

AVALIAÇÃO DO PARÂMETRO DE RUGOSIDADE R_v DE CILINDROS DE BLOCOS DE COMPRESSORES HERMÉTICOS USINADOS PELO PROCESSO DE BRUNIMENTO FLEXÍVEL

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: O objetivo deste trabalho é avaliar por meio de um planejamento fatorial completo o efeito das condições de usinagem (rotação, velocidade de avanço e números de golpes da ferramenta) empregados durante o processo de brunimento flexível na rugosidade R_v do cilindro de blocos de compressores herméticos. O brunimento convencional foi realizado pela EMBRACO, enquanto que o brunimento flexível foi realizado na Universidade Federal de Uberlândia utilizando um centro de usinagem CNC e um brunidor flexível que é composto por uma haste metálica e cerdas de nylon com lóbulos abrasivos nas pontas. A avaliação da rugosidade R_v foi efetuada por meio de um rugosímetro eletromecânico. Para o mensurando foi estimada a incerteza de medição, aplicando o método proposto no GUM. Os resultados indicaram que o processo de brunimento flexível não altera a profundidade dos vales, independente dos parâmetros de corte utilizados.

Palavras-chave: brunimento convencional e flexível, compressor hermético, rugosidade, incerteza de medição.

1. INTRODUÇÃO

Em busca do desenvolvimento de seus produtos a indústria de refrigeração, particularmente o setor destinado à 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 que levam ao desgaste do componente, 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, propondo a utilização do processo de brunimento flexível utilizando-se a ferramenta *Flex-Hone*.

Segundo Miller (1993), o brunimento flexível é um método utilizado após o brunimento convencional que atua por intermédio de partículas abrasivas de maneira a não alterar as características geométricas, tais como, cilindridade, concentricidade, coaxialidade e dimensões da peça. De acordo com Barton e Haasis (1993), este método de brunimento está sendo cada vez mais utilizado como operação adicional, com o objetivo de arredondar os picos da superfície. 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.

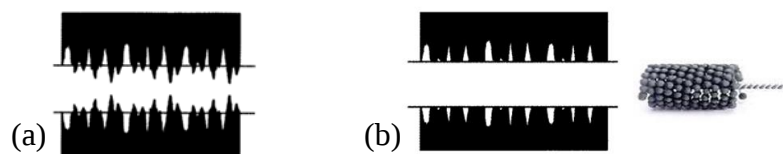


Figura 1: (a) Representação esquemática do perfil de uma superfície cilíndrica antes do processo de brunimento flexível e (b) após este processo com brunidor flexível (Vertec, 2016).

Neste contexto, surgiu a proposta do presente trabalho, que tem como objetivo principal avaliar a rugosidade R_v do cilindro de blocos de compressores herméticos submetidos ao processo de brunimento flexível utilizando-se um centro de usinagem CNC e a ferramenta *Flex-Hone* considerando diferentes valores dos parâmetros de corte (rotação, velocidade de avanço e números de golpes da ferramenta). Se apresenta, ainda, a avaliação da incerteza de medição através da aplicação da metodologia proposta no BIPM et al. (2008) e uma análise de variância ANOVA para o experimento fatorial completo, para testar a significância dos efeitos principais e de interação entre os mesmos utilizando o *software* Statistica.

2. METODOLOGIA

Foi utilizada uma amostra de 36 cilindros, inicialmente usinados pelo processo de brunimento convencional e em seguida usinados pelo processo de brunimento flexível. A avaliação da rugosidade foi efetuada após cada operação, utilizando um rugosímetro eletromecânico portátil Surtronic 3+, do fabricante Taylor Hobson, modelo 112/1590, com resolução de 0,01 μm , apalpador com ponta de diamante de raio de 2 μm e certificado de calibração n° 0001/2016. O comprimento de amostragem adotado foi de 0,8 mm, conforme recomenda a ABNT 4288 (2008) e utilizado filtro Gaussiano para retirada das ondulações do perfil. O rugosímetro e a peça foram posicionados e fixados sobre a mesa de medição da máquina de medir por coordenadas, Fig. (2), e a coleta dos dados foi realizada através do *software* Talyprofile Gold 4.0, fornecido pelo fabricante do respectivo rugosímetro.



Figura 2: Rugosímetro portátil Surtronic 3+ da Taylor Hobson posicionado na mesa de desempenho da máquina de medir por coordenadas.

Todas as medições foram conduzidas à temperatura ambiente controlada de $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$. Um termo-higrômetro digital com resolução de 0,1 $^\circ\text{C}$ e faixa nominal de $(-20,0 \text{ a } 60,0) ^\circ\text{C}$ foi 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.

Foi efetuado um ciclo de cinco medições e avaliada a incerteza de medição associada ao parâmetro R_v utilizando o método proposto no BIPM et al. (2008). O modelo matemático para o cálculo da incerteza da rugosidade R_v é mostrado na Eq. (1).

$$R_{Rug} = L_{Rug} + \Delta R_{Rug} + \Delta IC_{Rug} + \Delta A_R + \Delta D \quad (1)$$

Onde: R_{Rug} (parâmetro de rugosidade medido), L_{Rug} (média dos valores indicados pelo rugosímetro), ΔR_{Rug} (correção associada à resolução do rugosímetro), ΔIC_{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).

A usinagem foi efetuada segundo o planejamento fatorial completo $2 \times 2 \times 3$ (12 experimentos), no qual as variáveis independentes foram: rotação, velocidade de avanço e número de golpes da ferramenta, Tab. (1).

Tabela 1: Matriz de planejamento para o experimento fatorial completo $2 \times 2 \times 3$.

Experimento	Fator 1 Rotação (rpm)	Fator 2 Velocidade de avanço (mm/min)	Fator 3 Número de golpes
1	-1 (400)	-1 (1400)	-1 (1)
2	+1 (700)	-1 (1400)	-1 (1)
3	-1 (400)	+1 (2800)	-1 (1)
4	+1 (700)	+1 (2800)	-1 (1)
5	-1 (400)	-1 (1400)	0 (2)
6	+1 (700)	-1 (1400)	0 (2)
7	-1 (400)	+1 (2800)	0 (2)
8	+1 (700)	+1 (2800)	0 (2)
9	-1 (400)	-1 (1400)	+1 (3)
10	+1 (700)	-1 (1400)	+1 (3)
11	-1 (400)	+1 (2800)	+1 (3)
12	+1 (700)	+1 (2800)	+1 (3)

3. RESULTADOS

A Figura (3) mostra os valores médios de R_v dos cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

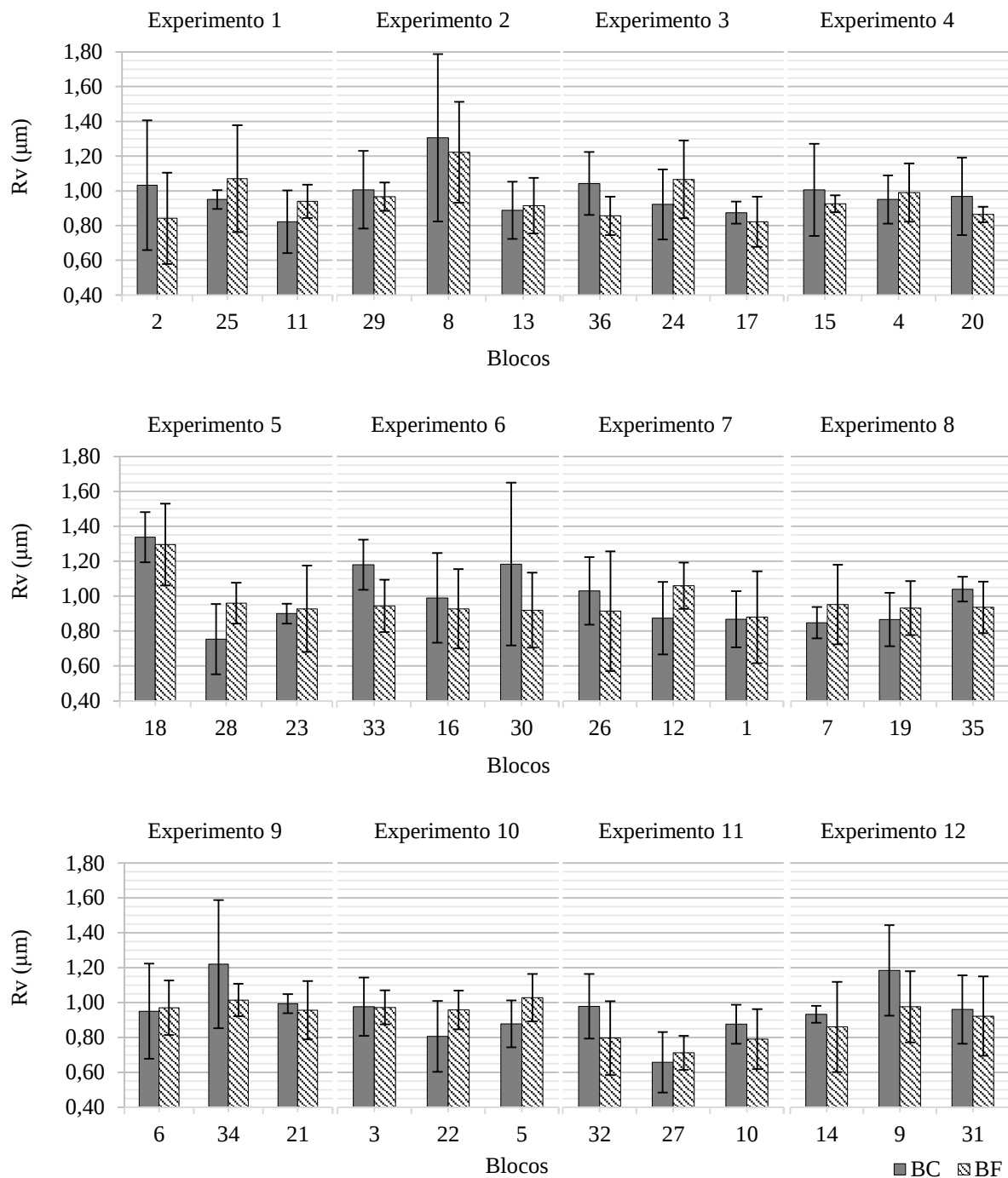


Figura 3: Valores médios do parâmetro R_v para os cilindros usinados pelo brunimento convencional e flexível nas 12 condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95%).

A Figura (3) mostra que os valores médios de R_v se encontram no intervalo de $0,66 \mu\text{m}$ até $1,34 \mu\text{m}$ para o brunimento convencional, enquanto que após o brunimento flexível assumem valores entre $0,71 \mu\text{m}$ e $1,30 \mu\text{m}$. Não foi observada nenhuma tendência definida após o brunimento flexível, pois este processo não altera o valor das ordenadas dos vales do perfil. As diferenças observadas são pouco significativas e podem ser atribuídas ao fato de que a medição é efetuada em locais diferentes e, também porque a linha média do perfil de rugosidade é levemente deslocada no sentido vertical. Os experimentos 1 e 6 foram os que proporcionaram a menor e a maior diferença percentual na rugosidade R_v entre os processos de brunimento convencional e flexível, sendo em média de 1,7% e 16,8%, respectivamente.

A incerteza expandida associada à medição do parâmetro R_v , Fig. (3), apresenta valores entre $0,05 \mu\text{m}$ e $0,49 \mu\text{m}$ após o brunimento convencional e entre $0,05 \mu\text{m}$ e $0,35 \mu\text{m}$ após o brunimento flexível. Não foi verificada nenhuma tendência definida para a incerteza após o brunimento flexível. Observa-se, ainda, que as faixas de valores associados à R_v após os dois processos, encontram-se parcialmente superpostos para todos os blocos.

Na Tabela (2) são apresentados os dados relativos ao cálculo da incerteza de medição (95%) do parâmetro de rugosidade R_v para o cilindro do bloco 16 (experimento 6) usinado pelo brunimento flexível. Nota-se que a variável que mais contribuiu para a incerteza final foi a incerteza associada à variabilidade das leituras e representa 97,8% da incerteza-padrão combinada, seguida da incerteza associada à calibração do rugosímetro com 1,2%. Para os demais blocos, após ambos os processos de brunimento, os resultados foram similares.

Tabela 2: Resultados da avaliação da incerteza do R_v para o cilindro 16 usinado pelo brunimento flexível. Em que: (TA) tipo de avaliação da incerteza; (DP) tipo de distribuição de probabilidades; (GL) grau de liberdade e (CS) coeficiente de sensibilidade.

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa (μm)	TA	DP	GL	CS	Incerteza padrão (μm)
$\bar{x}(L_{Ruq})$	1,14	A	<i>t-student</i>	4	1	0,08114
ΔR_{Ruq}	0,01	B	Retangular	∞	1	0,00289
$\Delta I C_{Ruq}$	0,02	B	Normal	10	1	0,00897
ΔA_R	0,02	B	Triangular	∞	1	0,00758
ΔD	0,005	B	Triangular	∞	1	0,00204
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm						0,08206
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})						4
Fator de abrangência (k)						2,78
Incerteza expandida (U) em μm						0,22784

A incerteza expandida para a rugosidade R_v do cilindro 16 usinado pelo brunimento flexível é declarada como sendo $0,23 \mu\text{m}$, baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência k igual a 2,78, e para uma distribuição *t-student* e probabilidade de abrangência de 95%.

Na Figura (4) são apresentados os valores médios de R_v para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

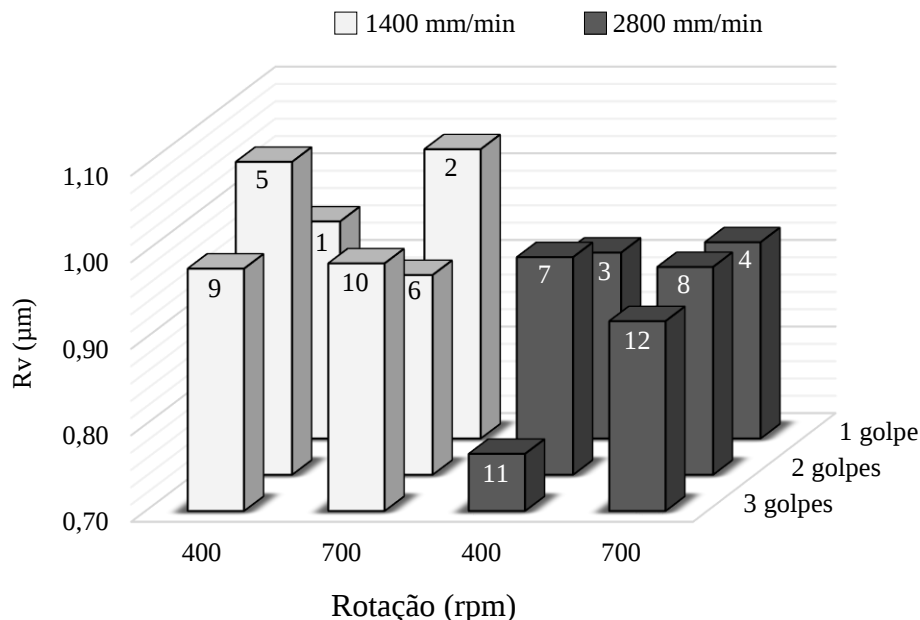


Figura 4: Valores médios do parâmetro R_v para os 12 experimentos realizados nos cilindros brunidos com o brunidor flexível.

De acordo com a Fig. (4), os cilindros do experimento 11 apresentaram os menores valores de R_v e os cilindros do experimento 2 os maiores valores. Entretanto, os cilindros destes dois experimentos apresentaram pequenas diferenças percentuais na rugosidade R_v entre os processos de brunimento convencional e flexível, o que conclui que o brunidor flexível praticamente não altera a profundidade dos vales do perfil de rugosidade.

O quadro da ANOVA para a variável resposta R_v é apresentado na Tab. (3). Para que os parâmetros de usinagem produzam efeitos significativos na rugosidade R_v , estes devem apresentar um valor de probabilidade de significância (p) menor que 0,05 (nível de significância de 5%). Na tabela tem-se que: NG é número de golpes da ferramenta, VA é a velocidade de avanço, ROT é a rotação, NG x VA é a interação entre o número de golpes e a velocidade de avanço, NG x ROT é a interação entre o número de golpes e a rotação, VA x ROT é a interação entre a velocidade de avanço e a rotação e F é a distribuição F de Fisher-Snedecor ou teste F.

Tabela 3: ANOVA do parâmetro R_v de rugosidade.

	Soma quadrática	Grau de liberdade	Média quadrática	F	p	Efeito
NG	0,011441	1	0,011441	1,051185	0,314011	-0,043667
VA	0,068819	1	0,068819	6,323166	0,017939	-0,087444
ROT	0,003173	1	0,003173	0,291581	0,593479	0,018778
NG x VA	0,007073	1	0,007073	0,649847	0,426961	-0,034333
NG x ROT	0,001536	1	0,001536	0,141130	0,709992	0,016000
VA x ROT	0,009539	1	0,009539	0,876436	0,357185	0,032556
Erro	0,304741	28	0,010884			

A variação dos parâmetros de usinagem utilizados no brunimento flexível não proporcionou nenhum efeito significativo na rugosidade R_v , com exceção da velocidade de avanço (VA), conforme verificado na Tab. (3). O aumento da velocidade de avanço da ferramenta proporcionou uma redução na rugosidade R_v . Isto é justificado pelo motivo do parâmetro R_v ser fortemente influenciado pela presença de vales isolados, obtendo maiores dispersões dos valores médios mesmo após o brunimento flexível.

A manutenção dos vales do perfil de rugosidade é essencial para os cilindros dos blocos de compressores herméticos, uma vez que estes servem de canais para a passagem do fluido que lubrifica o par cilindro-pistão.

4. CONCLUSÕES

Pode-se concluir que a variação dos parâmetros de usinagem (rotação, velocidade de avanço e número de golpes da ferramenta) no brunimento flexível dos cilindros dos blocos dos compressores não proporcionou efeitos significativos no parâmetro de rugosidade R_v . Isto indica que o brunidor flexível não altera a profundidade dos vales, independente dos parâmetros de corte utilizados. O aumento dos valores de R_v indica uma melhoria das propriedades da superfície para retenção de lubrificantes, enquanto a redução, o inverso. No entanto o brunidor flexível não altera a profundidade dos vales e mantém a retenção do fluido lubrificante. Os parâmetros R_{sk} , R_{ku} , R_k , R_{pk} e R_{vk} , além da curva de *Abbott-Firestone*, são os indicativos de maior significância para a caracterização das superfícies brunidas pelo processo convencional e flexível.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, às instituições CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo suporte financeiro e à EMBRACO S/A (Whirlpool - Unidade Compressores) pelo fornecimento do material, mas principalmente pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR ISO 4288. “Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade”. Rio de Janeiro, Brasil, 2008, 10 p.
- Barton, K. e Haasis, G. “Characteristics of Honing in: Understanding the Basics of Honing”. Technical publication of SME - Society of Manufacturing Engineers, 1993, 37 p.
- BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, JCGM 100. “Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement - Propagation of distributions using a Monte Carlo method”. 2008, 90 p.
- Miller, M. “Flexible Honing: A Study of Cylinder Wall Micro-structure”. Technical publication of SME - Society of Manufacturing Engineers, 1993, 9 p.
- Vertec. “Manual Flex-Hone”. 13 de Maio de 2016. <http://www.vertec.com.br/Produtos/flex_hone.pdf>.

7. DIREITOS AUTORAIS

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