

APLICAÇÃO DA TEORIA DE EQUIVALÊNCIA PARA ANÁLISE DA METODOLOGIA DO ESTUDO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS SUBMETIDOS ÀS ALTAS PRESSÕES ¹

Serguei Alexandrovitch Vinogradov²

Guerold Sergueevitch Bobrovnitchii³

Resumo

Para geração de altas pressões de 3,0 até 10,0 GPa e altas temperaturas até 2000° C nos dispositivos de alta pressão utiliza-se o meio comprimível em forma de corpo sólido feito de minerais : pirofiliita e calcita. O sucesso da geração de altas pressões depende do comportamento dos materiais empregados para este caso durante a deformação entre as superfícies de trabalho do dispositivo. Os estudos feitos para determinar a espessura crítica da gaxeta formada pelo material do meio comprimível apresentaram os resultados diferentes, pois foram utilizados materiais, metodologias variáveis, e dispositivos diferentes. Tudo isto está exigindo a elaboração do método de avaliação dos resultados já obtidos. Foi proposta a análise generalizada dos resultados experimentais obtidos durante a compressão do material testado para gaxeta nas bigornas de Bridgman pela introdução dos critérios de equivalência que leva as condições correspondentes com resultados experimentais. As dependências entre os critérios de equivalência podem ser utilizadas para estudos simplificados das propriedades de materiais novos nas bigornas de Bridgman.

Palavras-chave: Alta pressão; Meio comprimível; Gaxeta; Bigornas de Bridgman.

APPLICATION OF THEORY OF SIMILARITY FOR ANALYSIS OF METODOLOGY MATERIALS PROPERTIES RESEARCH BY HIGH PRESSURE

Abstract

For the generation of high pressures from 3,0 GPa to 10,0 GPa and high temperatures over 2000°C in the high pressure apparatus, there is a solid pressure-transmitting media made of minerals like pirofilitite and calcite. The success of high pressure generation depends on the material behavior used in this case during the deformation between the work surfaces of the high pressure equipment. Studies to determine the critic thickness of the gasket formed by pressure-transmitting media material showed different results because there were used different materials, methodologies, and devices. All this demand the elaboration of an evaluation method of the results obtained at the actual moment and in the future. It was proposed a general analysis of experimental results obtained during the test of the compressive material to be used as gasket in the Bridgman anvils by the introduction of an equivalence criterion that takes the corresponding conditions with experimental results. The dependences between the equivalence criterions can be used for the study on new material properties in the Bridgman anvils.

Key words: High pressure; Pressure-transmitting media; Gasket; Bridgman anvils.

¹ *Contribuição técnica ao 62° Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

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 *Pesquisador Sênior do Instituto de Materiais Superduros da Academia de Ciências da Ucrânia, Kiev.*

1 INTRODUÇÃO

A física da alta pressão e a ciência dos materiais são ligadas com os chamados dispositivos de alta pressão (DAP), que são capazes de gerar a alta pressão de 3,0 até 10,0 GPa e temperatura até 2000° C.^(1,2) Como meio comprimível, devido às condições de aquecimento, utiliza-se material sólido mineral, tipo pirofilita ou calcário em forma de cápsula deformada.^(3,4) O fechamento da câmara de compressão realiza-se pela formação da gaxeta por extrusão ou compressão do material da cápsula entre as partes móveis do DAP.⁽⁵⁾

As características físico-mecânicas dos materiais que contribuem para a geração de alta pressão e alta temperatura determinam o nível da pressão gerada dentro da câmara de compressão, o valor admissível da temperatura e também a segurança da sua manutenção durante o tempo pré-estabelecido.

Os materiais mais estudados que se usam para geração de alta pressão são: pirofilita (para DAP tipo Belt)⁽⁶⁾ e calcita ou calcário (para DAP tipo bigorna com concavidade).⁽⁷⁾ Para os DAP tipo multipistões servem ambos os materiais. Mas os problemas técnicos e o desenvolvimento de outras tarefas científicas que podem ser solucionadas pela alta pressão que exigem a busca de novos materiais para este serviço. Então, o estudo do comportamento de novos materiais sob altas pressões e altas temperaturas sempre é tarefa principal.

O progresso lento nesse ramo das pesquisas é condicionado, de um lado, pelo fato que a pirofilita e a calcita satisfazem, em geral, às exigências tecnológicas que são conservadores, e, de outro lado, pelo fato que as tecnologias desenvolvam-se, tendo em vista os materiais existentes que não fazem muita mudança nas construções dos DAP e processamento.

A busca dos materiais pode ser feita ou por testes sucessivos dos materiais “candidatos”, ou à base de critérios que incluem as características físicas-mecânicas padronizadas determinadas por testes padronizados. A segunda opção é predominante, pois ela, de um lado, baseando-se ao modelo desenvolvido do comportamento do material, permite de maneira mais racional, não fazendo os experimentos prévios, escolher os materiais necessários, e, de outro lado, permite ampliar a base das características padronizadas, fazendo-lhes acessíveis para utilização comum. Este conceito está propondo a necessidade de condições de generalização e na sua base a determinação de critérios de comparação dos resultados das pesquisas das propriedades físico-mecânicas dos materiais para cápsula dos DAP de tipos e dimensões variáveis, realizadas com auxílio de bigornas de Bridgman.⁽⁸⁾ Este método pode ser baseado em métodos da teoria da equivalência e análise dimensional.

Para justificar esta proposta pode ser considerado que a análise comparativa das propriedades dos materiais em condições de carregamento por força está supondo que há equivalência do estado de tensão e de deformação (em conformidade com a terminologia “materiais testam-se em condições iguais”), pois qualquer mudança do tipo do estado de tensão leva à mudança das propriedades mecânicas dos materiais. Por exemplo, é bem conhecido o fenômeno de transferência dos materiais de estado frágil em estado plástico sob a mudança do estado de tensão da compressão uniaxial para compressão tridimensional.⁽¹⁾

2 ANÁLISE DA QUESTÃO

Os limites da resistência em cisalhamento e compressibilidade são as características básicas mecânicas dos materiais sob altas pressões. As pesquisas experimentais do limite de resistência de cisalhamento dos materiais variáveis foi proposto realizar em bigornas de Bridgman⁽¹⁰⁾ pela compressão uniaxial dos discos planos fabricados de material testado. Nesse trabalho foi utilizada a metodologia da determinação comparativa qualitativa do limite de resistência em cisalhamento dos materiais variáveis sob o valor igual da força integral. Esta metodologia foi adotada em pesquisas anteriores.^(11, 12) Ela baseia-se em suposição que o valor relativo da espessura crítica do disco comprimido $h_c / 2R_0$ (onde $2R_0$ é diâmetro do topo plano carregado da bigorna) é a função da pressão média sobre o disco $F / \pi R_0^2$ para material testado. Sob a força F integral idêntica, o material com o valor alto do limite de resistência em cisalhamento tem o valor aumentado da espessura crítica, ou seja, há dependência linear $\tau = \tau(h_c)$. Segundo Wakatsuki, Ichinise e Aoki,⁽¹⁰⁾ a comparação dos materiais variáveis em relação à espessura crítica h_{c1}^m conservando a pressão média constante sobre a superfície de trabalho da bigorna, $F / \pi R_0^2$, é idêntico a sua comparação pelo limite de resistência em cisalhamento τ_c^m sob a pressão constante “p”. Onde: m- índice do modelo do material.

Depois desse primeiro passo, foram desenvolvidos os métodos analítico-experimentais da determinação da dependência do limite de resistência em cisalhamento em relação à pressão.^(7, 13-19)

Todos estes métodos são baseados em suposição que o material está totalmente no estado de deformação plástica e, por conseguinte, o estado de tensão depende da resistência do material às deformações cisalhantes.

A maioria dos autores tomou o tipo linear da dependência, pois ela tem a razão clara física e coincide pela sua forma com a lei conhecida como Coulomb para atrito superficial dos corpos sólidos. A base da solução da equação do equilíbrio do disco comprimido formado para suposições tomadas, busca-se a dependência entre os parâmetros medidos (espessura do disco, força integral sobre o disco e pressão no centro do disco) e a resistência em cisalhamento.

A comparação e também utilização dos resultados experimentais encontrados na literatura é difícil, pois eles foram obtidos em bigornas de Bridgman com diâmetros variáveis do topo plano. Além disso, a construção do disco mesmo comprimido e, por conseguinte, a correlação entre dimensões e materiais dos seus elementos construtivos também sofre variações. Os resultados obtidos para o sistema disco-bigorna são difíceis de utilizar em sistemas de outras dimensões. Mesma coisa acontece durante a troca dos materiais a serem utilizados, pois são desconhecidos os critérios correspondentes.

No presente trabalho pretende-se determinar os critérios da equivalência mecânica para caso da compressão do disco entre as bigornas planas de Bridgman e na base dos dados experimentais obter a dependência entre os critérios da equivalência para os sistemas geometricamente semelhantes “disco-bigorna”. Tal solução permite divulgar os resultados do estudo de um sistema, por exemplo compressão de um material determinado com próprias dimensões nas bigornas, para toda classe dos sistemas geometricamente semelhantes. Isto, de um lado, diminui o número de experimentos e, de outro, dá a possibilidade de determinar racionalmente a direção das pesquisas experimentais posteriores.

3 ARGUMENTAÇÃO TEÓRICA

A teoria de equivalência geral está dando a argumentação teórica para obtenção de critérios citados. Em conformidade desta teoria, todos os sistemas geometricamente semelhantes podem ser unidos em único grupo à base de complexos adimensionados cujas grandezas ficam constantes para todos sistemas do grupo. As regularidades físicas deles também podem ser apresentadas em forma de dependências entre esses complexos dimensionados que são nomeados como os critérios de equivalência.

Como são conhecidos, os fenômenos físicos são considerados equivalentes se eles decorrem de sistemas geométricos equivalentes, e, com tudo isso os campos de todos alternados do mesmo nome que descrevem o comportamento do sistema são equivalentes respectivamente, ou seja, para quaisquer momentos semelhantes do tempo os alternados do mesmo nome são proporcionais.⁽²⁰⁾ Para determinação da equivalência de dois sistemas físicos convém se apoiar sobre as condições indispensáveis e suficientes da equivalência que se baseiam em complexos adimensionais das grandezas que determinam o comportamento do sistema físico – o critério de equivalência. Há dois métodos da determinação dos critérios da equivalência física do sistema. O primeiro baseia-se em equações diferenciais que descrevem o seu comportamento. Outro está ligado com análise de dimensões. O segundo método é preferencial, pois ele não exige os conhecimentos sobre equações que descrevam o estado físico do disco comprimido. Basta somente determinar, à base do experimento, os valores que dispensam (ou implicam na influência) a influência significativa sobre processamento.^(20, 21)

Então, em conformidade com concepção da análise de dimensões em primeira etapa da solução do problema podem ser propostos os parâmetros básicos (que determinam este processo), a partir das compreensões presentes sobre o processo de compressão do disco:

$$F; R_0; r_0; h; \tau; p_0;$$

Onde: F - força integral atuante no disco; R_0 - raio externo do disco; r_0 - raio do furo central do disco; h - espessura do disco; τ - limite da resistência em cisalhamento do material do disco; p_0 - a pressão na parte central do disco limitado pelo r_0 .

Analisa-se disco com orifício interno central que serve para instalação do sensor ou célula de alta pressão. A distribuição da pressão na área deste orifício é constante. A força integral pode ser apresentada pela função:

$$F = f(R_0; r_0; h; \tau; p_0) \quad (1)$$

À base de Π , teorema⁽²⁰⁾ essa igualdade pode ser apresentada pela dependência entre critérios de equivalência, compostos de grandezas da equação (1).

Os critérios da equivalência são os complexos adimensionais e para obtê-los é recomendado utilizar o método apresentado em Alabujev.⁽²¹⁾ Em conformidade com este método entre os parâmetros determinantes (1) escolhe-se arbitrariamente os valores primários lineares independentes, ou seja, aqueles para quais o determinante composto de dimensões independentes é distinguido de zero.

Os valores de F , h , R_0 , se escolhe na qualidade de primários (independentes) e em qualidade de dimensões independente tomam $[F]$, $[L_z]$, $[L_r]$, respectivamente a dimensão de força, comprimento em direção ao eixo z e comprimento em direção do raio "r". Para estes valores o determinante composto de suas dimensões é distinto de zero:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1 \neq 0,$$

Ou seja, estas grandezas são linearmente independentes.

Os três valores restantes da equação (1) expressam-se através dos complexos primários ou em conformidade com Π - teorema⁽²¹⁾ de seis grandezas (1) que determinam o processo, pode compor neste caso os três complexos adimensionais, que se expressam nessa forma:

$$\Pi_1 = \frac{r_0}{[F]^{\alpha_r} [h]^{\beta_r} [R_0]^{\gamma_r}}; \quad \Pi_2 = \frac{p_0}{[F]^{\alpha_p} [h]^{\beta_p} [R_0]^{\gamma_p}} \quad \Pi_3 = \frac{\tau}{[F]^{\alpha_\tau} [h]^{\beta_\tau} [R_0]^{\gamma_\tau}}$$

Expressando os valores independentes através de dimensões independentes ([F]; [L_r]; [L_z]) pode ser obtido:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{[F]^0 \cdot [L_r]^1 \cdot [L_z]^0}{[F]^{\alpha_r} [L_z]^{\beta_r} [L_r]^{\gamma_r}} = [F]^{-\alpha_r} \cdot [L_r]^{(1-\gamma_r)} \cdot [L_z]^{-\beta_r}; \\ \Pi_2 &= \frac{[F] \cdot [L_r]^{-1} \cdot [L_z]^{-1}}{[F]^{\alpha_p} [L_z]^{\beta_p} [L_r]^{\gamma_p}} = [F]^{1-\alpha_p} \cdot [L_r]^{-1-\gamma_p} \cdot [L_z]^{-1-\beta_p}; \\ \Pi_3 &= \frac{[F] \cdot [L_r]^{-2} \cdot [L_z]^0}{[F]^{\alpha_\tau} [L_z]^{\beta_\tau} [L_r]^{\gamma_\tau}} = [F]^{1-\alpha_\tau} \cdot [L_r]^{-2-\gamma_\tau} \cdot [L_z]^{-\beta_\tau}; \end{aligned} \quad (2)$$

Pois os complexos escritos devem ser apresentados pelas grandezas adimensionais os índices do grau da potência, nos primeiros valores são iguais a zero, ou seja, é possível escrever, respectivamente, três sistemas das equações lineares em relação aos graus de potência desconhecidos:

$$1) \begin{cases} -\alpha_r = 0 \\ 1 - \gamma_r = 0 \\ -\beta_r = 0 \end{cases} \quad 2) \begin{cases} 1 - \alpha_p = 0 \\ -1 - \gamma_p = 0 \\ -1 - \beta_p = 0 \end{cases} \quad 3) \begin{cases} 1 - \alpha_\tau = 0 \\ -2 - \gamma_\tau = 0 \\ -\beta_\tau = 0 \end{cases}$$

As quais deram as três totalidades das grandezas do grau da potência para os complexos:

$$1) \begin{cases} \alpha_r = 0 \\ \gamma_r = 1 \\ \beta_r = 0 \end{cases} \quad 2) \begin{cases} \alpha_p = 1; \\ \gamma_p = -1 \\ \beta_p = -1 \end{cases} \quad 3) \begin{cases} \alpha_\tau = 1; \\ \gamma_\tau = -2; \\ \beta_\tau = 0; \end{cases}$$

Substituindo as grandezas obtidas, pelos índices dos graus em (2) podem aproximar-se aos três complexos adimensionais, quais são os critérios da equivalência:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{r_0}{[R_0]^1} = \frac{r_0}{R_0}; \\ \Pi_2 &= \frac{p_0}{[F] \cdot [h]^{-1} \cdot [R_0]^{-1}} = \frac{p_0 \cdot h \cdot R_0}{F}; \\ \Pi_3 &= \frac{\tau}{[F]^1 \cdot [R_0]^{-2}} = \frac{\tau \cdot R_0^2}{F}; \end{aligned} \quad (3)$$

Estes critérios favorecem a condição necessária da equivalência em conformidade de qual os dois sistemas são equivalentes, se os critérios correspondentes da equivalência destes sistemas compostos de parâmetros generalizados são iguais, ou seja em caso presente da compressão do disco a condição necessária da equivalência (3) apresenta-se em forma:

$$\Pi_1 = \frac{r_o}{R_o} = \text{idem} \quad (4.1)$$

$$\Pi_2 = \frac{p_o \cdot h \cdot R_o}{F} = \text{idem} \quad (4.2)$$

$$\Pi_3 = \frac{\tau \cdot R_o^2}{F} = \text{idem} \quad (4.3)$$

A primeira igualdade deste sistema expressa a condição da equivalência geométrica e os outros são as condições da equivalência mecânica.

A qualquer totalidade dos valores obtidos será o critério da equivalência.

De Alabujev⁽²¹⁾ é emprestado o termo “modelo” ao disco com propriedades conhecidas e “natural” ao disco cujas propriedades devem ser determinadas, e trocando o critério (4.2) pela correlação dos critérios (4.2) e (4.3) para chegar ao sistema das igualdades:

$$\frac{r_o^M}{R_o^M} = \frac{r_o^N}{R_o^N} \quad (5.1)$$

$$\frac{p_o^M \cdot h^M}{\tau^M \cdot R_o^M} = \frac{p_o^N \cdot h^N}{\tau^N \cdot R_o^N} \quad (5.2)$$

$$\frac{\tau^M \cdot (R_o^2)^M}{F^M} = \frac{\tau^N \cdot (R_o^2)^N}{F^N} \quad (5.3)$$

Onde: Índices “M” e “N” apresentam “modelo” e “natural”

A análise das igualdades (5.1-5.3) está gerando algumas conclusões, por exemplo:

1- Se o material, do disco é o mesmo para ambos os casos (equivalência simples), $\tau_M = \tau_N$ (5.3), segue a correlação:

$$F^M = F^N \frac{(R_o^2)^M}{(R_o^2)^N} \quad (6)$$

A igualdade (6) é a expressão da lei conhecida Barba-Kik,⁽²²⁾ os corpos do mesmo material geometricamente equivalente e carregado equivalentemente com mesmas forças externas recebem as tensões e deformações iguais sob única condição, se todas as forças são proporcionais ao quadrado das dimensões lineares.

2- A partir da igualdade (5.2) pode ser obtida a condição:

$$h^M = h^N \frac{R_o^M \cdot \tau^M}{R_o^N \cdot \tau^N} \quad (7)$$

considerando que a pressão no centro do disco é igual para “modelo” e “natureza” - $p_o^M = p_o^N$.

Esta expressão dá a dependência entre a espessura do disco comprimido e a grandeza do limite de resistência em cisalhamento. A partir de (7) é visto que durante a compressão do disco do mesmo material a sua espessura é diretamente proporcional ao raio da bigorna. Se até resolver as condições quais em comum

existem durante testes comparativos dos materiais em bigorna de Bridgman (as mesmas bigornas, $R_o^M=R_o^N$), a equação (7) reduz-se à dependência muito simples que expressa o fato experimental bem conhecido que é a espessura do disco comprimido sob a mesma pressão do centro do disco sendo diretamente proporcional à grandeza do limite da resistência em cisalhamento:

$$h^M = h^N \frac{\tau^M}{\tau^N} \quad (8)$$

3- É interessante analisar à base dos critérios obtidos da equivalência a metodologia proposta em (10) da avaliação comparativa do limite da resistência dos materiais em cisalhamento, considerando o valor da espessura crítica dos discos destes material que corresponde à mesma força integral sob a compressão nas bigornas de Bridgman. Basta transFigurar o grupo dos critérios (4), multiplicando o segundo com o terceiro critérios:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{r_o}{R_o} \\ \Pi_2 &= \frac{p_o \cdot h \cdot \tau \cdot R_o^3}{F^2} \\ \Pi_3 &= \frac{\tau \cdot R_o^2}{F} \end{aligned} \quad (9)$$

A análise comparativa das propriedades mecânicas dos materiais convém realizar em condições da equivalência geométrica e mecânica. A condição suficiente da equivalência dos sistemas é a igualdade dos dois quaisquer critérios da equivalência destes sistemas compostos de seus parâmetros principais e condições iniciais.⁽²¹⁾

A observação do segundo critério do grupo (9) e consideração da condição de sua igualdade para "natural" e "modelo", ou seja, dos materiais em comparação:

$$\frac{p_o^M h^M \tau^M (R_o^3)^M}{(F^2)^M} = \frac{p_o^N h^N \tau^N (R_o^3)^N}{(F^2)^N}$$

Em conformidade com o estudo $R_o=$ constante e $F=$ constante, então a essa igualdade, transforma-se em:

$$\begin{aligned} p_o^M \cdot h^M \cdot \tau^M &= p_o^N \cdot h^N \cdot \tau^N, \quad \text{de onde obtemos:} \\ h^M &= h^N \frac{p_o^N \tau^N}{p_o^M \tau^M} \end{aligned} \quad (10)$$

Da expressão obtida é visto que sob o valor constante da força atuante e conservação de condições da equivalência, a espessura do disco que corresponde ao equilíbrio (a espessura crítica⁽¹⁰⁾) não depende proporcionalmente do limite da resistência em cisalhamento do seu material e é a função da pressão no centro do disco. Isto é conseqüência de tal fato que para a conservação das condições da equivalência mecânica deve ser equivalente a distribuição das tensões, ou seja, em pontos parecidos a correlação das mesmas tensões deve ser constante. Isto significa que os diagramas de pressão ao longo do raio do disco são equivalentes geometricamente. Ao mesmo tempo é inteiramente evidente que para materiais diferentes com força igual à pressão no centro do disco será diferente e, conseqüentemente, os diagramas não serão equivalentes geometricamente, ou seja, a condição de equivalência mecânica também se perturbará.

Então, a metodologia oferecida em (10), da avaliação comparativa do limite da resistência em cisalhamento dos materiais diferentes, não é, a rigor, legítima do ponto de vista mecânico que é necessário ter em vista durante a sua utilização.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O material mais estudado na técnica de alta pressão é a pirofilita, por causa da sua ampla utilização nos dispositivos de alta pressão do tipo “Belt”. Nas bigornas com concavidade central tradicionalmente utilizam-se os diversos tipos de calcários. Entretanto, a colocação das tarefas técnico-científicas solucionadas com a ajuda da alta pressão colocam as novas exigências aos materiais usados. Ou por outras palavras, o estudo do comportamento de materiais sob alta pressão e temperatura sempre fica como um problema atual. O progresso lento nesta área de pesquisa é condicionado de um lado, por tal fato que pirofilita e calcário satisfazem, em geral, às exigências tecnológicas e, por outro lado, as tecnologias estão atreladas a esses materiais, limitando assim o desenvolvimento técnico-científico.

O desenvolvimento dos experimentos sobre o estudo do comportamento dos materiais sob alta pressão e temperatura é um problema trabalhoso e tecnicamente complexo. A determinação dos métodos que podem facilitar a sua solução é muito atual. A utilização da teoria de equivalência permite propor tais métodos.

Para justificar isso foram usados os dados do estudo experimental de dois materiais mais utilizados na geração de alta pressão – pirofilita e calcário (calcita) para a determinação das dependências entre os critérios da equivalência (4.2) e (4.3). Isto pode mostrar como, usando esses critérios, podem ser obtidos os dados sobre o comportamento dos outros materiais nas condições semelhantes.

Como pode ser visto de (4.2) e (4.3), para determinação da grandeza de critérios da equivalência física é necessário saber o valor da pressão no centro do disco p_0 , o valor correspondente do limite da resistência em cisalhamento τ e também a dependência entre a espessura corrente h e o valor da força integral. O critério (4.1) é a condição de equivalência geométrica, mas a deformação relativa do disco pode ser chamada também como o critério da equivalência Π_4 e ele pode ser apresentado em forma da deformação logarítmica:

$$\Pi_4 = \ln\left(\frac{h}{h_i}\right) \quad (11)$$

Onde: h_i e h – respectivamente, as espessuras iniciais e corrente do disco comprimido. Este critério é fácil obter, introduzindo no grupo dos parâmetros (1) determinantes a espessura inicial do disco h_i .

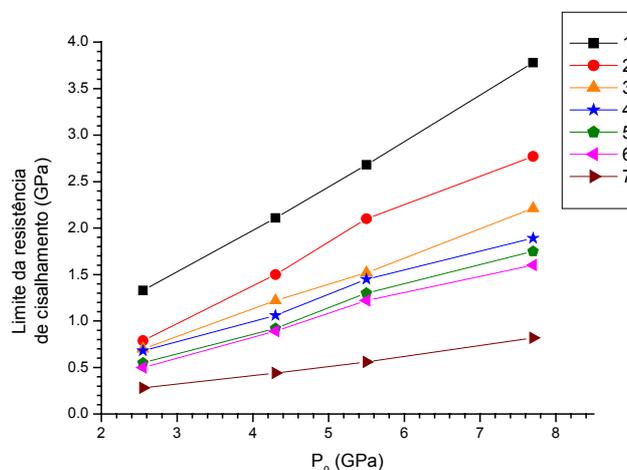


Figura 1 – Dependência entre o limite da resistência de cisalhamento e a pressão para pirofilita. 1 – [14]; 2 – [25]; 3 – [19]; 4 – [17]; 5 – [18]; 6 – [15]; 7 – [27]

A dependência entre novo critério “o valor de deformação Π_4 ” e critérios Π_2 e Π_3 é obtido de dados já publicados.^(11-19, 23-30) Análise destes trabalhos mostra que as grandezas do limite de resistência em cisalhamento “ τ ” da pirofilita e do calcário varia em limites amplos, que é condicionado não somente pela diferença das metodologias empregadas no estudo mas também pelas propriedades iniciais que é característica para os minerais.

Nas Figuras 1 e 2 são apresentados as dependências $\tau(p)$ na forma de funções lineares, respectivamente para a pirofilita e calcário construídas em conformidade de resultados dos trabalhos publicados.

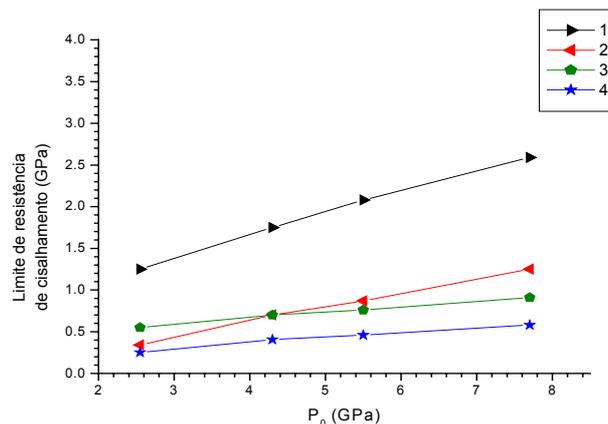


Figura 2 - Dependência entre o limite da resistência de cisalhamento e a pressão para calcário (calcita). 1 – [30]; 2 – [16]; 3 – [11]; 4 – [27]

Para diminuir a influência do erro ligado com método de tratamento de dados experimentais e com metodologia variável da realização de experimento é necessário usar para determinação dos critérios de equivalência, os dados obtidos em [11] para pirofilita e calcário prensado e em blocos. As dependências calculadas dos critérios (4.2) e (4.3) em relação à deformação logarítmica⁽¹¹⁾ são apresentados na Figura 3.

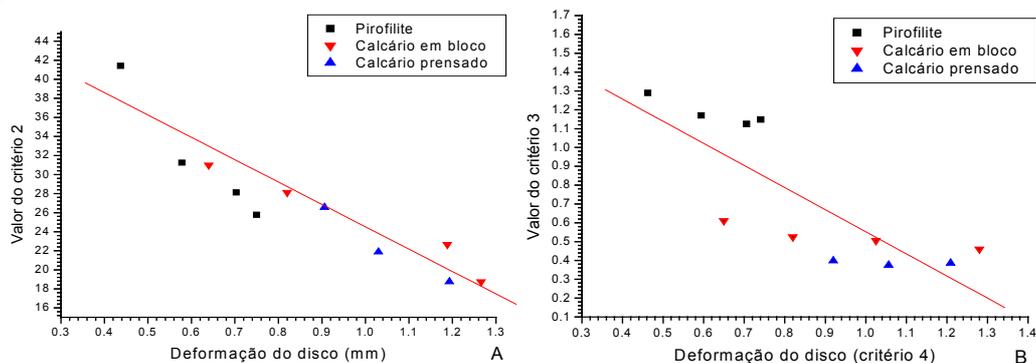


Figura 3 – Dependência entre os critérios Π_2 (A) e Π_3 (B) e valor da deformação logarítmica do disco comprimido Π_4 .

Como pode ser visto na Figura 3, observam-se as dependências determinadas dos critérios de equivalência Π_2 e Π_3 em relação ao critério Π_4 , que podem ser aproximados pela função linear com probabilidade de 80 e 65%, respectivamente. Essas dependências, em conformidade com a teoria da equivalência, ficam invariáveis para todos os discos comprimidos geometricamente equivalentes de materiais diferentes. Por isso, utilizando, por exemplo, a função $\Pi_3(\Pi_4)$ pode ser

determinado o valor do limite da resistência em cisalhamento do material do disco, e a função Π_2 (Π_4) dá a possibilidade de determinar a pressão no centro do disco.

De modo que, executando o estudo experimental geral da pirofilita e calcário, pode-se obter as características correspondentes para outros materiais, fazendo a quantidade limitada de experimentos simples: as medições diretas da espessura do disco h_i e uma força integral correspondente F . Tendo a dependência experimental $F(h_i)$ e usando as dependências entre os critérios da equivalência (4.1-4.3) é possível calcular o limite de resistência do material em cisalhamento ou a pressão no centro do disco para o material estudado. De tal modo que permita aliviar os estudos experimentais que busca os novos materiais.

Assim, utilizando os dados experimentais⁽¹²⁾ e dependência entre os critérios Π_3 e Π_4 (veja a Figura 3B) foi feito o cálculo, como exemplo, as dependências entre o limite da resistência em cisalhamento e pressão para os materiais estudados nesse trabalho (Figura 4).

No gráfico são mostrados os valores do limite da resistência em cisalhamento, os mesmos materiais obtidos experimentalmente com utilização das bigornas de Bridgman em rotação. Como pode ser visto (Figura 4) os dados experimentais coincidem satisfatoriamente com os calculados na região da pressão até 4,0 GPa.

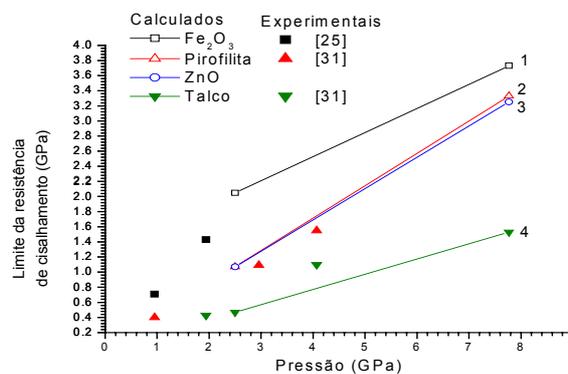


Figura 4 – Dependência experimental (■;▲;▼) e calculadas (□;△;○;▽) entre o limite da resistência de cisalhamento e a pressão para diversos materiais.

É lamentável que no momento atual não tenha a possibilidade de dar a justificativa completa dos dados calculados devido à falta de dados experimentais.

Finalizando, é necessário notar que a descrição acima apresentada é apenas uma aproximação metódica geral à realização dos experimentos e análise correspondente dos resultados que permitirão fazê-los acessíveis para utilização pelos outros pesquisadores e não pretende em plenitude da análise. O conjunto de critérios obtidos,⁽⁹⁾ não é diminutivo, pois não foram levados em conta as características elásticas do disco que não deve em hipótese alguma ser descartadas. Contudo neste trabalho foi tomado o modelo geralmente aceito do equilíbrio do disco comprimido, quando a força externa equilibra-se somente por conta da resistência do seu material às deformações cisalhantes. Considerar as propriedades elásticas é possível incluir no item dos valores já existentes (1) as características das propriedades elásticas do material do disco (módulo de compressão volumétrica, módulo de Young, coeficiente de Poisson, entre outros).

5 CONCLUSÕES

- A aplicação da teoria da equivalência permite fazer a análise geral dos dados experimentais obtidos durante os estudos da compressão de discos finos nas bigornas de Bridgman, introduzindo os critérios de equivalência que têm os mesmos valores para todos os sistemas “disco-bigorna” geometricamente equivalentes. Assim, os resultados apresentados de forma geral para um sistema concreto são justos para todos os sistemas geometricamente equivalentes.
- As metodologias utilizadas para avaliação comparativa da resistência ao cisalhamento dos materiais variável em relação à espessura do disco sob o valor constante da força atuante não é, a rigor, legítimo mecanicamente, pois a sua espessura é a função da pressão no centro do disco cujo o valor varia-se para os materiais variáveis. Os critérios elaborados estão em correspondência com resultados experimentais anteriores. E mesmo assim, a espessura do disco comprimido é diretamente proporcional ao valor da resistência ao cisalhamento sob a pressão igual no centro do disco. Tal conceito dá a importância não só da comparação qualitativa, mais também da quantitativa dos materiais variáveis para cápsulas dos dispositivos de alta pressão.
- Realizando o estudo completo experimental de um ou alguns materiais e apresentando os resultados de forma generaliza, é possível reduzir o estudo dos outros materiais aos métodos diretos mais fáceis, por exemplo, fazendo a medição da espessura do disco e da força integral, que é muito importante para a avaliação rápida dos materiais destinados para geração de alta pressão tanto nas condições laboratoriais, quanto na indústria.

REFERÊNCIAS

- 1 Ed. por SPAIN, J. I. e PAAUWE, J. **High pressure technology**. v.1 e v.2, 1979.
- 2 BUNDY, F. P. **Ultra-high pressure apparatus**. Phys. Rep.167, N°6, pp. 135-176, 1988.
- 3 HULSE, C. O.; GRAF, R. B. Effect of temperature on the mechanical properties of solid pressure-transmitting media II pirophylite. **Journal of Applied Physics**, n. 5, p. 1593-1596.
- 4 GERASIMOVITCH A.V.; GRIGOR`EV, N.M. A resistência ao cisalhamento dos materiais das gaxetas deformáveis dos dispositivos de alta pressão. **Journal of Superhard Materials**, n.1, p. 36-43, 1996.
- 5 BUNDY, F.P. Design and development of apparatus to achieve the highest possible static pressures. **Physics**. 1986-139, pp. 42-51.
- 6 GERASIMOVITCH, A.V., et all. Estudo das propriedades físico-mecânicas das pirofilitas sob alta pressão. **Journal of Superhard Materials**. n. 5, p. 10-14, 1998.
- 7 NOVIKOV, N.V.; LEVITAS, V. I., A solução do problema eixo simétrico sobre fluxo plástico do material em algumas câmaras de alta pressão. **Journal of Superhard Materials**. n. 5, p. 3-11, 1980.
- 8 BRIDGMAN, P.W. **Proc. Nat. Acad. Sci (USA)**, 81, p.165, 1952.
- 9 **Mechanical Behavior of materials under high pressure**. Ed. H.LI.D.Pugh. A.L.N,Y. p.296, 1970.
- 10 WAKATSUKI, M.; ICHINISE, K.; AOKI T., Notes on compressible gasket and Bridgman-Anvil type high-pressure apparatus. **Journal of Applied Physics**. n. 4, p.578-598, 1972.

- 11 BAKYL, V.N. et al. Dependência entre as tensões de cisalhamento e valor da pressão para pirofilita e pedra litográfica. **Synteticheskyye Almazy**, n. 2, p. 25-30, 1976 (em russo).
- 12 GERASIMOVITCH, A.V. et al. Estudo dos materiais das gaxetas deformáveis dos DAP. **Journal of Superhard Materials**. – n. 4, p. 9-11, 1982.
- 13 BANDYOPADHYAY, A. K. et al. Optimization of gasket thickness in a Bridgman anvil system. **Review of Scientific Instruments**, n. 8, p.1232-1235, 1981.
- 14 NISHIKAWA, N.; AKIMOTO, S., Bridgman anvil with an internal heating system for phase traps formation. **High temperature - High pressure**, p. 161-176, 1973.
- 15 OKAI, B.; YOSHIMOTO, J. Large Bridgman anvils and mechanical properties of pyrophyllite. **Ibid**, p. 675-678, 1973-5.
- 16 JACKSON, T.W.; WAXMAN M. An analysis of pressure and stress distribution under rigid Bridgman-type anvils. **High pressure measurement**. Ed. By A.A. Giardini, p. 39-58, 1963.
- 17 SIGALAS, I.; CLARK, J.B. Harts Shear strength measurements at high temperature and pressures. **High Press**, v. 15, p. 553-564, 1983.
- 18 OCAI, B.; YOSHIMOTO, J. Shear strength of pyrophyllite up to 80 kbar. **Japan. J. Appl. Phys**, v. 4, p. 534-535, 1971.
- 19 KAMARAD, I. A distribuição da pressão na gaxeta dos dispositivos de alta pressão. **Rev. Sci. Instruments**, n. 6, p. 161-162, 1980
- 20 GUKHMAN, A. A. **Introdução na teoria da equivalência**. Moscou. Ed. Escola Superior. p. 238, 1993 (em russo).
- 21 ALABUJEV, P. **Teoria de equivalência e dimensões. Modelagem**. Moscou Ed. Escola Superior, p. 206, 1968.
- 22 DAVIDENKOV, N. N. **Alguns problemas da mecânica dos materiais**. Lgjkizdat. p. 109-120, 1943. (em russo)
- 23 BRIDGMAN, P.W. **The physics of high pressure**. London: G. Bell and Sons Ltda. p 445, 1958.
- 24 HALL, H.T. **Progress in very high pressure research**. Ed. Bundy F.P. et al. N. Y. Wiley, p. 273, 1961.
- 25 AKIFUMI, Onodera; SUITO, K. Shear strength of some semi sintered oxides of high pressure. **J. Appl. Phys**, v. 1, n. 3, p.1825- 1826, 1980
- 26 VERESHAGIN, L.F.; ZUBKOVA, E. V. Medição da tensão de cisalhamento de algumas substâncias sob a pressão até 100.000 atm. **Coletânea de obras: Diamantes sintéticos e hidroextrusão**. Moscou. Ed. Nauka, p. 303-306, 1982 (em russo).
- 27 OGIBALOV, P. M.; KIYKO, I. A, **Ensaio sobre mecânica de altos parâmetros**, Moscou. Ed. MGU, p. 272, 1966.
- 28 OGATO, M.; IKEZUWA, T., On a new method for measuring the coefficient of internal friction of gasket materials. In: **Proc. 8 th AIRAPT Conf., Uppsala University**, p. 632-626, 1981.
- 29 VINOGRADOV, C. A., A influência da pressão sobre o coeficiente do atrito interno do calcário. **J. of Superhard Materials**, n. 3, p. 36-45, 2000.
- 30 RAMALHO, A. M., **Tese de doutorado**. Metodologia de seleção de materiais e tecnologia de fabricação das cápsulas deformáveis utilizadas nos processos de síntese/sinterização dos materiais superduros. UENF, p. 202, 2003.
- 31 KING, J. M., Choice of materials for use in compressible-gasket high-pressure apparatus. **J. Sci. Instrum**, v. 42, p. 374-380, 1965.