneamento acabado temos a deposição da camada de cromo. Nas Figs. 2 e 3, percebe-se que usando uma ferramenta com ângulo de 20° temos uma quantidade menor de cromo depositado no fundo do chanfro e por consequência uma menor espessura da camada. Ao usar ferramenta com ângulo de 30°, temos uma espessura da camada de cromo de 0,11 mm no fundo do chanfro, enquanto que uma ferramenta com ângulo de 20° resulta numa espessura na camada de 0,08 mm.

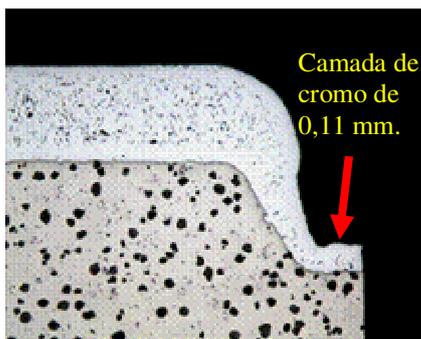


Figura 2. Corte de um anel que utilizou ferramenta com ângulo de 30°.

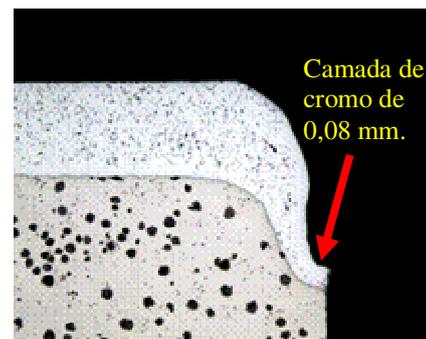


Figura 3. Corte de um anel que utilizou ferramenta com ângulo de 20°.

Uma menor camada de cromo no fundo do chanfro é desejável por que permite o surgimento e propagação linear da trinca de ruptura, facilitando o rompimento da camada na abertura da árvore e, como consequência, reduzindo consideravelmente o surgimento de lascas na face de contato do anel de pistão. Se a camada de cromo neste ponto é alta não há mais um ponto frágil para ruptura. Sem uma região frágil para cisalhar, ao se abrir à árvore o rompimento da camada de cromo entre os anéis se dá preferencialmente por rasgamento e não por cisalhamento puro, ocorrendo deslocamento das superfícies de trinca paralelamente a si mesmas e não no sentido preferencial perpendicular, gerado pelo cisalhamento. Assim, uma quantidade expressiva de lascamentos na camada de cromo é esperada e as peças com esse problema devem ser refugadas.

2.2. Caracterização da peça usinada

Os anéis torneados são ferro fundido nodular com alto teor de Nióbio, similar ao material ISO 6621-3 (2004b), subclasse 56, sendo sua composição química é mostrada na Tab. 1. Altas adições de ligas neste material promovem uma microestrutura com propriedades próximas à dos aços endurecidos. Logo, a usinabilidade é similar a do aço e muito pior do que do ferro fundido cinzento. Este ferro fundido dúctil tem tensão de escoamento e módulo de elasticidade respectivamente no valor mínimo de 1.300 MPa e 145.000 MPa e sua dureza média é de 41 HRC. A estrutura metalográfica do material, obtida com um microscópio Leica DM IRM, é apresentada na Fig. 4, onde percebe-se os nódulos de grafita uniformemente distribuídos. A matriz é martensita temperada sem ferrita livre e com partículas de carbeto isolados distribuídos uniformemente com menos de 5%.

Tabela 1. Composição química do ferro fundido nodular com Nióbio (Catálogo Mahle, 2007).

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Mg	Nb
Quantidade (%)	3.5 – 4.1	2.4 – 2.9	0.2 – 0.8	max 0.15	max 0.03	max 0.7	max 0.3	0.02 – 0.07	0.4 – 0.6

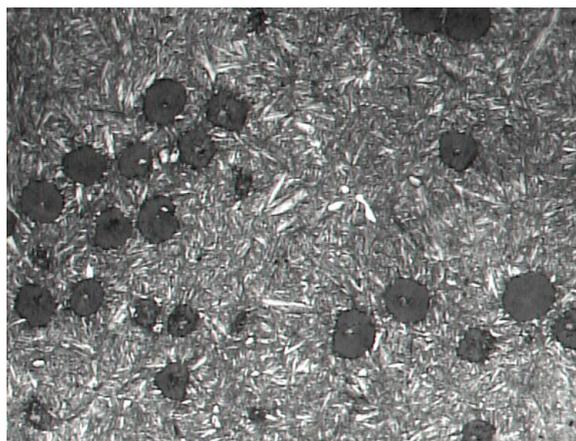


Figura 4. Nódulos de grafita numa matriz martensítica temperada atacada com Nital 3%, 500:1.

Neste trabalho, como a peça torneada é a face de contato de um anel de pistão, sua usinagem somente é viável quando certa quantidade de anéis é montada numa árvore, resultando em uma barra cilíndrica com 380 mm de comprimento, 75,75 mm de diâmetro inicial e tendo como comprimento total 500 mm, considerando o dispositivo de fixação mais à peça usinada. A Fig. 5 mostra uma árvore montada pronta para ser usinada. Os nomes das peças de fixação são os seguintes: 1) Centro postiço no lado do arraste; 2) Eixo da árvore; 3) Colar; 4) Anel de encosto; 5) Arruela; 6) Porca e 7) Centro postiço no lado da porca.

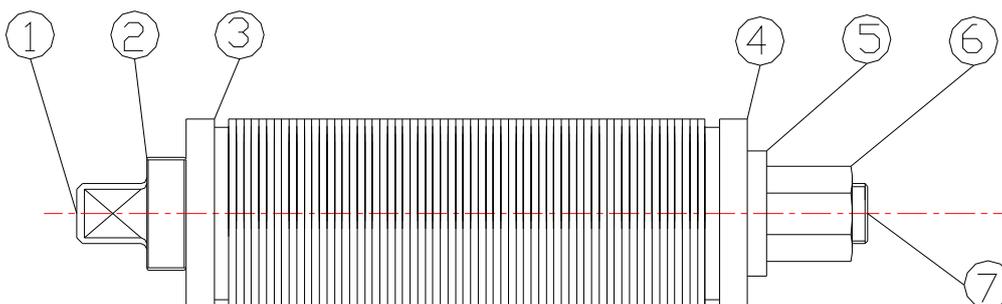


Figura 5. Vista geral da árvore montada pronta para ser usinada.

3. METODOLOGIA DE ENSAIO

A máquina utilizada no torneamento é um torno CNC com sistema Siemens Sinumerik 810D controlando um motor trifásico assíncrono com 11 KW, 9.000 RPM, que aciona o eixo árvore, e dois eixos com 6 Nm, 3.000 RPM, cujos movimentos são independentes entre si e em relação ao eixo árvore. Estes dois eixos que fazem os movimentos axiais e radiais da ferramenta. Este processo opera com refrigeração usando o fluido Plantocool MH 2002 diluído 6% em água. Tal fluido não contém óleos minerais na sua composição e seus aditivos promovem uma excelente lubrificação no torneamento, sendo indicado para aplicações severas (Fuchs Catalogue, 1997). A quantidade de material removido é de 0,25 mm no diâmetro da peça. Conforme mostrado na Fig. 6, a ferramenta perfilada se move em direção à peça com uma velocidade de avanço radial removendo material no diâmetro e com uma velocidade axial removendo material em um movimento longitudinal.

O número total de árvores torneadas com uma afiação define a vida útil da ferramenta. A rugosidade esperada para a superfície torneada neste tipo de operação é em torno de 1,0 μm Ra. Sendo adotado como critério de vida útil à falha catastrófica. Esta ocorre quando o desgaste na ferramenta é tão grande que a mesma já não consegue executar nenhum corte com sucesso.

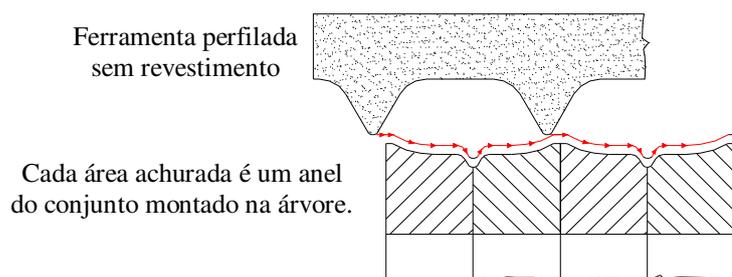


Figura 6. Movimento que a ferramenta perfilada executa durante o torneamento.

Considerando os parâmetros inicialmente definidos para o processo, ou seja: velocidade de avanço radial de 4,0 mm/min, velocidade de avanço axial de 12,0 mm/min e rotação da peça de 211 RPM; temos na Tab. 2 os resultados de vida útil da ferramenta conforme o ângulo (α) utilizado na mesma.

Tabela 2. Resultados obtidos com os parâmetros utilizados antes do projeto de experimentos.

Ângulo de corte da ferramenta (α)	Quantidade de árvores torneadas
30°	30
25°	24
20°	14

3.1. Planejamento do Projeto de Experimentos

Para este estudo definiu-se uma análise fatorial completa de dois níveis com replicação resultando em 16 experimentos. A experiência adquirida no estudo do processo indicou que os 3 fatores mais críticos do processo são a velocidade de avanço radial, a velocidade de avanço axial e a rotação da peça. Antes de definir os dois níveis para cada fator, um conjunto de experimentos foi efetuado com o objetivo de permitir a escolha daqueles níveis que iriam economizar tempo nos experimentos. Com isto optou-se em se reduzir à rotação em 5% e aumentar as velocidades axial e radial. Após estas considerações, os níveis ficaram conforme os valores indicados na Tab. 3.

Tabela 3. Níveis e fatores definidos para os experimentos.

	Nível 1	Nível 2
Velocidade Avanço Radial (mm/min)	6,3	7,2
Velocidade Avanço Axial (mm/min)	12	15
Rotação (RPM)	180	190

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

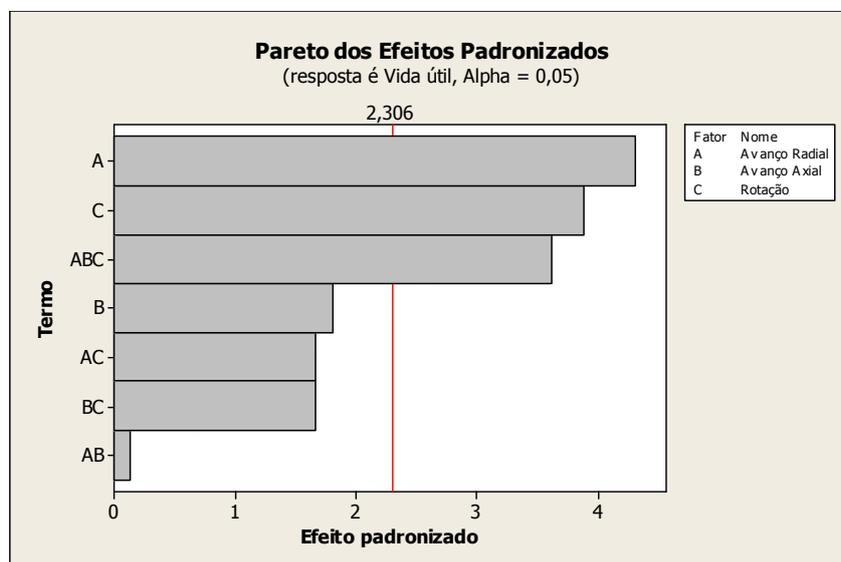
4.1. Resultados do Projeto de Experimentos

Os experimentos foram efetuados de forma aleatória conforme indicado na Tab. 4. Após executar a análise fatorial foi gerado o gráfico de pareto com fatores que afetam da vida útil da ferramenta.

Tabela 4. Descrição detalhada dos experimentos do DOE com seus resultados.

	Vel. Avanço Radial (mm/min)	Vel. Avanço Axial (mm/min)	Rotação (RPM)	Quantidade de árvores torneadas
1	7,2	12	180	43
2	6,3	15	190	20
3	6,3	12	180	22
4	7,2	15	190	28
5	6,3	12	190	26
6	7,2	15	180	32
7	7,2	12	190	29
8	6,3	15	180	26
9	7,2	12	190	24
10	7,2	15	180	34
11	7,2	12	180	37
12	6,3	15	180	32
13	6,3	15	190	11
14	6,3	12	180	23
15	6,3	12	190	30
16	7,2	15	190	25

Este gráfico de pareto, que é apresentado na Fig. 7, mostra um resumo das informações sobre a importância relativa da diferença entre os três fatores e suas interações para cada resposta. A informação é disposta em barras distribuídas do mais significativo para o menos significativo. O comprimento de cada barra é proporcional à significância estatística de seu efeito. Este gráfico mostra que a vida útil da ferramenta é grandemente afetada pelo avanço radial, pela rotação e pela interação dos três fatores. A linha vertical vermelha é a linha do valor crítico que indica que os fatores apresentados acima do valor de 2,306 de efeito padronizado são significantes, considerando um nível de significância de 5% (Polhemus, 2005). Logo, os fatores que estão abaixo da linha vermelha têm pouca influência na vida da ferramenta.

**Figura 7. Pareto com os fatores que afetam a vida útil da ferramenta e o tempo de ciclo.**

Os efeitos principais para cada fator são apresentados na Fig. 8. A linha de referência nestes gráficos representa a média geral dos dados e tem por fim auxiliar ao usuário a visualizar a magnitude destes efeitos, obviamente para vida útil da ferramenta quanto maior o valor obtido melhor. Verifica-se que um avanço radial maior em conjunto com uma rotação menor resulta em maior vida útil da ferramenta. Uma redução na velocidade axial tem um efeito reduzido, mas também contribui para o aumento na vida útil. A partir dessas informações fica claro que o fator chave para melhorar a vida útil da ferramenta é o tempo de usinagem ou o tempo de contato entre ferramenta e peça enquanto se executa a operação de torneamento. Esse tempo está diretamente relacionado aos parâmetros de rotação e avanço radial.

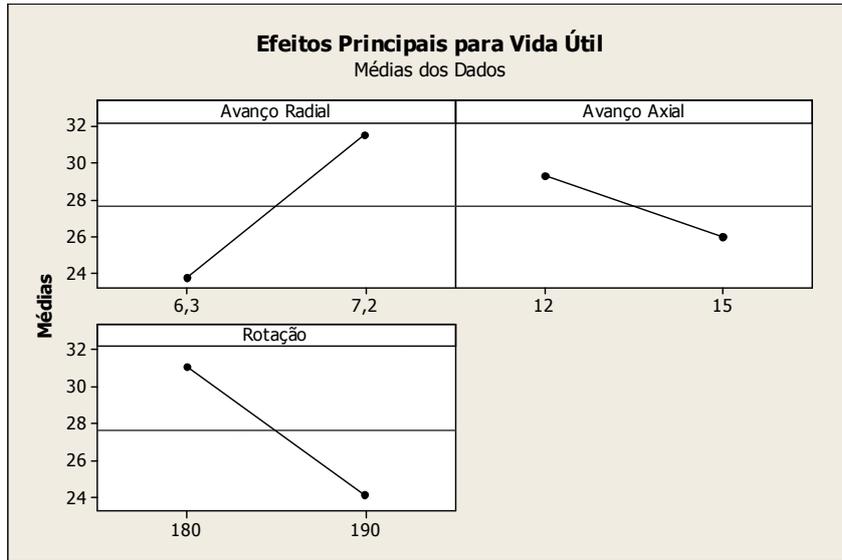


Figura 8. Principais efeitos para cada fator que afetam a vida útil da ferramenta.

Considerando-se um deslocamento de 0,25 mm, o tempo de usinagem relativo apenas ao torneamento radial é de 2,38 segundos com um avanço radial de 6,3 mm/min e 2,08 segundos para um avanço radial de 7,2 mm/min. Assim, uma maior velocidade de avanço radial resulta em um decréscimo de 12,5% no tempo de contato entre a ferramenta e a peça. O tempo de usinagem calculado para cada conjunto de parâmetros é mostrado na Tab. 5. O conjunto de parâmetros que resultam em menor tempo de usinagem, e por conseqüência menor tempo de contato entre ferramenta e peça levarão a um aumento na vida útil da ferramenta especial de metal duro. Esta condição é obtida com um avanço radial de 7,2 mm/min e uma rotação de 180 RPM.

Tabela 5. Relação dos parâmetros utilizados com o tempo de contato entre peça e ferramenta.

Vel. Avanço Radial (mm/min)	Rotação (RPM)	Tempo Usinagem (seg)
6,3	190	7,5367
6,3	180	7,1400
7,2	190	6,5867
7,2	180	6,2400

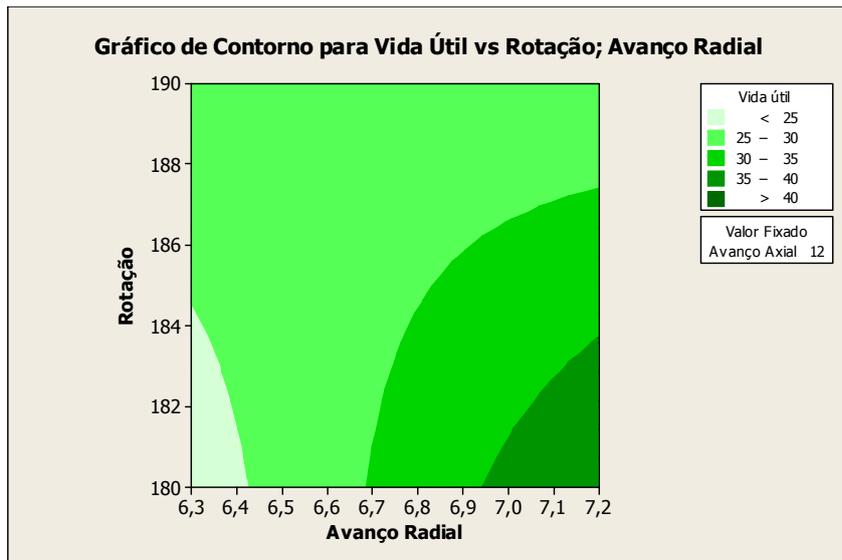


Figura 9. Gráfico de contorno indicando a região escura com interseção de parâmetros ótimos.

No gráfico de contorno da Fig. 9, fica evidente que os parâmetros que resultam em menor tempo de usinagem e por conseqüência menor desgaste da ferramenta são os parâmetros ótimos para aumento da vida útil da ferramenta. Na representação da vida útil em função da rotação versus velocidade radial é mostrada a melhor região dos parâmetros que

otimizam as respostas, os quais são indicados na interpolação das áreas mais escuras. Neste caso, as duas variáveis observadas são as mais críticas para a vida útil, conforme identificado pelo gráfico de Pareto da Fig. 7, e a variável considerada fixa é o avanço axial.

Tabela 6. Resultados e ganhos observados após a aplicação do DOE.

	Resultado inicial	Resultado final	Comparação com os testes iniciais utilizando ângulo de 20°
Quantidade de árvores torneadas	14	36	+157%
Custo ferramenta por peça (R\$)	0,00789	0,00210	-73,4%

Os resultados obtidos aplicando o DOE foram comparados com a condição inicial, conforme mostrada na Tab. 6. A quantidade de árvores usinadas com uma afiação da ferramenta com ângulo de 20° na condição de corte inicial foi de 14 árvores de anéis. Depois do processo de otimização (DOE) obteve-se um ganho de 157%, alcançando-se 36 árvores. Uma redução no tempo de ciclo de 12,5 minutos para 11,7 minutos representa um aumento de produtividade de 6,4%. Como também, ao se considerar o custo de uma ferramenta dividido pelo número total de árvores torneadas a redução no custo por peça foi de 0,00789 para 0,00210, expresso em reais (R\$).

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados e discussões desenvolvidos neste trabalho, as principais conclusões obtidas através da análise do processo de torneamento curvilíneo de anéis de pistão de ferro fundido nodular com ferramenta especial de metal duro, foram as seguintes:

a) O aumento na velocidade de avanço radial em conjunto com uma redução na rotação da peça tem efeito positivo na vida útil da ferramenta especial. Após a definição dos novos parâmetros, se alcançou um aumento de 157% na quantidade de árvores de anéis torneadas com uma afiação da ferramenta.

b) As melhorias no processo foram atingidas mesmo com a redução no ângulo da ferramenta de 30° para 20°, o que torna a ferramenta menos resistente ao desgaste, mas com melhor geometria para redução da espessura da camada de cromo;

c) A redução do custo (73,4 %) com ferramenta foi significativa para o processo de torneamento;

d) O Projeto de Experimento mostrou ser uma ferramenta efetiva para otimizar processos especiais de usinagem conseguindo com poucos experimentos a um baixo custo alcançar resultados positivos.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a gerência da Mahle Componentes de Motores do Brasil pelo seu apoio e encorajamento para este estudo. Também agradecemos o governo brasileiro pelo apoio recebido dos órgãos patrocinadores como o CNPq, o Capes e a Fapemig que apóiam e tornam possível o programa de mestrado na UNIFEI.

7. REFERÊNCIAS

- Anderson, M.J. and Kraber, S.L., 1999. "Eight Keys to Successful DOE", Quality Digest, July 1999. < <http://www.qualitydigest.com/july99/html/doe.html> >.
- Fuchs Catalogue. "Technical Informations: Plantocool MH2002", Brazil, 1997.
- International Organization for Standardization, "Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges – Designation of the main groups and groups of application". Norm ISO 513, 2004.
- International Organization for Standardization, "Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges – Designation of the main groups and groups of application". Norm ISO 6621-3, MC 56, 2004.
- Mahle catalogue – Materials Piston Rings, São Paulo, 2007, 60 p.
- Minitab – Guia do Usuário, Belo Horizonte, 2007, 144 p.
- Montgomery, D.C., 2005, "Design and Analysis of Experiments", Ed. John Wiley & Sons, Arizona, United States of America, 641 p.
- Nist/Sematech, "E-Handbook of Statistical Methods – Engineering Statistics Handbook", May 15th, 2009 < <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/html> >.
- Polhemus, N, October 26th, 2005, Statgraphics Centurion, How to guides. April 17th, 2009 < <http://www.statgraphics.com/How%20To%20Perform%20an%20Optimization%20Experiment.pdf> >.
- Yigit, R, et al., 2008, "Effect of cutting speed on the performance of coated and uncoated cutting tools in nodular cast iron", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 204, pp. 80-88.
- Valente, R., 2008, March 10th, 2009, Blog carburado. Anéis de pistão – 2a parte. September 08th, 2008 < <http://blogcarburado.blogspot.com/2008/09/os-anis-de-pisto-2-parte.html> >.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.



CONTOUR TURNING OF PISTON RINGS OF NODULAR CAST IRON WITH SPECIAL CEMENTED CARBIDE TOOL

Lucio Albino Amaro da Silva, lucioalbino@yahoo.com.br¹
João Roberto Ferreira, jorofe@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá, MG, CEP 37500-903

Abstract:

This work presents a case of study where tool life performance of a cemented carbide blank, class K-10, had been significantly improved by the results of a Design of Experiments. This tool is used in a contour finish turning of Nodular cast iron. This material is largely used by manufacturing industry due to superior results in toughness and ductility. However its machinability is reported to be poorer than grey cast iron. When the manufacturing process request a grooved tool with a reduced edge angle, tool life performance becomes critical. This occurs because a reduced edge angle in the tool results in less quantity of material in the cutting edge, which reduces its resistance to cutting efforts and worsens due to relatively lower machinability of the material. Aiming to improve the life time of the tool a Design of Experiments was performed with 2 levels and 3 factors to optimize the machining conditions. These 3 factors are the main variables of this process of contour turning: radial feed, axial feed and piece rotation. The final results showed a tool life 157% higher than the initial condition of the process.

Keywords: *Contour turning, Nodular cast iron, Special geometry tool, Design of experiments.*

Responsibility notice:

The authors are the only responsabli for the printed material included in this paper.