



16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering

Engineering for the New Millennium

MECHANICAL SYSTEM DESIGN AND OPTIMIZATION

ISBN 85-85769-06-6

MODELAGEM DO PROCESSO DE PRENSAGEM ISOSTÁTICA DE PÓS CERÂMICOS UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Rodrigo Bresciani Canto

Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Trabalhador São Carlense, 400 - Cx. P. 359 - CEP 13566-590 - São Carlos, SP, Brasil.
Fax: +55 16 273 9402 - canto@sc.usp.br

Volnei Tita

Jonas de Carvalho

Benedito de Moraes Purquerio

Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Trabalhador São Carlense, 400 - Cx. P. 359 - CEP 13566-590 - São Carlos, SP, Brasil.
Fax: +55 16 273 9402 - voltita@sc.usp.br; prjonas@sc.usp.br; purquerio@sc.usp.br

Resumo. O trabalho apresenta uma simulação do processo de prensagem isostática de cerâmica de alumina utilizando o método dos elementos finitos (MEF) visando uma previsão da forma e dimensões finais do componente prensado. Neste estudo foi analisada a conformação de esferas (hiperesferas) de cerâmica para implantes de quadril. Relata os materiais utilizados na prensagem dos componentes e os modelos e métodos empregados na simulação computacional. Compara e discute os resultados obtidos nas análises numéricas relativamente aos obtidos no componente fabricado.

Palavras chave: prensagem isostática, elementos finitos, pós cerâmicos, alumina.

1. Introdução

O processo de prensagem isostática (*wet bag*), tradicionalmente utilizado na produção de velas de ignição de motores automotivos, é caracterizado pela grande uniformidade e alta qualidade dos produtos gerados. Atualmente, este é o método mais utilizado pela indústria de componentes cerâmicos de precisão, tais como: componentes de bombas, bicos de solda, ferramentas de usinagem, parte de motores automotivos e de máquinas ferramentas e aplicações biomédicas. O processo consiste basicamente no confinamento de um material cerâmico granulado no interior de um molde elastomérico o qual é submetido à uma pressão isostática. Após este processo de conformação, o componente prensado pode ser usinado e sinterizado, dependendo das características exigidas pelo produto.

Apesar da grande uniformidade da densidade alcançada nesse processo, há uma dificuldade em se prever formas e dimensões finais obtidas no componente após a prensagem, que dependem exclusivamente do projeto adequado do molde elastomérico. Atualmente, o procedimento utilizado na indústria para projetar o molde elastomérico é o de “tentativa-erro”, auxiliado por cálculos simples de compactação ou por informações resultantes de experiências anteriores. Enquanto o comportamento de muitos materiais de engenharia é bastante conhecido e estudado, o comportamento dos materiais granulados ainda vem sendo desenvolvido (Henderson et al, 2000). Visando resolver tal limitação, o projeto do molde elastomérico pode ser realizado com o auxílio de ferramentas computacionais, que possibilitem modificar as formas e dimensões do molde partindo de um protótipo virtual até atingir a geometria adequada. Dessa forma a simulação do processo de prensagem isostática é de importância fundamental para determinação da dimensão e da geometria final da peça após a prensagem, permitindo a avaliação e o estabelecimento da quantidade de sobrematerial necessária para posterior usinagem. Assim o componente prensado pode ser obtido na forma e tolerância dimensional final desejada. Este sobrematerial, quando em excesso, representa para o produto final uma parcela significativa de custos, não só pelo desperdício do material utilizado, como também pelo gasto adicional em usinagem, acabamento e tempo de mão-de-obra.

No presente trabalho a simulação do processo de prensagem isostática foi realizada utilizando um programa de elementos finitos comercial (ABAQUS®), atribuindo-se para a modelagem do pó cerâmico o modelo de material de Drucker-Prager/cap, que é adequado para materiais granulados e muito empregado em problemas da mecânica dos solos.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

O material utilizado neste estudo foi desenvolvido por Wrege et al (1999) e apresenta a composição que se segue:

- 99,90% em peso de Alumina S5G - 99,5%
Granulometria: # 325 mesh.
Procedência: Alcan Alumínio do Brasil S.A.

Lote: Silo B lote 24.
 Densidade Compactada: 1,20g/cm³.
 Área superficial: 0,95 m²/g.
 Diâmetro esférico equivalente: 4,08 µm.

- Álcool polivinílico (PVAL).
 Procedência: Vetec Química Fina Ltda.
 Especificação: para síntese.
 Densidade Compactada: 1,20g/cm³.
 Lote: 861451.
 Peso molecular: 72.000.
- MgO de alta pureza 0,25% em peso.
 Procedência: Labsynth Produtos para Laboratórios Ltda.
 Especificação: Para análise com teor mínimo de 99%.
 Peso Molecular: 40,30.
 Lote: 23488.

2.2. Métodos

2.2.1. Processo de prensagem isostática

O processo de prensagem isostática consiste na utilização de um molde elastomérico flexível, onde a sua cavidade é preenchida por pó-cerâmico. Posteriormente o molde é selado e introduzido num vaso de pressão de uma prensa isostática *wet bag*, onde é pressionado isostaticamente pela ação de um fluido. O fluido, quando pressurizado, comprime a parede externa do molde, gerando o compactado à verde, que posteriormente poderá ser usinado e sinterizado, dependendo das características exigidas pelo produto (Wrege et al, 1999). Como estudo de caso para este trabalho foi utilizada uma esfera cerâmica para implante de quadril cuja conformação foi efetivada sob uma pressão de 200 MPa. O molde para a confecção desse componente, mostrado na Fig. (1), é formado basicamente por quatro partes: carcaça, molde elastomérico, núcleo metálico e tampa. Após o preenchimento da cavidade do elastômero, as diferentes partes são montadas e travadas na parte inferior pela tampa com rosca onde se encontra fixado o núcleo metálico através de um parafuso. Em seguida o molde é colocado no vaso de pressão da prensa onde lhe é aplicado a carga externa isostática. Esse trabalho foi desenvolvido por Wrege (2000).

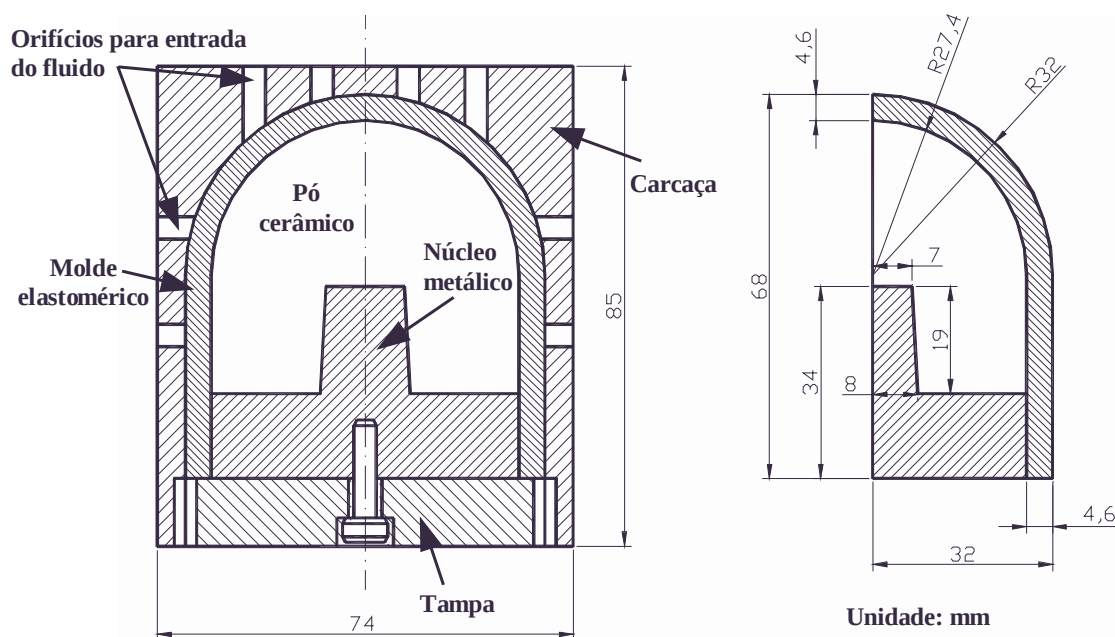


Figura 1. Molde para prensagem isostática de uma esfera cerâmica para implante de quadril (Wrege et al, 1999).

2.2.2. Análise pelo método dos elementos finitos

Para simular o processo de compactação do pó cerâmico, deve-se considerar a ocorrência de três fases durante o carregamento compressivo desse material (Henderson et al, 2000).

- A acomodação dos grãos nos espaços vazios. Esse mecanismo ocorre geralmente quando as tensões hidrostáticas são baixas quando comparadas às de cisalhamento (por exemplo durante a vibração do molde) ou no início da aplicação de uma pressão isostática.
- A deformação entre os grãos. Esta ocorre quando a pressão aplicada é suficientemente alta para que haja um escoamento do material aglomerado.
- A ruptura dos grãos.

Dessa forma, os mecanismos desenvolvidos ao longo do processo de compactação acarretam um comportamento não linear desses materiais e a resistência do material aumenta à medida que é compactado. Apesar de ser um meio descontínuo, costuma-se adotar a hipótese da continuidade para esse tipo de material a fim de se empregar as teorias matemáticas de elasticidade, plasticidade e viscosidade quando se fizerem necessárias (Chen et al, 1985). O modelo modificado de Drucker-Prager/*cap*, ilustrado na Fig. (2), é adequado para representar o comportamento do material e, segundo Hibbit et al (2000), nesse modelo a superfície de escoamento do material é formada por dois segmentos: uma superfície de escoamento por cisalhamento introduzida por Drucker-Prager e uma outra superfície envoltória (*cap*) que intercepta o eixo das tensões hidrostáticas. A superfície de Drucker-Prager é uma superfície de escoamento perfeitamente plástica, já a envoltória (*cap*) limita a superfície de escoamento no eixo de tensões hidrostáticas, possibilitando um mecanismo de encruamento inelástico que representa a compactação plástica e auxilia no controle da variação volumétrica quando o material escoar por cisalhamento, proporcionando um certo amolecimento. Tal fenômeno é representado pelo modelo quando há aumento do volume inelástico, e quando há escoamento do material na superfície de plastificação por cisalhamento de Drucker-Prager.

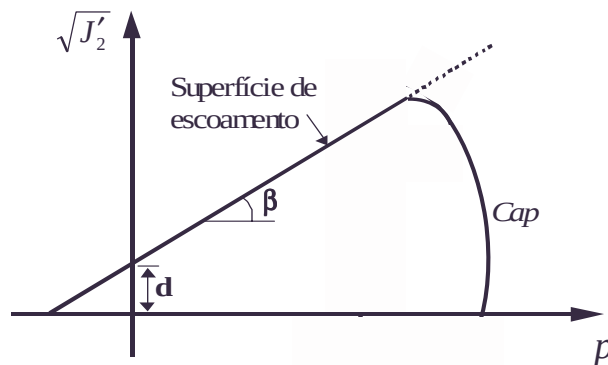


Figura 2. Modelo de Drucker-Prager/*cap* utilizado para representar o material cerâmico granulado (Aydin et al, 1996).

Na simulação do processo, modelou-se o pó-cerâmico confinado na cavidade interna do molde elastomérico, aplicando condições de contorno de modo a representar a modelagem do molde elastomérico e o núcleo metálico conforme mostrado na Fig. (3). Foram utilizados elementos axissimétricos tipo CAX4 de 4 nós. A região interna limitada pelo núcleo metálico foi representada por restrições aos nós, permitindo-lhes somente os deslocamentos paralelos às linhas, com exceção da base onde foram restringidos os deslocamentos vertical e horizontal. Na linha de interface com o elastômero foi aplicada uma pressão de compressão uniforme de 200 MPa. O molde elastomérico não foi considerado na análise a fim de simplificá-la, porém a presença deste exerce influência na análise por possibilitar a previsão de possíveis distorções no componente (Henderson et al, 2000). Os parâmetros utilizados na modelagem e no critério de escoamento do modelo de Drucker-Prager/*cap* foram obtidos de maneira análoga aos obtidos por Aydin et al (1996) e Canto et al (2001), e são apresentados na Tab. (1). A curva que representa a evolução do encruamento do material é dada pela Eq. (1) e foi obtida por Canto et al (2001).

$$p_b = 1.562 + 0.070 \times 10^{4.786 \epsilon_{vol}^{pl}} \quad (1)$$

Tabela 1. Parâmetros empregados no modelo de material.

β - Coeficiente de atrito interno do material	16,5°
d - Coesão (MPa)	3,0
E - Módulo de elasticidade (MPa)	2850
ν - Coeficiente de Poisson	0,278
R - parâmetro de forma da curva <i>cap</i>	0,558
α - parâmetro de forma da curva <i>cap</i>	0,03

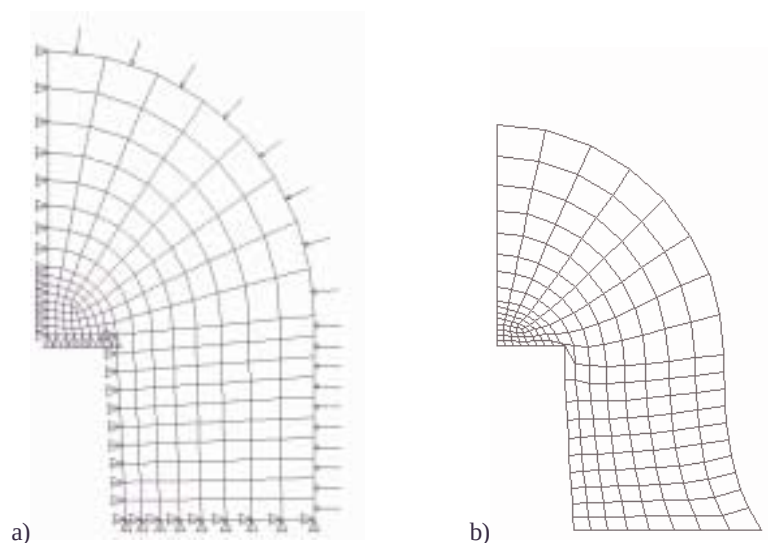


Figura 3. Malha de elementos finitos do modelo simétrico ao eixo (axissimétrico) da esfera de cerâmica.
a) estado inicial com condições de contorno b) estado compactado.

3. Resultados e discussões

Os resultados obtidos retratam com aproximação a forma e dimensões finais do componente prensado, quando comparadas às formas obtidas do componente fabricado, mostrada na Fig. (4). A região superior e a região próxima à base do núcleo metálico não foram previstas com grande precisão pela análise numérica. Além das limitações do modelo de material utilizado e as aproximações dos ensaios e cálculos dos parâmetros adotados, acredita-se que tal fato também foi influenciado pelas simplificações do modelo, onde a ausência da parcela de rigidez do molde elastomérico e o atrito entre o núcleo metálico e o material cerâmico não foram considerados. A diminuição desse erro pode ser obtida com aprimoramento do modelo, como por exemplo a introdução do molde elastomérico, e do núcleo metálico na análise.

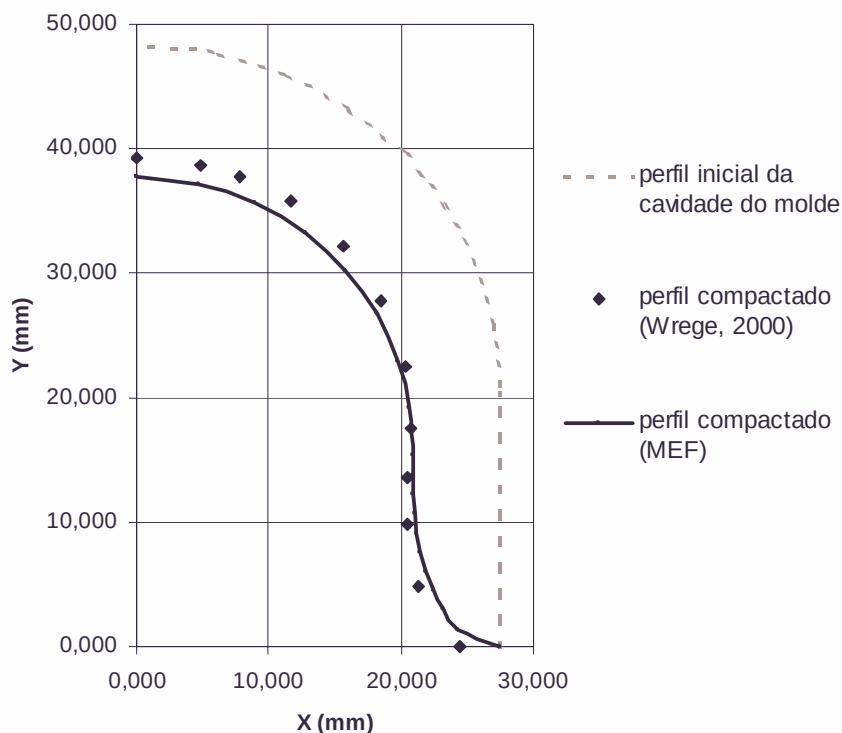


Figura 4. Comparação entre resultados obtidos por análise numérica (MEF) e as dimensões experimentais do componente.

5. Conclusões

No presente trabalho constatou-se a viabilidade da utilização do modelo de material de Drucker-Prager/cap na representação do comportamento do pó cerâmico, que permitiu a obtenção de resultados coerentes com o resultado obtido do processo. Este procedimento pode ser estendido à outros tipos de componentes, com geometrias mais complexas onde o projeto do molde possa ser otimizado segundo exigências de forma e dimensões do componente pretendido. Contudo, conclui-se que a simulação do processo de prensagem isostática é uma técnica vantajosa para auxiliar no projeto de moldes para prensagem isostática, para adequar a quantidade de sobrematerial do componente cerâmico para posterior usinagem à verde.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP, CAPES e CNPq pelo financiamento concedido e ao Departamento de Estruturas – EESC - USP pela disponibilização do programa ABAQUS®.

7. Referências

- Aydin, I., Briscoe, B.J., Sanlitürk, K.Y., 1996, “The internal form of compacted ceramic components: a comparison of a finite element modeling with experiment”, Powder Technology, Vol.89, pp. 239-254.
- Canto, R.B., Tita, V., Carvalho, J., Purquerio, B.M., 2001, “Finite element simulation of ceramic powder isostatic pressing process using material parameters of a uniaxial compaction”, Third International Latin-American Conference on Powder Technology – PTECH 2001, Florianópolis - SC, a ser publicado.
- Chen, W.F., Baladi, G.Y., 1985, “Soil plasticity – Theory and implementation”, Ed. Elsevier, 231 p.
- Henderson, R.J., Chandler H.W., Akisanya A.R., et al., 2000, “Finite element modeling of cold isostatic pressing”, Journal of European Ceramic Society, Vol. 20, pp. 1121-1128.
- Hibbit, Karlsson and Sorensen, 2000, “ABAQUS User’s Manual”, Vol. 2, Version 6.1.
- Wrege, P.A.S., 2000, “Metodologia para a obtenção de esferas de cerâmica para próteses de quadril”, Tese de Doutorado, EESC, 186 p.
- Wrege, P.A.S. e Purquerio, B.M., 1999, “Desenvolvimento de cerâmicas para próteses de quadril: conformação e usinagem”, 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Florianópolis – SC.

8. Direitos autorais

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

CERAMIC POWDER ISOSTATIC PRESSING PROCESS MODELLING USING FINITE ELEMENT METHOD

Rodrigo Bresciani Canto

Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Trabalhador São Carlense, 400 - Cx. P. 359 - CEP 13566-590 - São Carlos, SP, Brasil
Fax: +55 16 273 9402 - canto@sc.usp.br

Volnei Tita

Jonas de Carvalho

Benedito de Moraes Purquerio

Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Trabalhador São Carlense, 400 - Cx. P. 359 - CEP 13566-590 - São Carlos, SP, Brasil
Fax: +55 16 273 9402 - voltita@sc.usp.br; prjonas@sc.usp.br; purquerio@sc.usp.br

Abstract. *This paper presents the results of finite element simulations of the isostatic pressing process. For this study, it is simulated the isostatic pressing of ceramic spheres for hip implant stem. This has been used through a Drucker-Prager/cap model within the commercial finite element code ABAQUS®. The simulations give good agreement with measured manufactured components.*

Keywords. *Isostatic pressing, ceramic powder, finite element.*