

**Artigo Original**

Recebido em 02/12/2003 e aceito em 14/10/2004

**Método alternativo para fabricação de cabeça femoral cerâmica para próteses de quadril**

*Alternative manufacture method for ceramic femoral ball head applied in hip prostheses*

**Hugo Leonardo Rocha Alves**

Mestre em Engenharia de Materiais / UFRGS  
Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS  
Doutorando no PPGEM da  
Escola de Engenharia da UFRGS  
E-mail: hugo@ufrgs.br

**Daniel Stainer**

Mestre em Engenharia Mecânica / UFSC  
Construções Mecânicas Cocal – CMC Tecnologia Ltda  
Av. Longarone, s/n – KM 01 Área Industrial  
CEP 88845-000 Cocal do Sul/SC, Brasil  
E-mail: daniel@cmc.ind.br

**Carlos Pérez Bergmann**

Dr.-Ing., Coordenador do Laboratório de Materiais Cerâmicos / Departamento de Materiais  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)  
Av. Osvaldo Aranha 99, s. 705b, Centro  
CEP 90035-190, Porto Alegre/RS, Brasil  
bergmann@ufrgs.br

**Resumo**

O aumento da expectativa de vida da população e o crescente número de acidentes automobilísticos com lesões graves têm aumentado mundialmente o número de cirurgias de artroplastia total de quadril. A maior parte das cirurgias ortopédicas realizadas utiliza próteses com articulação cabeça/acetábulo tipo metal/polímero que tem demonstrado altos índices de falhas. A falha de um implante de quadril geralmente está associada ao processo de desgaste na articulação que libera partículas dos materiais envolvidos, causando reações biológicas de infecção e a perda de fixação do implante. Alumina tem sido utilizada com sucesso como cabeça femoral na indústria biomédica mundial. No entanto para a conformação de esferas cerâmicas, tem-se recorrido quase que sem exceção à prensagem isostática a quente, que exige alto custo em equipamentos e operação. Este estudo apresenta um processo alternativo de conformação de cabeças femorais cerâmicas. Este novo processo de fabricação de cabeças femorais cerâmicas para próteses de quadril apresenta redução de custo considerável em compração com a prensagem isostática a quente. O objetivo é apresentar um processo que permita chegar próximo ao formato final da peça. Isto traz como benefício redução de volume de material removido por desgaste e polimento promovendo aumento da produtividade. Aqui alguns critérios de seleção da alumina, complexidade do componente e viabilidade de execução foram abordados. Neste trabalho foi possível a fabricação de componentes de alumina para aplicação como cabeça femoral em próteses de quadril via processo de prensagem flutuante de duplo efeito. Os corpos cerâmicos obtidos apresentaram propriedades que satisfazem às exigências da norma ABNT NBR-ISO 6474 em termos de densificação, tamanho médio de grão e resistência mecânica.

**Palavras-chave:** Alumina cerâmica, Cabeça-femoral, Conformação, Prótese de quadril.

**Abstract**

*The increase of the life expectancy of the population and increasing number of automobile accidents with serious injuries has magnified world-wide the number of total hip surgeries. In the majority of the times they use metal/polymer joint which has high levels of fails. The fail of hip implant normally is associated with the wear process in the joint that liberates particles of the involved materials, causing biological reactions of infection on tissue, and the loss fixing of the implant. Alumina has been appreciably used as femoral head in the worldwide biomedical industry. However, for the conformation of the alumina ceramic spheres, it has been appealed almost that without exception to the hot isostatic pressing, that demands high cost in equipment and operation. In this work, an evaluation of one alternative conformation technology for ceramic femoral heads is presented. This new process allows manufacture of ceramic components with*

a significant reduction of costs compared with traditional isostatic pressing. The objective is to present a process that allows arriving close to the final format of the biomedical component. This brings as benefit a significant reduction in the volume of material removed for grinding promoting increase in productivity. Here some criteria are commented involving characteristics of the material, complexity of the component and viability of execution. From the presented results it can be concluded that is viable the manufacture of alumina femoral ball heads by floating pressing with double effect system. It was verified that the results satisfy the requirements imposed for the component in densification terms, average size of grain and mechanical strength.

**Keywords:** Alumina ceramic, Conformation, Femoral head, Hip Prostheses.

## Extended Abstract

### Introduction

The fail of hip implant after a total hip replacement surgery normally is associated with osteolysis induced by liberated particles in the wear process between the femoral head and the ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) acetabular component. This promotes biological reactions of infection around of living tissue, leading to the premature loss fixing of the implant, and subsequent fail of the prosthesis. Dense and polycrystalline alumina ( $Al_2O_3$ -a) detaches in function of the combination of its properties of high resistance to the wear, good biocompatibility (bioinert), low angle of wetting, that allows one better adsorption of biological molecules that act as a lubricant film, beyond high resistance to the corrosion and high mechanic resistance to compression. However, the selection of a material cannot be made independently of the selection of the manufacture process, format and aggregate cost. However, the determination of a methodology that evaluates the final properties of structural ceramics is so important how much its proper selection and processing.

In this work, an evaluation of one alternative conformation technology for ceramic femoral heads is presented. This new process allows manufacture of ceramic components with a significant reduction of costs compared with traditional isostatic pressing. The floating pressing with double effect system is one technique still not developed by worldwide biomedical industry, but it can be a cheap and efficient solution capable to substitute or at least optimizing the expensive and delayed process of isostatic pressing). In this work some criteria are commented involving the choice of the raw material and the choice of the manufactured process to be use, involving characteristics of the material, complexity of the component and viability of execution.

### Materials and Methods

The raw material chosen for this work was an atomized powder based on high purity alumina (RC-HP RTP 99.97%) supplied by Malakoff Reynolds Company. The choice of a raw material supplier is crucial for the final quality of the

ceramic sphere, because a product with an atomized powder size minor of 0.5 mm detaches as key element in the final properties of the component. The CMC Technology Company projected and constructed a matrix, whose principle of functioning is presented in Figure 2. For the conformation process had been pressed components using a specific pressure of up to 150 MPa. The sintering of the components was carried through in furnace of electric resistance of the Lenton mark, with rates of heating of 95 K/h until the temperature of sintering of 1540 °C, where they remained 3 hours. The stage of superficial finishing of the ceramic bodies understood the process of grinding and polishing with a diamond wheel. The finishing is improved with the reduction of the size of abrasive grain of the wheels in such even for the external region as for the region of the bore.

### Results and Discussion

Was determined the 2.26 g/cm<sup>3</sup> density of the green ceramic spheres by method of immersion in mercury. The linear shrinkage of 16.8% was determined. With this linear shrinkage, the dimensional adjust after sintering demanded a grinding for the reduction of 1.0 mm in the diameter of the sphere, in order to reach the final diameter of 28 mm. The loss to the fire was in average of 0.37% in weight. The real density after sintering was 3.97 g/cm<sup>3</sup>, what it discloses a good densification, being that the gotten value is very next to the theoretical density of the alumina of 3.98 g/cm<sup>3</sup> and superior to the theoretical density of the alumina of 3.98 g/cm<sup>3</sup> and superior to the minimum limit of 3.94 determined by ASTM ISO 6474. In the same way, the apparent porosity of 0.26% and water absorption of 0.07% in average, are indicative of this raised densification. Besides satisfying to the described requirements in the mentioned norm, these values do not differ very from the values found in literature for ceramic bodies with the same application, but manufactured by hot isostatic pressing process. The average value of microhardness Vickers was of 2081.6 HV0,5 what it characterizes the high superficial hardness of gotten alumina. This value serves as indicative of the resistance to the wear of the component, in view of that this will act as a joint.

### Conclusion

From the presented results it can be concluded that is viable the manufacture of alumina components for application as femoral head in hip prosthesis with process of floating pressing with double effect system. This alternative process allows arriving next to the final format to the biomedical component. This brings as benefit a significant reduction in the volume of material removed for grinding, and consequently, in the final cost of the product. It was verified that the chosen parameters of sintering satisfy the requirements imposed for the component in densification terms, average size of grain and mechanical strength, being fit of the foreseen one in norms ASTM ISO 6474 for applied ceramic bodies as femoral head in hip prosthesis.

## Introdução

É possível relacionar o aumento da expectativa de vida da população e o crescente número de acidentes automobilísticos com o aumento do número de cirurgias de artroplastia total de quadril. A artroplastia total ou prótese total de quadril é um procedimento cirúrgico que visa à substituição das estruturas ósseas danificadas da articulação natural do quadril, por materiais que vão atuar artificialmente como uma junta. A cirurgia de colocação de uma prótese de quadril é realizada principalmente em pacientes portadores de artrose grave da articulação natural do quadril, quando existe uma grande limitação dos movimentos e a dor é muito intensa, tornando as atividades diárias muito penosas. Também em certos casos de fratura do colo do fêmur ou de necrose da cabeça do fêmur (quando ocorre a destruição do osso), justifica-se a realização desta cirurgia (Ratner, 1996).

No entanto ainda hoje estas próteses apresentam altos índices de falhas. A falha prematura de implantes pode estar associada a inúmeros outros fatores como o carregamento mecânico (sobrecarga, impacto, fadiga e desgaste), o ambiente corrosivo (corrosão por pites, por frestas, metalose), falha na seleção, projeto e fabricação do implante, má colocação, danificação do implante durante a cirurgia ou ainda devido a pouca qualidade óssea do paciente (Ravaglioli e Hrajewski, 1992). Devem ser levadas em conta ainda outras condições peculiares do corpo humano como, por exemplo, a presença intrínseca de eletrólitos - uma concentração de cloretos de ordem 2% -, apresentando um pH da ordem de 7,6 à temperatura média de 36 °C. Outra característica necessária para os materiais de implantes é a manutenção das propriedades após a esterilização, que pode ocorrer via temperatura (estufa seca ou a vapor), por produto químico (por exemplo, com óxidos de etileno) e por radiação gama (Zavaglia, 1993).

Este trabalho objetiva determinar as características de componentes cerâmicos aplicados como cabeça femoral de próteses de quadril conformados via prensagem flutuante de duplo efeito. Serão comentados alguns critérios envolvendo a escolha do material e o processo de fabricação, características do material e complexidade da peça.

## Fundamentos teóricos

As próteses de quadril (Figura 1) são constituídas por três peças: a haste, que é colocada por dentro do fêmur, podendo ser de titânio, ligas Cr-Co ou aço inox; o acetábulo, uma peça que é presa na bacia, em geral feita de metal com a região interna de polietileno de ultra-



**Figura 1.** Representação esquemática dos componentes de uma prótese total de quadril. **Figure 1.** Schematical representation of total hip prostheses components.

alto peso molecular; e a esfera, podendo ser metálica ou cerâmica. O encaixe perfeito destas duas últimas permite a reprodução dos movimentos da articulação (Ravaglioli e Hrajewski, 1992).

A maior parte das cirurgias ortopédicas realizadas utiliza próteses com articulação cabeça/acetábulo tipo metal/polímero que tem demonstrado altos índices de falhas. Este tipo de articulação pode durar até cerca de 10 anos e o maior problema a longo prazo é a perda da aderência ao osso humano (Hench e Wilson, 1999). Naturalmente, este fenômeno depende das solicitações advindas do tipo e intensidade das atividades do indivíduo. A obesidade, o trabalho pesado ou excesso de atividade podem apressar a perda da aderência, o que muitas vezes requer uma segunda cirurgia para troca da prótese. A expectativa de bons resultados de uma segunda operação não é tão grande como a da primeira e a possibilidade de complicações durante a cirurgia são muito maiores (Hippert e Azevedo, 2001).

As cerâmicas avançadas estruturais têm sido utilizadas notavelmente como cabeça femoral na indústria biomédica mundial, principalmente as à base de alumina. A utilização de zircônia também tem sido estudada, porém alguns fatores indicam uma limitação no seu uso nesta aplicação (Fredel, 1998). A alumina alfa ( $Al_2O_3-\alpha$ ), densa e policristalina, destaca-se em função da combinação de suas propriedades de alta resistência ao desgaste, boa biocompatibilidade (bioinerte), baixo ângulo de molhamento - o que lhe permite uma melhor adsorção de moléculas biológicas que atuam como um filme lubrificante, diminuindo ainda mais o coeficiente de atrito da articulação -, além de elevada resistência

à corrosão e alta resistência mecânica à compressão (Hübner e Dörre, 1984). O sucesso na utilização de alumina em endopróteses do quadril está baseado no encaixe perfeito e travamento das cabeças cerâmicas nos insertos metálicos da haste através do cone Morse, sem proporcionar concentração de tensões (Willmann e Heros, 1998). As propriedades da alumina policristalina para aplicação biomédica são normalizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT ISO 6474 – Implantes para cirurgia - Materiais cerâmicos a base de alumina de alta pureza), baseada na ASTM F 603-83 (*American Society for Testing and Materials - Standard Specification for High Purity Dense Aluminum Oxide for Surgical Implant Application*), resumidas na Tabela 1.

A prensagem isostática é particularmente aplicada a produtos que apresentam formas esféricas. O processo de prensagem isostática de esferas cerâmicas utiliza-se uma matriz elastomérica flexível. Neste processo, a cavidade da matriz elastomérica é preenchida pelo pó cerâmico e posteriormente selada (Nevelos *et al.*, 2001). Neste processo a superfície externa da matriz elastomérica é comprimida por um fluido pressurizado gradativamente pela ação de uma prensa isostática, gerando o compactado verde. Industrialmente, são aplicadas pressões de 7 a 200 MPa. Após a prensagem, seguem-se as etapas finais de usinagem e sinterização. Notoriamente, este processo demanda um rígido controle de todos os parâmetros demandando um tempo de ciclo relativamente alto que permite somente a confecção de peças unitárias a cada ciclo (Reed, 1988).

A prensagem uniaxial de dupla ação é empregada quando a espessura da peça é muito grande para o emprego da técnica de ação simples. Nestes casos, tanto o punção superior como o inferior exercem pressão sobre a massa contida no molde. Uma vez finalizada a aplicação da carga, a retirada do punção superior e o movimento ascendente do punção inferior permitem

a extração da peça (Reed, 1988). Uma solução para evitar a fricção excessiva entre os grânulos e as paredes do molde, que pode levar a uma heterogeneidade na densidade da peça e/ou a formação de trincas durante a extração da peça, consiste na utilização de uma matriz que também seja móvel. Nesta técnica, durante a fase de compactação, a matriz acompanha, parcialmente, o movimento do punção superior, e, na fase de extração, enquanto o punção superior é removido, a matriz desce ainda mais, para facilitar a extração da peça. Esta técnica é denominada prensagem flutuante de duplo efeito.

### Materiais e Métodos

A matéria-prima escolhida para a realização deste trabalho foi uma alumina atomizada, de referência RC-HP RTP, com teor de pureza de 99,97%, fornecida pela Malakoff Reynolds. Os seguintes dados de sua caracterização foram fornecidos pelo fabricante: área superficial (BET) 8,3 m<sup>2</sup>/g; tamanho médio de partícula (Sedigraph 5100) 0,37 µm.

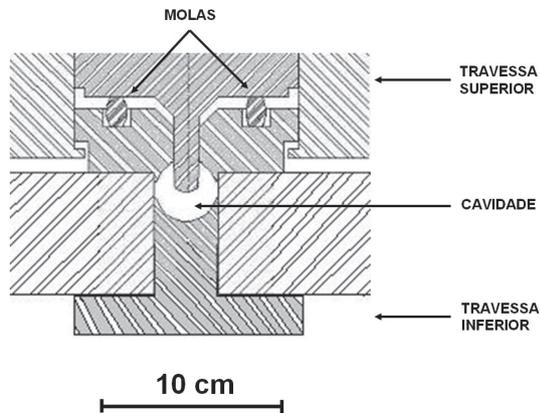
### Conformação

A matriz para a prensagem flutuante de duplo efeito foi projetada e construída pela CMC Tecnologia Ltda. (Cocal do Sul, SC). A matriz de compactação da referida prensa é apresentada esquematicamente na Figura 2. A prensa possui um sistema de mesa flutuante e uma matriz que permite a prensagem uniaxial de duplo efeito.

Para tornar reproduzível o processo de conformação da massa cerâmica, foi realizado o controle de uma série de parâmetros de processo como a quantidade exata de 45 g de pó a preencher a cavidade da matriz, correta setagem dos parâmetros da prensa para obtenção de uma pressão específica de 150 MPa sobre o sistema particulado e o controle do tempo de compactação do

**Tabela 1.** Propriedades das matérias-primas segundo a ABNT-NBR-ISO 6474 (1998) e ASTM F 603-83 (1995). **Table 1.** Properties of raw materials according to ABNT-NBR-ISO 6474 (1998) and ASTM F 603-83 (1995).

Propriedade	Unidade	Requisitos Ortopédicos
Teor de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% peso	> 99,5
Aditivo de sinterização: MgO	% peso	≤ 0,3
Impurezas: SiO <sub>2</sub> + CaO + óxidos	% peso	≤ 0,1
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	≥ 3,94
Tamanho médio de grão	µm	≤ 4,5 ± 2,6
Resistência à flexão	MPa	≥ 250
Resistência à compressão	MPa	> 4000
Módulo de elasticidade	GPa	> 380



**Figura 2.** Representação esquemática da matriz utilizada na prensagem flutuante de duplo efeito.  
**Figure 2.** Schematical representation of mold used for double effect pressing with floating table system.

pó de 5 s. A Figura 3 apresenta esquematicamente a seção transversal da cavidade de prensagem que dará forma à peça prensada.

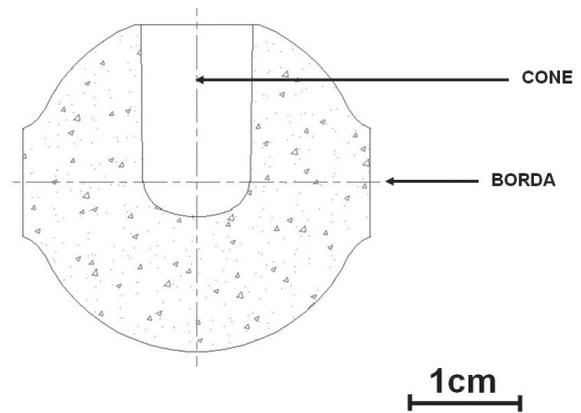
### Queima

A curva de queima dos corpos a verde foi otimizada em pré-testes, confrontado as propriedades requeridas, como tamanho de grão, densidade, resistência mecânica e temperatura de sinterização. A queima das peças foi realizada em forno de resistência elétrica da marca Lenton, com taxas de aquecimento de 95 K/h até atingir a temperatura de sinterização de 1540 °C, com patamar de 3 horas. O esfriamento foi natural, procedido com as peças dentro do forno. As peças foram divididas em cinco queimas (com nove peças cada) para reduzir a influência do carregamento do forno sobre a eficiência de queima das mesmas.

### Usinagem

A etapa de acabamento superficial dos corpos cerâmicos compreendeu o processo de usinagem e polimento com rebolos diamantados. O acabamento foi aprimorado com a diminuição do tamanho de grão abrasivo dos rebolos tanto para a parte externa como para a região do cone interno, pontos esses considerados críticos (Piconi *et al.*, 1999).

O princípio de funcionamento da retífica cerâmica projetada fundamenta-se na composição simultânea dos movimentos de três eixos: a rotação da peça (esfera), a rotação da ferramenta e o movimento de todo o conjunto retífica com relação ao rebolo fixo. A potência da máquina, rotação máxima e seu estado de conservação (ocorrência de vibrações, folgas) são



**Figura 3.** Geometria da seção transversal da cabeça femoral após a prensagem.  
**Figure 3.** Geometry of conformed ball head transversal section after the pressing.

fatores importantes. Especial atenção foi dada para o alinhamento do centro virtual da esfera com o centro de rotação da ferramenta, de forma a tornar reproduzível o processo da usinagem. O líquido lubrificante utilizado constituiu-se de uma solução à base de óleo mineral solúvel diluído em água. O polimento foi obtido pela substituição do rebolo diamantado por um dispositivo tipo copo saturado com pasta de diamante aplicada internamente.

### Caracterização física e mecânica

Para o controle do processo de queima, foi determinada a retração linear (utilizando-se um paquímetro Mitutoyo com fundo de escala de 150 mm e resolução de 0,02 mm), além da análise tridimensional, via *software* Geopak em uma *Coordinate Measuring Machine* (CMM) da Mitutoyo. As amostras queimadas foram caracterizadas para averiguação das exigências estabelecidas pela norma ABNT NBR-ISO 6474 (1998). Na caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos corpos-de-prova, foram determinadas densidade real e aparente, porosidade e absorção de água, microdureza e resistência mecânica.

A densidade real foi determinada usando um picnômetro a gás hélio fabricado por Quantachrome Corporation, modelo MVP-01. Para os ensaios de porosidade aparente, absorção de água e densidade aparente foi utilizado o método hidrostático que emprega o princípio de Arquimedes. O ensaio de microdureza foi realizado com um microdurômetro, marca Buehler. A carga de indentação utilizada foi de 0,5 N, com tempo de penetração de 15 s e obtenção de imagem por uma câmera acoplada ao aparelho.

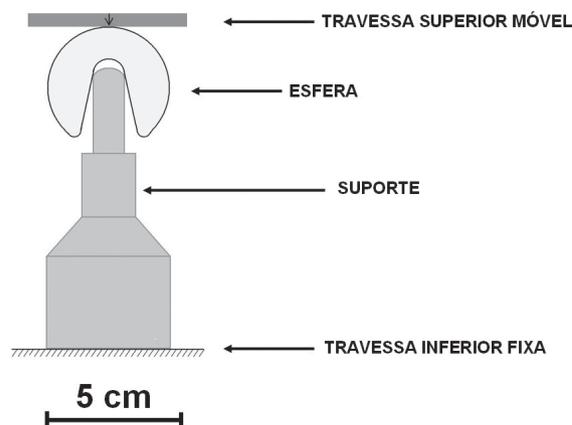
O ensaio de resistência mecânica foi realizado em uma máquina universal de ensaios ATS, modelo 1105 C com célula de carga de duas toneladas, onde foi acoplado um dispositivo para posicionamento vertical da esfera, esquematicamente apresentada na Figura 4.

Após o ensaio de resistência mecânica a compressão alguns fragmentos das amostras foram submetidos à análise microestrutural, realizada via microscópio eletrônico de varredura Phillips XL-20. Para a realização da análise microestrutural foi necessário um ataque térmico da amostra (40 minutos a 1400°C), com o intuito de destacar os contornos de grão. Para a avaliação da presença de trincas na superfície do corpo cerâmico foi procedida a análise por imersão em líquido penetrante durante cinco minutos. A solução de líquido penetrante foi preparada na concentração de 0,01% de azul de metileno ( $C_{16}H_{18}N_3SCl \cdot 3H_2O$ ) em álcool etílico.

### Resultados e Discussão

Com relação a tradicional prensagem isostática a quente, a prensagem flutuante de duplo efeito apresenta vantagem de maior produtividade e menor custo de instalação. A principal vantagem na utilização da mesa flutuante sobre a prensagem uniaxial de duplo efeito está na obtenção de uma melhor homogeneidade de densificação na compactação das partículas junto às paredes da matriz. O formato esférico do interior da cavidade da matriz desenvolvida facilita a distribuição do pó atomizado para preenchimento por igual de toda a cavidade e conseqüentemente menor fator de heterogeneidade na densificação. Para o controle da densificação na prensagem, foi determinada a densidade a verde de 2,26 g/cm<sup>3</sup> através do método de imersão em mercúrio, correspondente à média de três medidas.

Foi observado que após queima as peças apresentaram uma coloração bege, característica de alumina de alta pureza, provavelmente proveniente da presença de impurezas residuais como ferro, sódio e outros. A análise visual após ensaio de líquido penetrante não evidenciou nenhum defeito significativo na superfície das esferas, como trincas. Quanto à retração linear, o resultado obtido para a média geral de todos os corpos-de-prova foi de 16,8%. Com esta retração linear, o ajuste dimensional após queima exigiu processos de usinagem e polimento para a redução de 1,0 mm no diâmetro da esfera, a fim de se alcançar o diâmetro final almejado de 28 mm com o respectivo acabamento superficial final apropriado. A média geral da perda ao fogo foi de 0,37%.



**Figura 4.** Geometria do ensaio de resistência mecânica.  
**Figure 4.** Geometry of the mechanical test used.

A densidade real após queima, obtida por picnometria, foi de 3,94 g/cm<sup>3</sup>, complementando o valor da densidade aparente média de 3,95 g/cm<sup>3</sup>, indicando o alcance de uma boa densificação (Tabela 2). Da mesma forma, os baixos valores de porosidade aparente e absorção de água são indicativos de uma elevada densificação. Além de satisfazerem às exigências descritas na referida norma, esses valores não diferem muito dos valores encontrados na literatura para corpos cerâmicos com a mesma aplicação, mas obtidos pelo processo de prensagem isostática a quente.

O resultado da avaliação de microdureza revela a elevada dureza superficial dos corpos cerâmicos obtidos através da prensagem flutuante de duplo efeito. A elevada dureza serve como indicativo da resistência ao desgaste do componente, tendo em vista que este atuará como uma articulação. A presença de um lubrificante influencia bastante no processo de desgaste adesivo. Neste contexto, a qualidade de acabamento superficial da alumina obtida e o molhamento da superfície com os fluidos fisiológicos são essenciais para uma expectativa de vida útil condizente com a sua função. Os resultados obtidos na caracterização dos corpos-de-prova após queima são apresentados na Tabela 2.

Como parte complementar a conformação e queima das peças cerâmicas está à etapa de usinagem da esfera cerâmica. A usinagem de componentes cerâmicos tem enorme importância na qualidade do acabamento dos produtos obtidos. Esta é influenciada significativamente pelas características da máquina de usinagem e pela ferramenta utilizada. Aqui o controle da vibração da máquina/ferramenta e da peça sendo desgastada mostrou-se fator crucial para a obtenção do corpo cerâmico com boa qualidade superficial e dimensional.

**Tabela 2.** Propriedades dos corpos cerâmicos após queima. **Table 2.** Properties of ceramic bodies after firing.

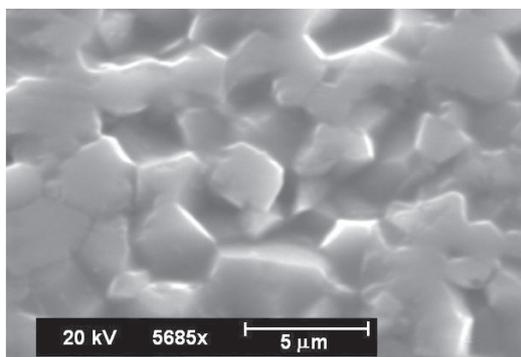
Queima	(HV <sub>0,5N</sub> )	PA (%)	AA (%)	DA (g/cm <sup>3</sup> )
1	1992	0,28	0,08	3,94
2	2132	0,25	0,06	3,95
3	2066	0,27	0,07	3,94
4	2034	0,30	0,09	3,95
5	2184	0,18	0,05	3,96
<b>Média</b>	<b>2081,6</b>	<b>0,26</b>	<b>0,07</b>	<b>3,95</b>

HV<sub>0,5</sub>=Dureza Vickers; PA=porosidade aparente; AA=absorção de água, DA=densidade aparente.

Após a sinterização, a dureza associada à fragilidade da cerâmica, dificulta a remoção do material por desgaste e dependendo das condições de usinagem poderá haver a introdução de sérios defeitos bem como a indução de tensão residual na superfície das peças usinadas com o conseqüente comprometimento da resistência mecânica do componente usinado (Kingery *et al.*, 1976).

Também aqui é importante considerar a esfericidade das esferas cerâmicas produzidas após usinagem. A média geral dos resultados obtidos revela um desvio de esfericidade máximo de 22 mm, devido provavelmente ao nível de vibração de usinagem, evidenciando a importância da estabilidade e rigidez do dispositivo de usinagem (Wrege e Purquerio, 1999).

A carga de ruptura nos ensaios de resistência à compressão obtida para a média geral de todos os corpos-de-prova foi de 13 kN. Porém, a aplicação da carga no ensaio levado a efeito é sobre uma área muito menor do que a disponível no caso real, induzindo uma



**Figura 5.** Microscopia eletrônica de varredura da microestrutura da esfera cerâmica evidenciando o tamanho médio de grão de 2,6 μm. Phillips XL-20, Potencia do feixe de 20.000 Volts, Aumento de 5685 X.  
**Figure 5.** SEM micrographies showing the microstructure of the ceramic sphere evidencing the average grain size of 2,6 μm. Phillips XL-20, High voltage of 20.000 Volts, Magnification of 5685 X.

concentração de tensões, pior condição de serviço da prótese (Toni *et al.*, 2000).

Através da micrografia da Figura 5, pode-se observar a microestrutura típica das amostras cerâmicas obtidas. O procedimento para determinação do tamanho médio de grão de 2,6 mm foi baseado no método de intercepto linear conforme a norma ASTM (American Society for Testing and Materials - Standard Test Methods for Determining Average Grain Size) E 112 (1996). Pode-se observar ainda pelas imagem obtida (de uma região de fratura) a elevada densificação obtida pelo processo de prensagem uniaxial de duplo efeito com mesa flutuante.

### Conclusão

A prensagem flutuante de duplo efeito como processo alternativo de conformação de cabeças femorais em cerâmica à base de alumina é uma técnica ainda em desenvolvimento pela indústria biomédica mundial, mas pode ser uma solução de mais baixo custo e eficaz, capaz de substituir ou ao menos otimizar o custoso e demorado processo de prensagem isostática a quente.

Neste trabalho foi possível a fabricação de componentes de alumina para aplicação como cabeça femoral em próteses de quadril via processo de prensagem flutuante de duplo efeito. O processo de prensagem flutuante de duplo efeito permitiu chegar próximo ao formato final da peça, trazendo como benefício uma redução significativa no trabalho de usinagem, e conseqüentemente, no custo final do produto. Os corpos cerâmicos obtidos apresentaram propriedades que satisfazem às exigências da norma ABNT NBR-ISO 6474 em termos de densificação, tamanho médio de grão e resistência mecânica.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Metrologia da Unisinos em São Leopoldo/RS pela análise tridimensional, ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica e, em

especial, à empresa CMC Tecnologia Ltda pelo apoio logístico e técnico para a realização deste trabalho.

## Referências

- ABNT NBR-ISO 6474 (1998), *Materiais Cerâmicos à Base de Alumina de Alta Pureza*, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil.
- ASTM F 603-83 (1995), *Standard Specification for High Purity, Dense Aluminum Oxide for Surgical Implant Application*, New York: ASTM.
- ASTM E 112 (1996), *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*, New York: ASTM.
- Fredel, M.C. (1998), *Materiais Cerâmicos Bioinertes*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Hench, L. L. & Wilson, J. (1999), *An Introduction to Bioceramics*, World Scientific Publishing Company, London: Word Scientific Publishing.
- Hippert, E., Azevedo, C. R. F. (2001), Alguns casos de análise de falhas de implantes cirúrgicos, In: *Boletim Técnico do Instituto de Pesquisas Tecnológicas*, São Paulo, v. 2755, p. 1-20.
- Hübner H., Dörre E. (1984), *Alumina*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
- Kingery, W. D.; Bowen, H. K.; Uhlman, D. R. (1976), *Introduction to Ceramics*, Second Edition. New York: John Wiley & Sons.
- Nevelos, J. E., Ingham, E., Doyle, C., Nevelos, A. B., Fisher, J. (2001), "Wear of HIPed and non-HIPed alumina-alumina hip joints under standard and severe simulator testing conditions", *Biomaterials*, v. 22, n. 16, p. 2191-2197.
- Piconi, C., Labanti, M., Magnani, G., Caporale, M., Maccauro, G., Magliocchetti, G. (1999), "Analysis of a failed alumina THR ball head", *Biomaterials*, v. 20, n. 18, p. 1637-1646.
- Ratner, B. D. (1996), *Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine*, New York: Academic.
- Ravaglioli, A., Krajewski, A. (1992), *Bioceramics: Materials, Properties, Applications*. New York: Chapman & Hall.
- REED, J. S. (1988), *Introduction to the Principles of Ceramic Processing*, New York: John Wiley & Sons.
- Toni, A., Terzi, S., Sudanese, A., Bianchi, G. (2000), "Fracture of ceramic components in total hip arthroplasty", *Hip International*, v. 10, n. 1, p. 49-56.
- Zavaglia, C. A. C. (1993), *Aplicações de Biocerâmicas em Próteses Ortopédicas*, Tese de Livre Docência, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 116 p., Maio.
- Willmann, G., Heros, R. J. (1998), "Ceramics in total Hip Arthroplasty: History, Mechanical Properties, Clinical Results, and Current Manufacturing State of the Art", *Seminars in Arthroplasty*, v. 9, n. 2, p. 114-122.
- Wrege, P. A. S., Purquerio B. M. (1999), "Desenvolvimento de uma geradora de esferas de cerâmica para próteses de quadril", In: *Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Águas de Lindóia, 9 p., Novembro.