

# FABRICAÇÃO DE ESFERAS CERÂMICAS POR USINAGEM EM VERDE: MÁQUINA E PROCESSO

M.P.G. Pedroso, B.M. Purquierio C.A. Fortulan

Escola de Engenharia de São Carlos – USP

Av. Trabalhador São-carlense, 400 – 13566-590 – São Carlos - SP

marcos.paulo.pedroso@.usp.br

## RESUMO

*Esferas cerâmicas encontram grande aplicação em componentes de alta precisão como rolamentos híbridos e próteses de quadril onde o alto desempenho é somente alcançado através de estreitas tolerâncias de forma e dimensão. A usinagem em verde é uma etapa crítica na fabricação das esferas, pois o sobrematerial removido e o acabamento superficial atingido no final dessa etapa têm influência direta na qualidade do produto final. O trabalho objetiva o projeto de um protótipo de geradora de esferas para usinagem em verde de esferas de até 19,0 mm de diâmetro seguindo a abordagem da metodologia de projeto mecânico. O conceito de usinagem é composto por três rebolos, sendo dois de arraste com velocidades e direção de giro variáveis para promoção de efeito orbital aleatório na esfera e um rebolo de corte em alumina eletrofundida de liga vítreia. Blanques esféricos de zircônia foram conformados por prensagem isostática à 200,0 MPa e usinados no protótipo de geradora de esferas construído. A usinagem das esferas validou o conceito do projeto, porém com consumo elevado de tempo na primeira condição de validação experimentada.*

Palavras chave: usinagem por abrasão, usinagem *em verde*, projeto mecânico, esferas cerâmicas.

## INTRODUÇÃO

Esferas cerâmicas são componentes utilizados em aplicações tradicionais como elementos em torres de catálises, em moinhos de bolas e em aplicações de precisão como os elementos de rolamentos, apalpadores de equipamentos de medição e esferas de implante de quadril. Em rolamentos híbridos de alta precisão, as esferas cerâmicas exibem vantagens em condições críticas de alta velocidade, alta carga, alta temperatura e meio hostil<sup>(01)</sup>. Neste caso as propriedades desejáveis das cerâmicas são: a alta dureza, a alta resistência ao desgaste, a resistência maior à compressão do que à tração unidas da

possibilidade de obtenção de acabamento superficial ultra fino ~~acabamento superficial~~. As tolerâncias estreitas de circularidade e acabamento superficial não apenas diminuem o atrito, como resultam em uma operação que permite velocidades até 80% maiores que as alcançadas em rolamentos com esferas metálicas, pois impõe menor vibração; já, a baixa densidade das cerâmicas diminui o consumo de energia em 15 a 20% do alcançado com os rolamentos com esferas metálicas <sup>(02)</sup> e a predominância de esforços compressivos nos elementos rolantes aproveita o máximo das propriedades mecânicas da cerâmica. Outra aplicação de destaque das esferas cerâmicas são as próteses de quadril, em que a esfera faz o papel da cabeça do fêmur quando danificada, a esfera forma um par tribológico com um acetábulo e garante a mimetização da articulação. As próteses mais comuns utilizam tanto a esfera quanto haste em aço inoxidável e o acetábulo em polietileno de ultra alto peso molecular, contudo as falhas dos implantes estão associadas ao desgaste do par tribológico, sendo as partículas liberadas pelo desgaste responsáveis por reações biológicas <sup>(03)</sup>. Baixo atrito, alta resistência ao desgaste e boa biocompatibilidade fazem da prótese de cerâmica de alumina e zircônia boas opções em longo prazo, principalmente para pacientes jovens e ativos, porque elas apresentam durabilidade maior e ausência de osteólise quando comparada à prótese metal-polietileno em intervalos maiores que 10 anos de utilização <sup>(04)</sup>.

### Usinagem de esferas cerâmicas

O princípio básico do conceito da usinagem de esferas tem sido conservado ao longo do tempo, ou seja, um rebolo de usinagem e outro de arraste, porém há inúmeros diferentes detalhamentos nos projetos destas máquinas; com o passar do tempo a eficiência do processo foi melhorada através da diminuição do tempo de produção e estreitas tolerâncias dimensionais e de forma foram alcançadas. Os principais projetos atuais são os métodos de usinagem com fluido magnético, canal em “V” concêntrico com dois rebolos, canal em “V” concêntrico com três rebolos e canal em “V” excêntrico com dois rebolos.

- *Método de usinagem com fluido magnético:* conforme mostrado pela Figura 1(a), as esferas são alojadas na célula de usinagem, imersas no fluido magnético, assim como os abrasivos e um disco, sendo todos os sólidos de

material não ferromagnético. O reservatório se encontra sobre uma base na qual existem barras magnetizadas, com seus polos norte apontando alternadamente para cima e para baixo. O campo magnético resultante que atravessa o fluido produz uma força vertical para cima que age sobre todos os materiais não ferromagnéticos, assim, as esferas são forçadas contra o eixo que possui um chanfro e empurradas pelo disco. Conforme o eixo gira, as partículas abrasivas promovem a usinagem das esferas<sup>(05)</sup>.

- Método de usinagem com canal em V concêntrico: tradicionalmente utilizado na produção em massa. Nesse método, conforme mostra a Figura 1(b), as esferas são alojadas no canal em V no rebolo de arraste (inferior) e através da rotação dos dois rebolos as esferas são usinadas<sup>(5)</sup>. Existe um aprimoramento ao método ao se dividir o rebolo de arraste em dois rebolos de rotações independentes cuja geometria forma o canal em V, conforme mostra a Figura 1(c)<sup>(06)</sup>.

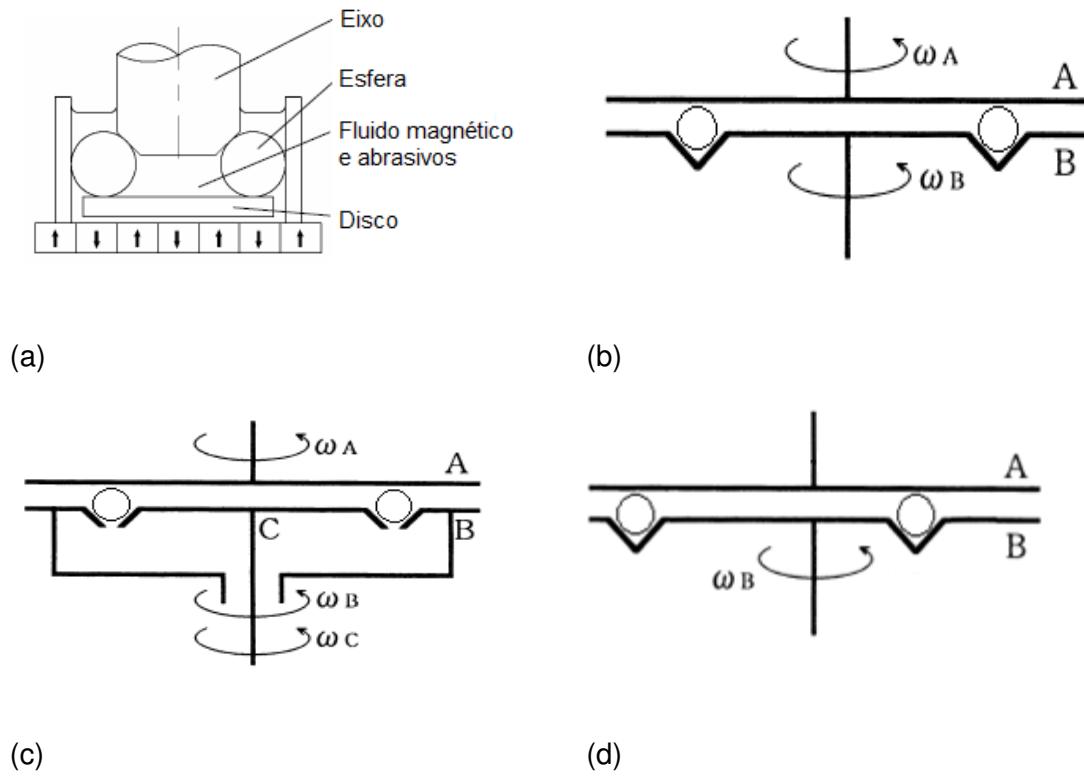


Figura 1. Esquemas de princípios de funcionamento na usinagem de esferas cerâmicas; em (a) com fluido magnético (adaptação de ZHANG et al. (2004)<sup>(07)</sup>); em (b) com canal em V concêntrico com dois rebolos (adaptado de KUROBE et al. (1996)<sup>(06)</sup>); em (c) com canal em V concêntrico com três rebolos (adaptado de KUROBE et al. (1996)<sup>(06)</sup>) em (d) esquema do método de usinagem excêntrico de dois rebolos (adaptado de KUROBE et al. (1996)<sup>(06)</sup>).

As grandezas utilizadas para o estudo do movimento das esferas aplicado ao método de usinagem do canal em V concêntrico são mostradas na Figura 2.

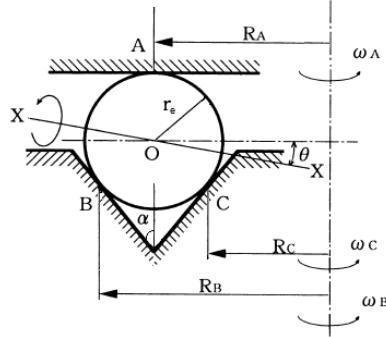


Figura 2- Grandezas utilizadas para o estudo do movimento das esferas com canal em V concêntrico (adaptado de KUROBE et. al. (1996)<sup>(06)</sup>).

Considerando as esferas e os rebolos como corpos rígidos e a ausência de escorregamento, através do equacionamento da cinemática do movimento da esfera, foi encontrado o valor do ângulo de giro das esferas para o sistema com dois rebolos da Figura 1(b) <sup>(08,09)</sup>:

$$\theta = \arctg \left( \frac{r_e \cdot \operatorname{sen} \alpha}{R_A} \right) \quad (1)$$

O ângulo de giro é determinado pelo raio da esfera, pelo raio do rebolo de arraste e pelo ângulo do canal em V, ou seja, quase não muda durante o processo. Portanto, as trilhas de usinagem são círculos concêntricos, o que resulta em uma usinagem não uniforme das esferas e em circularidades elevadas <sup>(08)</sup>. Através da aplicação dessas hipóteses ao movimento das esferas do sistema da Figura 1(c), chega-se a uma nova expressão para o ângulo de giro <sup>(06)</sup>:

$$\theta = \arctg \left[ \frac{R_A R_B (\omega_B - \omega_A) \operatorname{sen} \alpha - R_A R_C (\omega_C - \omega_A) \operatorname{sen} \alpha + R_A R_C (\omega_B - \omega_C)}{R_A R_B (\omega_B - \omega_A) \operatorname{cos} \alpha + R_A R_C (\omega_C - \omega_A) \operatorname{cos} \alpha} \right] \quad (2)$$

Conforme mostrado pela equação 2, o ângulo de giro depende não apenas da geometria do equipamento, mas também das velocidades angulares dos três rebolos. Portanto, o ângulo de giro pode ser controlado através da composição das rotações dos rebolos. Com o aumento do ângulo de giro ocorre o aumento da taxa de remoção de material, devido ao aumento da distância de deslizamento na superfície de contato entre a esfera e o rebolo de corte (superior) <sup>(06)</sup>.

• Método de usinagem com canal em V excêntrico: como mostrado pela na Figura 1(d), outra modificação foi realizada ao se promover a existência de excentricidade entre o eixo de giro do rebolo de arraste e o eixo geométrico do canal em V. Nessa configuração o rebolo de corte permanece parado. Devido à presença da excentricidade ocorre o aumento e a diminuição da velocidade de circulação das esferas, que deslizam entre os rebolos, e o ângulo de giro é alterado continuamente <sup>(10)</sup>. A taxa de remoção de material é de 2 a 8 vezes maior que o método tradicional da usinagem com canal em V concêntrico com dois rebolos <sup>(07)</sup>.

Este trabalho objetiva a manufatura de esferas cerâmicas à partir da usinagem em verde de esferas cerâmicas de *blanks* conformados à partir de prensagem isostática *wet bag*.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Esfera de Zircônia 3Y de diâmetro final de 19,0 mm foi idealizada; o material escolhido para a fabricação das esferas foi a zircônia tetragonal parcialmente estabilizada com 3 mol% de ítria (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) TZ-3Y-E (Tosoh). Sua escolha foi devido às características superficiais de acabamento da zircônia (brilho e reflexo de luz), sua relativa alta tenacidade a fratura e uso em implantes de quadril. O pó para prensagem foi obtido em um moinho de jarros com a introdução de 30 vol% de pó de zircônia, 67,5 vol% de álcool isopropílico, 2vol% de PVB e 0,5 % da massa de ZrO<sub>2</sub> de PABA (ácido 4-aminobenzóico). A aglomeração ocorreu por evaporação do álcool com pistola de ar quente à ~80°C e granulação entre malhas 80 – 170 Mesh.

### Projeto de Molde Isostático e prensagem de *blank*

A figura 03 ilustra o molde usado na prensagem das esferas. Em a) desenho em corte do molde com chamada para os componentes; em b) foto do molde fabricado e em c) imagem do molde com a esfera sendo removida. *Blanks* esféricos foram prensados isostaticamente em prensagem tipo *wet bag* à 200,0 MPa.

Para a fabricação do molde, as peças elastoméricas foram fabricadas em silicone através de moldagem e a camisa rígida foi fabricada por impressão 3D tipo FMD em ABS na impressora Dimension Elite.



(a) (b) (c)  
Figura 3- Molde para prensagem das esferas, em a) vista em corte; em b) molde carregado com o pó e fechado e em c) esfera recém-prensada dentro do molde.

#### Projeto da Máquina de usinagem

Uma máquina de usinagem foi projetada e construída. O conceito inicial e as premissas do projeto foram baseados em uma máquina com canal em “V”, com três rebolos (sendo dois de arraste) e eixos excêntricos tendo velocidades angulares e direções de giro variáveis para promover um efeito orbital aleatório na esfera, o que garante baixo desvio de esfericidade; é previsto a usinagem em verde de esferas de até 30 mm de diâmetro. A Figura 4 ilustra esquematicamente o conceito inicial do equipamento, composto por um rebolo de usinagem montado em um cabeçote que promove a velocidade periférica mínima de 30,0 m/s no perímetro de contato; dois rebolos de arraste em aços revestidos com trilhas de elastômero são atuados por dois motores de passo controlados por modulo e software CAD *freeware*; coluna suporte do cabeçote de usinagem com movimentação vertical atuado por conjunto manual para avanço rápido e avanço micrométrico; estrutura composta por mesa de granito sintético e suporte metálico; sistema de proteção para limpeza e previsão de acidentes.

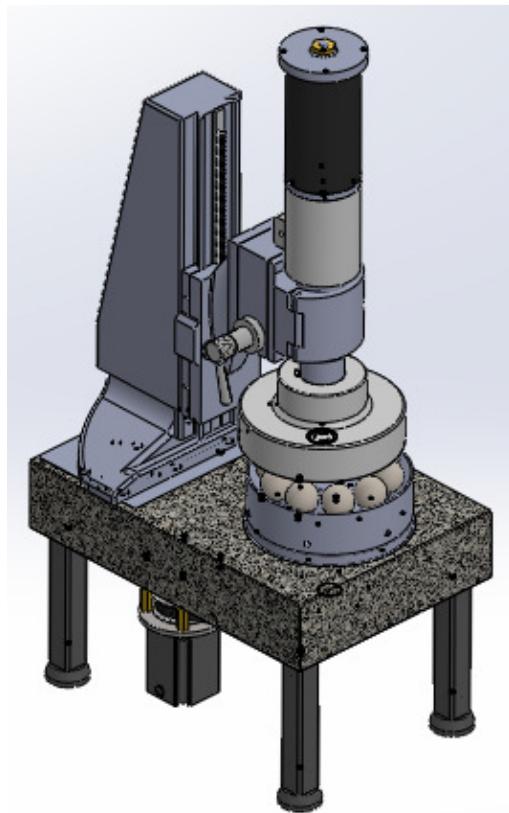


Figura 4- Desenho esquemático da máquina de usinagem de esferas

A estrutura da máquina foi construída em granito sintético que incorpora em sua *fundição* os insertos metálicos da caixa do mancal, suporte da coluna vertical, fixação dos motores e apoios para estrutura. A Figura 05 mostra as fases de fabricação da estrutura em granito sintético composto de britas de granito tipo Cinza Mauá e resina epóxi.

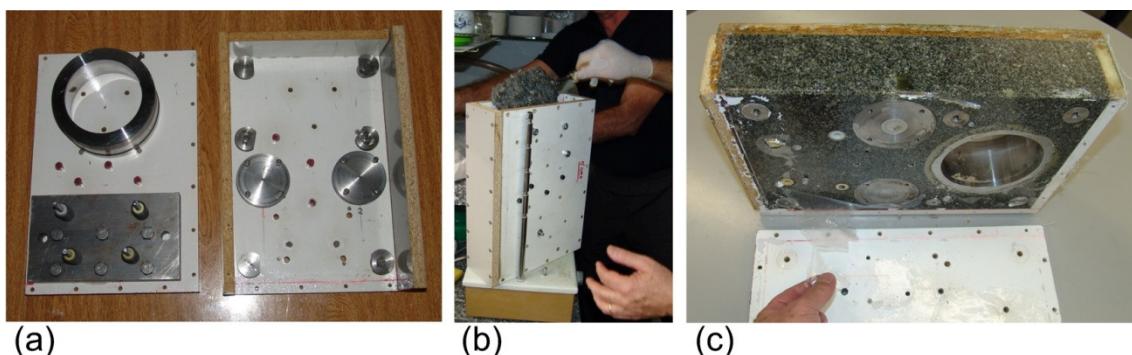


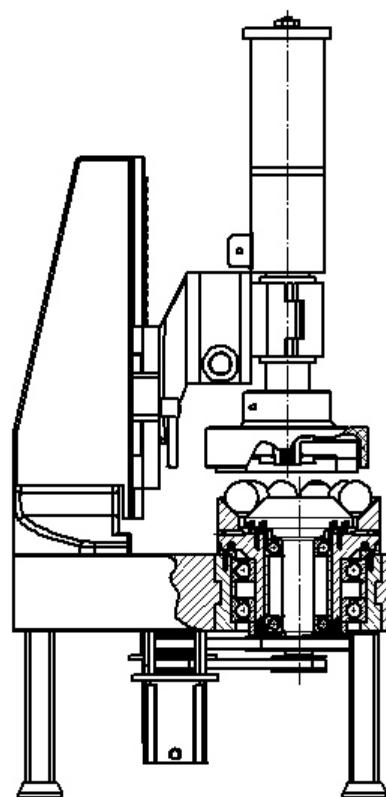
Figura 5 – Imagens da estrutura de granito, em (a) molde com inserts; em (b) preenchimento com o granito sintético e em (c) abertura do molde e desmoldagem da estrutura.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 06 mostra em (a) uma imagem da máquina construída onde é observado o canal em “V”, o cabeçote acionando por um motor DC, a coluna vertical com os dois manípulos de avanço rápido (por cremalheira) e micrométrica (por came) e em (b) uma imagem em cortes parciais simulando o carregamento com esferas e o rebolo.



(a)



(b)

Figura 6 – Máquina de usinagem de esferas construída, em (a) imagem do equipamento e em (b) vista em corte parcial mostrando detalhes do projeto.

Algumas fases de montagem da máquina de usinagem são apresentadas pela na Figura 07 que mostra a mesa em granito sintético montada com os rolamentos do rebolo de arraste externo em (a); os rebolos de arraste formando o canal “V” (b) e os servomotores instalados (c).

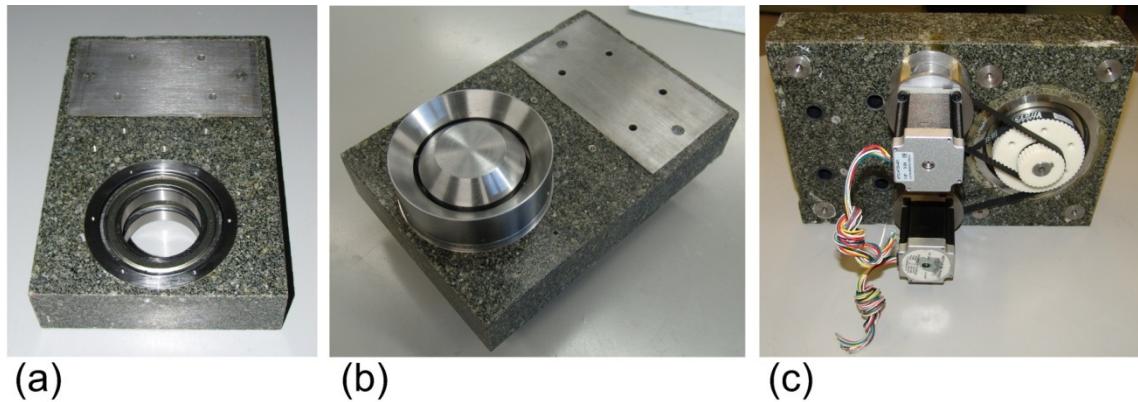


Figura 07- Fases de montagem da máquina de usinagem, em (a) estrutura com os mancais externos; (b) cabeçotes de arrastes montados e em (c) motores de passo para o arraste.

O banco de ensaios de usinagem com a instrumentação da máquina através de acionamento e controle é mostrado na Figura 8. Nele é destacado o PC para controle das velocidades e direção de giro dos rebolos de arraste através do driver CNC e fonte DC para alimentação variável do motor responsável pelo giro do rebolo de corte; o protetor do rebolo para segurança para eventual quebra do rebolo ou esfera e uma espuma posicionada no canal “V”.

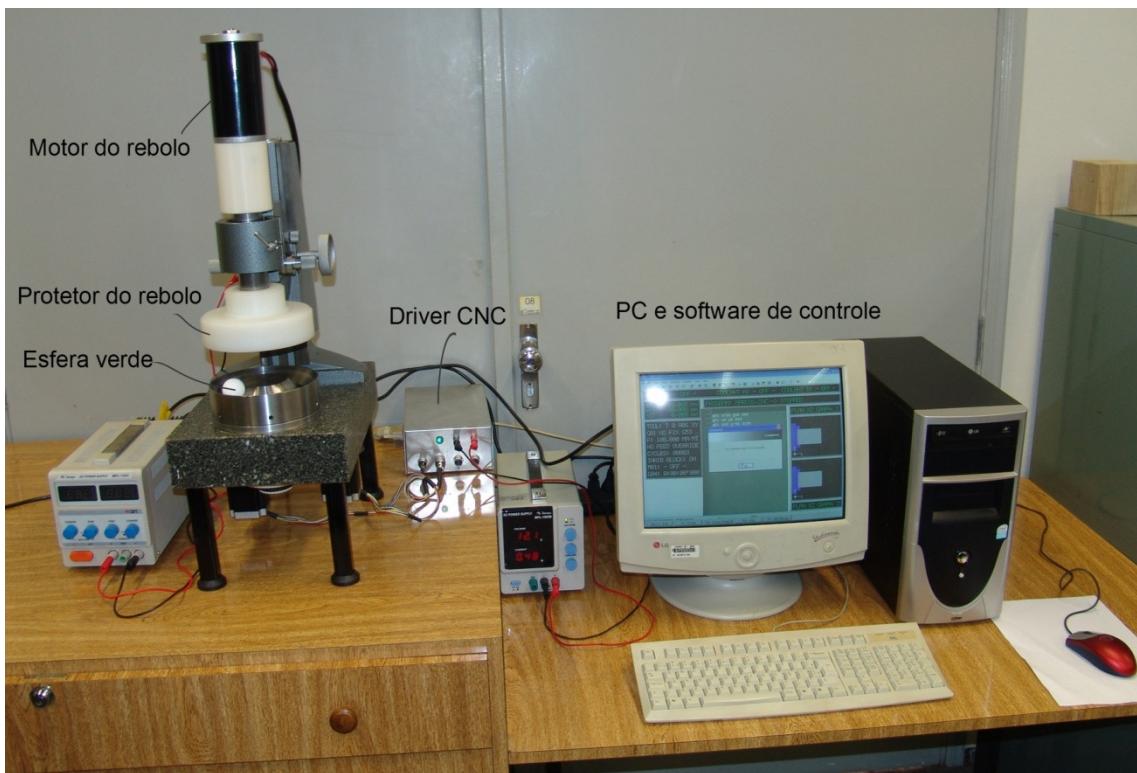


Figura 8- Banco de ensaios e instrumentação de controle e acionamento da máquina de usinagem.

### Validação

O protótipo fabricado foi validado através da usinagem de esferas cerâmicas em verde. Foram aplicadas rotações no rebolo de arraste externo de 100,0 rpm no sentido horário, o rebolo de arraste interno de 150,0 rpm no sentido horário e o disco de corte à rotação de 1000,0 rpm. O sentido de giro dos rebolos de arraste se inverte, alternadamente, a cada 2 minutos de usinagem, fato que garantiu a aleatoriedade do giro. Nestas condições a taxa de remoção foi de 100,0 mm<sup>3</sup>/min, considerada muito baixa devido a baixa rotação do rebolo de corte que foi idealizada em 6000,0 rpm para gerar velocidade periférica de 30,0 m/s; entretanto, giros rotações mais altas geraram um arraste na esfera que ocasionou uma força centrífuga forçando a esfera na cunha formada pela superfície em “V” do rebolo arraste externo e superfície plana do disco de corte ocasionando a compressão, seguida de fratura das esferas. Uma gaiola separadora de esferas foi então considerada para evitar o arraste das esferas pelo rebolo de corte e será experimentada nas fases sucessivas de validação

### CONCLUSÕES

O protótipo avaliado gerou esferas em verde que tiveram suas irregularidades decorrentes da prensagem isostática removidas com bom acabamento superficial, o que valida inicialmente o conceito, porém, com consumo muito elevado de tempo. Isto foi devido ao arraste das esferas pelo disco de corte, prevalecer sobre os rebolos de arraste. A gaiola separadora de esferas é considerada como a próxima etapa evolutiva do projeto no sentido de aumentar a velocidade do rebolo de corte sem o efeito do arraste.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo auxílio da bolsa de mestrado.

### REFERÊNCIAS

- 01-KANG, J. ; HADFIELD, M. “A novel eccentric lapping machine for finishing advanced ceramic balls,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 215, no. 6, pp. 781–795, Jan. 2001.

- 02- RICHERSON, D.W. Modern ceramic engineering, Properties, processing and use in design. Taylor e Francis Group, Boca Raton, USA, 2006, 707 p.
- 03- PURQUERIO, B. M.; FORTULAN, C. A. Projeto conceitual de prótese cerâmica para recapeamento de quadril. In: 53º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2009, Guarujá/SP. Anais do 53º Congresso Brasileiro de Cerâmica. São Paulo/SP: Associação Brasileira de Cerâmica, 2009.
- 04- MURPHY SB, ECKER TM, TANNAST M. Two- to 9-year clinical results of alumina ceramic-on-ceramic THA. *Clin Orthop Relat Res* 2006;453:97, 2006.
- 05- UMEHARA, N.; KIRTANE,T. ; GERLICK, R. ; JAIN, V. K. ; KOMANDURI, R. "A new apparatus for finishing large size/large batch silicon nitride (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) balls for hybrid bearing applications by magnetic float polishing (MFP)," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 2, pp. 151–169, Feb. 2006.
- 06- KUROBE, T. ; KAKUTA, H.; ONODA, M. "Spin Angle Control Lapping of Balls (1st Report)," *J. Japan Soc. Precis. Eng.*, vol. 62, no. 12, pp. 1773–1777, 1996.
- 07- ZHANG, W. X.; REN, C. Z.; ZHENG, F.; JIN, X. M.; "Shaping of Green Ceramic Balls and Precision Lapping of Ceramic Balls for Ceramic Ball Bearings," *Key Eng. Mater.*, vol. 259–260, pp. 471–475, 2004.
- 08- YUAN, J. L.; CHEN, L. N.; ZHAO, P. ; CHANG, M.; XING, T.; LV, B. H.; "Study on Sphere Shaping Mechanism of Ceramic Ball for Lapping Process," *Key Eng. Mater.*, vol. 259–260, pp. 195–200, 2004.
- 09- LEE, R.T.; HWANG, Y.C.; CHIOU, Y.C. "Lapping of ultra-precision ball surfaces. Part I. Concentric V-groove lapping system," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 10, pp. 1146–1156, Aug. 2006.
- 10- KANG, J. Influence of surface quality on the rolling contact fatigue behaviour of ceramics. 2001. 220f. Escola de Projeto, Engenharia e Computação, Universidade Bournemouth, Reino Unido, 2001.

## **GREEN CERAMIC BALL MANUFACTURING: MACHINE AND PROCESS**

### **ABSTRACT**

Ceramic balls have a large application in high precision components such as hybrid bearings and hip prosthesis where high performance is only achieved through close form and dimension tolerances. Green machining is a critical step in the manufacture of balls since the over material removal and the surface finish achieved at the conclusion have a direct influence on the quality of the

final product. This work aims the design a prototype for machining green balls to the diameter of Ø19.0 mm following the approach of mechanical design methodology. The concept consists of three wheels, two for drag with speed and direction of rotation variables to promote random orbital effect on the ball and a cutting wheel with silicon carbide #120 mesh track. Spherical zirconia blanks were shaped by isostatic pressing at 200.0 MPa and machined with the built machine prototype. The machining of the spheres validated the project concept, but with high time consumption during first validation process.

**Keywords:** abrasive machining, green machining, mechanical design, ceramic balls.