

INTERFEROMETRIA SÍSMICA PASSIVA PARA O MONITORAMENTO DE BARRAGENS

Camilla Tavares Rodrigues – Tetra Tech, CPGA/UFRJ; Amanda Queiroz de Paula – Tetra Tech, Nugeo/UFOP; Leonardo Santana de Oliveira Dias – Tetra Tech, CPGA/UFRJ; Marco Antonio Braga – CPGA/UFRJ

RESUMO

Barragens e diques podem ter diferentes finalidades e serem constituídos de diferentes materiais. Porém, todas essas estruturas devem ter um sistema de monitoramento adequado e eficiente.

O monitoramento microssísmico surge como uma alternativa para o monitoramento contínuo. Ele conta com duas abordagens (convencional e passiva). Na abordagem convencional, ele se apresenta como o monitoramento sismográfico mais sensível, registrando eventos de menor magnitude (magnitude relativa a momento sísmico da ordem de -2 a 0). Na abordagem passiva, ele se vale da técnica de interferometria sísmica passiva para, a partir do ruído ambiente, obter a variação de velocidade de propagação de ondas em um determinado meio.

A velocidade de propagação de ondas sísmicas de um meio é uma propriedade física. Utiliza-se a região da chamada *Coda wave* para o monitoramento da velocidade de propagação de ondas S, que é formulada pela razão entre módulo de cisalhamento e massa específica do meio.

Trata-se de um método ainda incipiente, com aplicações operacionais em barragens desde 2018. Não obstante, se apresenta promissor e objetivo. Enquanto método indireto, é eficiente na identificação de anomalias para posterior investigação direta, se necessário.

Hoje, o Brasil conta com mais de vinte estruturas com esse monitoramento. A ANM, ainda no início de 2019, sugeriu o emprego dessa tecnologia na investigação de estruturas de mineração. Há, ainda, aplicabilidade a estruturas para outros fins.

A difusão deste método fomentará o avanço da fronteira do conhecimento a cerca das correlações possíveis entre a engenharia geotécnica e a variação de velocidade de onda, o que permitirá aos empreendedores maior conhecimento do comportamento estrutural de suas estruturas.

O CENÁRIO DE I&M PARA BARRAGENS

Barragens e diques de contenção, estruturas de mesmo entendimento jurídico, têm aplicações das mais variadas. Sua invenção tem início incerto, mas sabe-se que há relatos dessas estruturas há mais de 2.000 anos.

Com variadas finalidades, atualmente seus principais empregos se aplicam à reservação de água para captação com fins de abastecimento humano, agropecuária ou agricultura e produção hidrelétrica. Além disso, sobretudo em países de vocação mineral, como o Brasil, têm o importante papel de reservarem rejeitos dispostos na forma de lama, permitindo a decantação do material particulado e consequente limpeza da água usada no processamento mineral, que retorna ao curso d'água.

Barragens e diques são construídos dos mais diferentes materiais. Inicialmente, eram construídos com aterros, compostos por terra e/ou enrocamento. Com a evolução tecnológica dos materiais de construção, passaram a ser construídos também com outros elementos, como madeira e concreto.

Para a operação dessas estruturas, faz-se necessário um programa de instrumentação e monitoramento (I&M), a fim de acompanhar seu desempenho estrutural. Usualmente, monitoram-se os fenômenos de deslocamento e presença de água, com suas variadas grandezas.

Com o avanço dos recursos computacionais de processamento e tratamento de dados, a periodicidade das leituras tem aumentado e o atraso no recebimento das medições tem diminuído, aproximando-se do “tempo real”.

Não obstante, trata-se de monitoramentos pontuais e de medidas diretas na estrutura, com instrumentos como piezômetros, indicadores de nível d'água, medidores de deslocamento, extensômetros ou prismas superficiais.

Com isso, nasceu uma demanda de técnicas de monitoramento de barragens e diques com métodos indiretos e volumétricos. Nesse cenário, operacionalizou-se, em 2018, os primeiros sistemas de monitoramento microssísmico.

MONITORAMENTO MICROSSÍSMICO

O monitoramento microssísmico lança mão da microssismicidade para monitoramento das estruturas de interesse. Ele difere de um monitoramento sísmico convencional devido à sensibilidade dos sensores, que conseguem registrar estímulos menos intensos que os sensores usuais.

A Figura 1, a seguir, ilustra a relação de amplitude entre vibrações sísmicas e microssísmicas.

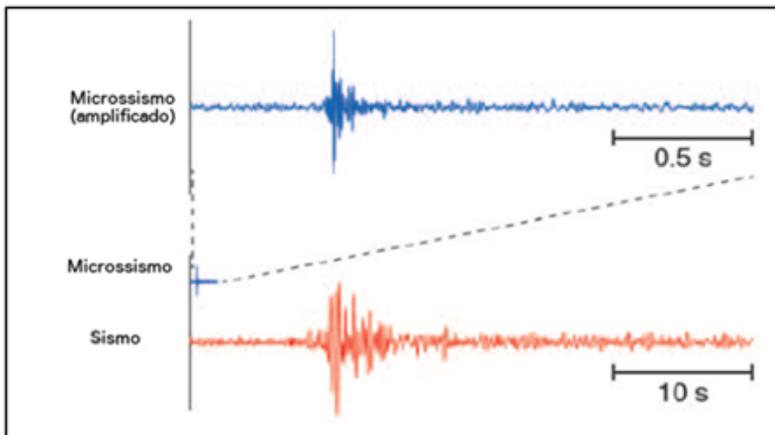


Figura 1: Registro da assinatura de exemplo de onda microssísmica (azul) e por terremoto natural (vermelho). Fonte: adaptado de Kamei et al., 2015

bém chamadas de *ground motions*, na região de interesse; e

- Abordagem passiva, na qual utiliza-se o ruído ambiente, a partir da técnica de interferometria sísmica, para avaliar a variação de velocidade de propagação de ondas no meio de interesse.

Informações sobre a abordagem convencional são encontradas em abundância na literatura técnico-científica. O objetivo do presente trabalho é discorrer sobre o monitoramento passivo, possibilitado pela técnica de interferometria sísmica passiva.

INTERFEROMETRIA SÍSMICA PASSIVA

A técnica da interferometria sísmica passiva utiliza o ruído ambiente como fonte sísmica para realizar o monitoramento contínuo do meio de propagação. O ruído ambiente é onipresente e gerado pelas forças que constituem o background sísmico da Terra, criado pela atividade humana e por fenômenos naturais. A amplitude deste estímulo varia com posição, tempo e frequência (Nakata et al., 2019).

O termo interferometria se refere ao estudo da interferência entre pares de sinais com o objetivo de obter informações acerca de suas diferenças (Curtis et al., 2006). Já o termo “interferometria sísmica” se refere ao princípio da geração de uma resposta sísmica a partir de uma fonte virtual (Wapenaar et al., 2008).

Nesse contexto, essa abordagem desempenha o monitoramento para um par de receptores, dos quais um representa uma fonte virtual. Esse método é aplicável devido à variação das propriedades da fonte impulsiva do ruído ambiente. Desta forma, como apresentado na Figura 2, uma onda que se desloca para a direita ao longo do eixo X, emitida por uma fonte impulsiva em $x = X_0$ e $t = t_0$, gera uma resposta no geofone 1 em $t = t_1$ e no geofone 2 em $t = t_2$. Esse tempo de viagem da onda até os receptores pode variar, a depender do ruído. Entretanto, independentemente de sua posição, considerando-se o meio inalterado, o tempo de viagem da onda do primeiro receptor ao segundo será o mesmo ($t_2 - t_1$). Essa última relação é observada através da correlação cruzada das respostas dos geofones, na qual se observa, para uma fonte no geofone 1, a resposta no geofone 2.

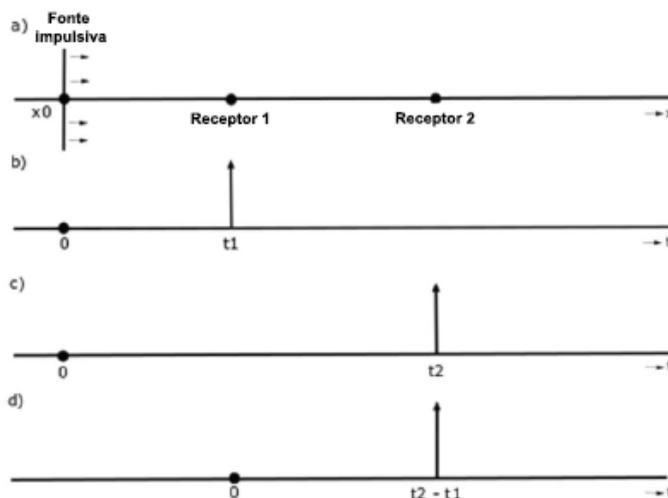


Figura 2: Representação da propagação de onda em um sistema microssísmico pela abordagem passiva. (a) Fonte impulsiva em $x = X_0$ e $t = t_0$. (b) A resposta no geofone 1, em $t = t_1$. (c) A resposta no geofone 2, em $t = t_2$. (d) Correlação cruzada. Fonte: adaptado de Wapenaar et al. (2008).

A microssismicidade está associada a eventos de magnitude relativa a momento sísmico entre -2 e 0 (Eaton, 2018). Sobre eles, regem as mesmas leis físicas da ondulatória convencional, sendo interpretados da mesma forma que eventos de maior magnitude.

O monitoramento microssísmico permite, com o emprego de geofones específicos, o acompanhamento da estrutura a partir de duas abordagens distintas:

- Abordagem convencional, na qual são realizadas as mesmas análises do monitoramento sísmográfico: a partir de sismogramas, obtêm-se os parâmetros da fonte sísmica e as vibrações geradas, tam-

sendo assim, as aquisições de sinais passam a ser obtidas para o par. O meio monitorado é a extensão entre os sensores. A razão entre a distância e o tempo de viagem ($t_2 - t_1$) permite a estimativa da velocidade de propagação de onda no meio. Através da correlação das velocidades registradas a cada aquisição, é possível observar a variação de velocidade de propagação de onda no meio durante o período de monitoramento.

O registro do receptor é representado por um sismograma e a estimativa da variação de velocidade é obtida através da correlação entre os tempos de chegada de onda nos sensores em múltiplas leituras.

FENOMENOLOGIA FÍSICA

Buscando-se a trabalhabilidade dos dados em tempo real e a sensibilidade necessária para se

ARTIGO TÉCNICO I

identificar baixas variações de velocidade de propagação, utiliza-se a porção mais dispersiva do espectro de onda adquirido. Esse componente do espectro é chamado de Coda wave.

A dispersão múltipla por parte desta onda permite a amostragem do meio por um período mais longo. Com isso, pequenas mudanças de velocidade são perceptíveis.

A velocidade de propagação de ondas mecânicas é uma propriedade do meio, regida por regras físicas consolidadas.

As mudanças de velocidade aferidas na *Coda wave* são, principalmente, variações de velocidade de ondas S (de Wit and Olivier, 2018). Ondas S são ondas de corpo associadas ao estímulo de cisalhamento do meio de propagação. Elas seguem a lei física exposta na equação 1, a seguir, obtida de (Rosa Filho, 2002).

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}} \quad (1)$$

- V_s : velocidade de propagação de ondas S no meio;
- μ : módulo de cisalhamento;
- ρ : massa específica;
- E : módulo de elasticidade; e
- σ : coeficiente de Poisson.

Pela equação, observa-se que o monitoramento microssísmico, pela abordagem passiva, permite o monitoramento da razão entre o módulo de cisalhamento e a massa específica do meio. No caso de barragens, monitora-se essa relação para o maciço da estrutura.

Face à incipiência da aplicação do monitoramento microssísmico a barragens, não há registros de estruturas monitoradas, em escala operacional, que tenham rompido. Por isso, as expectativas das consequências que tais eventos teriam na variação da velocidade de propagação de ondas sísmicas são baseadas na teoria dos fenômenos envolvidos, nas experiências disponíveis e no acompanhamento das estruturas que contam com o sistema instalado.

A grandeza monitorada sofre influência de inúmeros fatores. Não obstante, os principais merecem destaque.

Para barragens de concreto, entre as causas mais recorrentes de ruptura, destaca-se a propagação de fissuras. Nesse caso, há evidente perda de resistência ao cisalhamento do material, devido à sua ruptura, incorrendo em diminuição do módulo de cisalhamento. A velocidade de propagação do maciço, portanto, seria diminuída sistematicamente.

De forma análoga, barragens de aterro sofrem rupturas por instabilização de seu talude. Nesse cenário, a propagação da superfície de ruptura tem comportamento similar à propagação de fissuras em estruturas de concreto, embora em diferentes intensidades. A expectativa da velocidade de propagação de ondas S é, também, de queda.

Em barragens de aterro, a erosão interna, levando ao *piping*, é uma das principais causas. Nela, há perda progressiva de sólidos no maciço da barragem, criando um caminho preferencial como um tubo no maciço, justificando o nome "*piping*". Nesse cenário, há alterações tanto no módulo de cisalhamento, quanto na massa específica, o que, outrossim, ocasionaria perda de velocidade de propagação de ondas S no meio monitorado.

A depender do geomaterial adotado na construção, ele pode apresentar comportamento liquefazível. A liquefação ocorre em materiais contráteis e saturados quando expostos a um gatilho que, muitas vezes, pode ser sísmico. Quando o gatilho não está associado a um esforço sísmico, a liquefação é chamada de estática.

Em ambos os casos, a liquefação implica na perda de resistência efetiva do material. Com isso, ele passa a se comportar como um fluido, rompendo-se de forma rápida e desavisada. A velocidade do meio, nesses casos, apresentaria decréscimo, porém com baixa antecedência à ruptura propriamente dita.

Com a difusão da técnica de monitoramento microssísmico, a expansão do conhecimento acerca dos resultados de variação de velocidade de propagação de ondas sísmicas em barragens, das mais distintas, tem se intensificado nos últimos anos.

A PERSPECTIVA DO MONITORAMENTO MICROSSÍSMICO PASSIVO

O estudo da geração do ruído ambiente e da interferometria foi iniciado nas décadas de 1950 e 1960. A partir de 2005, o número de publicações apresentando suas aplicações registraram um vertiginoso crescimento (Nakata et al., 2019).

A interferometria sísmica vem sendo empregada em diversas soluções como no monitoramento de vulcões (Brenquier et al., 2008), de encostas (Mainsant et al., 2012), minas subterrâneas (Olivier et al., 2015) e barragens (Planès et al., 2016).

No que tange ao cenário brasileiro, a tecnologia tem sido implementada em mais de 20 estruturas de contenção, dentre barragens e diques, desde 2018.

A Agência Nacional de Mineração divulgou um comunicado, em fevereiro de 2019, sugerindo a execução de investigação em barragens, reservatórios e áreas de influência com métodos indiretos, como a microssísmica (ANM, 2019).

Apesar de incipiente, a microssísmica já é vista como uma técnica promissora e objetiva. Ela, enquanto método

indireto, é eficiente na identificação de anomalias para posterior investigação direta, se necessário.

Com o aumento de estruturas monitoradas, o avanço da fronteira do conhecimento sobre a variação de velocidade de propagação de ondas sísmicas em estruturas geotécnicas se estenderá de forma ainda mais rápida, aprofundando, por conseguinte, a compreensão dos empreendedores sobre o comportamento de suas estruturas de contenção – seja de água ou de rejeitos de mineração.

REFERÊNCIAS

- ANM. 2019. COMUNICADO - Agência Nacional de Mineração. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/noticias/comunicado>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2020.
- BRENGUIER F, SHAPIRO NM, CAMPILLO M, FERRAZZINI V, DUPUTEL Z, COUTANT O & NERCESSIAN A. 2008. Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise 1, 126.
- CURTIS A, GERSTOFT P, SATO H, SNIEDER R & WAPENAAR K. 2006. Seismic interferometry - turning noise into signal. *The Leading Edge* 25, 1082–1092. <https://doi.org/10.1190/1.2349814>
- DE WIT T & OLIVIER G. 2018. Imaging and monitoring tailings dam walls with ambient seismic noise. Australian Centre for Geomechanics. 10.
- EATON DW. 2018. Passive seismic monitoring of induced seismicity: Fundamental principles and application to energy technologies. Cambridge University Press.
- KAMEI R, NAKATA N & LUMLEY1, D. 2015. Introduction to microseismic source mechanisms. *The Leading Edge, Microseismic source mechanisms* 34, 876–880.
- MAINSANT G, LAROSE E, BRÖNNIMANN C, JONGMANS D, MICHOUUD C & JABOYEDOFF M. 2012. Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Toward failure prediction. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117.
- NAKATA N, GUALTIERI L & FICHTNER A. 2019. Seismic Ambient Noise. Cambridge University Press.
- OLIVIER G, BRENGUIER F, CAMPILLO M, ROUX P, SHAPIRO NM & LYNCH R. 2015. Investigation of coseismic and postseismic processes using in situ measurements of seismic velocity variations in an underground mine. *Geophysical Research Letters* 42, 9261–9269. <https://doi.org/10.1002/2015GL065975>
- PLANÈS T, MOONEY MA, RITTGERS JBR, PAREKH ML, BEHM M & SNIEDER R. 2016. Time-lapse monitoring of internal erosion in earthen dams and levees using ambient seismic noise. *Géotechnique* 66, 301–312. <http://dx.doi.org/10.1680/jgeot.14.P.268>
- ROSA FILHO JC. 2002. Modelagem sísmica de ondas elásticas e migração reversa no tempo em meios transversalmente isotrópicos (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ - Brazil.
- WAPENAAR K, VAN DER NEUT J & RUIGROK E. 2008. Passive seismic interferometry by multidimensional deconvolution. *GEOPHYSICS* 73, A51–A56. <https://doi.org/10.1190/1.2976118>

Workshop de Licenciamento Ambiental e Tecnologias de Aquisição Sísmica Marítima

14 -15 Abril 2020 | Rio de Janeiro, Brasil



Cadastre-se no LinkedIn da SBGf