

Brunimento Flexível de Cilindros de Blocos de Compressores Herméticos: Avaliação do Efeito da Granulometria e do Número de Golpes da Ferramenta no Parâmetro de Rugosidade R_p

Guilherme Henrique Caetano Barros *, Rosenda Valdés Arencibia, Luciano José Arantes.

*Laboratório de Ensino em Metrologia, guilhermearros2@gmail.com

Palavras-chave

brunimento flexível, flex-hone, brunimento convencional, rugosidade R_p

1. INTRODUÇÃO

Na crescente busca do desenvolvimento e evolução de seus produtos a indústria de refrigeração e climatização, em particular a de produção de compressores, tem investido constantemente em pesquisas para melhorar a funcionalidade, prolongar a vida útil de seus componentes e, principalmente, aumentar a eficiência energética. Neste contexto, o cilindro do bloco do compressor recíproco alternativo hermético, tem recebido uma atenção especial por parte dos fabricantes e pesquisadores. Este requer elevada exatidão dimensional e geométrica, a fim de evitar dificuldades na montagem, o aparecimento de esforços desgastantes, possíveis vazamentos, e a perda de eficiência do compressor (Rosa, 2012), e com isso diminuir gastos com possíveis retrabalhos ou refugos devidos a erros de fabricação.

O brunimento flexível (BF) é um processo de usinagem utilizado após o brunimento convencional (BC), que atua por intermédio de partículas elásticas e abrasivas de maneira a não alterar as características anteriores da geometria da peça, tais como, cilindridade, coaxialidade, concentricidade e dimensões (Miller, 1993). O brunimento flexível tem por finalidade eliminar os picos e imperfeições das superfícies dos cilindros dos compressores herméticos e melhorar expressivamente o acabamento superficial o qual influi diretamente na vida útil e na eficiência do compressor. A Figura 1 apresenta esquematicamente um perfil de uma superfície cilíndrica antes de realizar a operação de brunimento flexível e após a realização desta.

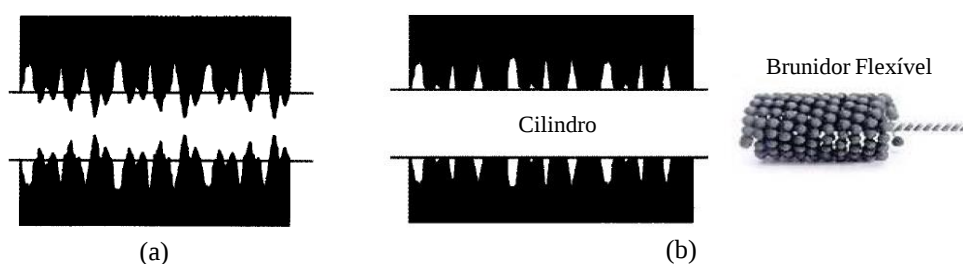


Figura 1 - (a) Representação esquemática do perfil de uma superfície cilíndrica antes do processo de brunimento flexível (b) e após este processo com brunidor flexível (Vertec, 2017)

No brunimento flexível do tipo esferas a ferramenta brunidora possui glóbulos abrasivos com forma esferoidal ligados às pontas de filamentos de nylon flexível. Cada esfera abrasiva é composta de múltiplas camadas, que se degradam a uma taxa prevista e controlada de exposição contínua das arestas cortantes (Miller, 1993).

O tamanho de grão do abrasivo é um fator decisivo na taxa de remoção de material, bem como na qualidade da superfície da peça (Flores, 1998). A dimensão e uniformidade dos grãos são características importantes nos processos de usinagem com abrasivos. O tamanho dos grãos em *mesh* representa o número de fios por polegada linear da peneira do processo de seleção.

2. METODOLOGIA

Neste contexto, objetivando investigar o efeito das variáveis granulometria e número de golpes da ferramenta nos valores do parâmetro de rugosidade R_p de blocos de compressores herméticos brunidos pelo brunimento flexível aplicado após o brunimento convencional (BF + BC) um planejamento fatorial completo $2^1 \times 3^1$ foi proposto, onde a granulometria da ferramenta foi investigada em dois níveis: 400 *mesh* e 800 *mesh*, e o número de golpes em três níveis: 1, 3 e 5 golpes. A Tabela 1 mostra a matriz experimental e os blocos avaliados em cada experimento.

De acordo com a matriz de planejamento foram executados 6 (seis) testes. Para cada teste foram efetuadas cinco réplicas. Sendo necessário avaliar 30 blocos de compressores herméticos, que foram numerados de forma aleatória de 1 a 30. De acordo com Pereira (2016), cada golpe da ferramenta no cilindro consistiu em quatro movimentos, sendo dois no sentido horário (um de avanço e um de recuo) e dois no anti-horário (um de avanço e um de recuo). Os blocos foram inicialmente usinados pelo brunimento convencional com a ferramenta precisor pela empresa EMBRACO, procedimento realizado em sua linha de produção. O BF dos cilindros foi realizado em uma máquina fresadora CNC, utilizando a ferramenta brunidora flexível.

Tabela 1 - Matriz de planejamento para o experimento fatorial completo $2^1 \times 3^1$

Experimento	Fator 1 Granulometria (mesh)	Fator 2 Número de golpes	Blocos
1	-1 (400)	-1 (1)	30, 29, 28, 27, 26
2	+1 (800)	-1 (1)	05, 04, 03, 02, 01
3	-1 (400)	-0 (3)	25, 24, 23, 22, 21
4	+1 (800)	-0 (3)	10, 09, 08, 07, 06
5	-1 (400)	+1 (5)	20, 19, 18, 17, 16
6	+1 (800)	+1 (5)	15, 14, 13, 12, 11

Para a avaliação da rugosidade foi utilizado um rugosímetro portátil Surtronic 3+, do fabricante Taylor Hobson, modelo 112/1590, com ponta de diamante com raio de $2 \mu\text{m}$, com resolução de $0,01 \mu\text{m}$. O certificado de calibração do rugosímetro declara uma incerteza expandida associada à calibração do rugosímetro de $0,02 \mu\text{m}$ para k igual a 2,23 e probabilidade de abrangência de 95 %. Cinco ciclos de medição foram efetuados. O comprimento de amostragem foi definido como $0,8 \text{ mm}$ de acordo a NBR ISO 4288 (ABNT, 2008). Cinco comprimentos de amostragem foram considerados. O filtro de Gauss foi aplicado no perfil bruto para retirada das ondulações.

Os blocos e o rugosímetro foram posicionados na mesa de medição da máquina de medir por coordenadas de forma a minimizar o efeito das vibrações transmitidas pelo solo. As medições foram conduzidas a temperatura ambiente de $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Para o monitoramento da mesma foi utilizado um termo-higrômetro digital, com resolução de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ e faixa nominal de $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Este equipamento possui incerteza associada à calibração de $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ para k igual a 2,00 e probabilidade de abrangência de 95,45 %.

A incerteza de medição foi avaliada por meio da aplicação do método proposto no BIPM et al. (2008). O tratamento dos dados foi efetuado utilizando-se a técnica estatística de Análise de Variância (ANOVA), por meio do *software* Statistica 7.0.

3. RESULTADOS

A Fig. 2a mostra os valores médios do parâmetro R_p para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %). Por sua vez a Fig. 2b mostra a diferença entre os valores médios de R_p obtidos antes e após o brunimento flexível para cada experimento. Observa-se na Fig. 2a que os valores de R_p são significativamente menores após o BC + BF em todas as condições investigadas, bem como os valores de incerteza expandida associados. Os valores de incerteza expandida associados ao R_p diminuíram de forma significativa com a aplicação do BC+BF, indicando uma maior repetibilidade. Isto pode ser justificado pelo fato de que com o processo do brunimento flexível os valores das ordenadas dos picos do perfil ficaram mais homogêneos em decorrência da eliminação de picos isolados e da redução da altura dos picos.

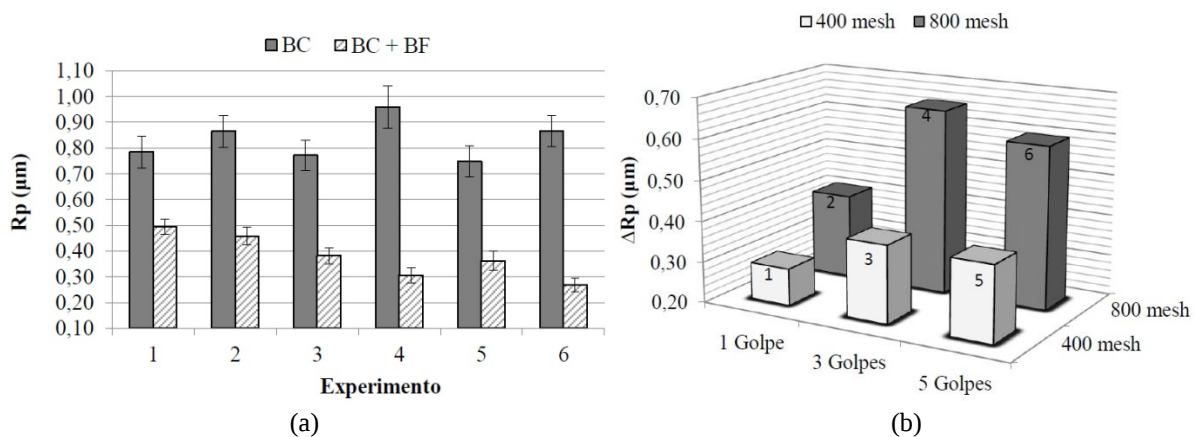


Figura 2 - (a) Valores médios do parâmetro R_p para os cilindros usinados pelo BC e BC+BF nas seis condições de corte investigadas, com barra de erros associada à incerteza expandida (95 %) e (b) Diferença entre os valores médios de R_p obtidos antes e após o brunimento flexível para cada experimento

A diferença entre os valores médios de R_p obtidos antes e após a aplicação do BF para cada experimento é apresentada na Fig. 2b. O Experimento 1 foi o que resultou na menor diferença percentual, sendo em média de 37,0 % (0,290 μm). Para este parâmetro foi observado que o Experimento 6 mostrou a maior evolução dos valores médios de R_p , com as condições de usinagem de granulometria da ferramenta de 800 *mesh* e 5 golpes da ferramenta brunidora flexível, em média de 68,9 % (0,597 μm). O Experimento 4 mostrou uma evolução significativa, com as condições de usinagem de granulometria da ferramenta de 800 *mesh* e 3 golpes da ferramenta brunidora flexível, sua diferença percentual entre os valores médios de R_p entre os dois processos foi de 68,1 % (0,653 μm).

A Tabela 2 mostra o resultado da ANOVA para as diferenças encontradas entre os valores do parâmetro R_p obtidos antes e após o BF. Nesta tabela pode ser observado que o fator granulometria da ferramenta (GR) e a interação entre os dois fatores (GR x NG) produziram efeitos estatisticamente significativos na variável resposta R_p para uma confiabilidade estatística de 95 %. Dentre eles, o fator de maior contribuição foi a granulometria da ferramenta (GR). A diminuição das dimensões dos grãos abrasivos da ferramenta brunidora flexível reduziu o parâmetro de rugosidade R_p , conforme observado na Fig. 2b. Isto pode ser justificado devido a que menores partículas abrasivas tendem a deixar menores marcas e produzem um acabamento superficial melhor, e consequentemente menores alturas.

Tabela 2 - ANOVA da diferença do parâmetro R_p de rugosidade dos cilindros antes e após brunimento flexível

R_p	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F	p
Granulometria (GR)	0,311223	1	0,311223	19,9587	0,000161
Nº de golpes (NG)	0,040459	2	0,020229	1,2973	0,291748
GR x NG	0,127508	2	0,063754	4,0885	0,029647
Erro	0,374240	24	0,015593		

Para os cilindros de compressores herméticos é desejável que o parâmetro R_p seja o menor possível, uma vez que os picos isolados presentes na superfície podem ser desgastados ou quebrados no início do funcionamento do compressor. As partículas desgastadas são misturadas com o fluido lubrificante, tornando-o abrasivo, o que pode diminuir a vida útil do compressor. Esses picos podem levar à existência de contato metal-metal no par tribológico cilindro-pistão, gerando aquecimento e pior desempenho. Ainda, a redução dos picos atribui ao compressor uma condição de amaciamento aumentando sua eficiência.

4. CONCLUSÕES

O fator granulometria da ferramenta e a interação entre este e o fator número de golpes da ferramenta provocaram efeitos estatisticamente significativos nos valores de R_p . Os menores valores de R_p foram observados na condição de usinagem com granulometria da ferramenta de 800 *mesh* e 5 golpes da ferramenta. A aplicação destas condições de corte possibilitou a obtenção de perfis muito similares aos obtidos por meio do brunimento platô o que pode aumentar o campo de aplicação do BC + BF.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia e à EMBRACO pelo fornecimento dos blocos.

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, 10p.
- BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, JCGM 101 – “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. 90p.
- Flores, G. Diamond and CBN honing technology. Society of Manufacturing Engineers. 1998, 9p.
- Miller, M. L. “Flexible Honing. A study of cylinder wall microstructure. Proceedings Understanding. The Basics of Honing, SME - Society of Mechanical Engineers”, 1993. 9p.
- Pereira, L. C. “Influência das Condições de Usinagem do Brunimento Flexível na Qualidade Geométrica de Cilindros de Blocos de Compressores Herméticos”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- Rosa, V. A. O. “Investigação da Operação de Alargamento dos Furos Usinados em Pistões de Ferro-Carbono Sinterizado”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- Vertec. “Manual Flex-Hone”, 02 de maio de 2017 < www.vertec.com.br/produtos/flex_hone.pdf >

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.