

PROJETO DO DISPOSITIVO PARA GERAÇÃO DE ALTA PRESSÃO DE 8,0 GPa E TEMPERATURA 2.000°C, UTILIZANDO A PRENSA DE 2500 TONELADAS DE FORÇA¹

Guerold Sergueevitch Bobrovnitchi²
Rômulo Crespo Tardim³

Resumo

Para realização de pesquisas sob alta pressão alta temperatura e desenvolvimento de novos materiais superduros são necessários os chamados dispositivos de alta pressão (DAP). O mundo científico e industrial utiliza três diferentes tipos de DAP. No Brasil, já há bastante tempo, com finalidade científica, são utilizados os DAP tipo bigorna com concavidade central. A realidade tecnológica brasileira é a seguinte: para pressões da ordem de 5,0 GPa existe o DAP com volume aumentado, enquanto que para pressões de 8,0 GPa, os mesmos possuem volume reduzido. Neste trabalho, pretende-se solucionar esta inconveniência com o desenvolvimento do DAP para geração de 8,0 GPa no volume aumentado. Com base na teoria de recipientes compostos, foi calculado que o cintamento para bigorna do tipo toroidal garante a geração de tensões prévias da ordem de 1100 MPa na bigorna de metal duro (WC+6%Co). Os desenhos desenvolvidos possibilitaram a fabricação posterior. Como testes foram utilizadas calibrações de alta pressão e alta temperatura em função da pressão p_1 no cilindro principal da prensa de 2500 toneladas, e corrente elétrica do aquecedor.

Palavras-chave: Alta pressão; Alta temperatura; Dispositivo de alta pressão; Materiais superduros.

DEVELOPMENT OF A HIGH PRESSURE DEVICE FOR PRODUCING 8.0 GPa AND 2000° C, IN A 2500 TON-PRESS

Abstract

High pressure high temperature and novel superhard materials researches are carried out through High Pressure Devices (HPD). The scientific and industrial worlds make use of three different types of HPD. In Brazil, for a long time, under a scientific issue, there are central concavity anvils HPD being used. The technological situation of HPDs follows: pressure up to 5.0 GPa are related with a great useful volume. On the other hand, pressures up to 8.0 GPa are restricted to a reduced volume. For that reason, this paper aims to solve that inconvenience by developing a HPD capable to produce pressure up to 8.0 GPa in larger volumes. Based on the composed containers theory, it can be affirmed that wrapping can create previous stresses up to 110 MPa around the hard metal (WC+6%Co) anvil. The developed drawings made the manufacturing of the device possible. For testing it, high pressure and high temperature calibration procedures were carried out, using the pressure of the main cylinder of the press and the electrical current of the heater as parameters.

Key words: High pressure; High Temperature; High pressure device; Superhard materials.

¹ *Contribuição técnica ao 6° Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 20 a 22 de agosto de 2008, São Paulo, SP*

² *Professor Emérito do SMSD/LAMAV - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Av. Alberto Lamego, 2000, Campos dos Goytacazes, RJ – Brasil. CEP 28013-600.*

³ *Graduando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UENF.*

1 INTRODUÇÃO

As altas pressões (acima de 5,0 GPa) e altas temperaturas são responsáveis pelo surgimento do diamante sintético no ano de 1953. A partir desta data, as altas pressões entraram em quase todos os ramos da indústria, principalmente na produção de materiais superduros, sem os quais é impossível o desenvolvimento avançado da indústria moderna.

Síntese e sinterização de diamante, nitreto cúbico de boro e materiais superduros em geral são realizadas sob altas pressões e altas temperaturas na região de sua estabilidade termodinâmica.^(1,2)

Para geração dos tais altos p , T – parâmetros são aplicadas matrizes especiais chamadas dispositivos de alta pressão e alta temperatura (DAP) que possuem construções e estruturas variadas. No momento atual, são registradas mais de 400 patentes relacionadas com construções de DAP. Apesar da ampla diversidade de soluções técnicas, as pesquisas científicas e a produção industrial de materiais superduros utilizam, em sua quase totalidade, apenas três tipos de DAP: bigornas com concavidade central, Belt, e multipistões.^(3,4) Dentre estes três tipos, destaca-se o bigorna com concavidade central pelos seguintes motivos:

- Menor consumo de metal duro por unidade de material superduro produzido;
- Simplicidade de construção;
- Simplicidade de operação e manutenção.

A primeira construção de um DAP tipo bigorna foi desenvolvida no ano 1972.⁽⁵⁾ Depois da realização de testes, a construção do DAP com concavidade esférica (em forma de segmento esférico) foi recomendada para utilização na indústria de produção de materiais superduros. A exigência da indústria por produtividade provocou o aparecimento do DAP com concavidade tipo cônico-esférica.⁽⁶⁾

Estes tipos de DAP foram utilizados principalmente para síntese de materiais superduros utilizando pressões na faixa entre 5,5 a 6,5 GPa e temperaturas de 1.250°C a 1.600° C.

Com a crescente demanda por compósitos a base de materiais superduros que, para sua produção, exigem pressões de até 8,0 GPa, a construção do DAP tipo bigorna com concavidade sofreu mudanças, surgindo então a bigorna toroidal.⁽⁷⁾

2 ESQUEMA DE CONSTRUÇÃO DO DISPOSITIVO TIPO BIGORNA TOROIDAL

Este tipo de DAP é utilizado na UENF para pesquisas tecnológicas já há bastante tempo, junto com a prensa de 630 toneladas de força.⁽⁸⁾ Ele apresenta vantagens em relação aos valores dos p , T – parâmetros, vida útil e facilidade de preparação de componentes para operações de síntese e sinterização sob pressões de até 7,7 GPa e temperaturas de até 2.000° C. A única desvantagem é o fato de o volume da célula reativa estar limitado a 0,15 cm³. O DAP tem suas particularidades que, em parte, podem ser observados na Figura 1.

O funcionamento acontece da seguinte maneira: na concavidade da parte inferior é instalada a cápsula deformável (6). O conjunto de partes (1) do DAP e a cápsula (6) são posicionados coaxialmente no interior da prensa. A bomba hidráulica da prensa é ligada e o pistão começa a ascender, aproximando as partes (1 e 1') do DAP e, finalmente, deformando a cápsula (6). Esta aproximação das partes forma a gaxeta (8), gerando na câmara de compressão formada pelas concavidades, a alta pressão. Ao atingir o patamar de pressão necessária para trabalho, a corrente

elétrica do aquecimento é ligada até um nível pré-estabelecido, passando através da bigorna (5) e da célula reativa (7), aquecendo o material comprimido até a temperatura desejada. Depois da manutenção da pressão hidráulica e da corrente elétrica por algum tempo, o aquecimento é desligado e, em seguida, a pressão é aliviada. O DAP é retirado da prensa e desmontado, revelando o produto obtido.

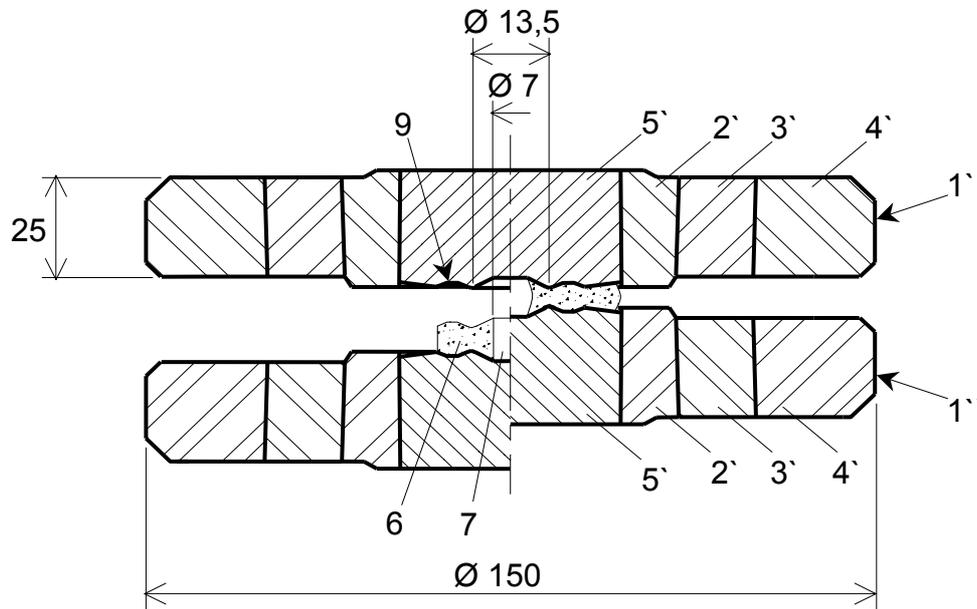


Figura 1. Dispositivo de alta pressão tipo bigorna toroidal com concavidade central de diâmetro 13,5 mm, onde: 1' e 1'' – discos superior e inferior; 2, 3 e 4 – anéis de aço para o cintamento; 5 – bigorna de metal duro; 6 – cápsula deformável de calcita; 7 – célula reativa; 8 – gaxeta deformada; 9 – concavidade semitoroidal.

Evidentemente, os parâmetros reais de tratamento, a pressão dentro da câmara de compressão e a temperatura devem ser calibrados através da utilização de uma metodologia especial.

Este dispositivo em questão foi oferecido pela empresa russa “Tomilino” sem o fornecimento dos desenhos de fabricação. A experiência acumulada na utilização deste DAP possibilita o desenvolvimento deste tipo de construção para forças mais potentes.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DO DAP TIPO BIGORNA TOROIDAL COM CONCAVIDADE CENTRAL COM 30 MM DE DIÂMETRO

Na UENF encontra-se instalada outra prensa com 2500 toneladas de força que funciona somente para a síntese de diamantes em pó, utilizando o DAP tipo bigorna com concavidade central com 55 mm de diâmetro. Este DAP é feito em aço rápido e possibilita a geração de pressões somente até 5,0 GPa.⁽⁹⁾ A prensa é equipada com um mecanismo de instalação do DAP em seu interior e, por este motivo, o diâmetro externo do acessório é limitado ao diâmetro de 360 mm. A seguir será apresentada a metodologia de cálculo de diâmetros dos anéis de cintamento, escolha dos materiais para os elementos, tensões atuantes e outras particularidades relacionadas com o desenvolvimento do novo DAP.

3.1 Dimensões dos Elementos do DAP

As dimensões da bigorna de metal duro foram calculadas tendo como padrão as dimensões da bigorna da prensa de 630 toneladas de força. Conhecendo a força necessária para gerar a pressão de 8,0 GPa na bigorna com concavidade de 13,5 mm de diâmetro e que a nova bigorna tem o diâmetro da concavidade de 30 mm, foi determinado o seguinte para o novo DAP: diâmetro externo da bigorna - 95 mm; profundidade da concavidade - 5,73 mm; concavidade semitoroidal com diâmetros 37,5 e 56,6, e profundidade de 2,0 mm. Foi determinado que o material da bigorna deve ser o metal duro de composição WC+6%Co, e para os três anéis de cintamento os aços AISI 4140 (interno e intermediário) e AISI 4340 (externo). O cintamento consiste na utilização dos três anéis encaixados um dentro do outro com aperto. O valor do aperto para cada um dos anéis será calculado mais adiante.

Em conformidade com a metodologia apresentada por Bobrovnitchii,⁽¹⁰⁻¹³⁾ os diâmetros dos anéis do cintamento podem ser calculados utilizando a seguinte fórmula:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \quad (1)$$

onde: K – coeficiente de espessura de parede do cintamento, ou $K=r_1/r_4$;
 r_1 – raio da bigorna ou diâmetro interno do anel interno;
 r_4 – raio externo do cintamento ou raio externo do anel externo;
 $K_1=r_1/r_2$ – coeficiente de espessura de parede do anel interno;
 r_2 – raio externo do anel interno ou raio interno do anel intermediário;
 $K_2=r_2/r_3$ – coeficiente de espessura do anel intermediário;
 r_3 – raio externo do anel intermediário ou raio interno do anel externo;
 $K_3=r_3/r_4$ – coeficiente de espessura de parede do anel externo.

Sabendo que o coeficiente de espessura real do cintamento do novo DAP é limitado por $K=95/360=0,2639$, em conformidade com Bobrovnitchii,⁽¹³⁾ podem ser calculados os diâmetros dos anéis de cintamento:

$$K_{1,2,3} = \sqrt[3]{K} = 0,6415; \quad 2r_2 = \frac{2r_1}{0,6415} = \frac{95}{0,6415} = 148 \text{ mm}; \quad 2r_3 = \frac{2r_2}{0,6415} = 231 \text{ mm} \quad (2)$$

Portanto, o diâmetro dos anéis são: $d_1=95$ mm, $d_2=148$ mm, $d_3=230$ mm.

O desenho da parte do DAP a ser fabricado é apresentado na Figura 2. Mas ainda é necessário determinar os valores de aperto entre os anéis e bigorna, para garantir a integridade dos elementos durante a geração dos parâmetros propostos.

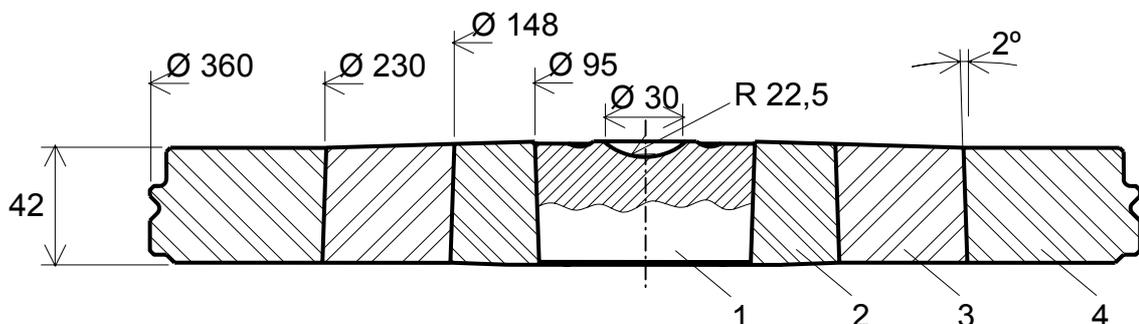


Figura 2. Parte do DAP: 1 – bigorna; 2 – anel interno; 3 – anel intermediário; 4 – anel externo.

3.2 Valores da Tolerância de Ajuste do Aperto e Estado de Tensão do Cintamento

Para determinar os valores da tolerância de ajuste do aperto para os elementos do DAP apresentado na Figura 2, é necessário determinar o somatório das pressões que irão atuar nas superfícies de contato entre todos os elementos durante a montagem e o funcionamento.

Para realização dos cálculos destas grandezas são aplicadas as chamadas fórmulas de Lamé⁽¹⁴⁾ modificadas conforme a metodologia apresentada por Bobrovnitchii.⁽¹¹⁻¹³⁾ Além disso, é preciso determinar a pressão de contato resultante que irá atuar na superfície lateral da bigorna. O valor desta pressão depende da resistência do cintamento e da bigorna durante o carregamento. Na Figura 3 é apresentado esquematicamente o estado do carregamento da bigorna pela força, F , e pressão de apoio lateral, p_{1W} .

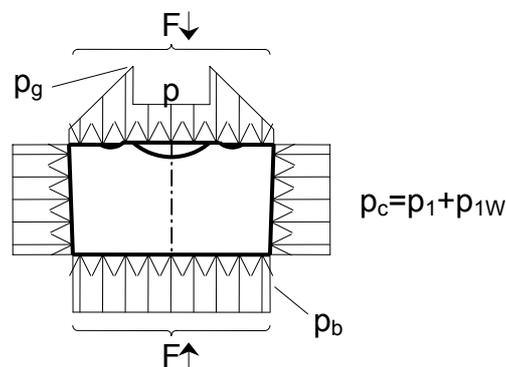


Figura 3. Esquema de carregamento da bigorna durante a geração de alta pressão, p , na concavidade central: p_g – distribuição da pressão na região de formação da gaxeta; p_{1W} – pressão complementar de contato entre cintamento e bigorna; p_b – pressão média de contato na base da bigorna; p_1 – pressão de aperto do cintamento; p_c – pressão de contato resultante.

A pressão, p_b , na base da bigorna foi tomada como constante por razões práticas. O valor da força F da prensa para atingir a alta pressão de $p=8,0$ GPa na câmara de compressão foi calculado de maneira proporcional, considerando as dimensões, pressão e forças aplicadas no DAP com concavidade de diâmetro 13,5 mm. Sob a força $F=2100$ toneladas, o disco (bigorna) de metal duro, carregado com a pressão p_b distribuída uniformemente nos topos, se deforma nos sentidos axial e radial. Conseqüência disto é que a deformação radial é responsável pelo aumento da pressão de contato na superfície lateral da bigorna.

$$\delta_b = p_b \frac{h_b \cdot \mu_1}{E_1} = 2964,2 \frac{4,5 \cdot 0,22}{6,2 \cdot 10^6} = 0,0048 \text{ cm} \quad (3)$$

onde: h_b – altura do disco da bigorna;
 μ_1 – coeficiente de Poisson do metal duro;
 E_1 – módulo de elasticidade do metal duro.

A pressão de contato complementar provocada pela deformação radial que surge durante o trabalho e atua no cintamento é a seguinte:

$$p_{1W} = \frac{\frac{\delta_b}{2r_1}}{\frac{1-\mu}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left(\frac{r_4^2 + r_1^2}{r_4^2 - r_1^2} + \mu_2 \right)} = 60 \text{ MPa} \quad (4)$$

Utilizando a terceira teoria de Moor pode ser calculada a pressão de contato necessária para o apoio da bigorna, gerada pela montagem com aperto:

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 - \nu \cdot \sigma_3 = -2964,2 + 0,2 \cdot \sigma_3 \leq [\sigma]_{com} = 500 \text{ MPa} \quad (5)$$

onde: σ_{eq} – tensão equivalente;

$[\sigma]_{com}$ – tensão admissível do metal duro (WC+6%Co) em compressão;

σ_1 – tensão de compressão axial da bigorna;

σ_3 – tensão radial ou p_1 na superfície lateral da bigorna;

$\nu = \sigma_{tr} / \sigma_{com}$ – módulo da diferença das tensões de tração e compressão para metal duro.

Então, $\sigma_3 = p_1 = 1000$ MPa. Considerando a pressão complementar $p_{1W} = 60$ MPa, a pressão do cintamento sobre a bigorna tem que ser $p_1 = 1060$ MPa.

Para calcular as pressões de contato entre os anéis foi utilizada a mesma metodologia⁽¹⁵⁾ com modificações das fórmulas de Lamé. O diagrama de distribuição de tensões no cintamento é apresentado na Figura 4. O cálculo foi feito considerando a igualdade de tensões tangenciais responsáveis pela tração para cada diâmetro interno de cada anel. Esta distribuição garante o funcionamento eficiente do cintamento se, para os anéis interno e intermediário puder ser utilizado o aço AISI 4140 com elevada dureza, e para o anel externo o aço AISI 4340 que por sua elevada plasticidade pode garantir a integridade dos outros anéis temperados com dureza na faixa entre 52 e 58 HRC.

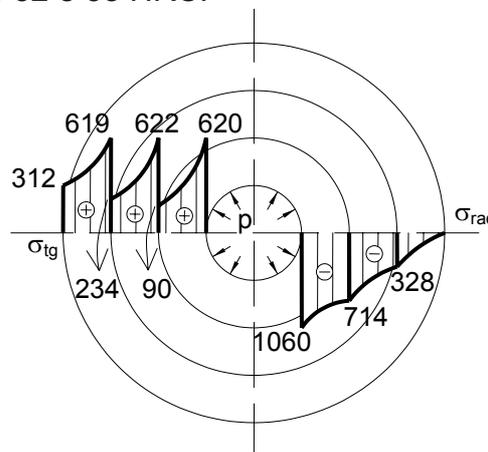


Figura 4. Esquema de distribuição de tensões nos anéis do cintamento do novo DAP para a prensa com 2500 toneladas de força.

3.3 Calibração e Teste do DAP

O DAP junto com a cápsula montada, que serve como meio comprimível, foi calibrado na prensa com força de 2500 toneladas em função da pressão, $p_2 = f(p_1)$, e temperatura, $T = f(I)$ ou $T = f(W)$; onde p_2 – pressão na câmara de compressão do DAP, p_1 – pressão no cilindro principal da prensa, T – temperatura dentro da célula reativa, I ou W – corrente ou potência elétrica do aquecimento. A metodologia utilizada corresponde à apresentada por Bobrovnitchii.⁽¹⁶⁾

Como resultado dos testes, é possível afirmar que o dispositivo é capaz de gerar altas pressões igual a 8,0 GPa sob ação da força de 2050 toneladas pela prensa, e temperaturas em torno de 2000° C durante 5 min.

4 CONCLUSÕES

- A tentativa de elaborar o projeto de um dispositivo de alta pressão tipo bigorna com concavidade central de 30 mm visando a geração de altas pressões até 8,0 GPa e temperatura até 2000° C indicou que a realização deste processo é possível nas atuais condições da indústria brasileira;

- Esta construção apresenta um avanço no desenvolvimento da ciência de altas pressões em toda a América Latina;

- Depois da fabricação, o dispositivo deve ser testado para determinação da sua vida útil e uso tecnológico racional.

REFERÊNCIAS

- 1 BUNDY, F.P.; BOVENKERK, H.P.; STRONG, H.M.; WENTORF, R.H. Diamond-Graphite Equilibrium from Growth and Graphitization of Diamond. **J. Chem. Phys.**, 1961, v. 35, n. 2, p. 383-391.
- 2 BUNDY, F.P.; WENTORF, R.H. Direct transformation of hexagonal boron nitride to denser forms. **J. Chem. Phys.**, v. 38, n. 5, p. 1144-1149.
- 3 BOBROVNITCHII, G.S.; SKURY, A.L.D.; RAMALHO, A.M.; MONTEIRO, S.N. Tendências do desenvolvimento das tecnologias de produção dos materiais superduros no Brasil. In: 56 Congresso Anual da ABM Internacional, Anais. São Paulo: Tec Art Editora Ltda, 2001, v. 1. p. 50-59.
- 4 BOBROVNITCHII, G.S.; SKURY, A.L.D. Algumas considerações sobre a produção mundial de materias superduros. In: 55 Congresso da ABM, Anais. Rio de Janeiro: ABM, 2000, v. 1. p. 1522-1531.
- 5 Patente da Grã-Bretanha n° 1360281, ICL B01J 3/60. Apparatus for development of high pressures and high temperatures. VERESTSHAGIN, L.F.; BAKUL, V.N.; SEMERCHAN, A.A.; et al. publ. 17.07.74.
- 6 Patente dos EUA n° 3782043, ICL B30B 11/32. High pressure high temperature device. BAKUL, V.N.; PRIKHNA, A.I.; SHULZHENKO, A.A. publ. 08.05.73.
- 7 Patente dos EUA n° 3854854, ICL B30B 11/32. High pressure producing apparatus. VERESTSHAGIN, L.F.; KHVOSTANTSEV, L.G. publ. 17.12.74.
- 8 BOBROVNITCHII, G.S.; HOLANDA, J.N.F. Cold consolidation of ATR-niobium powder under high pressure. **J. of Materials Processing Technology**, v. 170, p. 187-191, 2005.
- 9 BOBROVNITCHII, G.S.; OSIPOV, A.S.; SIDERIS JUNIOR, A.J. Preparation of Mg-Ni alloys through high pressure treatment, **Journal of Alloys and Compounds**, v. 372, 88-91, Elsevier, 2004.
- 10 BOBROVNITCHII, G.S.; RAMALHO, A.M.; CARVALHO, E.A. Determinação da pressão ótima nos cilindros de prensas e dispositivos hidráulicas . In: Anais do V Congresso de Engenharia Mecânica Norte Nordeste, 1998, Fortaleza, Ceará, v. 3. p. 572-579.
- 11 BOBROVNITCHII, G.S.; SIDERIS JUNIOR, A.J.; RAMALHO, A.M.; TARDIM, R.C. Desenvolvimento do recipiente composto de multielementos para geração de alta pressão hidrostática até 2,0 GPa destinado a hidroextrusão e compactação. In: 4° Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, Anais. São Paulo: Tec Art Editora Ltda, 2006. v. 1. p. 95-102.

- 12 BOBROVNITCHII, G.S.; RAMALHO, A.M.; SIDERIS JUNIOR, A.J. Projeto do recipiente composto de multielementos para extrusão a quente. In: 4° Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, Anais. São Paulo: Tec Art Editora Ltda, 2006. v. 1. p. 87-94.
- 13 BOBROVNITCHII, G.S.; RAMALHO, A.M.; SIDERIS JUNIOR, A.J. Projeto de um recipiente composto de alta capacidade para extrusão de ligas de alumínio: Cálculo de construção real. In: 2° Encontro de Integrantes da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes, Anais. 2004. v. 1. p. 232-246.
- 14 TIMOSHENKO, S.P. **Mecânica dos Sólidos**, Ed. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1994.
- 15 BOBROVNITCHII, G.S.; RAMALHO, A.M. Análise das tensões e superfícies de contato entre os anéis do cintamento do dispositivo de alta pressão tipo bigorna com concavidade. In: 55 Congresso da ABM, 2000, Rio de Janeiro. Anais do 55 Congresso da ABM. Rio de Janeiro: ABM, 2000. v. 1. p. 1245-1254.
- 16 BOBROVNITCHII, G.S.; VIANNA, W.S. Metodologia para a medição da temperatura no dispositivo de alta pressão com grande volume usado na síntese de diamantes. In: 60° Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte. Anais, v. 1, p. 3078-3087, 2005.