

BRUNIMENTO COM FERRAMENTAS TIPO BUCHA DIAMANTADA EM FERRO FUNDIDO - ANÁLISE DAS INFLUÊNCIAS DOS FATORES DE ENTRADA NA QUALIDADE DOS FUROS OBTIDOS

Marco Antonio Schmidt

Lourival Boehs

Universidade Federal de Santa Catarina
Campus Universitário - Trindade - Caixa postal 476
Florianópolis - Santa Catarina
88040-900

***Resumo.** O brunimento com ferramentas diamantadas é um processo de fabricação utilizado para acabamento de furos cilíndricos que podem ser obtidos com tolerâncias de forma e dimensional da ordem de 1 μm . Essas ferramentas de brunir tem uma longa vida útil e podem ser utilizadas em máquinas de custo e precisão não muito elevados. Neste trabalho foi investigado o brunimento de furos de carcaças de válvulas hidráulicas empregando técnicas de análise fatorial para a velocidade, avanço, curso, sobremetal e cilindricidade. Foram medidos os efeitos destes parâmetros de entrada no diâmetro, cilindricidade e rugosidade dos furos obtidos. O erro de cilindricidade diminui com o emprego de velocidades de corte e cursos da ferramenta menores, bem como quando são usinados furos com baixos valores de cilindricidade inicial. A rugosidade da superfície da peça melhora com o aumento da velocidade de corte enquanto que grandes quantidades de sobremetal levam obtenção de diâmetros mais fechados.*

***Palavras chave** – brunimento, processo abrasivo, usinagem com ferramentas diamantadas.*

1. INTRODUÇÃO

O brunimento com ferramentas diamantadas é capaz de realizar, com precisão, furos passantes pré-usinados. O processo encontra aplicação particularmente na produção de componentes hidráulicos, os quais freqüentemente exigem furos cilíndricos elevada precisão. Apesar de seu potencial para produção de furos com tolerâncias de cilindricidade e dimensional da ordem de 1 μm , sua aplicação prática é principalmente baseada na experiência industrial. Este trabalho procura contribuir para o entendimento deste processo, quantificando os efeitos das principais variáveis de entrada na geometria do furo.

O objetivo deste trabalho é determinar os efeitos de cinco variáveis do processo, e suas interações, no diâmetro, acabamento e erro de cilindricidade final das peças. As variáveis escolhidas foram: sobremetal (variável A); cilindricidade (variável B); velocidade de corte (variável C); avanço (variável D) e curso da ferramenta (variável E).

2. CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO

Segundo König (1980), o resultado obtido pelo processo de brunimento é determinado por dois grupos de grandeza de entrada que são o sistema e os parâmetros de usinagem.

O sistema de usinagem contém as grandezas do processo que são determinadas pela máquina, peça, ferramenta e fluido de corte.

As variáveis de entrada, parâmetros de usinagem, envolvem os itens compreendidos pela cinemática e pela mecânica do processo. A cinemática resulta da sobreposição de dois movimentos que o movimento axial (velocidade axial e comprimento do curso) e movimento de corte (velocidade de corte).

Também influenciam o processo a pressão de contato entre a ferramenta e a peça e a pressão e vazão do fluido de corte.

No brunimento a remoção de material se processa através da ação de grãos abrasivos, unidos entre si por um ligante (Peres, 1994). Os principais materiais abrasivos utilizados são: carboneto de silício, óxido de alumínio, nitreto de boro cúbico (CBN) e diamante. Como ligantes são empregados: resinas sintéticas, ligantes metálicos e ligantes cerâmicos.

No processo de brunimento convencional, de acordo com Marvin (1994), três mecanismos atuam simultaneamente na ferramenta durante cada ciclo: rotação, expansão e oscilação axial do fuso. Dessa forma, a peça é usinada através de diversas passagens da ferramenta pelo furo ao mesmo tempo em que é rotacionada e expandida por um dispositivo hidráulico até atingir a medida final.

Ainda segundo Marvin (1994), no brunimento de passe único a ferramenta passa pelo furo apenas uma única vez, com seu diâmetro previamente ajustado. A característica desse tipo de ferramenta não possuir partes móveis durante a usinagem, o que confere alta rigidez, aliada ao emprego de superabrasivos, diamante e CBN, permite que o processo de passe único mantenha um bom controle da precisão do furo. A Fig. 1 ilustra os movimentos realizados no brunimento convencional e de passe único.

A quantidade de material que pode ser removida pelo brunidor é pequena, como mostra a Tab. 1, e depende do tamanho de grão empregado, do material usinado, do formato e do comprimento da peça. Da mesma forma, o acabamento da superfície do furo também depende destes fatores. Quando uma quantidade maior de material tem que ser removida vários passes são necessários. Estes podem ser efetuados através da expansão gradual do brunidor, após cada passe ou através de uma série de brunidores com diâmetros previamente ajustados.

Miller (1996) afirma que em máquinas de brunir automáticas a ferramenta é montada no fuso da máquina e a peça é fixada na mesa de trabalho sendo quase impossível alinhar os eixos da ferramenta e do furo da peça para a precisão imposta pela quantidade de material a ser removido. É essencial permitir que a ferramenta flutue em relação à peça. Isto pode ser conseguido através de ferramentas rígidas e dispositivos de fixação da peça flutuantes ou ferramentas articuladas e fixações rígidas.

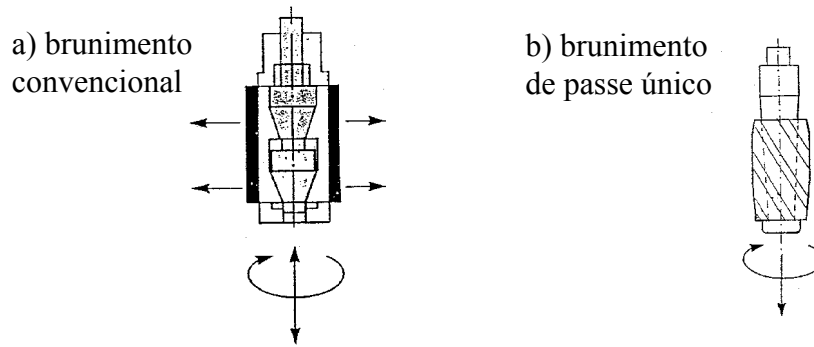


Figura 1 - a) movimentos realizados pela ferramenta no brunimento convencional; b) movimentos realizados pela ferramenta no brunimento de passe único

Tabela 1 - Remoção e acabamento resultantes do brunimento de passe único de acordo com o tamanho do grão e do material da peça (Marvin , 1997).

| Material | | Tamanho do grão (μm) | | | | |
|----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----|-----|------|------|
| | | 150 | 100 | 64 | 50 | 46 |
| Ferro fundido Sinterizados | Remoção (μm) | 101 | 76 | 51 | 25 | 12 |
| | Ra (μm) | 3 | 1,5 | 0,8 | 0,4 | 0,25 |
| Aço doce | Remoção (μm) | 38 | 30 | 18 | 12 | 5 |
| | Ra (μm) | 3 | 1,5 | 0,8 | 0,4 | 0,3 |
| Aço endurecido | Remoção (μm) | 25 | 20 | 12 | 5 | 5 |
| | Ra (μm) | 1,2 | 0,6 | 0,3 | 0,15 | 0,1 |
| Alumínio | Remoção (μm) | 76 | 51 | 38 | 12 | 8 |
| | Ra (μm) | 1,5 | 0,8 | 0,4 | 0,2 | 0,15 |
| Cerâmica | Remoção (μm) | 127 | 101 | 63 | 25 | 12 |
| | Ra (μm) | 3 | 1,5 | 0,8 | 0,4 | 0,3 |

3. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E PREPARAÇÃO DOS BRUNIDORES DE PASSE ÚNICO

A ferramenta utilizada neste trabalho, Fig. 2, consiste de uma haste cônica na qual é encaixada uma bucha abrasiva com um furo cônico. A haste cônica possui uma camada de abrasivo (carboneto de silício) na região em que a bucha é encaixada para que a fricção entre o abrasivo e a bucha não permita o escorregamento da bucha em relação à haste durante o brunimento.

O diâmetro do brunidor é ajustado através do deslizamento axial da bucha ao longo da haste cônica. A faixa de ajuste do brunidor é geralmente em torno de 50-60 μm o qual não deve ser excedido sob risco de deformação permanente da bucha. Nos brunidores utilizados neste trabalho, o movimento axial de deslizamento da bucha em relação à haste é conseguido através de uma porca localizada na extremidade da haste. As buchas geralmente possuem a forma de

barril, sendo a entrada e a saída cônicos. A entrada cônica permite que a ferramenta seja inicialmente guiada pelo furo da peça.

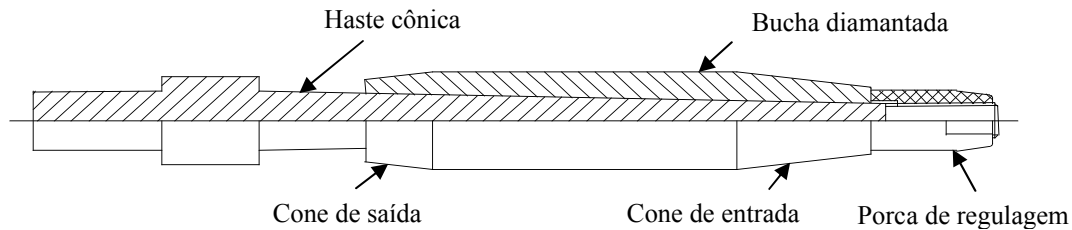


Figura 2- Características construtivas das ferramentas de brunir utilizadas

A superfície externa da bucha possui uma camada de abrasivo que utiliza metal como ligante. Esta camada é formada pela eletro-deposição de níquel de um banho contendo as partículas superabrasivas.

Os superabrasivos utilizados são o diamante natural e o nitreto de boro cúbico (CBN). O diamante é indicado para materiais de peças de ferro fundido e não ferrosas enquanto que o CBN é adequado para peças de aço. A camada de abrasivo da bucha deve ser submetida a uma preparação chamada de dressamento. Esta operação é necessária para que seja eliminada a camada de grãos soltos ou fracamente presos ao ligante, para a uniformização da superfície da bucha e para que a excessiva agressividade dos grãos de diamante venha a retirar mais material do que o desejado do furo da peça.

A Fig. 3 mostra uma imagem obtida através de um microscópio eletrônico de varredura da superfície da bucha diamantada utilizada neste trabalho onde pode-se observar os grãos de diamante aderidos ao ligante e o desgaste do abrasivo promovido pela operação de dressamento.

4. PROJETO DO EXPERIMENTO

Foi utilizada a análise fatorial de meia fração com cinco variáveis, cada uma com dois níveis (alto e baixo). O bloco contém $\frac{1}{2} \times 2^5 = 16$ experimentos.

A ordem na qual os experimentos foram realizados foi aleatorizada para minimizar os efeitos das variáveis não controláveis.

Montgomery (1991) afirma que a análise fatorial de meia fração é um experimento no qual os efeitos principais são confundidos somente com interações de quatro fatores. Interações de dois fatores são confundidas somente com interações de três fatores. Assume-se que interações de três fatores ou mais podem ser desprezadas. Os efeitos principais e interações de dois fatores foram testados quanto à sua significância através da análise de variância. A construção de um experimento fatorial completo pode ser encontrada na referência Montgomery (1991).

Os níveis para cada efeito foram escolhidos de acordo com a Tab. 2.

5. EQUIPAMENTO E TÉCNICA EXPERIMENTAL

As amostras utilizadas foram carcaças de válvulas hidráulicas fabricadas de ferro fundido cinzento DIN GG30, colhidas da linha de produção de uma empresa fabricante de componentes hidráulicos.

As ferramentas utilizadas possuem 306 mm de comprimento total de haste, com a região cônica ocupando 152 mm, enquanto que a bucha diamantada possui 127 mm de comprimento. A

regulagem do diâmetro através da porca permite que a cada $\frac{1}{4}$ de volta deste, o diâmetro da ferramenta seja alterado em 1 μm . A primeira ferramenta, utilizada para a análise de variância do experimento, é coberta com uma camada de diamante de granulometria D150 e teve seu diâmetro ajustado em 11,980 mm.

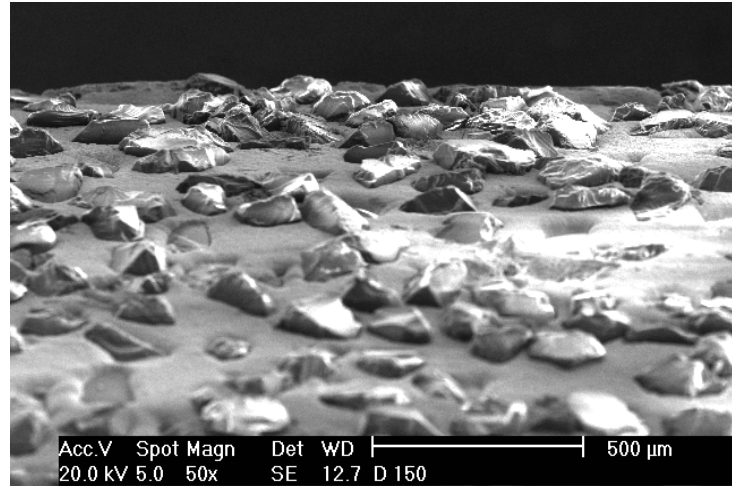


Figura 3 – Superfície da bucha diamantada (50x).

Foram colhidas 40 amostras e medidos o diâmetro, a circularidade, a cilindridade e a rugosidade de cada uma em quatro pontos. O furo a ser brunido dessa peça é pré-usinado com diâmetro em torno de 11,95 mm, através do processo de alargamento. Das amostras foram escolhidas as 16 peças que condiziam com o sobremetal, cilindridade e suas interações descritos na Tab. 3, que mostra também o planejamento final do experimento.

Tabela 2 – Valores definidos para os níveis do experimento fatorial

| Variável | A | B | C | D | E |
|----------|------------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------|------------|
| Nível | Sobremetal (μm) | Cilindridade (μm) | Velocidade (m/min) | Avanço (m/min) | Curso (mm) |
| + | > 30 | > 8 | 26 | 1,8 | 85 |
| - | \leq 30 | \leq 8 | 16 | 1,0 | 75 |

As buchas diamantadas foram dressadas montando o brunidor em uma brunidora manual, horizontal, e através da fricção de segmentos de rebolos de óxido de alumínio no comprimento da bucha eliminou-se a camada de grão de diamante soltos ou fracamente aderidos ao metal ligante. A seguir o brunidor foi passado manualmente pelo furo de uma peça, medindo-se o diâmetro resultante na peça. A cada passada da ferramenta pela peça era ajustado o diâmetro da ferramenta, através da porca de ajuste, até que a medida 11.980 mm fosse alcançada.

As amostras foram presas em dispositivos de fixação especiais para este tipo de peça montados rigidamente sobre a mesa de trabalho da máquina. A ferramenta foi montada em um dispositivo articulado que permitia o deslocamento radial e angular da ferramenta, corrigindo desta forma o erro de alinhamento entre a ferramenta e o furo da peça.

Como fluido de corte foi utilizado o óleo Ratak HF15R o qual é armazenado em um tanque provido de filtro magnético e de papel filtro, para remoção de cavacos.

Os diâmetros dos furos foram medidos por uma máquina de medir tridimensional Zeiss MCC250. Foram realizadas duas medidas ortogonais em quatro planos distantes em 10 mm. O diâmetro foi obtido pela média destas medidas.

Tabela 3 – Planejamento do experimento

| Tratam. | Peças | Variáveis | | | | | | | | | | |
|---------|-------|-----------|---|--------|---------|---------|--------|-------|-----|---|----|---|
| | | A | | | B | C | D | E | | | | |
| | | Sob. | | Ø | Cilind. | Rotação | Avanço | Curso | | | | |
| e | 8 | 27 | - | 11,953 | 6,26 | - | 425 | - | 1 | - | 85 | + |
| a | 17 | 33 | + | 11,947 | 5,68 | - | 425 | - | 1 | - | 75 | - |
| b | 22 | 29 | - | 11,951 | 8,13 | + | 425 | - | 1 | - | 75 | - |
| abe | 19 | 32 | + | 11,948 | 8,96 | + | 425 | - | 1 | - | 85 | + |
| c | 15 | 28 | - | 11,952 | 6,45 | - | 690 | + | 1 | - | 75 | - |
| ace | 28 | 33 | + | 11,947 | 6,94 | - | 690 | + | 1 | - | 85 | + |
| bce | 29 | 19 | - | 11,961 | 8,39 | + | 690 | + | 1 | - | 85 | + |
| abc | 9 | 33 | + | 11,947 | 9,46 | + | 690 | + | 1 | - | 75 | - |
| d | 12 | 28 | - | 11,952 | 5,04 | - | 425 | - | 1,8 | + | 75 | - |
| ade | 27 | 34 | + | 11,946 | 6,90 | - | 425 | - | 1,8 | + | 85 | + |
| bde | 20 | 27 | - | 11,953 | 9,00 | + | 425 | - | 1,8 | + | 85 | + |
| abd | 33 | 36 | + | 11,944 | 8,32 | + | 425 | - | 1,8 | + | 75 | - |
| cde | 10 | 29 | - | 11,951 | 6,26 | - | 690 | + | 1,8 | + | 85 | + |
| acd | 3 | 33 | + | 11,947 | 7,71 | - | 690 | + | 1,8 | + | 75 | - |
| bcd | 4 | 27 | - | 11,953 | 10,72 | + | 690 | + | 1,8 | + | 75 | - |
| abcde | 7 | 33 | + | 11,947 | 8,55 | + | 690 | + | 1,8 | + | 85 | + |

Os erros de forma foram medidos em um medidor de erro de forma Mahr MMQ-3. A circularidade foi medida nos mesmos pontos onde foram medidos os diâmetros e a média destas quatro medições foi considerada como sendo o erro de circularidade. O erro de cilindridade também foi obtido através destes quatro pontos. Para atenuar o efeito da rugosidade na medição de circularidade foi utilizado o filtro eletrônico da máquina e as peças em que se podia observar a influência da rugosidade foram descartadas.

O acabamento superficial das amostras foi medido em um rugosímetro modelo S8P da Mahr. As medidas do parâmetro R_a foram tomadas em quatro pontos distintos ao longo da peça e a média destas foi considerada a rugosidade da peça.

O procedimento de realização do experimento foi o mesmo para todos os tratamentos. A ferramenta, pré-ajustada para o diâmetro de 11.980 mm, foi fixada no dispositivo articulado. Cada amostra, gravada com um número, foi colocada no dispositivo de fixação e a mesa da máquina foi girada até a posição imediatamente anterior à que se encontrava a ferramenta. Os parâmetros de corte, velocidade e avanço, eram ajustados, bem como o curso da máquina. Ligava-se o fluxo de óleo de corte e o ciclo automático da máquina. No final do curso a máquina invertia automaticamente a direção de avanço até a posição inicial.

6. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados do experimento estão apresentados na Tab. 4. A discussão sobre as variáveis que influenciam nas características do furo obtido, erro de cilindridade, diâmetro e rugosidade, será feita nos itens a seguir.

6.1 Efeitos das variáveis do processo na cilindricidade do furo

A análise de variância dos resultados relativos à cilindricidade dos furos obtidos, Tab. 5, mostra que o fator de maior influência é a cilindricidade inicial (B) e a interação entre rotação-curso (CE), com um nível de significância de 1%. As interações cilindricidade-rotação (BC) e cilindricidade-curso (BE) também são significativas com um nível de 5%.

Pode-se observar dos dados obtidos que quanto maior o valor do erro de cilindricidade inicial, maior é o erro da cilindricidade do furo obtido. Ainda, quanto maior a rotação da ferramenta maior o erro de cilindricidade do furo obtido. O erro de cilindricidade também é maior quando são utilizados os níveis altos do curso da ferramenta.

Segundo König (1980), existe uma influência considerável do efeito do erro de forma da peça bruta sobre o resultado de trabalho e Peres (1994) descreve que peças com menores desvios de forma levam à baixa cilindricidade final, do mesmo modo que desvios de forma elevados ocasionam erros de cilindricidade maiores.

Nota-se da tabela 4 que os valores dos erros de cilindricidade diminuem em todos os tratamentos, porém esta redução parece estar limitada a um valor em torno de 4 μm . Pode-se afirmar que quando os erros de cilindricidade são maiores, a passagem da ferramenta apenas uma vez pelo furo não é suficiente para corrigir o erro a níveis comparáveis daqueles obtidos com erros iniciais menores.

A variável rotação e a interação rotação-curso provocam erros de cilindricidade maiores, quando utilizadas em seus níveis altos, devido ao desbalanceamento do conjunto ferramenta-suporte articulado. Rotações elevadas provocam maiores forças centrífugas, fazendo que a ferramenta seja forçada contra as paredes do furo e causando erros de cilindricidade.

Aliado a esse fato, um curso maior faz com que o cone de entrada e de saída da ferramenta não esteja bem engajado no pré-furo, possibilitando que a ferramenta realize um movimento orbital na entrada e na saída do furo. Esses efeitos também foram observados por Arunachalan *et al.* (1997) e por Miller (1996). König (1980), descreve que quanto maior o curso, tanto mais as aberturas do furo se alargam em suas extremidades, influenciando o erro de cilindricidade.

6.2 Efeitos das variáveis do processo no diâmetro do furo

A análise de variância dos valores dos diâmetros dos furos obtidos, Tab. 6, mostra que o único fator significativo é o sobremetal (A), com um nível de significância de 1%.

Observa-se da Tab. 4 que os níveis altos da variável sobremetal produzem furos com diâmetros menores.

Peres (1994) utilizou em seu trabalho ferramentas de brunir do tipo “Precidor”, as quais possuem um mecanismo interno de ajuste do diâmetro, enquanto Miller (1996) fez uso de ferramentas tipo bucha diamantada, como a usada neste trabalho. Nos trabalhos citados o sobremetal sempre foi uma variável que produz efeitos significativos.

No brunimento de passe único parece sensato concluir que maiores quantidades de material a ser removido levam a diâmetros resultantes menores. Os diferentes níveis de deformação elástica da ferramenta e/ou da peça causados pelo maior ou menor sobremetal do furo podem ser a razão para esse comportamento.

6.3 Efeitos das variáveis do processo na rugosidade da superfície do furo

A variável de entrada do processo que possui alguma significância sobre a rugosidade da superfície do furo obtido é a rotação (velocidade de corte) da ferramenta, apesar do nível de significância estar em 10%, como mostra a Tab. 7.

Tabela 4 – Resumo dos resultados do experimento fatorial

| Tratam. | Peças | Cilindricidade (μm) | | Diâmetro (mm) | | Rugosidade R_a (μm) | |
|---------|-------|----------------------------------|------------|---------------|------------|------------------------------------|------------|
| | | Inicial | Resultados | Inicial | Resultados | Inicial | Resultados |
| e | 8 | 6,26 | 3,97 | 11,958 | 11,986 | 0,63 | 1,31 |
| a | 17 | 5,68 | 3,32 | 11,946 | 11,980 | 0,72 | 1,19 |
| b | 22 | 8,13 | 4,65 | 11,956 | 11,986 | 1,46 | 1,25 |
| abe | 19 | 8,96 | 4,73 | 11,948 | 11,981 | 1,43 | 1,33 |
| c | 15 | 6,45 | 4,35 | 11,954 | 11,985 | 0,94 | 1,24 |
| ace | 28 | 6,94 | 4,16 | 11,947 | 11,982 | 1,36 | 1,27 |
| bce | 29 | 8,39 | 4,04 | 11,961 | 11,987 | 1,55 | 1,18 |
| abc | 9 | 9,46 | 4,96 | 11,947 | 11,981 | 0,89 | 1,18 |
| d | 12 | 5,04 | 3,62 | 11,952 | 11,984 | 0,80 | 1,31 |
| ade | 27 | 6,90 | 4,12 | 11,946 | 11,982 | 1,11 | 1,26 |
| bde | 20 | 9,00 | 4,69 | 11,953 | 11,986 | 1,32 | 1,40 |
| abd | 33 | 8,32 | 4,31 | 11,944 | 11,980 | 0,80 | 1,39 |
| cde | 10 | 6,26 | 4,27 | 11,951 | 11,983 | 0,66 | 1,28 |
| acd | 3 | 7,71 | 4,12 | 11,947 | 11,982 | 1,27 | 1,20 |
| bcd | 4 | 10,72 | 4,84 | 11,953 | 11,984 | 1,21 | 1,32 |
| abcde | 7 | 8,55 | 4,39 | 11,944 | 11,981 | 1,40 | 1,28 |

König (1980), descrevendo a influência da velocidade de corte na rugosidade da superfície obtida através de brunimento convencional, relata que o aumento da velocidade influencia de maneira positiva a qualidade da superfície usinada.

Tabela 5 – Análise de variância relativa à cilindridade do furo obtido

| Varição | Soma Quad | GL | Média Quad. | F_o | NS |
|---------|-----------|----|-------------|--------|------|
| B | 1,37 | 1 | 1,369 | 35,116 | 0,01 |
| BC | 0,26 | 1 | 0,255 | 6,542 | 0,05 |
| BE | 0,26 | 1 | 0,255 | 6,542 | 0,05 |
| CE | 0,57 | 1 | 0,570 | 14,623 | 0,01 |
| Error | 0,43 | 11 | 0,039 | | |
| Total | 2,88 | 15 | | | |

Peres (1994) obteve como resultado uma redução da rugosidade da superfície brunida quando são empregadas maiores velocidades de corte devido ao maior número de grãos abrasivos atuando num mesmo comprimento usinado.

Tabela 6 - Análise de variância relativa ao diâmetro do furo obtido

| Varição | Soma Quad | GL | Média Quad. | Fo | NS |
|---------|-----------|----|-------------|-------|----|
| A | 0,00006 | 1 | 0,00006 | 50,48 | 1% |
| Error | 0,00002 | 14 | 0,00001 | | |
| Total | 0,00008 | 15 | | | |

Entretanto, Miller (1996) concluiu que o acabamento superficial não é afetado por nenhuma das variáveis envolvidas em seu estudo, nem mesmo a velocidade de corte.

Observa-se da Tab. 4 que os valores de rugosidade R_a são menores quando a variável velocidade encontra-se no nível alto, apesar do nível de significância de 10%. Também pode-se notar que o tamanho de grão utilizado, D150, é um fator que certamente tem influência no acabamento superficial já que em várias peças o valor do parâmetro R_a é maior após o brunimento do que no pré-furo alargado, situando-se em um valor próximo a $1,30 \mu\text{m}$.

Tabela 7 - Análise de variância relativa à rugosidade R_a do furo obtido

| Varição | Soma Quad | GL | Média Quad. | Fo | NS |
|---------|-----------|----|-------------|------|-----|
| C | 0,01 | 1 | 0,012 | 4,68 | 10% |
| Error | 0,04 | 14 | 0,003 | | |
| Total | 0,05 | 15 | | | |

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho procurou-se investigar os efeitos causados no diâmetro, acabamento da superfície e erro de cilindridade final das peças pelas variáveis sobremetal, cilindridade, velocidade de corte, avanço e curso da ferramenta.

O diâmetro final da peça é afetado pela quantidade de sobremetal removido da peça sendo que quantidades maiores de sobremetal resultam em menores diâmetros, devido à deformação da peça e/ou ferramenta.

O erro de cilindridade final mostrou-se dependente da cilindridade inicial, da rotação e do curso da ferramenta. Erros de cilindridade do furo pré-existente menores levam a menores erros de cilindridade finais devido ao fato de que apenas uma passagem da ferramenta pelo furo não é suficiente para corrigir erros maiores que $8 \mu\text{m}$, aproximadamente.

A fixação rígida da peça e flutuante da ferramenta, através da junta bi-articulada, provoca um agravamento do erro de cilindridade quando são empregadas velocidades de corte mais altas. Isso se deve ao fato da ação da força centrífuga sobre a ferramenta provocar um desbalanceamento na rotação da ferramenta e dificultar a compensação da falta de alinhamento entre o eixo de rotação do brunidor e o eixo do furo da peça.

O erro de cilindridade mostrou-se ainda dependente do curso de trabalho da ferramenta. Em cursos maiores, a forma de barril da ferramenta faz com que o brunidor não esteja bem centrado no furo da peça quando a rotação é acionada, alargando a entrada. Da mesma forma a saída do furo é deformado quando a ferramenta é rotacionada estando apenas o cone de saída atuando.

O acabamento da superfície do furo é afetado pela velocidade de corte, diminuindo com o aumento desta. Pode-se afirmar também que o tamanho de grão do abrasivo utilizado, apesar de não ser utilizado como uma variável de entrada, também afeta a rugosidade da superfície do furo.

O brunimento de furos com ferramentas tipo bucha diamantada, em peças fabricadas de ferro fundido, pode proporcionar bons resultados como indicam os valores obtidos neste experimento. Passes subsequentes, com ferramentas com tamanho de grão abrasivo menores e ajustadas para uma remoção de material condizente com o grão empregado, certamente levariam a valores de rugosidade superficial, precisão dimensional e de forma da ordem de 1 μm .

Embora seja uma ferramenta atrativa quanto ao custo e robustez de fabricação, o sucesso de seu uso depende em grande parte do dressamento, que deve ser realizado antes da sua utilização.

8. REFERÊNCIAS

- ARUNACHALAN, S.; O'SULLIVAN, J. M. – **Superabrasive reaming – an innovative technique for bore finishing**. Industrial Diamond Review, vol. 3, p. 76-80, 1997
- KÖNIG, W. - **Fertigungsfahren, Band 2** . Düsseldorf, VDI verlag, Tradução Prof. Walter Weingaertner, 1980.
- MARVIN, R. – **Achieving Maximum Effectiveness with Single-Pass Superabrasive Bore Finishing**. Society of Manufacturing Engineers. International Honing Clinic. 22 p., 1994.
- MARVIN, R. – **Achieving Maximum Effectiveness with Single-Pass Superabrasive Bore Finishing**. Society of Manufacturing Engineers. International Honing Clinic. 18 p., 1997.
- MILLER, J. – **Super-abrasive reaming of bores in cast iron**. Industrial Diamond Review, vol. 2, p. 52-57, 1996.
- MONTGOMERY, D. – **Design and analysis of experiments**. 3rd. ed., 649 p., John Wiley & Sons, Inc. New York, 1991.
- PERES, R. – **Caracterização do processo e verificação das grandezas de entrada no brunimento de curso longo tipo “Precidor”**. Tese de Mestrado. 157 p., UFSC, Florianópolis, 1994.

HONING WITH DIAMOND SLEEVE TOOLS OF BORES IN CAST IRON - AN ANALYSIS OF THE INPUT DATA INFLUENCE ON GEOMETRIC QUALITY

Abstract. *Honing with diamond tools is an industrial process used for finishing cylindrical bores to form and size tolerance of the order of 1 μm . These honing tools have a long working life and can be used on machine tools of moderate cost and precision. In this work, the honing of hydraulic valve body bore was investigated using a factorial design of experiment in honing tool speed, feed, stroke, stock material and initial cylindricity. Effects of the above parameters on diameter, cylindricity and surface finish were measured. Cylindricity errors are reduced when lower tool cutting speed and stroke are used as well as bores with lower initial cylindricity errors are honed. Surface finish improves with higher cutting speeds whereas more closed diameter sizes are achieved with large amounts of material removed.*

Key words – honing, abrasive process, diamond tools machining.