

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE USINAGEM DO BRUNIMENTO FLEXÍVEL NA QUALIDADE GEOMÉTRICA DE CILINDROS DE BLOCOS DE COMPRESSORES

Leandro Carvalho Pereira, Universidade Federal de Uberlândia, cp.leandro@hotmail.com

Rosenda Valdés Arencibia, Universidade Federal de Uberlândia, arvaldes@mecanica.ufu.br

Luciano José Arantes, Universidade Federal de Uberlândia, ljarantes@femec.ufu.br

Resumo. *Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito de alguns dos principais parâmetros de operação do brunimento flexível na qualidade geométrica do cilindro de blocos de compressores herméticos. Para tanto um planejamento fatorial completo é proposto visando investigar o efeito dos seguintes parâmetros de corte: rotação, velocidade de avanço, número de passadas (golpes) e granulometria da ferramenta, nas variáveis: rugosidade e desvio de circularidade. A rugosidade será avaliada por meio dos valores numéricos dos parâmetros (R_a , R_q , R_p , R_t , R_k , R_{pk} , R_{vk} , R_{sk} , R_{ku} , R_{vo} e R_p/R_t) e da curva de Abbott-Firestone. O processo de medição da rugosidade será efetuado utilizando um rugosímetro eletromecânico, enquanto que uma máquina de medir desvios de forma (MMDF) será utilizada para medir desvios de circularidade. Já a incerteza de medição será estimada utilizando a metodologia proposta no JCGM 100, exceto para os casos em que a aplicação da lei de propagação de incerteza não forneça resultados adequados, nos quais será aplicado o método de Monte Carlo. Se espera com este trabalho melhorar expressivamente o acabamento superficial dos cilindros de blocos de compressores herméticos o qual influi diretamente na vida útil e na eficiência do compressor. Este processo não requer máquinas especiais para a sua realização, ao contrário dos outros tipos de acabamento por brunimento, como o brunimento a laser e brunimento por jato d'água, que requerem máquinas específicas e dedicadas, tornando o processo oneroso.*

Palavras chave: brunimento convencional e flexível, desvio de circularidade, rugosidade, incerteza de medição.

1. INTRODUÇÃO

A época contemporânea, caracterizada por grandes descobertas científicas, acelerado desenvolvimento tecnológico e uma economia cada vez mais globalizada, trouxe a evolução dos processos produtivos. O caráter global das relações comerciais, a competitividade e a busca por maiores parcelas no mercado levaram os países a investirem na procura de novas tecnologias, com o objetivo de aumentar a produtividade e a qualidade dos produtos. Como consequência, máquinas modernas de usinagem foram incorporadas gradativamente ao mundo industrializado, onde os produtos são fabricados com tolerâncias cada vez mais estreitas e em maiores quantidades (Rosa, 2014).

Em busca do desenvolvimento de seus produtos a indústria de refrigeração, em particular na produção de compressores, procura constantemente investir para melhorar seus componentes. Desta forma, o cilindro do bloco do compressor recíproco alternativo hermético, tem recebido uma atenção especial por parte dos fabricantes e pesquisadores, pois requerem elevada exatidão dimensional e geométrica, afim de evitar dificuldades na montagem, o aparecimento de esforços desgastantes, possíveis vazamentos e a perda de eficiência do compressor. Então, a Embraco S/A (Whirlpool - Unidade Compressores) percebeu a necessidade de melhorar, principalmente, a rugosidade do cilindro de seus compressores herméticos visando otimizar o desempenho deste.

Assim sendo, surgiu a ideia por parte da empresa de efetuar uma operação de acabamento nos cilindros, visando eliminar os picos isolados presentes na superfície e arredondar o cume da maior quantidade de picos afim de evitar o contato metal-metal e a vedação do par cilindro-pistão por meio do lubrificante. Para tanto, a empresa propôs a utilização do processo de brunimento flexível utilizando-se a ferramenta *Flex-Hone*, solucionando-se assim o problema.

O brunimento flexível é um método utilizado após o brunimento convencional que atua por intermédio de partículas abrasivas e elásticas de maneira a não alterar as características geométricas, tais como, cilindricidade, concentricidade, coaxialidade e dimensões da peça (Miller, 1993). Este método de brunimento esta sendo cada vez mais utilizado como operação adicional, com o objetivo de arredondar os picos da superfície (Barton e Haasis, 1993). A ferramenta remove picos e imperfeições das paredes de cilindros, criando o acabamento desejável, Fig. (1). O resultado é a redução do atrito, do aquecimento localizado e a melhoria geral no desempenho.

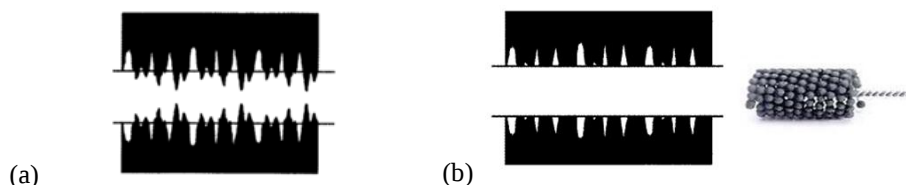


Figura 1. (a) Representação esquemática do perfil de uma superfície cilíndrica antes do processo de brunimento flexível e (b) após este processo com brunidor flexível (Vertec, 2015).

Entretanto, existem outras técnicas de brunimento que poderiam ser utilizadas para efetuar a operação de acabamento dos cilindros. As principais são: o brunimento platô (Andretta, 2001), (Machado, 2008), (Junior, 2009), (Pawlus *et al.*, 2009), (Corral *et al.*, 2010), (Rejowski, 2012), o brunimento por jato d'água (Rejowski, 2012), o brunimento por laser (Andretta, 2001), (Rejowski, 2012), o brunimento deslizante (Rejowski, 2012) e o brunimento espiral deslizante (Rejowski, 2012). Contudo, estas tecnologias são onerosas em relação ao brunimento flexível, que constitui uma alternativa conveniente para atender a demanda por uma alta exatidão dimensional e geométrica do cilindro, de forma simples e econômica.

Apesar destas importantes vantagens, o processo de brunimento flexível tem sido pouco estudado, sendo que na literatura foram encontrados poucos trabalhos sobre este assunto.

De forma geral, a qualidade da superfície obtida por um processo de brunimento de acabamento é usualmente caracterizado por meio dos parâmetros de rugosidade: R_k (Rugosidade do núcleo do perfil- Serie); R_{vk} (Região de vale) e R_{pk} (Região de pico) e duas fronteiras ($Mr1$ e $Mr2$), os quais são definidos a partir da curva de Abbott-Firestone. Entretanto, parâmetros como R_{vo} (volume de retenção de óleo) e a relação R_p/R_t (coeficiente de vazio) também caracterizam muito bem este tipo de superfícies e, portanto, devem ser avaliados.

Neste contexto, surgiu a proposta do presente trabalho, que tem como objetivo principal avaliar a qualidade geométrica do cilindro de blocos de compressores herméticos submetidos ao processo de brunimento flexível utilizando-se uma fresadora CNC e a ferramenta *Flex-Hone*. Para tanto será desenvolvido um planejamento fatorial completo para investigar os efeitos de determinadas condições de usinagem na rugosidade e no desvio de circularidade dos cilindros; além de avaliar a incerteza de medição através da aplicação da metodologia proposta no JCGM 100 (BIPM *et al.*, 2008) e do método de Monte Carlo (INMETRO, 2008), em função da complexidade do mensurando avaliado.

2. METODOLOGIA

O controle geométrico do cilindro será realizado em 72 peças de compressores herméticos antes da operação de brunimento flexível. Para medição do desvio de circularidade será utilizada uma máquina de medir desvios de forma (MMDF) fabricada pela Taylor Hobson, Fig. (2a), com resolução de $0,01 \mu\text{m}$ e faixa de medição no eixo vertical de 250 mm e no eixo horizontal de 180 mm. Este equipamento possui incerteza expandida associada à calibração de $0,011 \mu\text{m}$, para k igual a 1,97 e probabilidade de abrangência de 95%. Durante a medição serão apalpadas cinco seções e cinco ciclos serão executados para cada peça. Já para a medição da rugosidade será utilizado um rugosímetro portátil, eletro-mecânico, digital, modelo TIME TR200 da Homis, Fig. (2b). Este equipamento possui resolução de $0,001 \mu\text{m}$ e faixa nominal de $160 \mu\text{m}$. Será utilizada uma ponta de diamante de raio igual a $2 \mu\text{m}$. Segundo o certificado de calibração a incerteza expandida associada à calibração do rugosímetro é de $0,060 \mu\text{m}$ para um fator de abrangência k igual a 2,57 e 95 % de probabilidade de abrangência. Será adotado um comprimento de amostragem (L_c) de $0,8 \text{ mm}$, de acordo com a NBR ISO 4288 (ABNT, 2008). A rugosidade da cada peça será medida cinco vezes.

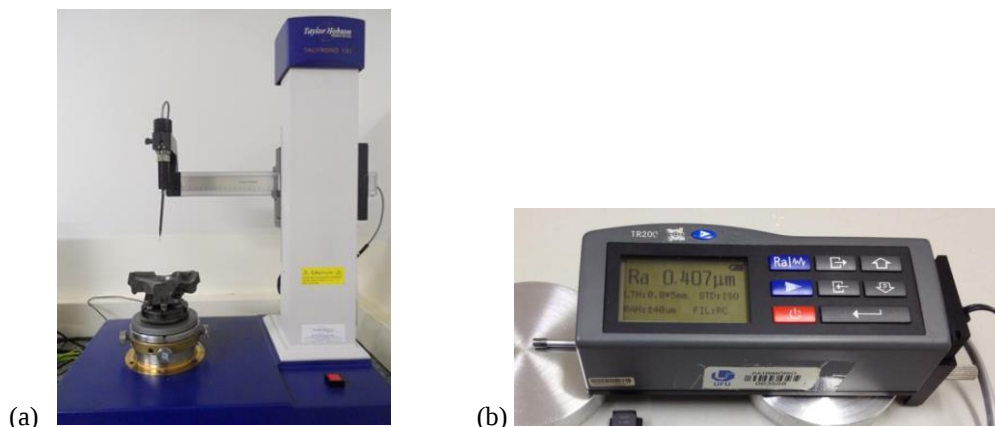


Figura 2. (a) Máquina de medir desvios de forma, fabricada pela Taylor Hobson e (b) rugosímetro portátil, modelo TR200 da Homis.

O rugosímetro e a peça objeto de medição serão posicionados em um desempenho de granito a fim de minimizar o efeito das vibração mecânica transmitida pelo solo. Aproveitando a excelente capacidade de diagnóstico do programa do rugosímetro, a rugosidade de cada peça será analisada a partir dos valores dos seguintes parâmetros: R_a (Desvio Aritmético Médio do Perfil), R_q (Desvio Médio Quadrático do Perfil), R_p (Altura Máxima do pico do Perfil), R_t (Altura Total do Perfil), R_{sk} (Fator de Assimetria do Perfil - Skewness), R_{ku} (Fator de Achatamento - Kurtosis), R_{vk} (Região de pico), R_{pk} (Região de vale), R_k (Rugosidade do núcleo do perfil), R_{vo} (volume de retenção de óleo) e R_p/R_t (coeficiente de vazio).

Todas as medições serão conduzidas à temperatura ambiente controlada de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Um termo-higrômetro digital com resolução de $0,1^\circ\text{C}$ e faixa nominal de $(-20 \text{ a } 60)^\circ\text{C}$ será utilizado para a medição da temperatura. Este equipamento possui certificado de calibração N. R4996/13, emitido pelo Laboratório de Temperatura e Umidade da Elus Instrumentação. Para a temperatura, a incerteza expandida é de $0,3^\circ\text{C}$ para k igual a 2,00 e infinitos graus de liberdade.

Em seguida será efetuada a operação de brunimento flexível dos cilindros dos blocos de compressores utilizando-se uma máquina fresadora CNC, conforme a Fig. (3a), e a ferramenta *Flex-Hone*, Fig. (3b).

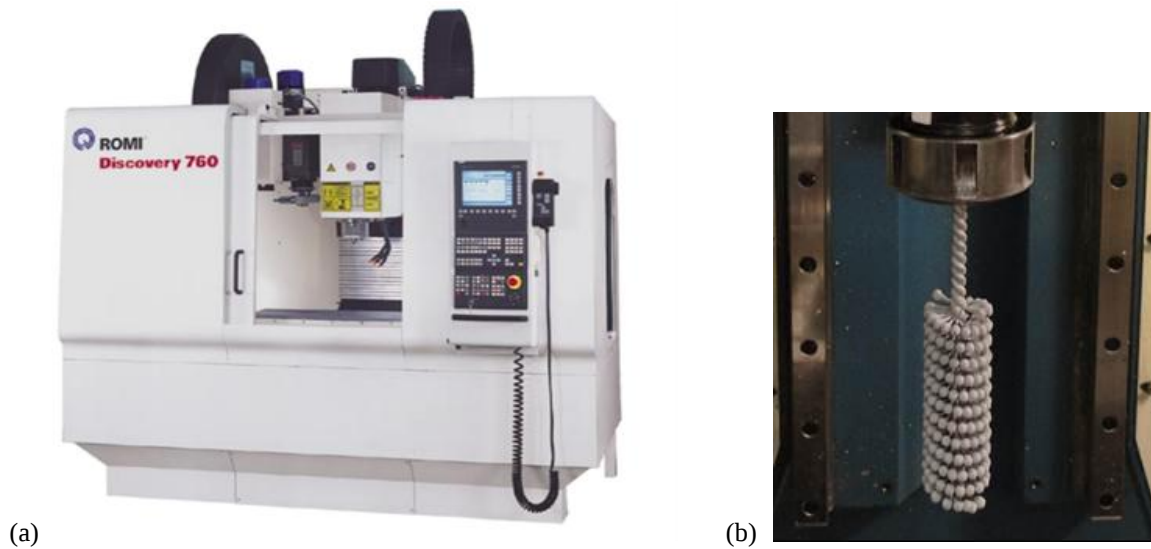


Figura 3. (a) Fresadora CNC, modelo Discovery 760 da Romi, utilizada para realização dos ensaios (Romi, 2015) e (b) brunidor flexível para furo de 22 mm, abrasivo SiC e granulometria 800 mesh.

A usinagem será efetuada segundo o planejamento fatorial completo $2 \times 2 \times 2 \times 3$, onde as variáveis independentes a serem avaliadas (fatores) são: rotação, velocidade de avanço, números de passadas (golpes) e granulometria da ferramenta, e os valores assumidos por cada uma delas (níveis) são mostrados na Tab. (1), perfazendo 24 experimentos, replicados duas vezes, totalizando 72 experimentos.

Após o processo de brunimento flexível o controle geométrico do cilindro dos compressores herméticos será novamente efetuado. Uma análise de variância ANOVA para o experimento fatorial completo citado acima, será realizado para testar a significância dos efeitos principais e de interação entre os mesmos utilizando o software Statistica.

Com o intuito de contribuir para a rastreabilidade do resultado proveniente de uma medição, será estimado a incerteza de medição para o desvio de circularidade utilizando a metodologia proposta no JCGM 100 (BIPM *et al.*, 2008), enquanto para a rugosidade será aplicado o método de Monte Carlo (MC) conforme recomenda INMETRO (2008).

O modelo matemático para cálculo da incerteza do desvio de circularidade é descrito na Eq. (1).

$$C_{Circ} = L_{MMDF} + \Delta R_{MMDF} + \Delta I_{C_{MMDF}} + \Delta D_{EXC} \quad (1)$$

Onde: C_{Circ} (desvio de circularidade), L_{MMDF} (média dos valores indicados pela MMDF), ΔR_{MMDF} (correção associada à resolução da MMDF) $\Delta I_{C_{MMDF}}$ (correção associada à incerteza padrão da calibração da MMDF) e ΔD_{EXC} (correção associada ao desvio de excentricidade da mesa da MMDF).

Já o modelo matemático para o cálculo da incerteza da rugosidade é mostrado na Eq. (2).

$$R_{Rug} = L_{Rug} + \Delta R_{Rug} + \Delta I_{C_{Rug}} + \Delta A_R + \Delta D \quad (2)$$

Onde: R_{Rug} (parâmetro de rugosidade medido), L_{Rug} (média dos valores indicados pelo rugosímetro), ΔR_{Rug} (correção associada à resolução do rugosímetro), $\Delta I_{C_{Rug}}$ (correção associada à incerteza da calibração do rugosímetro), ΔA_R (correção associada ao raio da ponta do apalpador) e ΔD (correção associada à deformação do material durante a medição).

Tabela 1. Matriz de planejamento para o experimento fatorial completo 2x2x2x3.

Fator 1 (Rotação)	Fator 2 (Velocidade de Avanço)	Fator 3 (Granulometria da Ferramenta)	Fator 4 (Número de golpes)
-1	-1	-1	-1
+1	-1	-1	-1
-1	+1	-1	-1
+1	+1	-1	-1
-1	-1	-1	0
+1	-1	-1	0
-1	+1	-1	0
+1	+1	-1	0
-1	-1	-1	+1
+1	-1	-1	+1
-1	+1	-1	+1
+1	+1	-1	+1
-1	-1	+1	-1
+1	-1	+1	-1
-1	+1	+1	-1
+1	+1	+1	-1
-1	-1	+1	0
+1	-1	+1	0
-1	+1	+1	0
+1	+1	+1	0
-1	-1	+1	+1
+1	-1	+1	+1
-1	+1	+1	+1
+1	+1	+1	+1

3. CONCLUSÕES

O brunimento flexível é uma operação de acabamento pouco investigada entre os pesquisadores atuantes na área de fabricação, e portanto não foram encontrados muitos trabalhos na literatura que abordem este processo. Assim, a avaliação dos impactos de variáveis de processo, tais como: rotação, velocidade de avanço, número de golpes e granulometria da ferramenta, na rugosidade superficial e no desvio de circularidade, seria uma grande contribuição científica para a área de fabricação.

Se espera com este trabalho melhorar expressivamente o acabamento superficial dos cilindros de blocos de compressores herméticos o qual influi diretamente na vida útil e na eficiência do compressor. Este processo não requer máquinas especiais para a sua realização, ao contrário de outros tipos de brunimento de acabamento, como o brunimento por laser e brunimento por jato d'água, que requerem máquinas dedicadas, tornando o processo oneroso.

Outros tipos de brunimento podem ser utilizados para esta finalidade, como por exemplo, o brunimento platô, no qual se tem uma redução da altura dos picos e a permanência dos vales no perfil de rugosidade do cilindro. Mas quando se comparam os custos envolvidos nesses dois tipos de brunimento, o brunimento flexível se destaca por possuir custo significativamente menor.

4. REFERÊNCIAS

- Andretta, C., 2001, "Brunimento para Recuperação das Camisas de Pistão dos Motores de Combustão Interna", Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 76 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR ISO 4288, 2008, "Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade", 10 p.
- Barton, K. e Haasis, G., 1993, "Characteristics of Honing in: Understanding the Basics of Honing", Technical publication of SME - Society of Manufacturing Engineers, 37p.
- BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, JCGM 100, 2008, "Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement - Propagation of distributions using a Monte Carlo method", 90p.
- Corral, I. B., Calvet, J. V., Salcedo, M. C., 2010, "Use of roughness probability parameters to quantify the material removed in plateau-honing", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 50, Barcelona, Espanha, pp. 621-629. 27.

- INMETRO, 2008, “A estimativa da incerteza de medição pelos métodos do ISO GUM 95 e de simulação de Monte Carlo”, INMETRO-DIMCI-DIMEC-LAPRE INMETRO, Nota técnica, 34p.
- Junior, R. F. M., 2009, “Análise Topográfica da Superfície de Cilindro de Motores a Combustão Interna”, Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 65 p.
- Machado, G. A. A., 2008, “Brunimento a Platô Aplicado a Cilindros de Motores: Avaliação da Evolução da Topografia da Superfície após Ciclos de Funcionamento em Banco de Provas”, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas, Belo Horizonte, Brasil, 148 p.
- Miller M., 1993, “Flexible Honing: A Study of Cylinder Wall Micro-structure”, Technical publication of SME - Society of Manufacturing Engineers, 9 p.
- Pawlus, P., Cieslak T., Mathia T., 2009, “The Study of Cylinder Liner Plateau Honing Process”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 6078-6086.
- Rejowski, E. D., 2012, “Caracterização e Desempenho de um Filme de Carbono Amorfo Hidrogenado Tipo Diamante (a-C:H) Dopado com Silício, Aplicado em Camisa de Cilindro de Motor à Combustão Interna”, Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, Brasil, 166 p.
- ROMI, Centros de Usinagem Verticais, Disponível em: <http://romi.com.br/fileadmin/Editores/MF/Catalogos/Portugues/cat_discovery_po_ai.pdf> Acesso em: 13 out. 2015.
- Rosa, V. A. O., 2014, “Avaliação do Desempenho Metrológico dos Métodos de Ajuste Utilizados nos Programas Computacionais Dedicados às MM3Cs”, Proposta de Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 21 p.
- Vertec, “Manual Flex-Hone”, Disponível em: <www.vertec.com.br/Produtos/flex_hone.pdf> Acesso em: 13 out. 2015.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, e às instituições CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo suporte financeiro.

6. ABSTRACT

This work has as objective evaluate the effect of some of the main flexible honing the operating parameters of the geometrical quality of the cylinder crankcase of hermetic compressors. For such a full factorial design experiments is proposed in order to investigate the effect of the following cutting parameters: speed, feed rate, number of passes (strokes) and particle size of the tool; and the variables are: the variables: roughness and roundness deviation. The surface roughness is evaluated by the numerical values of parameters (R_a , R_q , R_p , R_t , k , R_{pk} , R_{vk} , R_{sk} , R_{ku} , Vor and R_p/R_t) and Abbott-Firestone curves. The roughness measurement process is performed using an electromechanical roughness tester machine, while a machine to measure deviations in shape (MMDF) is used to measure circularity deviations. Since the measurement uncertainty is estimated using the methodology proposed in JCGM 100, except for cases where the application of the uncertainty propagation law does not provide adequate results, which will be applied in the Monte Carlo Method. This work is expected to improve significantly the surface finish of cylinder crankcase of hermetic compressors which directly influences the life and efficiency. This process does not require special machines for its operation, unlike other types of finishing honing, such as laser honing and water jet honing, which require dedicated machines, making costly process.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.