

# **PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS COM AVALIAÇÃO DE SISMOS**

## **DAMS PERCOLATION ANALYSIS WITH EARTHQUAKES ASSESSMENT**

Silva, Camila Aparecida Lebron Xavier da; Graduanda Universidade Federal de Minas Gerais, *Belo Horizonte - MG, Brasil, camila.lebron@gmail.com*

Soares, Ecidinéia Pinto; Profa. Universidade Federal de Minas Gerais, *Belo Horizonte - MG, Brasil, esoares@etg.ufmg.br*

### **RESUMO**

Este artigo apresenta uma análise do comportamento de barragens de terra para reservação de fluidos diante de sismos simulados em laboratório, próximos da realidade sísmológica observada do Estado de Minas Gerais. Para tal, foram introduzidos sismos de magnitudes variadas, com a utilização de metodologias de ensaio e do sismômetro de vibração GSR-12PC. A partir de modelo reduzido de uma seção de barragem, construída com base em análises numéricas de percolação e estabilidade, avaliou-se o comportamento da estrutura face às poropressões geradas. O modelo estudado compõe-se de seção homogênea, cujo material foi ensaiado em laboratório de solos, com drenagem interna em tapete drenante, e dreno de pé. As análises e medições permitiram verificar o comportamento geotécnico da estrutura, a partir dos níveis piezométricos verificados no talude a jusante, face às solicitações induzidas.

**PALAVRAS-CHAVE:** SISMO, BARRAGEM DE TERRA, POROPRESSÃO, PIEZÔMETROS.

### **ABSTRACT**

This paper presents a behavior analysis of earth dams for reservation fluids before earthquakes in laboratory simulated, similar to the seismic reality observed in the state of Minas Gerais. To this finality, Were brought earthquakes of various magnitudes using test methodologies and vibration seismometer GSR-12PC. From reduced model of a dam section , based on stability and percolation numeric analysis, was evaluated the behavior of the structure in the face of pore pressures generated. The studied model consists of homogeneous section, whose material was tested in soil laboratory, with internal drainage in underdrain, and toe drain. The analysis and measurements allowed to verify the geotechnical behavior of the structure, faced with induced solicitation.

**KEY-WORDS:** EARTHQUAKE, EARTH DAM, PORE PRESSURE, PIEZOMETER.

### **1. INTRODUÇÃO**

Um abalo sísmico, também conhecido como terremoto, é o resultado de um movimento que faz com que a rocha sofra ruptura quando há uma pressão muito grande na crosta. Essa pressão muito aumentada vai se acumulando em forma de energia potencial na litosfera até um certo limite onde essa energia é liberada em forma de ondas elásticas, que se propagam em todas as direções da Terra.

As rochas por sua vez se comportam como corpos elásticos, podendo acumular deformações quando submetidas a esforços de compressão ou de tração até o limite de sua resistência. Quando é ultrapassado esse limite de resistência a rocha se rompe ao longo de um plano chamado falha, que pode ser novo ou já existir anteriormente.

Os movimentos dinâmicos do interior da Terra, principalmente o movimento de convecção no manto responsável pela deriva dos continentes, dão origem às forças tectônicas que são as principais causadoras dos sismos.

Sabe-se que a litosfera é a camada mais externa da Terra formada por solo e rocha e é dividida nas placas tectônicas.

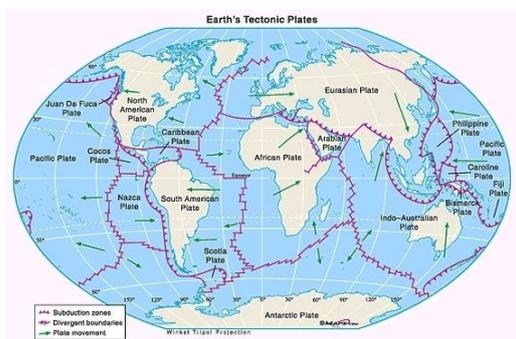


Figura 1 - Placas tectônicas e seus movimentos (<http://www.materiaincognita.com.br/>).

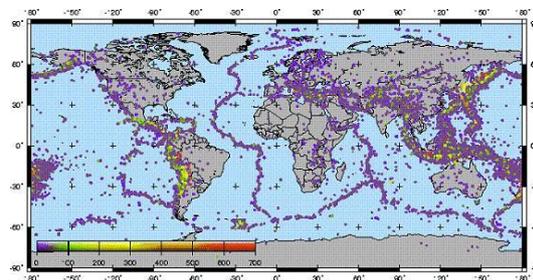


Figura 2 - Sismicidade no mundo (<http://www.iag.usp.br/>).

Segundo D'Agrella-Filho (2016), professor do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (UPS), a distribuição dos sismos é uma das maiores evidências da teoria tectônica de placas, pois é na região onde se encontram as placas que se concentra boa parte dos sismos do mundo. A maior parte da energia liberada pelos terremotos todos os anos se dá nas regiões de contato entre placas. As demais regiões do planeta foram consideradas assísmicas, acreditando que os terremotos ocorriam apenas nos limites das placas tectônicas. Entretanto, foram registradas sismicidades intraplaca, como os tremores registrados em Nova Madrid e Missouri nos EUA, no início do século XIX, de magnitude 7,7 na Escala Richter. Essa região, que fica no Vale do Mississipi, compreende a uma falha geológica nomeada de falha de Nova Madrid e que é constantemente monitorada.

O Brasil, como pode ser observado nas figuras 1 e 2, está localizado na placa da América do Sul, que por sua vez está pressionada pela Placa de Nazca, a oeste, e pelo movimento de abertura da cordilheira meso-oceânica, responsável pela expansão do assoalho marítimo do Oceano Atlântico e afastamento da África em relação à América. Esse fato causa um acúmulo de tensões crescente ao longo de toda placa provocando o surgimento de trincas ao longo da crosta brasileira. Essas trincas, por sua vez, devido às pressões sofridas pela Placa Sulamericana também ficam submetidas a grandes tensões, podendo aliviá-las repentinamente e provocar tremores, como já é registrado no Brasil. Sabe-se que há no Brasil regiões onde os tremores são mais frequentes, como no Rio Grande do Norte, Ceará, parte central de Goiás, e a bacia do Pantanal. As Figuras 3 e 4 apresentam as falhas geológicas mapeadas no Brasil, de acordo com o IGC (Instituto de Geociências) da Universidade Federal de Minas Gerais, e a ocorrência dos sismos, respectivamente.



Figura 3 - Falhas Geológicas Localizadas no Brasil (Instituto de Geociências - UFMG).

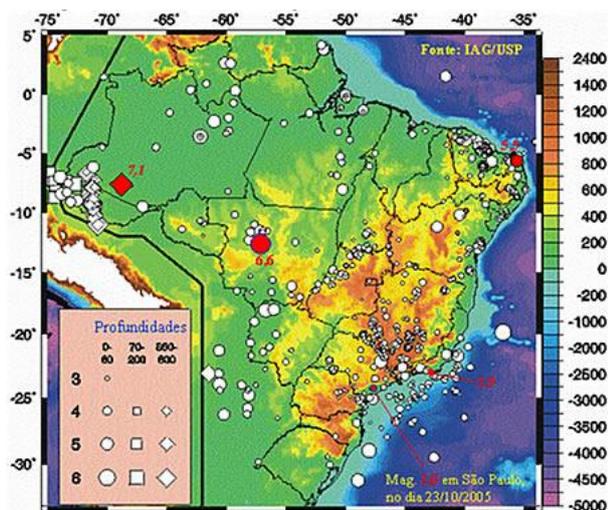


Figura 4 - Sismicidade no Brasil (<http://www.iag.usp.br/>).

De acordo com D'Agrella-Filho (2016), os terremotos podem ser provocados por ações antrópicas, denominados sismos induzidos, como injeção de água e gás sob pressão no subsolo, extração de fluidos dos maciços, alívio de carga em minas a céu aberto e subterrâneas e enchimento de reservatórios artificiais ligados a barragens, sendo estes últimos os que podem atingir maior magnitude. Vale ressaltar que um sismo induzido nunca ultrapassa em magnitude um sismo natural ocorrido na mesma região.

## 2. OBJETIVO

Dentro do contexto citado, ressalta-se a quantidade crescente de eventos sismológicos registrados nos últimos anos, especialmente, no Estado de Minas Gerais, como o sismo registrado no início da manhã do dia 2 de maio deste ano, cujo epicentro se localizou próximo às cidades de Esmeraldas e Betim, a 10 quilômetros de profundidade, de acordo com o Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (Obsis/UnB). Tais eventos despertam a necessidade de estudos mais direcionados para, além de suas origens, os impactos por eles causados em obras civis.

Assim, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de barragens de terra, para reservação de água, quando submetidas a sismos simulados em laboratório, com magnitudes semelhantes às registradas recentemente no estado de Minas Gerais.

## 3. METODOLOGIA

Inicialmente, foi estudada uma seção típica de barragem em solo arenoso, com a utilização do programa *Slide da Rocscience*, cujos parâmetros geotécnicos foram obtidos a partir de ensaios de laboratório. A seguir, foi construído um modelo, em escala reduzida e, depois de verificada a percolação pelo maciço, foram simulados sismos e verificados os danos causados na estrutura.

O modelo estudado compõe-se de seção homogênea com drenagem interna em tapete drenante e dreno de pé. Os materiais utilizados para o experimento foram: caixa de vidro e aço (162 cm x 16,5 cm x 50 cm), areia lavada média, piezômetros, anilina, mangueira de plástico, tábua fixada sobre rodas e sismômetro modelo GSR-12PC.

Ressalta-se que os sismos foram simulados através de uma plataforma de madeira fixada sobre 4 pares de rodas, onde a caixa de vidro foi apoiada, como apresentado na Figura 5.

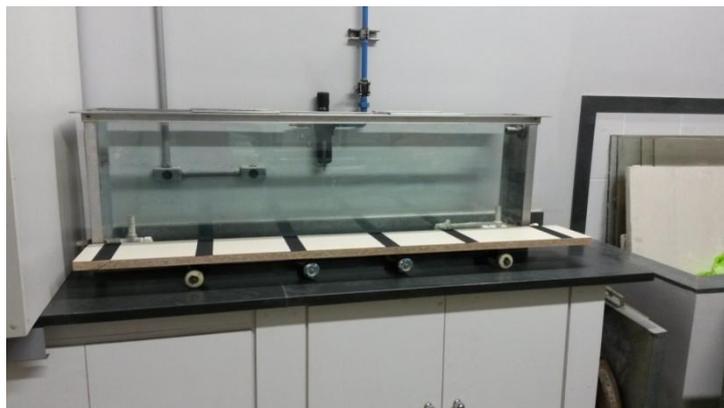


Figura 5 - Plataforma de apoio e caixa de vidro

Sobre a caixa de vidro foi apoiado um sensor do sismômetro que registrou as vibrações provocadas no sistema e que consistiram, inicialmente, em deslizar a base rolante com diferentes velocidades através de sua movimentação manual. Com os dados obtidos, determinou-se a magnitude alcançada pelo experimento a partir de gráficos de *velocidade da partícula x magnitude*, de acordo com Koçaslan *et al.* (2016).

#### 4. MODELO REDUZIDO

O experimento foi instalado em uma caixa mista de vidro e aço. O tapete drenante foi executado com manta de geossintético e brita zero, conforme ilustra a Figura 6. Na Figura 7 é possível visualizar os piezômetros, que foram fixados posteriormente à construção e compactação da seção de barragem.



Figura 6 - Tapete drenante.

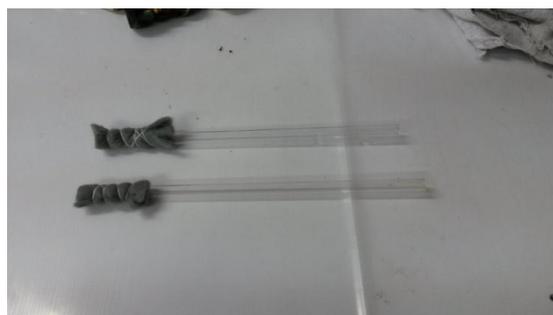


Figura 7 - Piezômetros.

O material utilizado para o maciço da barragem, areia média, foi ensaiado para a determinação dos parâmetros geotécnicos conforme Figura 8, e que foram considerados na análise de estabilidade realizada. A Figura 9 apresenta o resultado desta análise, cuja seção apresenta 25 cm de altura, talude de montante 1V: 2,5H, talude de jusante 1V:2H, largura da crista 8 cm.

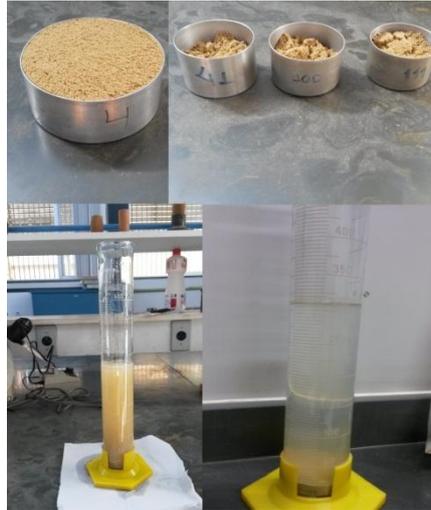


Figura 8 - Medição da densidade.

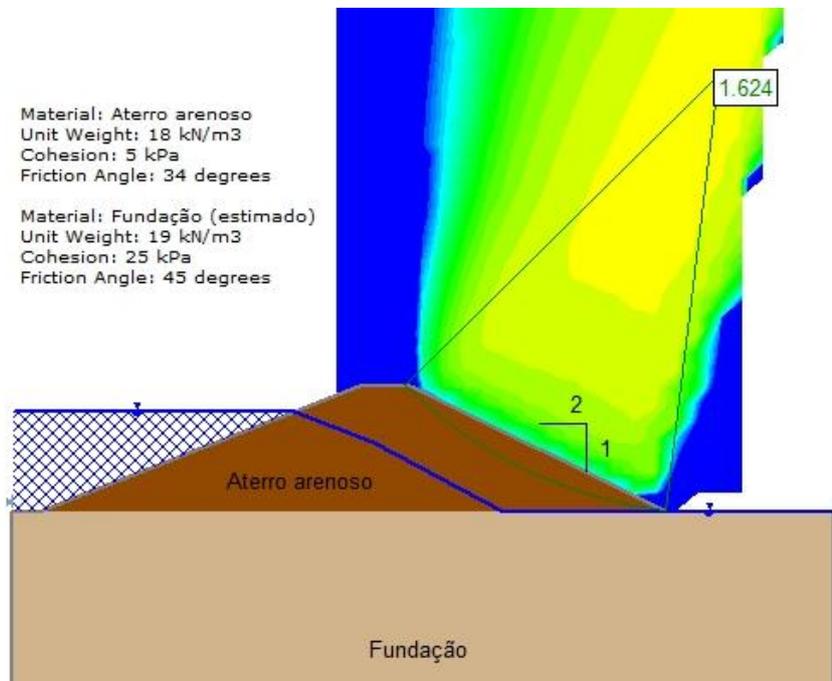


Figura 9 – Análise de estabilidade da seção considerada.

A Figura 10 apresenta a sequência executiva do barramento.



**Figura 10 - Seção da barragem em etapas da construção e compactação.**

Depois do processo de construção e compactação citado, fez-se o acerto geométrico da seção, a fixação dos piezômetros, de mangueiras de plástico para a injeção de anilina no sistema para caracterização do fluxo, e proteção com britas do talude a montante. A seguir, foi realizado o enchimento com água e adicionou-se a anilina para comprovar o fluxo antes da simulação do sismo. A Figura 11 apresenta a linha de fluxo representativa.



**Figura 91 - Seção da barragem com percolação.**

O nível d'água no reservatório foi mantido em 20 cm durante todo o experimento. A Figura 12 apresenta detalhe da medição no piezômetro, antes das simulações dos sismos. Em sequência, instalou-se o sensor do sismômetro sobre o sistema, como mostra a Figura 13, e deu início a quatro simulações de sismos.



**Figura 102 – Piezômetro antes dos sismos.**



**Figura 113 - Sensor do sismômetro de vibração.**

## 5. RESULTADOS

Tendo em vista o exposto, percebe-se que a realidade sísmica do estado de Minas Gerais consiste em sismos predominantemente superficiais. Os tremores registrados com maior frequência no estado variam, na escala Richter, entre 0,1 e 3, com exceção da região de Montes Claros, onde já foram registrados sismos de magnitude maior que 4, de acordo com o relatório do Obsis, do ano de 2013.

Com os valores obtidos, foi realizada a correlação dos dados do sismômetro com os do gráfico da Figura 124, sendo que as extrapolações necessárias foram realizadas manualmente. Os resultados alcançados estão apresentados na Tabela 1, assim como na Figura 15. Para todas as simulações sísmicas a seção da barragem não apresentou alteração visível na percolação em sua estrutura, apesar de ter ocorrido o galgamento da mesma, como mostra as Figuras 16 e 17.

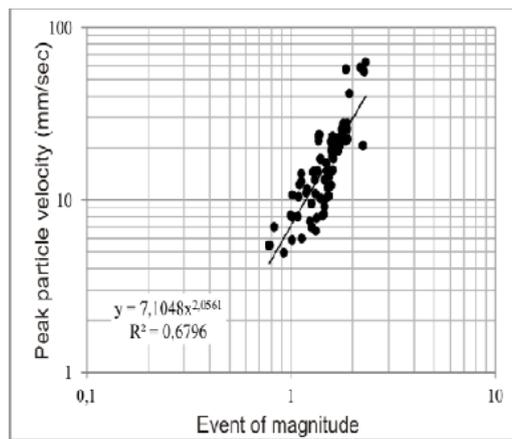
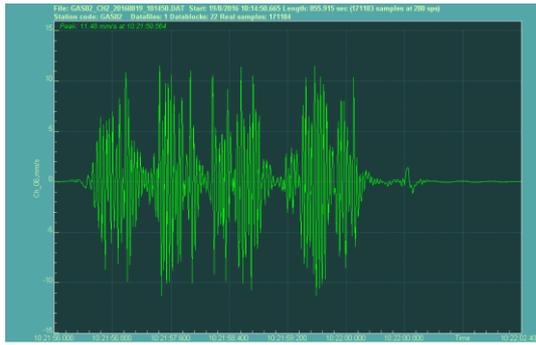


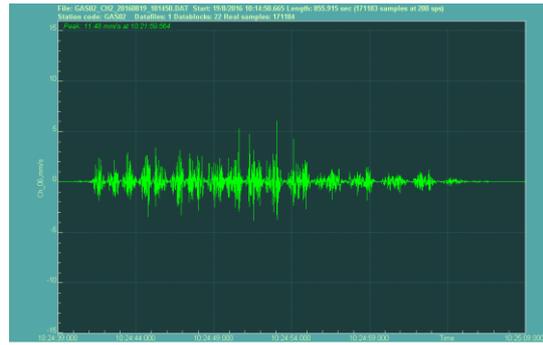
Figura 124 - Gráfico *velocidade x partícula* (Koçaslan et al., 2016).

Tabela 1 - Velocidade de pico registrada no sismômetro e magnitude estimada dos sismos.

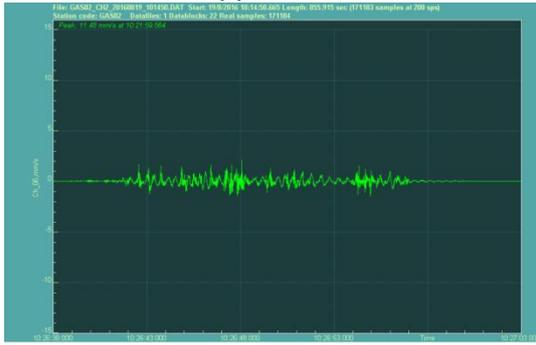
Sismo	Velocidade mm/s	Horário hh:mm:ss	Magnitude
1	11,48	10:21:59.564	1.3
2	6,05	10:24:53.019	0.9
3	2,08	10:26:48.050	0.5
4	1,07	10:28:29.689	0.4



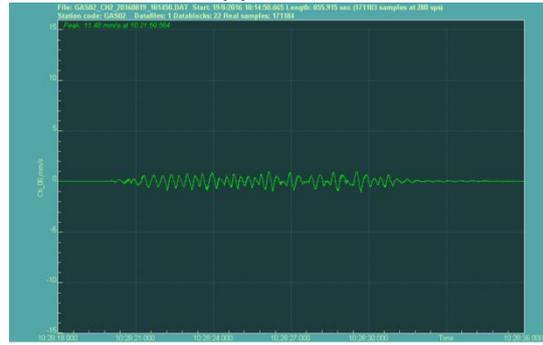
(a) Sismo 1



(b) Sismo 2



(c) Sismo 4



(d) Sismo 4

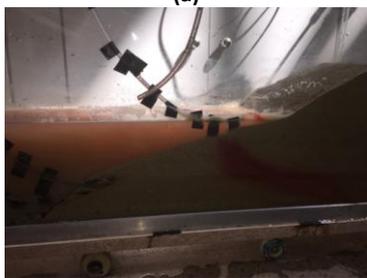
Figura 15 – Imagens do sismômetro.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 16 – Imagens da seção pós sismo.



Figura 17 - Piezômetro após sismos.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da observação do comportamento final da estrutura em análise, ressalta-se que a mesma manteve-se estável mesmo após o galgamento proveniente dos sismos induzidos. Considera-se, ainda, que as leituras nos piezômetros, no instante dos sismos, não puderam ser confirmadas em função da vedação lateral dos mesmos na parede de vidro.

A estimativa das magnitudes apresentadas na Tabela 1 requer aprimoramento por se tratar de uma mensuração manual, baseada no gráfico da Figura 14, que foi desenvolvido tendo como referência outra região. Portanto, um modelo matemático para tal seria mais adequado, considerando a região de Minas Gerais.

Ressalta-se que este estudo representa a fase inicial de uma linha de pesquisa em sismicidade e barragens de terra e enrocamento, que objetiva fornecer um banco de dados sobre o assunto, para que o mesmo possa ser aprimorado e estimulado com novos trabalhos, a fim de garantir segurança às estruturas futuras e existentes.

## 7. AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao DETG – Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia da UFMG, e às pessoas que colaboraram para este trabalho. Dentre elas destacam-se o Professor Paulo Aranha, do IGC, o Professor Fernando Amorim de Paula, do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG, a aluna de pós graduação Dâmia Carina Dias do Carmo, Gabriel Lourenço Braga de Paula, e João Victor Coelho Guabiroba.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. KOÇASLAN, Ç. ÇAYLAK, A. BÜYÜKSARAÇ, E. ARPAZ, K. GÖRGÜLÜ, A. DEMİRCİ, The Relationships between the Particle Velocity, Magnitude and Energy in the Blast-Induced Ground Vibration. Disponível em [http://akademikpersonel.kocaeli.edu.tr/earpaz/bildiri/earpaz22.12.2012\\_01.23.16bildiri.pdf](http://akademikpersonel.kocaeli.edu.tr/earpaz/bildiri/earpaz22.12.2012_01.23.16bildiri.pdf). Acesso em: 23 jun. 2016.

D'Agrella-Filho, M.S., Física da Terra e do Universo para Licenciatura em Geociências. Disponível em <[http://www.iag.usp.br/~agg\\_1400200/moddata/GEOFISICA/apostila2-sismo.pdf](http://www.iag.usp.br/~agg_1400200/moddata/GEOFISICA/apostila2-sismo.pdf)>. Acesso em: 11 mai. 2016.

ASSUMPÇÃO, M.. A regional magnitude scale for Brazil.. Bull. Seism. Soc. Am., Estados Unidos, v. 73, n.1, p. 237-246, 1983.

FERREIRA, CRCDP. Desenvolvimento de um equipamento laboratorial para estudo de problemas de percolação em modelo reduzido. 2008. 124 f. Dissertação (Especialização em Geotecnia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto – Portugal. 2008.

LOAYZA, FH. Modelagem do comportamento pós-sismo de uma barragem de rejeito. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontífca Universidade Católica, Rio de Janeiro – Brasil. 2009.