

A Utilização Da Fibra Óptica no Monitoramento Microssísmico de Maciços Rochosos Fraturados

Tiago Borges da Silva

Doutorando, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, tiago.borges.silva@usp.br

Marcos Massao Futai

Professor Titular, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, futai@usp.br

RESUMO: A tecnologia denominada *Distributed Acoustic Sensing* - DAS é baseada no princípio de um interrogador enviar um pulso de luz em uma fibra óptica e medir as mudanças de tensão ao longo de seu comprimento causadas por perturbações acústicas. Quando uma onda sísmica exerce uma pequena mudanças de pressão/deformação nesta fibra, isso muda a amplitude e a fase da luz retroespalhada. O sistema registra digitalmente a resposta em pontos de medição ou canais uniformemente espaçados ao longo da fibra. O DAS é uma tecnologia emergente para medir o campo de tensão associado com propagação de ondas sísmicas e, por vezes, considerado com maior resolução espacial e capacidade de amostragem superior aos instrumentos sísmicos tradicionais, além da alta sensibilidade para eventos em baixa escala. O presente artigo apresenta vantagens e limitações relacionadas com aquisições por fibra óptica, além de apresentar estudos que demonstram o potencial da tecnologia DAS no monitoramento de eventos microssísmicos com a leitura de deformações causadas pelas ondas sísmicas, a localização dos eventos, a relação entre as técnicas de empilhamento de dados gerados pelo grande quantidade de leituras e grande cobertura resultante da utilização da fibra em comparação com sismógrafos existentes no mercado, além de pesquisas no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: Fibra óptica, Maciço rochoso, DAS, Microssísmica.

ABSTRACT: The technology, known as Distributed Acoustic Sensing (DAS), is based on the principle that an interrogator sends a pulse of light into an optical fiber and measures the strain changes along the length of the fiber caused by acoustic disturbances. When a seismic wave causes small changes in pressure or strain in this fiber, it causes a change in the amplitude and phase of the backscattered light. The system digitally records the response at measurement points, or channels, evenly spaced along the fiber. DAS is an emerging technology for the measurement of the stress field associated with the propagation of seismic waves and is sometimes considered to have a higher spatial resolution and a better sampling capability than conventional seismic instruments, in addition to a high sensitivity to small-scale events. The purpose of this article is to present the advantages and limitations associated with fiber-optic acquisition, as well as studies that demonstrate the potential of DAS technology for monitoring microseismic events by reading the deformations caused by seismic waves and the location of events, and to the relationship between data stacking techniques generated by the large number of readings and the large coverage resulting from using fiber compared to existing seismographs, as well as research conducted in Brazil.

KEYWORDS: Fiber optic, rock mass, DAS, microseismic

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos 15 anos, uma nova classe de instrumento, o *Distributed Acoustic Sensor* - DAS, foi lançado e adiciona imagens sísmicas à lista de aplicações na indústria de energia. O DAS é uma tecnologia emergente para medir o campo de tensão associado com propagação de ondas sísmicas como reflexo de meios elásticos, além da alta sensibilidade para eventos em baixa escala de energia.

Inicialmente, o DAS foi usado na indústria de exploração de petróleo e gás, com fibra implantada em poços para gerar imagens de subsuperfície com métodos sísmicos ativos, como *Vertical Seismic Profiling* - VSP (Daley *et al.*, 2013). Nos últimos anos o DAS tem sido aplicado a investigações sísmicas passivas, incluindo o estudo da tectônica de terremotos (Lindsey *et al.*, 2017); estudos de ruído ambiente e microssismos em uma variedade de configurações, incluindo estimulação de reservatório por fraturamento hidráulico

(Verdon *et al.*, 2020). Em conjunto, têm surgido inúmeras propostas de estudos em minerações subterrâneas, aplicação em barragens de rejeito e monitoramento de túneis, inclusive com prospectos no Brasil.

2 O MACIÇO ROCHOSO E AS ONDAS SÍSMICAS

A descrição das características mecânicas do meio natural são normalmente complexas por apresentarem uma natureza heterogênea, desta forma, a correlação de observações sísmicas e propriedades elásticas devem admitir condições simplificadoras para uma aproximação realista.

São conhecidos quatro tipos de ondas separadas em dois grupos conforme o meio e tipo de propagação a partir de uma fonte natural ou artificial. O grupo das compressionais e transversais, que integram o grupo de ondas volumétricas ou de corpo e o grupo de ondas superficiais, denominadas Rayleigh e Love. (Miranda *et al.*, 2000).

Inúmeros autores fizeram proposições da utilização de ondas sísmicas para o estudo do comportamento geomecânico do maciço (Watanabe e Sassa, 1996; Boadu, 1997; Goh *et al.*, 2011), outros, mais especificamente, para análise direta de métodos de classificação (Barton, 2006), no monitoramento de poços e reservatórios de petróleo (Bois *et al.*, 1972; Doyen, 1988; Maxwell e Urbancic, 2005; Trudeng *et al.*, 2014), monitoramento de fraturamento hidráulico (Eaton e Dusseault, 2003), minas subterrâneas (Gibowicz e Kijko, 1994; Urbancic e Trifu, 2000) e, por fim, para o projeto, construção e monitoramento de estruturas geotécnicas, voltados para túneis (Taioli, 1999; Sattel *et al.*, 1996; Dickmann, 2005), estudos de fundações (Xia *et al.*, 1999; Fatehnia *et al.*, 2015), estudos para o monitoramento de barragens (Rodrigues *et al.*, 2020; Johansson *et al.*, 2020).

Diferentes exemplos de monitoramento de estruturas estão distribuídos pelo mundo e a tecnologia sísmica apresenta grande potencial. Como exemplo, em uma usina hidrelétrica de Jinping, na China, foi observado que o monitoramento microssísmico é uma técnica inestimável para avaliar a estabilidade de taludes e outras estruturas rochosas. Xu *et al.* (2011) utilizaram a técnica para analisar a correlação entre a microssismicidade e a potencial superfície de deslizamento do talude da margem esquerda da usina hidrelétrica. Foi implementado um modelo numérico para analisar os processos de falha e a estabilidade do talude denominado *Rock Failure Process Analysis - Strain Rock Mass - RFPA-SRM*, em que, a análise de elementos discretos pode simular o processo de falha de rochas e solos. Os resultados da simulação foram comparados com a distribuição espacial da microssismicidade registrada pelo sistema de monitoramento e os resultados coincidiram com a distribuição espacial dos sismos. Xu *et al.* (2015), descreveram como os riscos associados às cavernas subterrâneas na usina hidrelétrica de Houziyan, no sudoeste da China, estavam crescendo devido ao descarregamento induzido pela escavação e foi instalado um monitoramento sísmico de alta resolução para determinar a relação entre as atividades microssísmicas medidas e as zonas de dano de escavação do maciço rochoso circundante. Zhao *et al.* (2019) aplicaram método microssísmico à Mina de Ferro Shirengou, selecionando uma área que apresentava infiltração e falha de massa rochosa como área de estudo. Foi gerada uma *Discrete Fracture Network - DFN* com base em uma varredura de descontinuidade tridimensional sem contato e estabeleceram a DFN escaneando os planos estruturais. Com base nos dados microssísmicos da área de estudo, os autores usaram seus critérios propostos para extrair as fraturas razoáveis dos planos focais associados a diferentes mecanismos de falha.

O monitoramento sísmico permite o controle das variações das velocidades de partículas e acelerações no meio, de acordo com os eventos sísmicos ou estímulos antrópicos percebidos por sensores capazes de registrar essas vibrações, como geofones ou fibras ópticas.

3 SENSORES SÍSMICOS E A TECNOLOGIA DA FIBRA ÓPTICA

A aquisição de dados sísmicos depende diretamente da sensibilidade do equipamento, portanto, a escolha entre sensores individuais (geofones) ou fibra óptica, dependerá do nível de detalhamento objetivado. Um série de trabalhos compararam os resultados brutos e transformados (Daley *et al.*, 2014; Spikes *et al.*, 2018; Eaid *et al.*, 2020), em que fica nítida a evolução da qualidade do equipamentos por fibra, com dados semelhantes, sendo necessário o ajuste no arranjo para a obtenção do máximo de informações coletados.

O *Distributed Acoustic Sensing - DAS* (Farhadiroushan *et al.*, 2009) é baseado no princípio do interrogador enviar um pulso de luz em uma fibra óptica e medir as mudanças de tensão ao longo dessa fibra

causadas por perturbações acústicas. Quando o pulso de luz é enviado, uma pequena quantidade dessa luz é dispersada e retroespalhada de volta para a unidade de detecção devido à interação com o vidro da fibra óptica (Parker *et al.*, 2014).

Quando uma onda sísmica exerce uma pequena mudanças de pressão/deformação na fibra isso muda a amplitude e a fase do luz retroespalhada. A fase relativa e a amplitude podem ser usadas para determinar a taxa de deformação na fibra. O sistema de detecção mede mudanças na tensão a uma taxa de até várias dezenas de kHz, necessário para registrar campos acústicos com precisão. O sistema registra digitalmente a resposta em pontos de medição ou canais uniformemente espaçados ao longo da fibra

Diversos autores, dentre eles, Parker *et al.* (2014) e Hull *et al.* (2017) descrevem o funcionamento de aquisição sísmica pelo DAS como um pulso de luz em uma fibra óptica, em que, as mudanças de tensão causadas pelas ondas acústicas interagem com a fibra. A resposta do sistema à deformação dinâmica é linear, o que torna possível tratar os dados do DAS de forma semelhante às tecnologias de sensores convencionais, como geofones e acelerômetros. Uma vez que o sinal acústico registrado é verdadeiro em frequência, fase e amplitude, é possível realizar um processamento avançado de arranjo de fase.

Em um campo de testes, Daley *et al.* (2013) analisaram o monitoramento subterrâneo pela detecção de pulsos de luz enviados pelo cabo de fibra óptica e análise da radiação retroespalhada pelas alterações causadas pelas vibrações. No artigo os autores discutem como os avanços na optoeletrônica e no processamento de sinais associados desempenham um papel crucial ao permitir o uso de cabos de fibra óptica como sensor. Esses avanços melhoraram a sensibilidade e a precisão na detecção de mudanças na luz retroespalhada, permitindo medições mais precisas das ondas acústicas.

Em um estudo dos aspectos técnicos da utilização de fibra óptica e casos históricos de sucessos de implementação desta tecnologia, Verdon *et al.* (2020) mencionam o alto fornecimento de taxa de dados pela sensibilidade do aparelho e distribuição de inúmero canais ao longo do cabo, permitindo o monitoramento microssísmico em tempo real. No mesmo artigo os autores exemplificam que o arranjo proposto para a fixação do cabo foi suficiente para o levantamento completo dos eventos microssísmicos, com captação do sinal nos três eixos de direções (Figura 1).

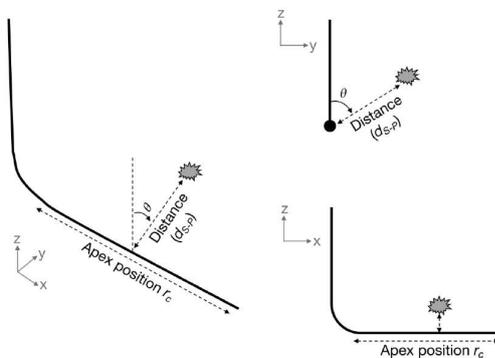


Figura 1. Representação esquemática do procedimento de localização de um evento sísmico. A figura à esquerda representa em 3D o arranjo da fibra ao longo do poço (traço em preto) e a posição do evento (em cinza). As outras duas ilustram visões em diferentes eixos (Verdon, *et al.*, 2020).

Uma vez observada a vantagem da tecnologia da fibra-óptica para a aquisição de dados sísmicos de diferentes naturezas, suas aplicações em diferentes indústrias são conhecidas e apresentam franco crescimento. Levantamentos utilizando a tecnologia DAS, além das inúmeras utilizações em petróleo e gás, estão sendo aplicados em infraestrutura, mais especificamente para uso no monitoramento geotécnico de barragens e túneis que exigem alto grau de segurança.

A agência nacional francesa (ANDRA-Déchets Radioactifs), responsável por identificar, implementar e garantir soluções de gestão de segurança para materiais radioativos, tem realizado testes com fibra óptica para o monitoramento sísmico de possíveis danos em galerias de armazenamento de resíduos (ANDRA, 2023).

Outro exemplo é a aplicação do DAS em anomalias em barragens na Suécia. Johansson *et al.* (2020) utilizaram equipamento para verificar o potencial de detecção de infiltração e erosão interna em barragens de terra com o monitoramento contínuo de sinais acústicos ao longo de toda a extensão da fibra. O DAS mostrou-se eficaz na detecção de eventos acústicos, como vazamentos e fluxo de água com detecção eficaz resultante

da alta resolução espacial da fibra. O DAS foi capaz de medir deformações em ordens de magnitude abaixo dos métodos tradicionais em acústica ou sistemas sísmicos convencionais.

Em uma barragem experimental, Johansson *et al.* (2021) e (2022) realizaram levantamentos utilizando DAS para detectar anomalias ao longo da operação, principalmente relacionando com os processos de enchimento e esvaziamento. Como resultados mencionaram capacidade da fibra óptica de observar mudanças em pequena escala com a análise de onda sísmica de frequência mais alta, além disso, os cabos puderam ser instalados de forma contínua em toda a estrutura, o que permitiu a construção de uma imagem 3D da barragem.

A Tabela 1 faz uma compilação das principais vantagens de utilização da fibra óptica em relação aos geofones tradicionais conforme os autores de estudos supracitados.

Tabela 1. Principais vantagens relacionadas à aquisição de dados sísmicos por fibra óptica. Compilado de Daley *et al.* (2013), Verdon *et al.* (2020), Johansson *et al.* (2022)

VANTAGEM	DESCRIÇÃO
Sensibilidade distribuída	O monitoramento contínuo ao longo de todo o comprimento do cabo de fibra óptica, permitindo a detecção de sinais acústicos em vários pontos simultaneamente.
Alta resolução espacial	Permite a detecção de mudanças sutis no movimento do maciços em intervalos muito pequenos ao longo do cabo. Possibilita a criação de leituras sísmicas detalhadas e a identificação de características com maior precisão.
Versatilidade	Como um cabo, pode ser fixado em diferentes geometrias, de maneira contínua, inclusive soterrado, fixado na superfície de paredes ou estruturas.
Imunidade eletromagnéticas	As fibras ópticas são imunes a interferências eletromagnéticas, o que as torna ideais para ambientes com alta interferência elétrica.
Baixo impacto na estrutura	A instalação das fibras ópticas pode ser feita de forma não intrusiva, sem a necessidade de grandes alterações na estrutura. Isso minimiza o impacto no funcionamento e na integridade do objeto estudado durante o processo de instalação.
Aplicação	A tecnologia tem sido amplamente utilizada em revestimentos de poços para a verificação fraturamento hidráulico da rochas, dinâmica de reservatórios, em cavas e galerias de mineração, nas injeções para sequestro de carbono e, por fim, no monitoramento de túneis e barragens.

No entanto, por ser uma tecnologia de vanguarda, a utilização da fibra ainda necessita de estudos e desenvolvimento de técnica de utilização. O Quadro 2 apresenta algumas desvantagens ou defasagens que a tecnologia DAS apresenta.

Tabela 2. Principais limitações relacionadas à aquisição de dados sísmicos por fibra óptica. Compilado de Hudson *et al.* (2021), du Toit *et al.* (2022).

LIMITAÇÕES	DESCRIÇÃO
Variação de sensibilidade	Sensibilidade que depende do ângulo de incidência da energia sísmica em relação à orientação da fibra. O sistema tende a ser menos sensível às chegadas de ondas P laterais - ondas P que chegam de direções perpendiculares à orientação axial da fibra.
Limitação da taxa de amostragem de	Os interrogadores DAS são capazes de detectar em diferentes faixas

frequência dependendo do comprimento da fibra óptica - apenas um pulso pode estar presente na fibra em qualquer momento dado, limitando a taxa de amostragem temporal com base na velocidade da luz. Como regra aproximada, uma fibra de 10 km pode ser interrogada a 10 kHz, e cada duplicação no comprimento irá reduzir pela metade a taxa de interrogatório.

Ruído O ruído de medição aleatório ao longo da fibra pode ser observado como mais potente do que o em geofones. Em monitoramento passivo, a faixa de frequência normalmente utilizada deve ser assumida a priori, o que geralmente leva a filtragem mais conservadora (ou seja, banda de passagem mais ampla) e maior contaminação por ruído.

Ainda que algumas desvantagens indicadas apresentem sérias interferências nas aquisições e o DAS necessite de mais aprimoramentos, a tecnologia já apresenta vantagens na cobertura e a possibilidade de utilizar a distribuição de rede de comunicação como grandes sensores sísmicos, além do aumento na resolução para imageamento de subsuperfície para diferentes fins.

4 MONITORAMENTO DO MACIÇO ROCHOSO UTILIZANDO DAS

A microssismicidade natural é um fenômeno sismológico de pequena magnitude que ocorre de forma contínua e difusa na crosta terrestre. A utilização do DAS em estudos de microssismicidade natural oferece uma amostragem espacial densa dos campos de ondas sísmicas, permitindo uma melhor resolução espacial, detecção de eventos microssísmicos e melhora significativa na relação sinal-ruído (*Signal to Noise Ratios - SNR*) com a largura de banda do espectro medido.

Conforme demonstrado por Hudson *et al.* (2021), a relação SNR indica a proporção entre a intensidade do sinal desejado e o nível de ruído presente nos dados. O DAS pode combinar os sinais registrados em diferentes pontos da fibra para melhorar a detecção e a qualidade dos eventos sísmicos reduzindo o impacto do ruído nos dados sísmicos, aumentando a intensidade do sinal em relação ao ruído de fundo. Essa melhoria na SNR é crucial para a detecção precisa de eventos microssísmicos de baixa magnitude, que podem ser facilmente mascarados pelo ruído ambiental. Com uma SNR aprimorada, o DAS torna-se uma ferramenta eficaz para identificar e analisar eventos sísmicos sutis e de pequena escala (Figura 2).

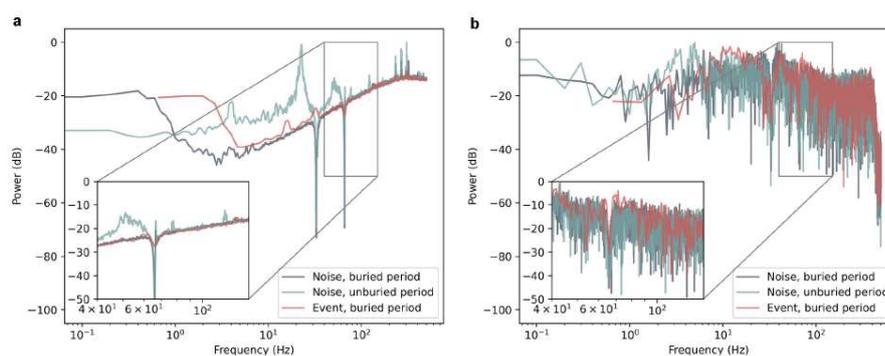


Figura 2 - Comparação dos espectros de eventos e ruídos para o DAS e geofones. (a) Espectro de eventos e espectros de ruído com fibra. (b) Espectro de eventos e espectros de ruído correspondentes aos mesmos períodos de tempo que o anterior, mas para um geofone colocado no final da fibra (Hudson *et al.*, 2021).

A Figura 2 apresenta os espectros de eventos e ruídos para o DAS e os geofones, tanto quando o cabo do DAS está enterrado quanto quando está desenterrado. A análise dos espectros mostra que o evento observado pelo DAS possui uma SNR mais alta em comparação com o espectro observado pelos geofones. Mesmo com a aplicação de um filtro em 66 Hz, o sinal no espectro do DAS permanece significativamente acima do nível de ruído, indicando uma SNR superior. O resultado ilustra a diferença na qualidade dos dados sísmicos obtidos pelo DAS em comparação com os geofones, destacando a capacidade do DAS de oferecer

uma SNR aprimorada devido à sua capacidade de empilhar múltiplos canais de medição. Essa melhoria na SNR é essencial para a detecção e análise eficaz de eventos micro sísmicos de baixa magnitude, demonstrando a vantagem do DAS em fornecer dados de alta qualidade para estudos de micro sísmica natural.

A Universidade de Utah, utilizando um laboratório de campo subterrâneo dedicado a desenvolver e testar tecnologias em sistemas geotérmicos, realizou testes de monitoramento micro sísmico utilizando fibra óptica (FORGE, 2022). Em uma análise prévia de dados abertos disponibilizados pela universidade (FORGE, 2022), a filtragem de banda permitiu a detecção de eventos micro sísmicos durante a estimulação de poços em três etapas. Esses eventos foram registrados em outros poços de observação, indicando a ocorrência de atividade sísmica induzida pela injeção de fluido no poço (Figura 3).

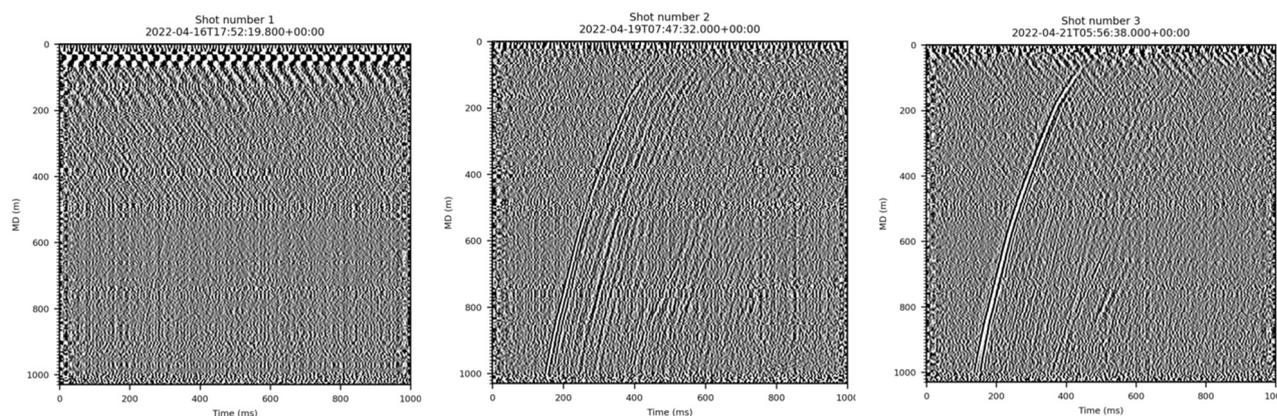


Figura 3 - Eventos registrados durante as três fases de estimulação do poço 16A (78) - 32 e monitoramento DAS pelo poço de observação 78A - 32 (FORGE, 2022).

Durante a estimulação do poço 16A (78) - 32, o poço de observação 78A-32 foi monitorado por meio da instalação do sistema de fibra óptica, permitindo a detecção e registro de eventos micro sísmicos induzidos pela injeção de fluido e a interação com o maciço rochoso. Apesar dos benefícios do monitoramento no poço 78A-32, houve desafios na determinação precisa da profundidade e azimute dos eventos micro sísmicos devido à configuração dos poços de observação. A detecção e catalogação dos eventos registrados no poço 78A-32 contribuíram significativamente para a compreensão da resposta sísmica do subsolo à estimulação hidráulica.

Na Universidade de São Paulo – USP, os pesquisadores do presente trabalho, estão iniciando os pesquisas utilizando a tecnologia DAS para futuras análises de caracterização de módulos elásticos e identificação de micro sísmos relacionados deslocamento de blocos no maciço rochoso de um túnel ferroviário. Os primeiros dados estão sendo gerados em testes de bancada e análises pontuais em campos de teste na universidade para o completo entendimento da tecnologia e desenvolvimento e proposta do melhor arranjo para aquisições em túneis e cavernas, uma vez que este tipo de trabalho é inédito no mundo. O trabalho está inserido no grupo de projeto Tunnel 4.0 – Aplicação de transformação digital na inspeção, monitoramento, análise e diagnóstico de túneis ferroviários.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Como brevemente discutido a tecnologia da fibra óptica apresenta grande potencial no monitoramento de vibrações, em especial micro sísmos, além de deformações estáticas e variações de temperatura. O objetivo principal foi apresentar o potencial de uma tecnologia de vanguarda, já largamente utilizada na indústria de óleo e gás, em fase inicial em minerações subterrâneas e com grande potencial para infraestrutura, no acompanhamento de estruturas civis e geotécnicas. Foram discutidas as vantagens e desvantagens até então conhecidas e exemplos recentes de monitoramento micro sísmicos utilizando fibra óptica.

Novos estudos estão sendo realizados pelos autores. Os resultados esperados são a calibração e verificação de módulos elásticos em um maciço rochoso fraturado e a possibilidade da aplicação do estudo de blocos formados por descontinuidades. Os resultados esperados são a validação cruzada de módulos elásticos com dados sísmicos mais detalhados e contínuos obtidos pelo DAS e a aplicação da técnica DFN para maciços

revestidos, possibilitando a aplicação do monitoramento microsísmico com fibra óptica em estruturas como túneis e taludes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRA. (2023). *Acquisition de données géophysiques dans une galerie de grand diamètre*. Acesso em junho de 2023, disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=geg-d-gMCgWs>
- BARTON, N. (2006). *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*. Taylor & Francis Group.
- BOADU, F. (1997). Fractured rock mass characterization parameters and seismic properties- Analytical studies. *Journal of Applied Geophysics*, pp. 1-19.
- BOIS, P., LA PORTE, M., LAVERGNE, M., & THOMAS, G. (1972). Well-to-well seismic measurements. *Geophysics*, 3, pp. 471-480.
- DALEY, T., FREIFELD, B., AJO-FRANKLIN, J., DOU, S., PEVZNER, R., SHULAKOVA, V., . . . LUETH, S. (2013). Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring. *The Leading Edge*, 32, pp. 699-706. doi:10.1190/tle32060699.1
- DALEY, T., MILLER, D., FREIFELD, B., & DODDS, K. (2014). Results of Field Testing of Simultaneous DAS and Geophone VSP. *76th EAGE Conference & Exhibition*. Amsterdam.
- DICKMANN, T. (2005). Seismic Prediction While Tunnelling In Hard Rock. *Annual Meeting of the German Geophysical Society*. Graz, Austria.
- DOYEN, P. (October de 1988). Porosity from seismic data: A geostatistical approach. *Geophysics*, 53, 1263-1275.
- DU TOIT, H., GOLDSWAIN, G., & OLIVIER, G. (2022). Can DAS be used to monitor mining induced seismicity? *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 155. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105127>
- EAID, M., KEATING, S., & INNANEM, K. (2020). Multi-parameter seismic elastic full waveform inversion with combined geophone and shaped fiberoptic cable data. *Geophysics*, pp. 1-64.
- EATON, D., & DUSSEAEULT, M. (2013). Microseismic monitoring developments in hydraulic fracture stimulation. Em M. VAN DER BAAN, D. EATON, & M. DUSSEAEULT, *Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing* (Vol. 1, p. 1074).
- FARHADIROUSHAN, M., PARKER, T., & SHATALIN, S. (2009). *Patente N° WO2010136810A2*.
- FATEHNIYA, M., HAYDEN, M., & LANDSCHOOT, M. (2015). Correlation between Shear Wave Velocity and SPT-N Values for North Florida Soils. *EJGE*, 20, pp. 1421-1430.
- FORGE. (2022). *Geothermal Data Repository*. Disponível em: <https://gdr.openei.org/submissions/1423>. Acesso em: 18 de mar. 2024.
- GIBOWICZ, S., & KIJKO, A. (1994). *An introduction to mining seismology*. Academic Press.
- GOH, T., GHANI RAFEK, A., RAHIM SAMSUDIN, A., HARIRI ARIFFIN, M., & BAIZURA YUNUS, N. (2011). Rock Mass Geomechanical Characterization by Seismic Methods: Poisson's Ratio. *Sains Malaysiana*, 40(6), pp. 561-568.
- HUDSON, T., BAIRD, A., KENDALL, J., KUFNER, S., BRISBOURNE, A., SMITH, A., . . . CLARKE, A. (2021). Distributed Acoustic Sensing (DAS) for Natural Microseismicity Studies: A Case Study From Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127, pp. 10-19.
- HULL, R., MEEK, R., BELLO, H., & MILLER, D. (2017). Case History of DAS Fiber-Based Microseismic and Strain Data, Monitoring Horizontal Hydraulic Stimulations Using Various Tools t Highlight Physical Deformation Processes (Part A). *Unconventional Resources Technology Conference, URTEC: 2695282*, pp. 1-13. Austin, Texas, USA. doi:10.15530/urtec-2017- 2695282
- JOHANNESSEN, K., DRAKELEY, B., & FARHADIROUSHAN, M. (2012). Distributed acoustic sensing - A new way of listening to your well/reservoir. *SPE Intellignet Energy International*. Utrecht, Netherlands.
- JOHANSSON, S., BEAUPRETRE, S., BOUE, A., & STORK, A. (2021). Distributed Acoustic Sensing for Detection of Defects in the Test Dam at Älvkarleby. *Energiforsk*.
- JOHANSSON, S., BEAUPRETRE, S., MORDET, A., & STORK, A. (2022). Distributed Acoustic Sensing for Detection of Defects in the Test Dam at Älvkarleby – Phase 2. *Energiforsk*.

- JOHANSSON, S., STORK, A., DAVID, A. M., & NYGREN, C. (2020). Fibre-optic distributed acoustic sensing for detection of seepage and internal erosion - Measurements in embankment dams. *Energiforsk* (Report 2020:682).
- LAVOUÉ, F.; COUTANT, I.; BOUÉ, P.; PINZON-RINCON, L.; BRENGUIER, F.; BRONSSIER, R.; DALES, P.; REZAEIFAR, M.; BEAN, C.J. (2020). Understanding Seismic Waves Generated by Train Traffic via Modeling: Implications for Seismic Imaging and Monitoring. *Seismological Research Letters*, 20(20).
- LINDSEY, N., MARTIN, E. R., DREGER, D. S., FREIFELD, B., COLE, S., JAMES, S. R., & BIONDI, B. (2017). Fibre-optic network observations of earthquake wavefields. *Geophysical Research Letters*, 11(44), pp. 792-799.
- MAXWELL, S., & URBANCIC, T. (February de 2005). The Potential Role of Passive Seismic Monitoring for Real-Time 4D Reservoir Characterization. *SPE - Reservoir Evaluation & Engineering*, 8(1), 70-76.
- PARKER, T., SHATALIN, S., & FARHADIROUSHAN, M. (2014). Distributed Acoustic Sensing – a new tool for seismic applications. *First Break*, 32, pp. 1-9.
- RODRIGUES, C., PAULA, A., & DIAS, L. (2020). Interferometria sísmica passiva para o monitoramento de barragens. *Boletim SBGF*, 112.
- SATTEL, G., SANDER, B. K., AMBERGF, F., & KASHIWA, T. (1996). Predicting ahead of the face – tunnel. *Tunnels and Tunnelling*, pp. 24-30.
- SPIKES, K., TISATO, N., HESS, T., & HOLT, J. (2018). Comparison of geophone and surface-deployed das seismic data. *Geophysics*, pp. 1-19.
- TAIOLI, F. (1999). Comportamento elástico dinâmico da Formação São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 29, pp. 657-662.
- TRUDENG, T., GARCIA-TEIJEIRO, X., RODRIGUEZ-HERRERA, A., & KHAZANEHDARI, J. (2014). Using Stochastic Seismic Inversion as Input for 3D Geomechanical Models. *International Petroleum Technology Conference*. Doha, Qatar.
- URBANCIC, T., & TRIFU, C. (2000). Recent advances in seismic monitoring technology at Canadian mines. *Journal of Applied Geophysics*, pp. 225-237.
- VERDON, J. P., HORNE, S., CLARKE, A., STORKA.L., BAIRD, A., & KENDALL, J. (2020). Microseismic monitoring using a fibre-optic Acoustic Sensor (DAS) array. *Geophysics*, 3, pp. 89-99. doi:10.1190/geo2019-0752.1
- WATANABE, T., & SASSA, K. (1996). Seismic Attenuation Tomography and its Application to Rock Mass Evaluation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, 33, pp. 467-477.
- XIA, J., MILLER, R. D., & PARK, C. B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, 64, pp. 691-700.
- XU, N., LI, T., DAI, F., LI, B. Z., & YANG, D. (2015). Microseismic Monitoring and Stability Evaluation for the Large Scale Under- ground Caverns at the Houziyan Hydropower Station in Southwest China. *Engineering Geology*, 188(2015), pp. 48-67. doi:10.1016/j.enggeo.2015.01.020
- XU, N., TANG, C., LI, L., ZHOU, Z., LIANG, Z., & YANG, J. (2011). Microseismic monitoring and stability analysis of the left bank slope in Jinping first stage hydropower station in southwestern China. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*(48), p. 950-963. doi:10.1016/j.ijrmms.2011.06.009
- ZHAO, Y., YANG, T., ZHANG, P., XU, H., ZHOU, J., & YU, Q. (2019). Method for Generating a Discrete Fracture Network from Microseismic Data and its Application in Analyzing the Permeability of Rock Masses: a Case Study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*(52), pp. 3133-3155. doi:10.1007/s00603-018-1712-x