

Monitoramento do ruído ambiental com estações *Raspberry Shake* sobre blocos de concreto: Estudo de caso da Barragem do Paranoá

Rafael Mendes Jorge

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasil.

Manuelle Santos Góis

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasil.

André Luís Brasil Cavalcante

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasil.

RESUMO: O uso de técnicas tradicionais para o monitoramento da integridade estrutural de barragens de terra, tem se mostrado insuficiente para prever de forma satisfatória a ocorrência de patologias internas e os sensores sísmicos, vêm sendo explorados como uma alternativa para o monitoramento desse tipo de estrutura ao longo do tempo. Neste tipo de monitoramento é importante: garantir um bom acoplamento do sensor ao solo e principalmente em ambientes urbanos, conhecer a assinatura sísmica do ruído ambiental na região de monitoramento. Nesse contexto, o presente estudo, situado no projeto de pesquisa P&D AINOÁ, tem por objetivo verificar as diferentes condições de acoplamento dos sensores ao variar dois parâmetros: a massa específica dos blocos de concreto sobre os quais os sensores foram acoplados e a condição de acoplamento do sensor ao meio. Para isso, foi feito o monitoramento do ruído ambiental na região da Barragem do Paranoá. Foram construídos 4 blocos e estes foram inseridos em furos executados na região próxima à ombreira esquerda da Barragem. Foi analisada a componente vertical durante um período de 3 h e um evento com duração de 1,5 minutos. Observou-se que, para as frequências características do ruído ambiental causado pelo fluxo de veículos, a variação da massa do conjunto sensor e bloco não apresentam diferenças perceptíveis na análise conduzida no presente estudo, através do pré-processamento dos dados monitorados.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens de Terra, Acoplamento de Geofones, Monitoramento do Ruído Ambiental.

1 INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas que geram diversos benefícios, tanto sociais quanto econômicos, influenciando uma boa parcela da população. Segundo dados do Relatório de Segurança de Barragens de 2020, aproximadamente 70% da energia elétrica consumida no Brasil é gerada por usinas hidrelétricas. Atualmente existem 21.953 barragens registradas na base da PNSB (Política Nacional de Segurança de Barragens), dentre as quais 57% são barragens de terra (ANA, 2020).

Em barragens de terra, o estudo de Foster *et al.* (2000) mostra que, em uma análise histórica dos principais motivos que levaram ao rompimento de barragens, o fenômeno de erosão interna ou *piping* é o motivo pelo qual 46,1% das barragens romperam. Muitas vezes só é possível detectar a ocorrência de tal mecanismo de falha através de inspeções visuais, o que significa que o problema já estaria em um estado avançado, uma vez que ele é frequentemente “invisível” para os métodos tradicionais de inspeção (Planès *et al.*, 2016). Desta forma, há uma necessidade crescente relacionada ao desenvolvimento de técnicas não invasivas que permitam monitorar de forma eficaz, a integridade estrutural de barragens de terra.

A utilização de sensores sísmicos tem se mostrado como uma alternativa viável no monitoramento deste tipo de barragem, conforme mostram os trabalhos de Planès *et al.* (2016), Parekh (2016), Rinehart *et al.* (2012), Rittgers *et al.* (2015) entre outros. Uma das vantagens da

utilização de sensores sísmicos para monitoramento de barragens está associada à possibilidade de utilizar técnicas de *Machine Learning* para analisar os dados. Os trabalhos de Fisher *et al.* (2017) e Fisher *et al.* (2016) são alguns exemplos que aplicaram técnicas de *Machine Learning* para tratamento dos dados obtidos através do monitoramento de barragens utilizando geofones.

O projeto de pesquisa P&D AINOÁ se encaixa em tal perspectiva ao propor um sistema de monitoramento de patologias internas em barragens de terra e enrocamento, sendo este fundamentado em inteligência artificial e internet das coisas. O projeto é um estudo de caso aplicado à Barragem do Paranoá, onde será aplicada a metodologia de monitoramento aliada ao tratamento dos dados por meio de técnicas de *Machine Learning*.

O monitoramento utilizando sensores sísmicos traz consigo dois aspectos importantes: (1) por ser localizada em ambiente urbano, é necessário monitorar o ruído ambiental na região da Barragem do Paranoá, para que seja possível diferenciar o ruído do sinal de interesse captado pelo sensor; (2) é preciso analisar as condições de acoplamento do sensor ao solo da região, através de uma análise da variação da resposta do sensor a diferentes condições de acoplamento em campo, de forma a ajudar na tomada de decisão da construção dos abrigos que comportarão os sensores durante o monitoramento.

Nesse contexto, o presente artigo, situado no projeto de pesquisa P&D AINOÁ, tem por objetivo estudar a resposta do sensor a diferentes condições de acoplamento durante o monitoramento do ruído ambiental, através da variação: da massa específica do bloco de concreto sobre o qual o sensor foi posicionado e; da condição de acoplamento do sensor ao meio, na região próxima à ombreira esquerda da Barragem do Paranoá.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Patologias em barragens de terra – Barragem do Paranoá (BP)

As barragens são estruturas geotécnicas utilizadas para armazenar água para diversos fins e, em alguns casos, são também utilizadas para armazenar rejeitos provenientes do processo de exploração de minérios. Segundo dados do Comitê Internacional de Grandes Barragens (ICOLD, 2020), nas barragens cuja água possui destinação única, que correspondem a 49% das barragens registradas, em 47% a destinação final da água é para irrigação, 21% é para geração de energia elétrica e 12% para uso populacional. Segundo o mesmo registro, a demanda por água apresenta historicamente um crescimento que pode chegar a valores da ordem de 2% a 3% nas próximas décadas. Isso representaria a necessidade de aproximadamente 7.714 km³ de água armazenada, o que sinaliza a importância dos barramentos na perspectiva que temos para o futuro.

Segundo dados do Registro Mundial de Barragens do ICOLD de 2020, as barragens de terra são predominantes, correspondendo a 65% das barragens registradas no mundo. Foster *et al.* (2000) indicam que historicamente, em grandes barragens de terra, classificadas pelo ICOLD como as que possuem mais de 15 metros de altura, a frequência de média de rompimento é de 1,2% durante a vida útil, reduzindo para 1,1% quando somente são consideradas as falhas que ocorreram durante a operação da barragem.

No que tange os principais modos de falha, Foster *et al.* (2000) indicam que, estatisticamente, em grandes barragens, até 1986, 48,4% romperam por galgamento; 46,1% romperam por *piping*, sendo: 30,5% pelo corpo do barramento, 14,8% pela fundação e 1,6% do corpo do barramento para a fundação; 4,7% romperam por deslizamentos a jusante, 0,8% romperam por deslizamento a montante; e 1,6% romperam por liquefação provocada por sismos.

Os fenômenos de erosão interna ou *piping* representam, portanto, uma boa parcela dos principais modos de falha observados historicamente em grandes barragens de terra. O grande problema associado a este mecanismo de falha é que ele não pode ser efetivamente observado, até que se torne visível através do afloramento de água no talude de jusante da barragem durante inspeções visuais e, neste ponto, ações de mitigação podem ser urgentes e de alto custo (Parekh, 2016).

Atualmente, segundo Parekh (2016) as técnicas tradicionais de monitoramento, como os piezômetros, são incapazes de identificar possíveis falhas de forma eficaz durante a vida útil da barragem. Segundo o mesmo autor, tais técnicas produzem grandes discontinuidades nos dados

tanto no espaço quanto no tempo, o que limita a sua capacidade de detectar problemas antes que estes escalem para situações de alto risco e custo.

Conforme Planès *et al.* (2016), existe a necessidade do desenvolvimento de técnicas de monitoramento não invasivas que permitam monitorar a vida útil de barragens de terra, permitindo identificar possíveis problemas internos durante os seus períodos iniciais. Segundo os mesmos autores, o uso de métodos de monitoramento através de sísmica passiva, também conhecido como correlação do ruído ambiental, vem ganhando popularidade tanto na indústria quanto na academia, sendo utilizado para o monitoramento de muitas estruturas como reservatórios de óleo e gás, vulcões, zonas de falhas e o interior da terra. Os autores propõem o uso dessas técnicas para o monitoramento de barragens de terra.

Aliado à sísmica passiva, o uso de técnicas de *Machine Learning* torna-se interessante por permitir um monitoramento em *time-lapse* de barragens de terra, o que permite alcançar uma análise em tempo real da integridade da estrutura. Fisher *et al.* (2017) fazem o uso dessas técnicas para detectar fenômenos de erosão interna que possam levar a falha, utilizando dados obtidos através de sensores posicionados na superfície da barragem.

Nesse contexto, o projeto de pesquisa P&D AINOÁ está inserido com o objetivo de criar um sistema de monitoramento da Barragem do Paranoá, utilizando estações sismológicas *Raspberry Shake*, aliado ao uso de técnicas de *Machine Learning* para monitorar a integridade estrutural da barragem.

A barragem do Lago do Paranoá, também denominada Barragem do Paranoá (BP), está localizada no rio Paranoá, pertencente a sub-bacia do rio de São Bartolomeu da grande bacia do Rio Paraná. A Barragem foi construída na cidade de Brasília, Distrito Federal (DF) entre os anos de 1958 e 1962, com a finalidade de melhorar a umidade do ar e gerar energia elétrica no DF. Atualmente ela possui um reservatório de aproximadamente 37,5 km², sendo classificada como uma Barragem de retenção e de regularização servindo, também, para as atividades de lazer da comunidade do DF (AINOÁ, 2021).

A BP liga ainda a Região Administrativa do Paranoá à região central do DF, apresentando um intenso fluxo de veículos em certos horários do dia. O processamento dos dados obtidos através do monitoramento da BP requer conhecimento do ruído ambiental característico da região, este caracterizado principalmente pelo fluxo de veículos, tornando possível diferenciar o ruído do dado analisado.

2.2 Sensores utilizados no monitoramento da BP

Vários tipos de sensores podem ser utilizados para o tipo de monitoramento proposto, Planès *et al.* (2016) utilizam de geofones de componente vertical de 20 Hz - 400 Hz e Fisher *et al.* (2017) utilizam o mesmo tipo de sensor com frequência de 500 Hz.

Para o monitoramento foram utilizados os sistemas *Raspberry Shake* RS3D e RS4D. O sistema *Raspberry Shake* RS3D consiste em um sismógrafo com três sensores de velocidade posicionados ortogonalmente, com uma taxa de amostragem de 100 amostras por segundo, o que possibilita uma aquisição de dados de boa qualidade, tanto para movimentos verticais como laterais com um custo relativamente baixo em relação aos demais equipamentos sísmicos disponíveis no mercado (AINOÁ, 2020). O sistema *Raspberry Shake* 4D consiste em um sismógrafo e acelerógrafo com um sensor de velocidade (geofone eletromecânico vertical) e acelerômetros (*MEMS – Micro-Electro-Mechanical System*) com uma taxa de amostragem de 100 amostras por segundo. A adição dos sensores *MEMS* amplia a banda de medição deste sismógrafo. A combinação dos sensores também estende os casos de uso do dispositivo, permitindo que ele seja usado em aplicações onde um acelerômetro é necessário para monitoramento de integridade estrutural (AINOÁ, 2020).

Ambos os sistemas constituem uma solução completa de *IoT (Internet of Things)* e *plug-and-play* para sismologia que integra os sensores, os digitalizadores, os hiper-amortecedores e o computador em uma única caixa (Figura 1) (AINOÁ, 2020).

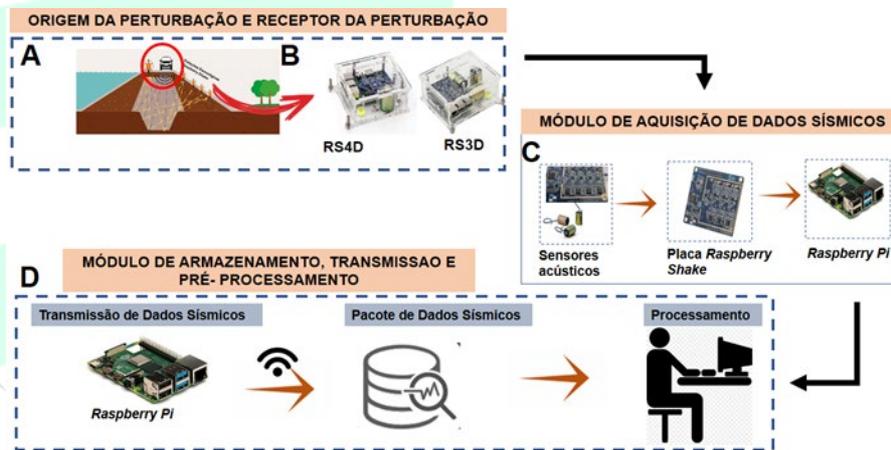


Figura 1 – Ilustração do sistema de aquisição de dados até o momento do processamento (AINOÁ, 2021).

As especificações técnicas dos sismógrafos RS3D e RS4D são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificação técnica dos sismógrafos RS3D e RS4D adquirido no projeto (adaptado de AINOÁ, 2020).

Parâmetro	Valor	
	RS3D	RS4D
<i>Raspberry Shake 3D Version</i>	V5	V8
Dimensões	Caixa padrão: 140 mm x 135 mm x 60 mm	Caixa padrão: 135 mm x 110 mm x 50 mm
Peso	0,6 kg	0,35 kg
Classificação de imersão	Invólucro padrão: IP10	
Conectores	Gabinete padrão: Ethernet (RJ45), alimentação Micro USB (5 V; 2,5 A), USB 2 portas x4, HDMI, Micro SD, porta CSI da câmera, vídeo composto e tomada de saída de áudio	
Considerações de instalação	Projetado para instalação <i>plug-and-go</i>	
Temperatura de operação	0 °C a 60 °C	
Computador de bordo	Raspberry Pi 3 Modelo B - A placa/software Raspberry Shake também é compatível com o Modelo B+	
Sismógrafo		
Tipo	Possui 3 geofones de 4,5 Hz dispostos ortogonalmente entre si da marca Sunfull PS-4,5B de 375 Ohm	Possui 1 geofone de 4,5 Hz de 395 Ohm da marca Racotech RGI-20DX

2.3 Monitoramento do ruído ambiental (MRA) em ambientes urbanos

Segundo a definição da SEG - *Society of Exploration Geophysicists* (2017), o ruído é definido como a energia sísmica proveniente de outras fontes senão as de reflexão primária, como microssismos e o ruído gerado por uma fonte qualquer.

O MRA em ambientes urbanos apresenta duas vantagens: (1) a variedade de fontes, devido às interações do vento, da chuva e das atividades humanas; (2) a expansão das redes de

monitoramento para os grandes centros urbanos é importante para melhorar a cobertura destas, podendo ser aplicadas para acompanhar a vida útil de estruturas geológicas, como barragens (Maciel *et al.*, 2021).

Sem uma análise cuidadosa, a variedade de fontes presentes nos centros urbanos parece gerar um ruído ambiental aleatório, porém é possível caracterizar diferentes assinaturas de diferentes eventos, conforme mostrou Nilot *et al.* (2021). Eles utilizaram dados de geofones localizados em Singapura para documentar o conteúdo de frequência relacionado às atividades antropogênicas e mostraram que estas apresentam características distintas quando comparadas com atividades naturais. Através da documentação dos diferentes conteúdos de frequência, é possível construir um banco de dados que pode ser utilizado em conjunto de técnicas de *Machine Learning*, para criar algoritmos que permitam identificar comportamento anômalo (Nilot *et al.*, 2021).

Em uma etapa que precedeu a presente pesquisa, foi instalada uma estação sismográfica RS3D pelos pesquisadores do projeto AINOÁ, desde dezembro de 2020 na guarita da BP, localizada na ombreira esquerda da Barragem do Paranoá (Figura 2a). O objetivo era o reconhecimento e a compreensão da assinatura sísmica de possíveis fontes no local antes da realização dos ensaios, e diagnosticar os horários de maior ruído, entendendo a magnitude dos conteúdos de frequência provocados pelas diferentes fontes de ruído, sejam elas naturais (ventos e chuvas) ou antropogênicas (circulação de veículos) (AINOÁ, 2021).

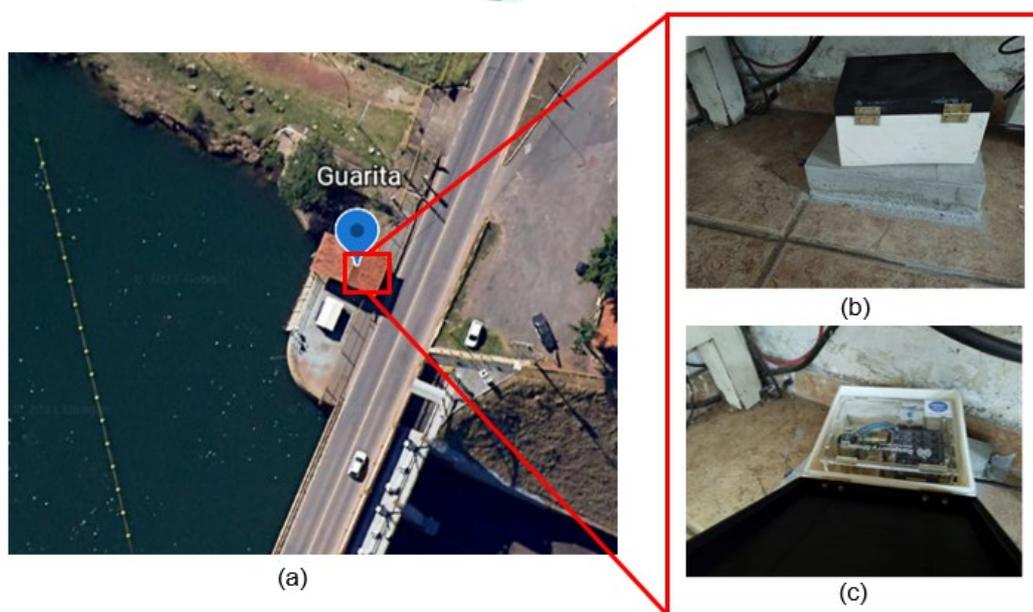


Figura 2 – Posicionamento do sensor para monitoramento do ruído ambiental na guarita: (a) localização da guarita na ombreira esquerda; (b) posicionamento da case de proteção dentro da guarita sobre uma base de argamassa; (c) vista superior do sensor no interior da case.

Na Figura 3 são apresentados os sismogramas dos dados adquiridos na BP pelos pesquisadores do projeto AINOÁ. São destacadas duas janelas de aquisição – de 00:00 até 06:00 (horário local) e a partir das 06:00 até às 20:00 (horário local). Observa-se que a janela de 00:00 até 06:00 tem menores amplitudes quando comparada com os dados que foram adquiridos a partir das 06:00 até 20:00 (AINOÁ, 2021). Ao analisar o atributo frequência, notou-se que a componente vertical (Z) detectou diferentes conteúdos de frequência quando comparada com as componentes leste (E) e norte (N), desta forma, os autores escolheram analisar somente a componente vertical em seu estudo.

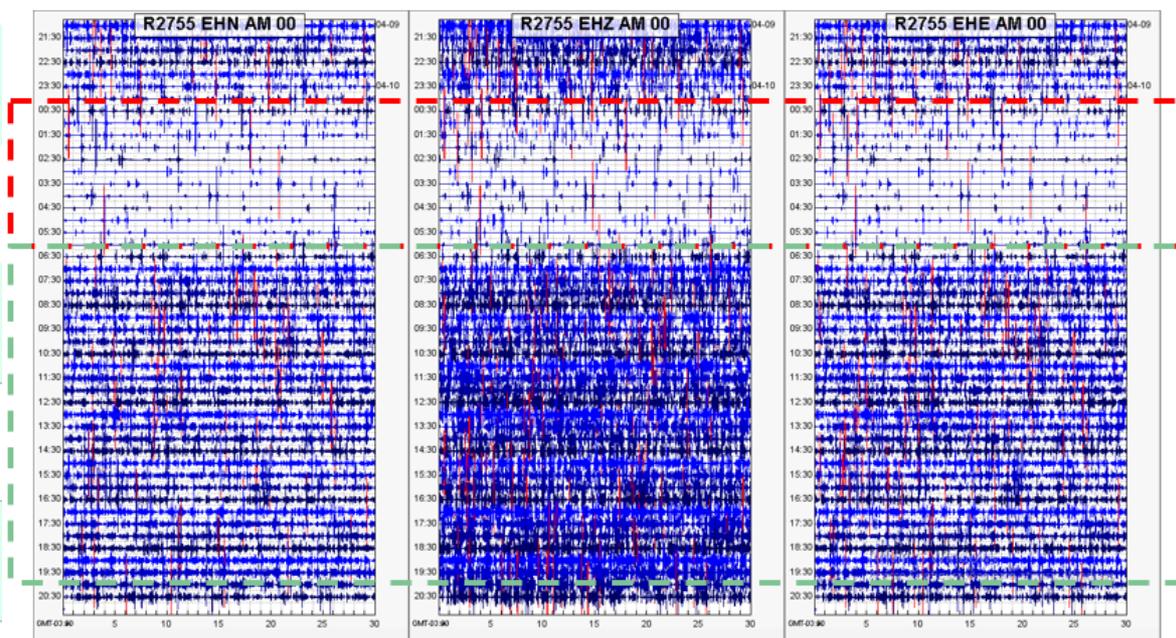


Figura 3 – Monitoramento com a estação AMR.2755 na Barragem do Paranoá (10/04/2021), sismogramas das componentes norte (N), vertical (Z) e leste (E) (AINOÁ, 2021).

A partir dos dados da Figura 4, do período de 10/04/2021 a 14/04/2021, os autores constataram que a amplitude dos registros começou diminuir a partir das 20:00, chegando na madrugada a registrar as menores amplitudes. Essa diminuição expressiva foi correlacionada à diminuição da circulação de veículos. A partir das 06:00, quando o fluxo de veículos ganha mais intensidade, as amplitudes voltaram a aumentar (AINOÁ, 2021).

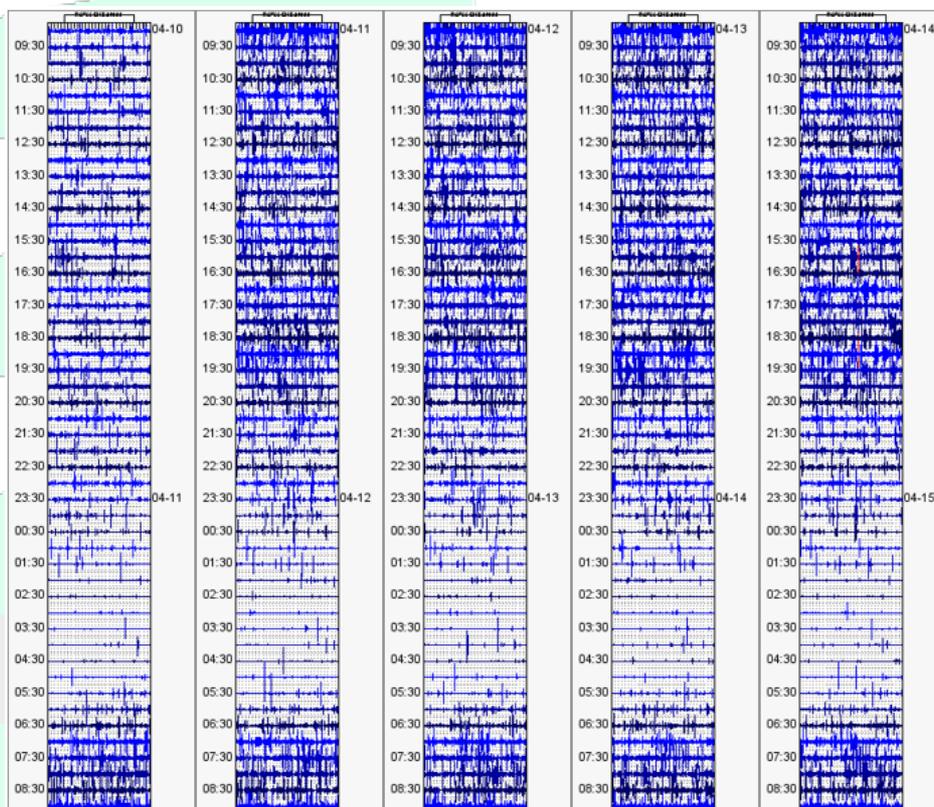


Figura 4 – Sismograma da componente Z no período que compreende o dia 10/04/2021 até 14/04/2021 (AINOÁ, 2021).

Com a identificação dos horários de maior amplitude do ruído ambiental, os autores observaram também fortes anomalias no período madrugada, com conteúdo de frequência contínuo em 38,5 Hz e 8,4 Hz e eventos cíclicos de 27,4 Hz, com duração de aproximadamente 14 minutos. No período da tarde foi observado um aumento muito expressivo no conteúdo de frequência, principalmente na faixa de 20 Hz. Por fim, no período da noite o aumento é ainda maior quando comparado com o período da tarde para os conteúdos de frequência de 10 Hz a 20 Hz (AINOÁ, 2021).

Os conteúdos de frequência supracitados, obtidos pelos pesquisadores do projeto de pesquisa P&D AINOÁ, são compatíveis com os resultados apresentados por Nilot *et al.* (2021), que indicam que um sinal constante e forte entre 2 Hz e 30 Hz é compatível com a passagem de veículos.

2.4 O acoplamento dos sensores ao solo

Em monitoramentos utilizando geofones é importante destacar que, este se trata de um sistema ressonante e que diferenças entre um conjunto de sensores individuais apoiados sobre o solo podem introduzir distorções, tanto na amplitude quanto na fase das ondas sísmicas observadas (Washburn & Wiley, 1941). Um sensor ideal mede o movimento do solo ou alguma medida relacionada, porém dois problemas podem ser associados à esta medida: (1) a presença do sensor por si só influencia no movimento do solo, uma vez que este não está mais em seu estado natural; (2) a medida é bastante influenciada pelas condições de contato entre o equipamento e o solo (Drijkoningen *et al.*, 2006).

A necessidade do estudo do acoplamento de sensores ao solo vem sendo explorada na literatura desde a década de 80, através de trabalhos como os de Hoover & O'Brien (1980), Krohn (1983) e Tan (1987), todos compartilham a ideia de que, devido ao aumento do uso de sensores para monitoramento sísmico é necessário conhecer a resposta do sistema de aquisição, o geofone, plantado sobre o solo. Segundo Krohn (1983), o acoplamento do sensor ao solo pode ser um fator crucial pois, ele será o responsável por limitar a resposta do equipamento ao movimento do solo e não os elementos internos do sensor em si.

O termo “acoplamento do geofone ao solo” é definido por Tan (1987) como a diferença entre a velocidade de uma onda no solo, medida pelo geofone e a velocidade desta mesma onda no solo, sem o geofone. Krohn (1983) se refere à acurácia com a qual o geofone é capaz de medir o movimento do solo, quando se refere ao termo e Drijkoningen (2000), por sua vez, o define como a diferença entre a velocidade medida por um geofone bem acoplado ao solo e outro mal acoplado ao solo.

Tal problema está associado com os dois tipos de acoplamento: (1) *spike-shear*: no qual o spike é o elemento que estabelece o contato do sensor com o solo; (2) *weight coupled*: o contato do sensor com o solo é obtido através do invólucro no qual o geofone está inserido, sendo geralmente classificado como *bad coupling*, a forma usual de melhorar o acoplamento neste caso é através do aumento da massa do sensor, melhorando o contato com o solo (Drijkoningen, 2000).

Vários modelos teóricos do acoplamento dos geofones ao solo podem ser encontrados na literatura. Na maioria destes estudos o sistema é modelado como um cilindro rígido apoiado sobre um meio semi infinito, elástico e isotrópico e eles diferem em dois aspectos principais: (1) na distribuição de tensões sob o cilindro e; (2) na solução dada para o modelo (Hoover & O'Brien, 1980). Apesar de serem modelos bastante explorados na literatura, alguns como os de Hoover & O'Brien (1980) e Wolf (1944) não levam em consideração a existência do *spike*, sendo este o tipo de geofone mais utilizado na indústria, conforme aponta Drijkoningen (2000). Segundo Krohn (1983), os geofones com *spike* têm uma distribuição de tensões bastante diferente dos que possuem base reta. Quando a força ao longo do *spike* é removida, modelagens como a de Hoover & O'Brien (1980) devem ser usadas. Nestes casos, o peso passa a ser o aspecto dominante, sendo caracterizado o *weight coupling*, ou acoplamento devido ao peso, em tradução livre (Drijkoningen, 2000; Drijkoningen *et al.*, 2006).

Em algumas situações o uso de *spike* não é possível, seja por se tratar de um tipo de sensor cuja *case* não suporta a introdução dele ou em locais onde é mais eficiente apoiar o sensor sobre o solo, sob a ótica do aumento do custo operacional. Carcione *et al.* (2016) propõem um modelo de acoplamento de geofones ao solo sem o uso de *spikes* (Figura 5), os autores consideraram dois modelos existentes, propostos por Wolf (1944) e Hoover & O'Brien (1980). Através do modelo proposto, os autores concluíram que a frequência de ressonância é independente da massa e do

raio da base do geofone, enquanto há um acréscimo na energia monitorada pelo sistema com o aumento do peso e diminuição da área de contato.

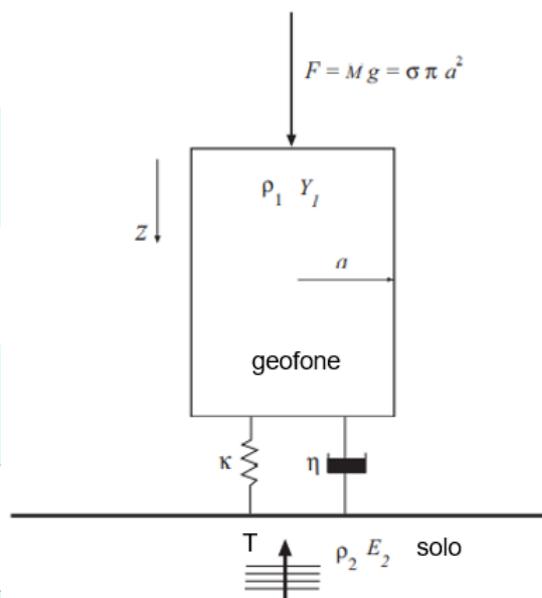


Figura 5 – Modelo de acoplamento do geofone ao solo (Adaptado de Carcione *et al.*, 2016).

Moura & Senos Matias (2012) usaram blocos de diferentes materiais com área de contato constante para medir experimentalmente a resposta dos geofones, avaliando qual tipo de material era o mais apropriado para acoplar o sensor, analisando ainda a proximidade dos resultados obtidos com o sensor acoplado sobre o bloco e o sensor acoplado com *spike*. Os resultados encontrados pelos autores, conforme pode ser observado no espectro de frequência apresentado na Figura 6, mostraram que sensores acoplados a blocos de cimento com 7 kg apresentam resultados semelhantes aos obtidos com sensores acoplados via *spike*.

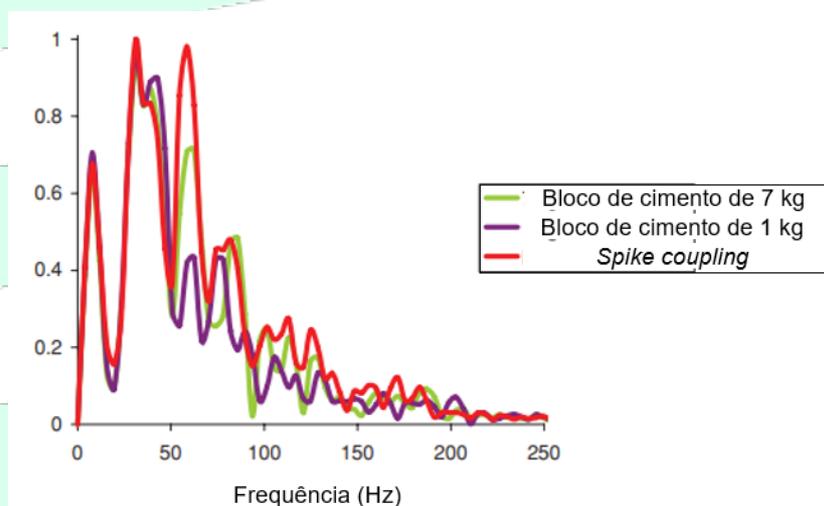


Figura 6 – Comparação do espectro de frequência para os 3 sistemas (Adaptado de Moura & Senos Matias, 2012).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho está inserido no projeto AINOÁ com o objetivo estudar a melhor condição de acoplamento das estações *Raspberry Shake*, sem a utilização do *spike*, para monitoramento na BP, ajudando na tomada de decisão associada à construção de abrigos para monitoramento da barragem ao longo do tempo. A partir do MRA foi definida a janela de aquisição como sendo a que

concentra o maior ruído ambiental devido ao fluxo de veículos portanto, das 06:30 às 20:30 (horário de Brasília).

O estudo de Moura & Senos Matias (2012) mostrou que o uso de blocos de concreto como intermediador do acoplamento do sensor ao meio, traz uma resposta semelhante dos sensores acoplados devido ao peso quando comparados com aqueles acoplados com *spike*. Nesta ótica, foram construídos 4 blocos de concreto com massas específicas diferentes para avaliar a resposta do sensor à variação da massa do bloco. Na Tabela 2 estão apresentados os traços unitários, a massa, o volume e a massa específica de cada bloco construído. A massa apresentada foi medida após 6 dias de cura do concreto.

Tabela 2 – Características dos blocos para acoplamento das estações *Raspberry Shake*.

Bloco	Traço unitário	Massa (kg)	Volume (m ³)	Massa específica (kg/m ³)
1	1:2:3:0,4	17,90	0,0080	2237,50
2	1:2:0,25:0,6	16,20	0,0079	2055,84
3	1:1:0,25:0,6	15,40	0,0078	1974,36
4	1:0,5:0,25:0,8	13,25	0,0072	1840,28

Por se tratar de um pequeno volume de concreto, os traços apresentados na Tabela 2 foram misturados manualmente, tomando os cuidados descritos por Neville (1997) para se obter uma mistura uniforme e, para evitar que esta tivesse contato com outros materiais, os procedimentos foram feitos com o auxílio de uma carruola.

Foram feitos 4 furos próximo à guarita, conforme apresentado na Figura 7, de dimensões 0,40 m x 0,40 m x 0,30 m em linha (Figura 7c) e nestes foram adicionados materiais para auxiliar no acoplamento. Tais materiais foram escolhidos com o objetivo de gerar diferentes condições de acoplamento ao meio. Dixon *et al.* (2018) fazem a utilização de uma camada intermediária de material grosso para melhorar a transmissão dos dados no sistema de monitoramento montado. Dentre os materiais utilizados, os autores utilizaram uma areia mal graduada, com partículas de 0,6 mm a 2 mm.

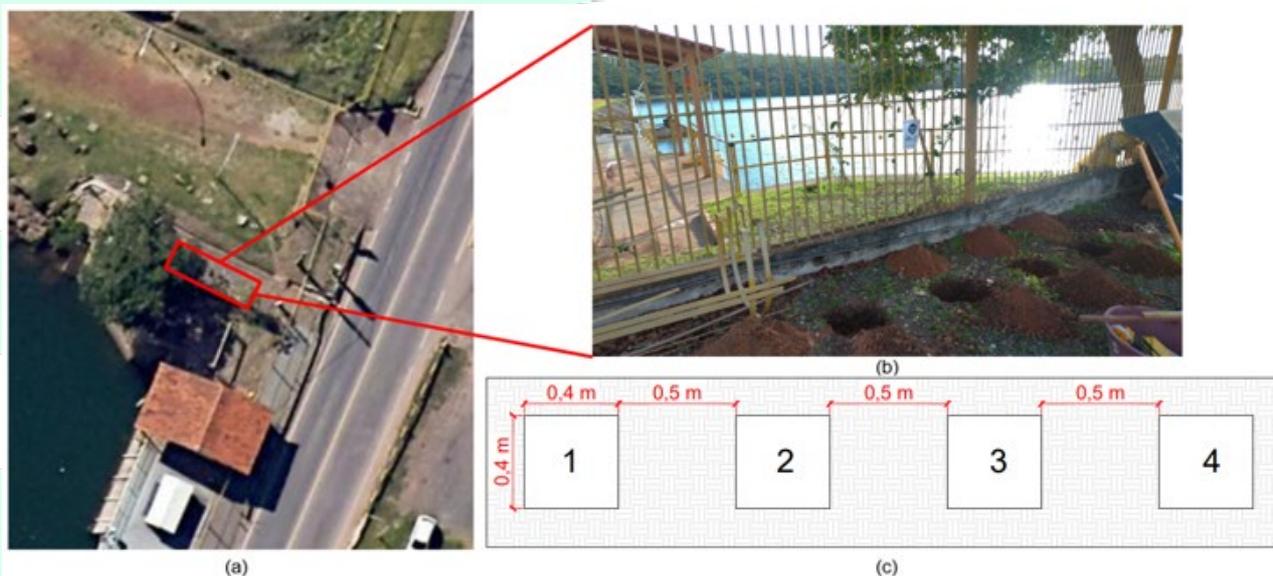


Figura 7 – Posicionamento dos furos na ombreira esquerda: (a) em relação à guarita; (b) detalhe dos furos executados em campo; (c) esquema do espaçamento, dimensão em planta e identificação dos furos.

Os materiais de preenchimento utilizados para gerar as diferentes condições de acoplamento do bloco ao meio foram 4 para os 4 blocos: (1) Areia passante na peneira 6,3 mm e retida na 2 mm, obtida conforme os procedimentos de peneiramento grosso descritos no item 4.5 da ABNT NBR 7181/2016; (2) Brita 0 de rocha calcária; (3) Solo da região, classificado de forma geral como latossolo, caracterizado segundo AINOÁ (2021); (4) Pasta de cimento.

O esquema apresentado na Figura 8 representa um corte dos furos executados, nele pode ser

observada a disposição do preenchimento dos furos com os diferentes materiais, apresentados na Tabela 3. A disposição dos blocos, cujo topo ficou abaixo do *datum* do solo, foi assim adotada de forma a evitar que os ruídos provenientes do vento afetassem o monitoramento com as estações.

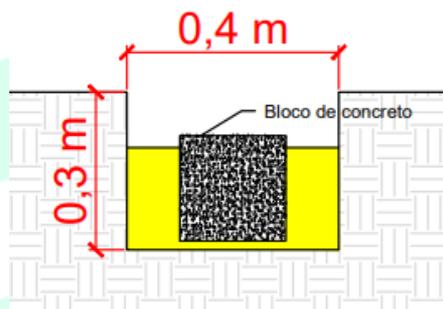


Figura 8 – Vista em corte do posicionamento do bloco de concreto e do material de preenchimento, hachurado em amarelo, nos furos executados.

Tabela 3 – Relação dos blocos posicionados em cada furo e seus respectivos preenchimentos.

Furo	Bloco	Material de preenchimento do furo	Descrição
1	1	Areia grossa	Passante na #6.3 mm e retida na #2 mm
2	2	Brita 0	De origem calcária
3	3	Solo da ombreira esquerda	Latossolo do DF, caracterizado conforme AINOÁ (2021)
4	4	Pasta de cimento	Mistura de cimento CP II-F 32, argamassa para fixação de cerâmica e água

As estações RS3D e RS4D foram posicionadas sobre os blocos através dos parafusos da case de proteção em acrílico. Na Figura 9 são apresentadas vistas individuais dos sensores sobre os blocos, com seus respectivos materiais de preenchimento. Os sensores foram posicionados com a componente vertical perpendicular à rodovia DF-001, que passa sobre a crista da BP.

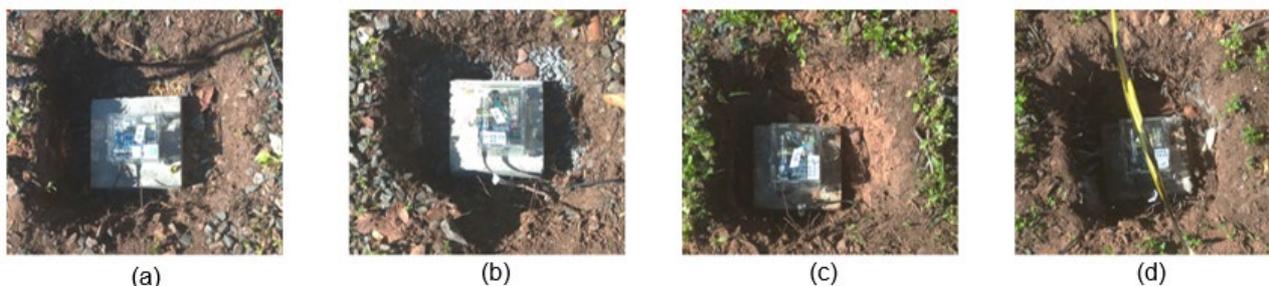


Figura 9 - Posicionamento dos blocos e sensores nos furos: (a) vista superior do furo 1; (b) vista superior do furo 2; (c) vista superior do furo 3 e (d) vista superior do furo 4.

O monitoramento foi feito em dois dias consecutivos na janela de aquisição resultante do MRA: em uma sexta-feira das 09:00 às 17:30 e no sábado das 07:30 às 13:00 (horário de Brasília). No segundo dia de aquisição foi utilizado no bloco 1 (Figura 9b) um sensor do tipo RS4D, nos outros dias e nos outros blocos foram utilizados sensores do tipo RS3D.

Após a análise dos dados obtidos no período supracitado optou-se, na sessão dos resultados, pela análise somente da componente Z e por apresentar os resultados para cada bloco em dois intervalos de tempo, de 3h e 1,5 minutos. Os dados foram pré-processados utilizando o *software* de acesso aberto SWARM (versão 3.2.0).

4 RESULTADOS

Com o objetivo de analisar a influência das massas específicas e do material de acoplamento dos blocos ao solo, os dados do monitoramento foram pré-processado no SWARM e os resultados para os 4 blocos estão apresentados na Figura 10.

No bloco 1, de massa específica $2237,50 \text{ kg/m}^3$, com a areia grossa como material de preenchimento (Figura 10 I), foi observada uma amplitude média de aproximadamente 15726,10 e eventos com amplitudes maiores que 30000 (Figura 10 I-a). Os picos de frequência têm valores em 8,55 Hz, 32,05 Hz, 40,51 Hz e 44,46 Hz (Figura 10 I-b), sendo que há uma distribuição bem uniforme dos conteúdos de frequência para o intervalo maior que 10 Hz e menor que 47 Hz (Figura 10 I-c). Nos detalhes em vermelho (Figura 10 I-d e Figura 10 I-e) são destacadas anomalias observadas próximo das 9:30 (horário local) com diferentes conteúdos de frequência detectados (de 10 Hz a 45 Hz).

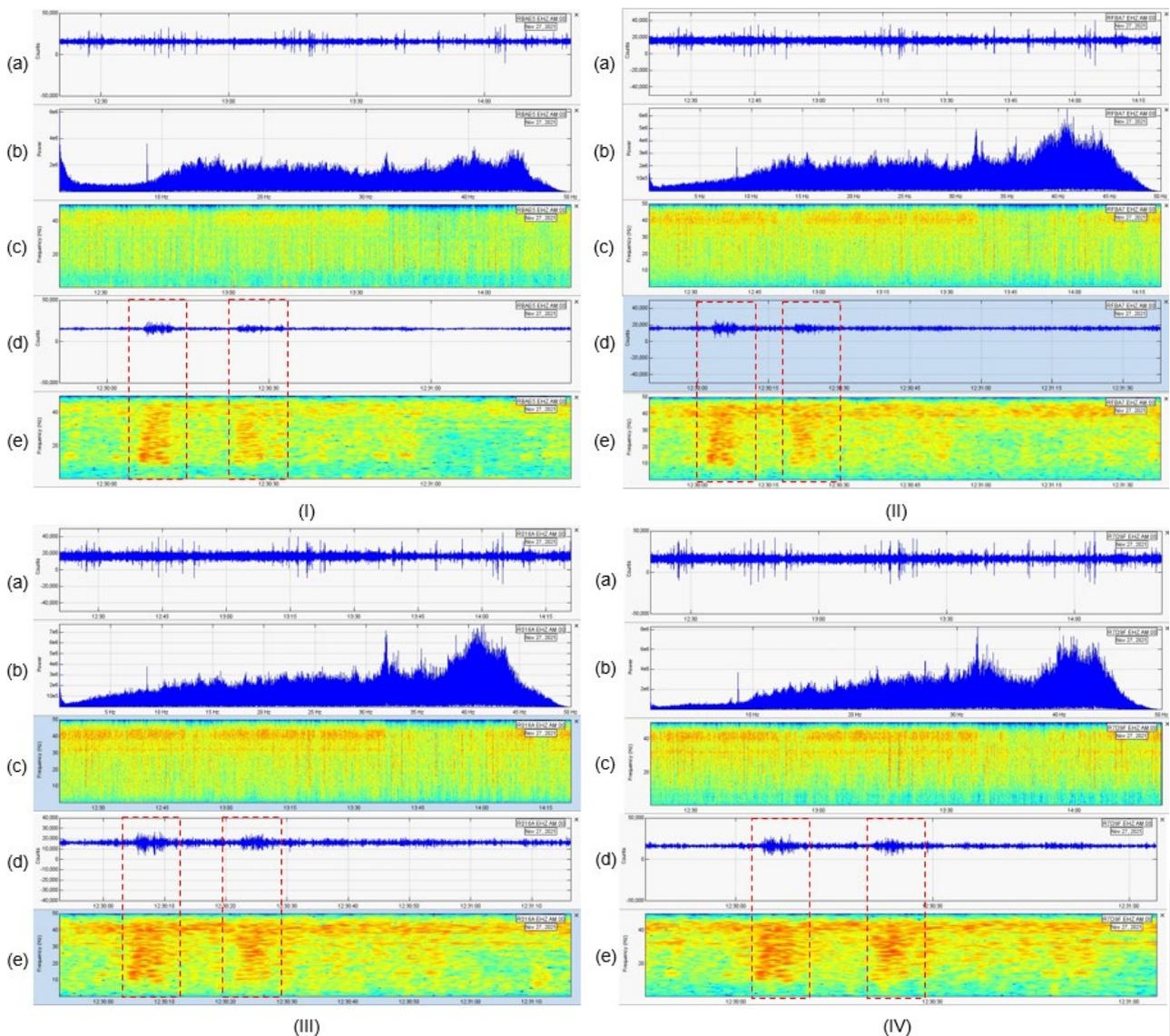


Figura 10 – Resultado do monitoramento da componente vertical (Z) no bloco 1 (I), bloco 2 (II), bloco 3 (III) e bloco 4 (IV): (a) variação da amplitude em um período de aproximadamente 3h; (b) conteúdo de frequência no período de aproximadamente 3 h; (c) espectrograma de frequência no período de aproximadamente 3 h; (d) variação da amplitude em um período de aproximadamente 1,5'; (e) espectrograma de um período de aproximadamente 1,5'.

No bloco 2, de massa específica $2055,84 \text{ kg/m}^3$, com a brita 0 como material de preenchimento (Figura 10 II) foi observada uma amplitude média por volta de 16017,4 e poucos eventos próximos

a 40000 (Figura 10 II-a). Os picos de frequência foram observados em 8,55 Hz, 31,95 Hz e 40,88 Hz, neste caso, diferente do observado no bloco 1, há uma maior concentração de conteúdo associado a frequências em torno de 40 Hz (Figura 10 II-b). No espectrograma (Figura 10 II-c), há predominância de um conteúdo de frequência em 40 Hz e 30 Hz. As mesmas anomalias de amplitude observadas no bloco 1 estão destacadas em vermelho na Figura 10 II-d e na Figura 10 II-e, nestas observa-se um aumento considerável no conteúdo de frequência de 10 Hz a 40 Hz durante a anomalia e em torno de 40 Hz fora da anomalia.

No bloco 3, de massa específica $1974,36 \text{ kg/m}^3$, com o solo da ombreira esquerda como material de preenchimento (Figura 10 III) foi observada uma amplitude média próxima a 16290,8 e alguns eventos próximos a 40000 (Figura 10 III-a). Os picos de frequência observados estão associados a 8,6 Hz, 32 Hz e 41,54 Hz e, assim como no bloco 2, foi observada uma concentração maior de conteúdos associados a frequências em torno de 40 Hz (Figura 10 III-b). No espectrograma (Figura 10 III-c) também há um conteúdo de frequência contínuo em 30 Hz e 40 Hz, com uma maior concentração de frequências em torno de 40 Hz. As anomalias destacadas em vermelho na Figura 10 III-D e na Figura 10 III-e, apresentam, visualmente, características semelhantes às observadas no bloco 2.

No bloco 4, de massa específica de $1840,28 \text{ kg/m}^3$, com a pasta de cimento como material de preenchimento (Figura 10 IV), foi observada uma amplitude média de aproximadamente 16358,4, e vários eventos maiores que 35000 (Figura 10 IV-a). Os picos de frequência estão associados a 22,17 Hz, 26,91 Hz, 31,82 Hz e 41,36 Hz, a mesma observação feita nos blocos 2 e 3, no que diz respeito aos conteúdos de frequência próximos de 40 Hz também são observadas aqui (Figura 10 IV-b). No espectrograma (Figura 10 IV-c) há dois eventos contínuos (42,26 Hz e 31,94 Hz) até 10h37'. As anomalias de amplitude (Figura 10 IV-d e Figura 10 IV-e) apresentam aspectos semelhantes, quando comparadas visualmente com os resultados apresentados para os blocos 2 e 3.

Em todos os casos, no espectrograma observa-se que, até próximo das 10:37 (horário local), há predominância de um conteúdo de frequência de aproximadamente 40 Hz e este apresenta uma diminuição a partir das 10:40 (horário local), horário em que se observa uma redução no fluxo de veículos na região.

Conforme os dados apresentados na Tabela 4, é possível constatar que a variação da massa específica no bloco não apresenta grande influência nas frequências mínimas e máximas detectadas pelo sensor. Quando analisadas as amplitudes, algumas variações maiores são observadas nas diferentes condições de acoplamento. O bloco 3, de massa específica $1974,36 \text{ kg/m}^3$ com o latossolo do DF como material de preenchimento do furo apresentou as maiores amplitudes mínimas e máximas enquanto o bloco 1, de massa específica $2237,50 \text{ kg/m}^3$ com a areia grossa como material de preenchimento do furo apresentou as menores amplitudes mínimas e máximas. Ao comparar a média, porém, as amplitudes apresentaram pouca variação, com o bloco 4 apresentando a maior amplitude média enquanto o bloco 1 apresentou a menor amplitude média.

Tabela 4 - Intervalos de amplitude e frequência observados em cada bloco.

Identificação	Amplitude			Frequência (Hz)	
	Mínima	Máxima	Média	Mínima	Máxima
Bloco 1	-10424	36483	15726,10	0,05	49,21
Bloco 2	-14423	40418	16017,40	0,05	48,57
Bloco 3	-38311	59205	16290,80	0,05	49,53
Bloco 4	-15180	54140	16358,40	0,05	49,30

Os resultados obtidos corroboram com os estudos de Moura & Senos Matias (2012) e Spikes *et al.* (2000), que indicam que, em frequências pequenas, a variação da massa do conjunto não produz um efeito muito significativo no sinal observado. Apesar disso, através do resultado obtido no pré-processamento dos dados, foi possível observar pequenas diferenças, principalmente quando comparados os dados obtidos no monitoramento com o bloco 1, que apresentou as maiores diferenças no conteúdo de frequência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos teóricos de geofones acoplados pelo peso ou *weight coupled*, como o proposto por Carcione *et al.* (2016), foram analisados experimentalmente utilizando estações *Raspberry Shake* 3D e 4D para o monitoramento do ruído ambiental da Barragem do Paranoá, através da elaboração de blocos de concreto com massas específicas diferentes e da implementação de diferentes condições de acoplamento do sistema de aquisição ao solo. O monitoramento foi feito durante o período do dia em que foi observada a maior janela de ruído ambiental. Os resultados obtidos no pré-processamento dos dados permitiram observar pequenas diferenças nas distribuições de frequências.

No contexto do projeto P&D AINOÁ, as análises aqui conduzidas permitiram observar que a variação da massa do conjunto formado pelo sensor e o bloco não produz diferenças significativas em baixas frequências, características do ruído ambiental causado pelo fluxo de veículos, conforme indica Nilot *et al.* (2021). No que tange a importância da presente pesquisa na tomada de decisão para a construção dos abrigos para monitoramento na barragem, os resultados dos blocos acoplados diretamente ao solo da região (bloco 3) resultaram nas maiores amplitudes, o que indica que não há a necessidade de utilização de materiais diferentes do meio no qual o conjunto formado pelo sensor e o bloco será inserido.

Como sugestões para o avanço deste estudo em pesquisas futuras se destacam: a análise da influência do peso no acoplamento de sensores *Raspberry Shake* utilizando fontes ativas e; a comparação dos dados processados através da utilização de técnicas de *Machine Learning*, que permitiriam uma análise minuciosa das variações dos diferentes tipos de acoplamentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos, pelo suporte dado a esta pesquisa, à Universidade de Brasília (UnB), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, concessões 435962/2018-3, 147055/2020-2, 305484/2020-6), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001, à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF, projetos 0193.002014/2017-68 e 0193.001563/2017), à NEOENERGIA/CEB Geração S.A. (PD-05160-1904/2019) e ao corpo técnico do projeto P&D AINOÁ.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2016). NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- AINOÁ (2020) Projeto de Pesquisa – Sistema de Monitoramento de Patologias Internas em Barragens de Terra e Enrocamento Fundamentado em Inteligência Artificial e Internet das Coisas: Caso de Estudo da Barragem do Paranoá. Relatório de Produto EAP #1.2.6. Brasília, 2020.
- AINOÁ (2021) Projeto de Pesquisa – Sistema de Monitoramento de Patologias Internas em Barragens de Terra e Enrocamento Fundamentado em Inteligência Artificial e Internet das Coisas: Caso de Estudo da Barragem do Paranoá. Relatório de Produto EAP #1.6.1. Brasília, 2021.
- ANA (2020). Relatório de Segurança de Barragens (RSB) de 2020. Brasília, DF, Brasil.
- Carcione, J. M., Almalki, H. S., & Qadrouh, A. N. (2016). Geophone-ground coupling with flat bases. *Geophysical Prospecting*, 64(2), 255–267. doi: 10.1111/1365-2478.12263
- Dixon, N., Smith, A., Flint, J. A., Khanna, R., Clark, B., & Andjelkovic, M. (2018). An acoustic emission landslide early warning system for communities in low-income and middle-income countries. *Landslides*, March. doi: 10.1007/s10346-018-0977-1
- Drijkoningen, G. G. (2000). The usefulness of geophone ground-coupling experiments to seismic data. *Geophysics*, 65(6), 1780–1787. doi: 10.1190/1.1444862
- Drijkoningen, Guy G., Rademakers, F., Slob, E. C., & Fokkema, J. T. (2006). A new elastic model for ground coupling of geophones with spikes. *Geophysics*, 71(2), 9–17. doi: 10.1190/1.2187777

- Fisher, W. D., Camp, T. K., & Krzhizhanovskaya, V. V. (2016). Crack detection in earth dam and levee passive seismic data using support vector machines. *Procedia Computer Science*, 80, 577–586. doi: 10.1016/j.procs.2016.05.339
- Fisher, W. D., Camp, T. K., & Krzhizhanovskaya, V. V. (2017). Anomaly detection in earth dam and levee passive seismic data using support vector machines and automatic feature selection. *Journal of Computational Science*, 20, 143–153. doi: 10.1016/j.jocs.2016.11.016
- Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1000–1024. doi: 10.1139/t00-030
- Hoover, G. M., & O'Brien, J. T. (1980). The influence of the planted geophone on seismic land data. *Geophysics*, 45(8), 1239–1253.
- ICOLD. (2020). *World Register of Dams: General Synthesis*. Retrieved from https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/general_synthesis.asp
- Krohn, C. E. (1983). Geophone Ground Coupling. *Geophysics*, 49(6), 722–731.
- Maciel, S. T. R., Rocha, M. P., & Schimmel, M. (2021). Urban seismic monitoring in Brasilia, Brasil. *PLoS ONE*, 16(8), 1–14. doi: 10.1371/journal.pone.0253610
- Moura, R. M., & Senos Matias, M. J. (2012). Geophones on blocks: A prototype towable geophone system for shallow land seismic investigations. *Geophysical Prospecting*, 60(1), 192–200. doi: 10.1111/j.1365-2478.2011.00963.x
- Neville, A. M. (1997). *Propriedades do concreto* (2ª ed.). São Paulo: Pini.
- Nilot, E., Fang, G., Li, Y. E., & Zhao, Y. (2021). *Characterizing ambient seismic sources in an urban environment*. 1906–1910.
- Parekh, M. L. (2016). *Advanced Internal Erosion Monitoring Using Seismic Methods in Field and Laboratory Studies*. Colorado School of Mines.
- Planès, T., Mooney, M. A., Rittgers, J. B. R., Parekh, M. L., Behm, M., & Snieder, R. (2016). Time-lapse monitoring of internal erosion in earthen dams and levees using ambient seismic noise. *Geotechnique*, 66(4), 301–312. doi: 10.1680/jgeot.14.P.268
- Rinehart, R. V., Parekh, M. L., Rittgers, J. B., Mooney, M. a, & Revil, A. (2012). Preliminary Implementation of Geophysical Techniques to Monitor Embankment Dam Filter Cracking at the Laboratory Scale. *Icsa6*, 1401–1408.
- Rittgers, J. B., Revil, A., Planes, T., Mooney, M. A., & Koelewijn, A. R. (2015). 4-D imaging of seepage in earthen embankments with time-lapse inversion of self-potential data constrained by acoustic emissions localization. *Geophysical Journal International*, 200(2), 758–772. doi: 10.1093/gji/ggu432
- SEG, Society of Exploration Geophysicists. (2017). *Noise (seismic)*. Retrieved from [https://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Noise_\(seismic\)](https://wiki.seg.org/wiki/Dictionary:Noise_(seismic))
- Spikes, K. T., Steeples, D. W., Schmeissner, C., Prado, R., & Pavlovic, M. (2000). Varying the effective mass of geophones. *2000 SEG Annual Meeting*, 66(6), 1850–1855.
- Tan, T. H. (1987). Reciprocity theorem applied to the geophone-ground coupling problem. *Geophysics*, 12, 1715–1717.
- Washburn, H., & Wiley, H. (1941). The effect of the placement of a seismometer on its response characteristics. *Geophysics*, 6(2), 116–131. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1443713>
- Wolf, A. (1944). The equation of motion of a geophone on the surface of an elastic earth. *Geophysics*.

Rafael Mendes Jorge (meendes.rafa@gmail.com)
 Manuelle Santos Góis (manuellegeo@gmail.com)
 André Luís Brasil Cavalcante (albrasilc@gmail.com)