

EQUIPAMENTO PARA AVALIAÇÃO DA RIGIDEZ DE GEOMATERIAIS SUBMETIDOS À PERCOLAÇÃO DE ÁGUA OU CONTAMINANTES

TESTING APPARATUS FOR EVALUATING THE STIFFNESS OF GEOMATERIALS SUBMITTED TO WATER OR CONTAMINANT PERCOLATION

Isadora Comparin, Pedro Domingos Marques Prietto
Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brasil.
E-mails: isadora_comparin@hotmail.com; pdmp@upf.br

RESUMO

O trabalho apresenta os resultados preliminares de validação de um equipamento de laboratório desenvolvido para avaliar, de forma contínua, as variações na condutividade hidráulica e na rigidez de geomateriais submetidos à percolação de água e/ou outros líquidos. O equipamento possui paredes rígidas e permite a aplicação de carga vertical estática e a medição contínua dos recalques. A medição da rigidez é realizada através de sensores do tipo *bender elements*. Para validação inicial do equipamento, foram realizados ensaios de determinação da rigidez em corpos de prova de uma areia uniforme com adição de cimento Portland. Os resultados obtidos, quando comparados a outros publicados na literatura para o mesmo material, demonstraram a validade do equipamento quanto à medição da rigidez, indicando a possibilidade da sua aplicação em estudos envolvendo a degradação de geomateriais submetidos à percolação de soluções agressivas.

Palavras-chave: Percolação, Condutividade hidráulica, Rigidez, *Bender elements*.

ABSTRACT

This paper presents the preliminary validation results of a laboratory apparatus developed to evaluate the continuous variations in hydraulic conductivity and stiffness of geomaterials subjected to percolation of water and/or other liquids. The apparatus has rigid walls and allows the application of vertical load and the continuous measurement of settlements. The measurement of stiffness is carried out by using *bender elements* sensors. For preliminary validation purposes, a few tests were performed in specimens of a uniform sand with the addition of Portland cement. The results obtained, when compared to other data found in the literature for the same material, showed the validity of the device to evaluate stiffness, indicating the possibility of its application in studies involving the degradation of geomaterials percolated by aggressive leaching solutions.

Keywords: Percolation, Hydraulic conductivity, Stiffness, Bender elements

1. INTRODUÇÃO

Grandes áreas de exploração de recursos minerais oferecem sérios riscos ambientais, resultantes, principalmente, da grande quantidade de resíduos sólidos gerados. Embora nos últimos anos tenha havido uma melhora significativa no projeto e na operação de instalações para disposição de resíduos de mineração, ainda são observados, em muitos casos, importantes impactos ambientais.

Como exemplo, pode-se citar a extração de carvão mineral, que no Brasil é bastante significativa, principalmente nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Segundo Knop (2007), os problemas resultantes da mineração de carvão estão relacionados às características dos resíduos gerados, os quais contêm um composto denominado pirita, de fórmula molecular FeS_2 . A pirita, quando em presença de oxigênio e água, gera um lixiviado agressivo de características ácidas, devido à formação de ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Uma técnica usualmente adotada em locais de disposição de resíduos para a contenção de contaminantes no solo, é o uso de barreiras impermeáveis horizontais, limitando o escape físico e prevenindo a propagação de contaminantes em sub-superfície (KACZMAREK et al., 1997; SHARMA; REDDY, 2004). Segundo Knop (2007) e Sivrikaya (2008), estas barreiras são geralmente constituídas de argila compactada, devido ao baixo custo de execução e abundância de material.

A interação físico-química entre uma solução contaminante e o solo pode, no entanto, resultar em importantes alterações nas suas propriedades físicas e no seu desempenho mecânico e hidráulico. Desta forma, barreiras impermeáveis podem apresentar condutividades hidráulicas bastante reduzidas quando permeadas com água ou muito elevadas quando permeadas por lixiviados agressivos (LEMOS, 2006).

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta os resultados preliminares de validação de um equipamento desenvolvido para a avaliação dos efeitos da percolação, com água e/ou com soluções contaminantes agressivas, sobre a rigidez e a condutividade hidráulica de geomateriais compactados.

2. DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO

O equipamento, disponível no Laboratório de Geotecnia do Centro Tecnológico de Engenharia Civil, Ambiental e Arquitetura (CETEC) da Universidade de Passo Fundo, foi originalmente desenvolvido por Santos (2013) para avaliar o comportamento hidráulico de longo prazo de misturas compactadas destinadas à aplicação em barreiras de contenção.

As Figura 1 e 2 mostram, respectivamente, um esquema do equipamento desenvolvido e o detalhe de uma das câmara de ensaio. A Figura 3 apresenta uma visão geral do equipamento.

O monitoramento das cargas aplicadas, dos recalques e do volume percolado é realizado de forma automatizada, em tempo real, através de um sistema composto pela instrumentação (transdutores de pressão, LVDTs e células de carga), um módulo USB de aquisição de dados e um software que realiza a comunicação com o usuário. Neste equipamento, foram utilizados materiais inertes (aço inoxidável e acrílico) para evitar reações entre os componentes do equipamento e a solução percolante. Como pode ser observado na Figura 3, o equipamento foi montado sobre um pórtico metálico e tem capacidade para ensaiar, simultaneamente, até seis corpos de prova com dimensões de 6 cm de altura e 7 cm de diâmetro. Cada câmara de ensaio possui uma entrada para o fluido percolante e uma saída para a coleta do percolado, sendo que o fluxo através do corpo de prova é descendente. Também pode-se observar na Figura 3, entre outras características, o mecanismo de aplicação de cargas estáticas verticais, o reservatório de armazenamento do fluido percolante, conectado na entrada da câmara de ensaio, e o reservatório de coleta do fluido percolado, conectado à saída da câmara de ensaio. O monitoramento do volume percolado é realizado através do balanço de massa dos reservatórios de coleta do percolado.

Baseando-se na experiência relatada por vários autores (HEINECK, 2002; CHAN, 2012; CLAYTON, 2011; DI EMÍDIO; FLORES, 2012), as células do equipamento foram adaptadas com dispositivos *bender elements*, de forma a permitir, durante o fluxo, a determinação contínua da rigidez.

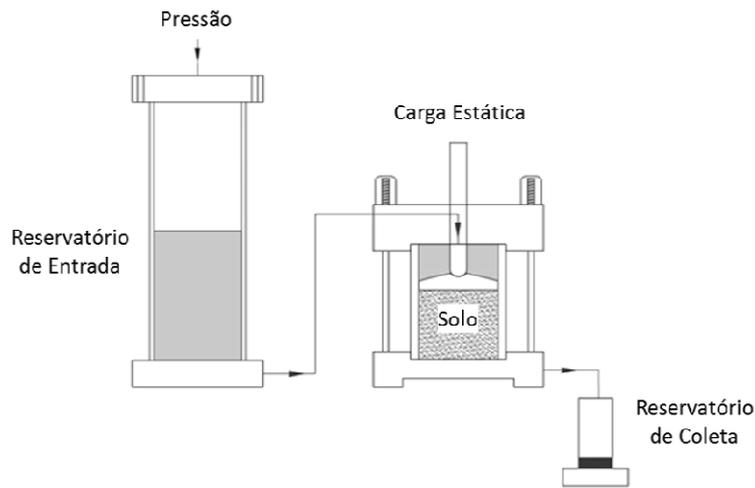


Figura 2: Esquema da câmara de ensaio.



Figura 3: Visão geral do equipamento.

A Figura 4 apresenta o esquema de uma câmara de ensaio equipada com *bender elements*. Para o uso desta técnica, além dos *bender elements*, são necessários equipamentos de transmissão e leitura de ondas de cisalhamento, tais como gerador de ondas, amplificador de sinal, osciloscópio para visualização das ondas e programa de computador para coleta dos dados e posterior análise. A Figura 5 apresenta um esquema dos equipamentos necessários para a realização de um ensaio com *bender elements*, conforme Chan (2012), e a Figura 6 mostra o ensaio sendo realizado.

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O solo utilizado nos ensaios com o equipamento desenvolvido foi uma areia fina, limpa e uniforme, sem presença de matéria orgânica, proveniente do município de Osório/RS.

A curva granulométrica e os principais índices físicos para este material estão apresentados na Figura 7 e na Tabela 1, de acordo com Diaz (1998).

Na confecção dos corpos de prova foram utilizados cimento Portland CP-V e água destilada.

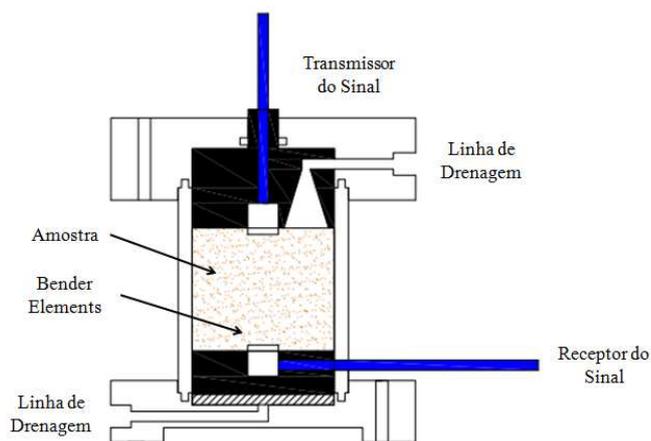


Figura 4: Esquema do permeâmetro equipado com bender elements.

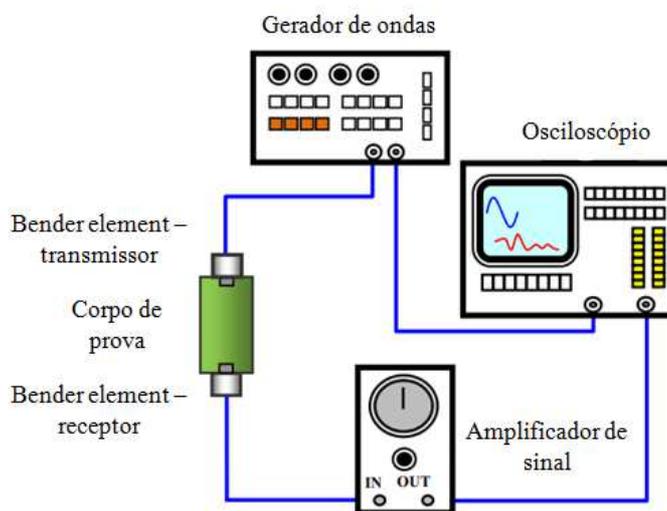


Figura 5: Equipamentos para ensaio com bender elements (adaptado de Chan, 2012).

4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

4.1. MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para a realização dos ensaios de validação do equipamento foram confeccionados corpos de prova de areia cimentada (5% de cimento em relação a massa seca da areia), moldadas no interior das câmaras de ensaio, com 6 cm de altura e 7 cm de diâmetro, diretamente sobre o *bender element* receptor, localizado na base da câmara. Todos os corpos de prova foram moldados com 10% de umidade e peso específico total de $17,1 \text{ kN/m}^3$.

O teor de cimento e os parâmetros de moldagem adotados permitiram a comparação com os resultados obtidos por Fonini (2012), utilizados como referência.

Finalizada a moldagem, os corpos de prova receberam um sulco na face de topo de modo que o *bender element* emissor, instalado no *cap* superior pudesse ser embutido.



Figura 6: Realização do ensaio de determinação da rigidez.

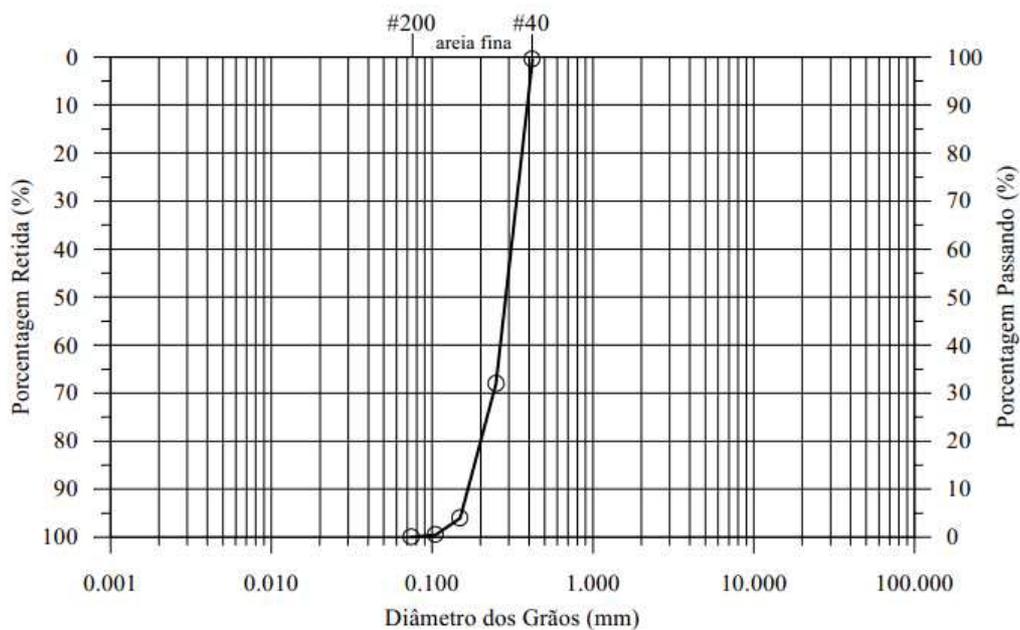


Figura 7: Curva granulométrica da areia de Osório (DIAZ, 1998).

Tabela 1: Índices físicos da areia de Osório (DIAZ, 1998)

Índices físicos	Valor
Massa específica real dos grãos	26,3 KN/m ³
Diâmetro efetivo, D ₁₀	0,16 mm
Limite de plasticidade, LP	NP
Índice de vazios, e _{min}	0,57
Índice de vazios, e _{max}	0,85

4.2. MEDIDAS DE RIGIDEZ

A técnica de *bender elements*, desenvolvida por Shirley e Hampton (1977 apud JOVICIC et al. 1996), é largamente utilizada na obtenção não destrutiva do módulo cisalhante elástico de materiais geomecânicos a deformações muito pequenas, inferiores 10^{-5} , a partir da medição da velocidade de propagação de uma onda cisalhante pelo corpo-de-prova. Os procedimentos gerais para a utilização desta técnica e os métodos de interpretação dos resultados são baseados em Jovicic et al. (1996) e Viggiani e Atkinson (1995).

Nos ensaios realizados, os corpos de prova foram submetidos à passagem de ondas de cisalhamento (ondas S) com frequências variando de 2 a 20 KHz. As ondas foram analisadas no domínio do tempo, o que se traduz na identificação do tempo da primeira chegada da onda emitida de um extremo ao outro do corpo de prova. A onda foi emitida por um gerador de funções, através do *bender element* emissor. Esta onda era então captada pelo *bender element* receptor e lida em um osciloscópio. A partir da análise das ondas emitidas e recebidas, foi possível determinar o tempo de percurso da onda pelo corpo de prova. Para as medidas do módulo cisalhante foram utilizadas ondas do tipo quadrática, em razão desta produzir, após uma série de testes preliminares, uma resposta mais clara para as frequências utilizadas.

Em virtude da natureza não destrutiva do ensaio, foram realizadas leituras para diferentes tempos de cura (primeiro, terceiro, quinto e sétimo dia), para um mesmo corpo de prova. A distância vertical entre os sensores emissor e receptor foi corrigida em função de eventuais variações de altura do corpo de prova.

A determinação da rigidez dos corpos de prova foi feita a partir do cálculo do módulo cisalhante G_0 , utilizando-se a seguinte expressão (VIGGIANI; ATKINSON, 1995):

$$G_0 = \rho V_s^2 = \rho \left(\frac{d^2}{t^2} \right) \quad (1)$$

em que:

V_s é a velocidade de propagação da onda;

ρ é a massa específica aparente do corpo de prova;

d é a distância entre os *bender elements* emissor e receptor; e

t é o tempo de percurso da onda.

5. RESULTADOS

A Figura 8 apresenta os resultados dos 4 ensaios realizados na areia artificialmente cimentada, com medições da rigidez até 7 dias de cura e sem aplicação de carga vertical.

A dispersão nos resultados do módulo cisalhante observada para as quatro amostras ensaiadas foi pequena, com diferenças máximas inferiores a 10%, o que pode ser creditado, além do inerente erro experimental, à pequenas variações nas características físicas dos corpos de prova. Estes resultados indicam uma boa precisão na determinação do módulo cisalhante com o equipamento desenvolvido.

O comportamento observado ao longo do tempo mostrou-se coerente, uma vez que, como esperado, o módulo aumentou com o tempo de cura para todas as amostras ensaiadas. Contudo, a taxa de evolução do módulo com o tempo de cura ficou abaixo do esperado.

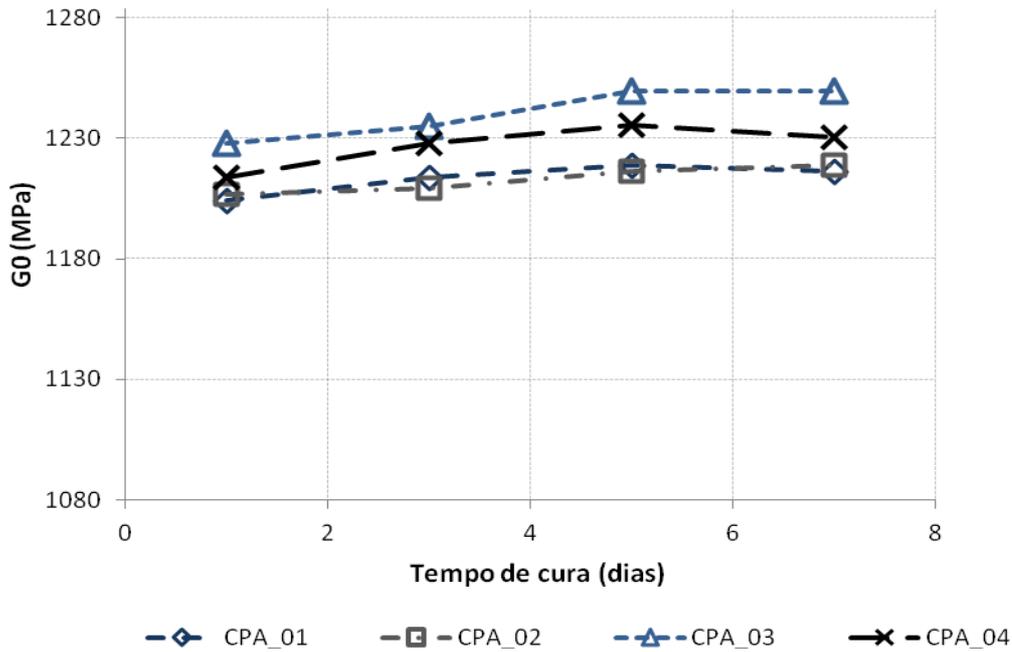


Figura 8: Resultados dos ensaios realizados com a areia artificialmente cimentada.

Para avaliar a acurácia dos resultados obtidos, foi feita uma comparação com os resultados reportados por Fonini (2012), que obteve para o mesmo material e os mesmos tempos de cura (1, 3, 5 e 7 dias), módulos cisalhantes na faixa de 721 a 1400 MPa, enquanto que no presente trabalho os valores situaram-se na faixa de 1200 a 1250 MPa. Embora uma diferença significativa quanto a taxa de evolução do módulo com o tempo, pode-se concluir que todos estes valores apresentam a mesma ordem de grandeza.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos no presente trabalho permitiram concluir que o equipamento desenvolvido, no que diz respeito à avaliação da rigidez de uma areia fina uniforme artificialmente cimentadas, produziu resultados coerentes tanto do ponto de vista qualitativo como quantitativo. Os módulos cisalhantes obtidos apresentaram valores na faixa de 1200 a 1250 MPa, valores estes que são coerentes com outros resultados encontrados na literatura para o mesmo material ensaiado.

Ensaio e teste adicionais serão necessários para verificar os efeitos do tamanho da amostra, do tipo de geomaterial e da percolação, com água e/ou soluções agressivas, na acurácia e precisão dos módulos cisalhantes medidos com o equipamento desenvolvido.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAN, C. On the interpretation of shear wave velocity from bender element tests. *Acta Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering*, v. 5, n. 1, p. 29-34, 2012.

CLAYTON, C. R. I. Stiffness at small strain: research and practice. *Géotechnique*, v. 61, n. 1, p. 5-37, 2011.

DI EMIDIO, G.; FLORES, R. D. V. Monitoring the impact of sulfate attack on a cement-clay mix. In: **GeoCongress 2012**. Reston: ASCE. 2012, p. 910-919.

DIAZ, J. G. **Estudo do comportamento de fundações superficiais em solos cimentados**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998.

FONINI, A. **Comportamento mecânico de uma areia cimentada: análise experimental e micromecânica**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

JOVIČIĆ, V.; COOP, M. R.; SIMIC, M. Objective criteria for determining G_{max} from bender elements tests. **Géotechnique**, v. 46, n. 2, p. 357-362, 1996.

KACZMAREK, M.; HUECKEL, T.; CHAWLA, V.; IMPERIALI, P. Transport through a clay barrier with the contaminant concentration dependent permeability. **Transport in Porous Media**, v. 29, p. 159-178, 1997.

KNOP, A. **Estudo do comportamento de liners atacados por ácido sulfúrico**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LEMONS, R. G. **Estudo do comportamento hidráulico, mecânico e químico de barreiras hidráulicas verticais, compostas por solo residual, bentonita e cimento sob ação de substâncias agressivas**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SANTOS, V. C. **Desenvolvimento de equipamento de coluna para ensaio de condutividade hidráulica de longa duração em barreiras compactadas**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2013

SHARMA, H. D.; REDDY, K. R. **Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies**. New Jersey: John Wiley & Sons, 992 p., 2004.

SIVRIKAYA, O. Models of compacted fine-grained soils used as mineral liner for solid waste. **Environmental Geology**, v. 53, p. 1585-1595, 2008.

VIGGIANI, G. e ATKINSON, J. H. Interpretation of bender elements tests. **Géotechnique**, v. 45, n. 1, p. 149-154, 1995.