



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



LUCAS BIANCHETTI DRUMOND

**ANÁLISE DE VIBRAÇÕES E DESENVOLVIMENTO DE
POROPRESSÃO EM REJEITO DE MINERAÇÃO**

OURO PRETO - MG
2018

LUCAS BIANCHETTI DRUMOND

lbdrumond@hotmail.com

**ANÁLISE DE VIBRAÇÕES E DESENVOLVIMENTO DE
POROPRESSÃO EM REJEITO DE MINERAÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Minas.

Professor orientador: DSc. Waldyr Lopes de Oliveira Filho

**OURO PRETO – MG
2018**

D795a

Drumond, Lucas Bianchetti.

Análise de vibrações e desenvolvimento de poropressão em rejeito de mineração [manuscrito] / Lucas Bianchetti Drumond. - 2018.

43f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Barragens de rejeitos. 2. Engenharia geotécnica. 3. Mecânica do solo. I. Oliveira Filho, Waldyr Lopes de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624.136



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

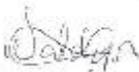
Aos 13 dias do mês de dezembro de 2018, às 15h30min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/UFOP, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 - Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado "**ANÁLISE DE VIBRAÇÕES E DESENVOLVIMENTO DE POROPRESSÃO EM REJEITO DE MINERAÇÃO**", pelo aluno Lucas Bianchetti Drumond, sendo a comissão avaliadora formada por Prof. Dr. Wahlyr Lopes de Oliveira Filho (orientador), M. Sc. Francisco Eduardo Almeida e Eng.º Geólogo Luís Artur Souza Oliveira.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela ~~aprovação~~ de candidato, com a nota ~~10,0~~, concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

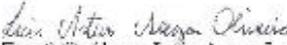
O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 - Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme inciso do CEMIN 2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas - CFMIN.

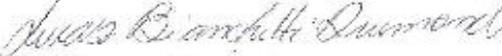
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 13 de dezembro de 2018.


Prof. Dr. Wahlyr Lopes de Oliveira Filho
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador


M. Sc. Francisco Eduardo Almeida
Membro da Comissão Avaliadora


Eng.º Geólogo Luís Artur Souza Oliveira
Membro da Comissão Avaliadora


Lucas Bianchetti Drumond


Prof. M.Sc. José Geraldo Miranda
Professor responsável pela Disciplina MIN-491 - Trabalho de Conclusão de Curso

A meus pais dedico mais esta etapa vencida, sem eles nada seria possível. Obrigado por todo o apoio e carinho durante todos estes anos de luta.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar a oportunidade de concluir mais uma importante fase da minha vida com sucesso.

Agradeço meus pais, Sérgio e Denise, por me apoiarem em todas as situações, por todo o carinho e amor durante os anos. Sem eles, nada seria possível.

À Faelma, por todo carinho, compreensão e companheirismo durante esta etapa.

Ao meu orientador, professor Waldyr Lopes de Oliveira Filho, por todo o apoio e empenho dedicados para que a realização deste trabalho fosse possível.

Aos engenheiros Luis Artur Souza Oliveira e Francisco Eduardo Almeida pela disponibilidade e solicitude em constituir a banca de defesa.

Agradeço ao Cleyson por todo auxílio com a montagem dos equipamentos e ao Otávio pela ajuda na realização dos experimentos. Vocês foram fundamentais para realização deste trabalho.

A todos os professores, técnicos e demais profissionais que fazem parte do Departamento de Engenharia de Minas da UFOP, por terem em cada detalhe auxiliado em minha formação.

Agradeço a Escola de Minas, o DEMIN e a Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino de excelência.

Agradeço a gloriosa República Sua Mãe e todos os irmãos que fizeram parte desta caminhada.

E finalmente, gostaria de agradecer a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste momento.

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo”.

Walter S. Landor

RESUMO

As vibrações advindas das demais atividades da mineração podem influenciar no aumento da poropressão em rejeitos, fato este que pode vir a ser prejudicial a estabilidade de uma barragem de rejeitos. Diante disso, se mostra importante o estudo dos mecanismos relacionados a este fenômeno. O presente estudo tem como objetivo observar e analisar a relação entre as vibrações e as poropressões em um material granular saturado. Para isto, se realiza uma revisão sobre o tema dentro da literatura e propõe a execução de experimentos com material granular a seco e saturado para analisar esta relação. Os experimentos consistem em provocar vibrações em uma coluna de material e analisar sua resposta quanto a vibração e poropressão (no caso de material saturado). A realização dos experimentos tem por objetivo verificar as variações de vibração de acordo com os eixos do equipamento utilizado (acelerômetro), o recalque do material apresentado e as variações de poropressão no experimento realizado com material saturado, com dados obtidos a partir de um transdutor de pressão. Para captação dos dados se utiliza de um microprocessador arduíno conectado a um computador. É realizada uma análise dos dados obtidos, que se mostra satisfatória e condizente com os resultados esperados.

Palavras-chave: rejeitos de mineração, barragem de rejeitos, vibração, poropressão, acelerômetro.

ABSTRACT

The vibrations from other mining activities may influence the increase in pore pressure in tailings, which may be detrimental to the stability of a tailings dam. Therefore, it is important to study the mechanisms related to this phenomenon. The present study aims to observe and analyze the relationship between vibrations and pore pressure in a saturated granular material. For this, a review is made on the subject within the literature and proposes the execution of experiments with dry and saturated granular material to analyze this relation. The experiments consist of causing vibrations in a column of material and analyzing their response for vibration and pore pressure (in the case of saturated material). The experiments were carried out to verify the variations of vibration according to the axes of the equipment used (accelerometer), the repression of the presented material and the variations of pore pressure in the experiment realized with saturated material, with data obtained from a transducer of pressure. To capture the data an arduino microprocessor is used connected to a computer. An analysis of the data obtained is performed, which is satisfactory and consistent with the expected results.

Keywords: mining tailings, tailings dam, vibration, pore pressure, accelerometer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Métodos de descarga de rejeitos em barragem.	4
Figura 2: Métodos de alteamento de barragens.	6
Figura 3: Barragens Val di Stava, Itália, pré ruptura.....	7
Figura 4: Vila afetada antes e depois do rompimento das barragens.	8
Figura 5: Mapa do caminho percorrido pelo rejeito proveniente do rompimento da barragem do Fundão.	8
Figura 6: Quadro demonstrativo sobre acidentes de barragens no Brasil e seus principais danos.	9
Figura 7: Sequência ilustrativa de um galgamento.....	10
Figura 8: Sequência ilustrativa do fenômeno de piping.	10
Figura 9: Localização de instalação de acelerômetro	13
Figura 10: Localização das máquinas em relação ao acelerômetro.....	15
Figura 11: Acelerogramas obtidos após vibrações causadas por equipamentos	15
Figura 12: Sismógrafo utilizado na coleta de dados.....	16
Figura 13: Acelerômetro e transdutor de pressão utilizados nos ensaios.	18
Figura 14: Arduíno Uno (à esquerda) e protoboard (a direita) utilizados no experimento.	19
Figura 15: Montagem final dos equipamentos utilizados para os ensaios.	20
Figura 16: Coluna utilizada para realização dos ensaios.....	21
Figura 17: Variação da vibração em função do tempo no eixo X durante o ensaio seco.....	23
Figura 18: Variação da vibração em função do tempo no eixo Y durante o ensaio seco.....	24
Figura 19: Variação da vibração em função do tempo no eixo Z durante o ensaio seco.	24
Figura 20: Coluna de material seco após realização do experimento.....	25
Figura 21: Variação da vibração em função do tempo no eixo X durante o ensaio a úmido...26	26
Figura 22: Variação da vibração em função do tempo no eixo Y durante o ensaio a úmido...27	27
Figura 23: Variação da vibração em função do tempo no eixo Z durante o ensaio a úmido ...27	27

Figura 24: Variação da poropressão durante experimento. Valores em centímetros de coluna d'água.....	28
Figura 25: Configuração da coluna antes do experimento (à esquerda) e logo após o experimento (a direita).....	29
Figura 26: Variações das acelerações e da poropressão durante o ensaio com o material saturado.....	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	Geral	2
2.2	Específicos.....	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1	Disposição de rejeitos na mineração	3
3.2	Barragens de Rejeito.....	3
3.2.1	Métodos de Alçamento.....	5
3.3	Acidentes em barragens de rejeito.....	6
3.3.1	Mecanismos de ruptura.....	9
3.3.2	Liquefação	11
3.4	Monitoramento em barragens de rejeito	12
3.4.1	Monitoramento de vibrações	12
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
4.1	Arranjo Experimental	17
4.2	Equipamentos, calibração e instalação	18
4.3	Acelerações no material seco	21
4.4	Aceleração e Poropressão no material saturado	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
5.1	Ensaio a seco	23
5.2	Experimento com material saturado	25
5.2.1	Variações de vibração.....	26
5.2.2	Variação de poropressão:.....	28
5.2.3	Abatimento do material e nível de água	28
5.2.4	Relação vibrações e poropressão.....	29
6	CONCLUSÃO.....	31
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	32

1 INTRODUÇÃO

A mineração é um ramo de atividades que visa extrair substâncias minerais de determinados depósitos. O desenvolvimento da mineração acompanha o próprio desenvolvimento humano, tendo seus primeiros relatos a milhares de anos antes de Cristo.

Neste longo período de tempo, a mineração se desenvolveu e se aperfeiçoou, porém convive atualmente com duras críticas quanto a gerar prejuízos para a sociedade em diferentes âmbitos.

Isso se deve em grande parte porque a mineração possui em seu ciclo de atividades a necessidade de encaminhar o rejeito proveniente da fase de beneficiamento mineral. Em sua maioria, estes rejeitos se encontram misturados a água e comumente são direcionados a barragens de rejeito, solução vista como mais economicamente viável para o descarte destes materiais.

As barragens de rejeito em sua grande maioria são barragens de terra, mas possuem diferentes métodos construtivos, de alteamento e operação. Devendo estes se adaptarem as condições geológicas locais e geotécnicas, a fim de não representarem um risco social e ambiental.

O acidente ocorrido na Barragem do Fundão, pertencente a empresa Samarco, no ano de 2015, representou um grande impacto nas comunidades afetadas e acendeu um debate nacional sobre a segurança deste tipo de empreendimento.

Apesar de amplamente utilizadas no Brasil e no mundo, barragens de rejeito estão sendo submetidas cada vez mais a rígidas normas ambientais, podendo isto representar um risco para a atividade mineradora. Desta forma, profissionais de diversas áreas procuram avanços tanto na parte construtiva, de operação e de monitoramento de barragens de rejeito.

Uma causa para o rompimento de barragens é o processo de liquefação, que causa uma perda drástica de resistência do cisalhamento do material. Este fenômeno está diretamente ligado ao aumento da poropressão em material granular saturado. (Pena, 2008)

Considerando este cenário, o estudo da correlação entre as vibrações as quais uma barragem de rejeito é submetida e as poropressões desenvolvidas no rejeito se mostra importante.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar as vibrações existentes na mineração e como estas podem influenciar o aumento da poropressão nos rejeitos granulares saturados, material comumente existente em barragens de rejeito.

2.2 Específicos

Realizar revisão bibliográfica em literatura especializada sobre o mecanismo de liquefação e sua ocorrência em barragens de rejeitos alteadas por montante.

Examinar por meio de experimentos o impacto das vibrações (aceleração) em material granular seco e seu recalque.

Estudar experimentalmente o mecanismo de ruptura e recalque por liquefação devido a vibração em material granular saturado.

Determinar a correlação entre aceleração e incremento da poropressão em material granular saturado durante vibração.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Disposição de rejeitos na mineração

De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), em função do método de processamento utilizado, podem se encontrar rejeitos com diferentes características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas. O descarte destes rejeitos pode ser realizado na forma a granel (por meio de correias transportadoras ou caminhões) ou em polpa, quando o rejeito está caracterizado por uma mistura de água e sólidos, sendo seu transporte realizado por meio de gravidade ou por sistema de bombeamento utilizando tubulações.

De forma geral, a disposição de rejeitos pode ser realizada em minas subterrâneas, cavas exauridas de minas, pilhas, empilhamento a seco “*dry stacking*”, disposição em pasta ou em barragens de contenção de rejeitos.

O método mais comumente utilizado pela indústria mineral é a disposição de rejeitos em reservatórios criados por diques de contenção ou barragens.

3.2 Barragens de Rejeito

Segundo Cerqueira (2017) uma barragem de rejeitos se constitui por uma estrutura projetada e construída para armazenamento de rejeitos provenientes da mineração. As características do rejeito que chegam às barragens dependem do processo de beneficiamento do minério de interesse. De forma geral, os rejeitos podem ser classificados como:

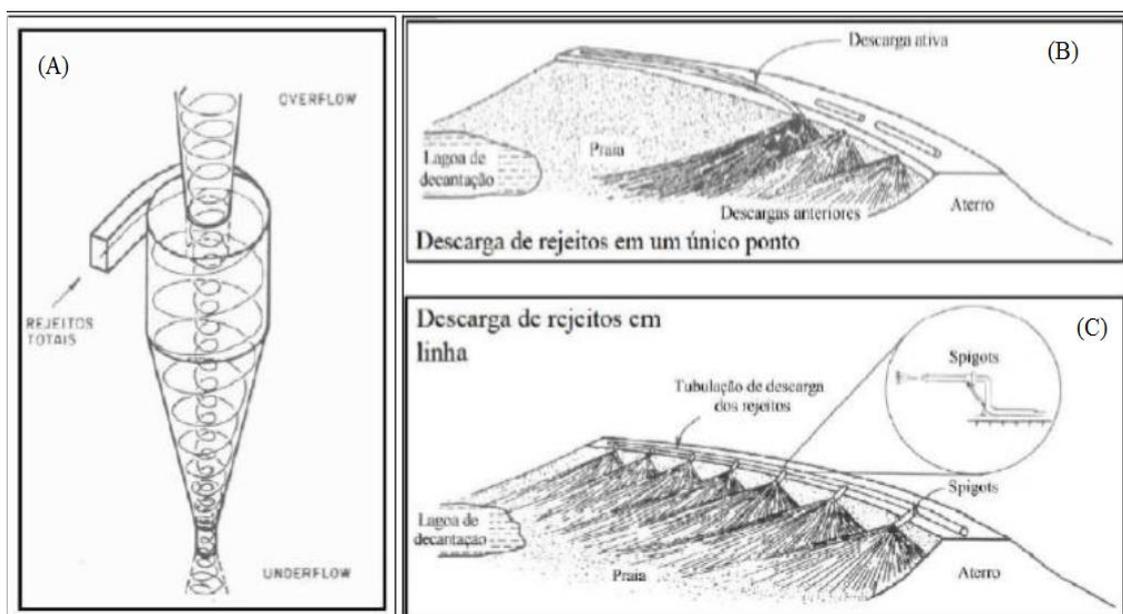
- Lama: Quando a parte sólida é muito fina e não permite um fácil adensamento quando lançado em barragem de rejeitos.
- Arenoso: Quando sua parte sólida é mais grosseira, constituída principalmente por quartzo, o que lhe dá chance de decantação rápida e eventual segregação granulométrica no lançamento em reservatórios.

De acordo com Chammas (1989), citado em Pena (2008), a preferência de mineradoras no que se refere ao manejo de rejeitos é a utilização da técnica de aterro hidráulico em áreas contidas por barragens ou diques, devido a facilidade de operação e rapidez, considerando que o rejeito está na forma aquosa.

De acordo com Cerqueira (2017), o transporte do rejeito até a barragem é usualmente feito através de rejeitodutos (tubulações e canais) e o seu lançamento pode ser efetuado basicamente de três formas, como pode ser visto na Figura 1:

- Descarga única: Lançamento pontual do material em uma única ombreira ou no perímetro da barragem (“espigote”), onde o material mais grosseiro (arenoso) se espalha formando uma praia, requerendo reposicionamento para subida uniforme do depósito. (Figura 1, B)
- Descarga múltipla: Lançamento utilizando diversas saídas (espigotes) de uma tubulação mestre localizada longitudinalmente à praia, abrangendo uma área maior e conseqüentemente uma melhor disposição dos rejeitos (subida uniforme do depósito). (Figura 1, C)
- Hidrociclones: Dispositivo utilizado para separar as porções grosseiras e finas do material. Em operação, o material mais grosseiro é liberado pelo seu *underflow*, enquanto o material mais fino é liberado pelo *overflow*. (Figura 1, A)

Figura 1: Métodos de descarga de rejeitos em barragem. (Fonte: Adaptado de notas de aula "Disposição de resíduos de mineração – Aula 2: Planejamento de Sistemas de Disposição de Resíduos" UFOP 2014)



A utilização de espigotes e rejeitos totais no lançamento origina um depósito com uma leve inclinação, conhecidos como praia. Existe a possibilidade de haver segregação hidráulica, fenômeno onde as partículas mais grosseiras se concentram próximas ao ponto de lançamento e as partículas mais finas se depositam em distâncias maiores, sedimentando-se no interior de um lago (Pena, 2008).

O fenômeno de segregação hidráulica em relação a granulometria do material depende de diversos fatores, como o teor de sólidos contido na polpa de rejeito, da graduação das partículas, do caminho da drenagem e da densidade dos minerais ali presentes.

Caso exista a utilização de hidrociclones na crista da barragem, o material fino pode ser lançado na bacia de decantação, enquanto o material grosseiro é depositado na área da crista, sendo usado para construção de alteamentos. (Ribeiro et al, 2003; Espósito, 2000, apud Pena 2008).

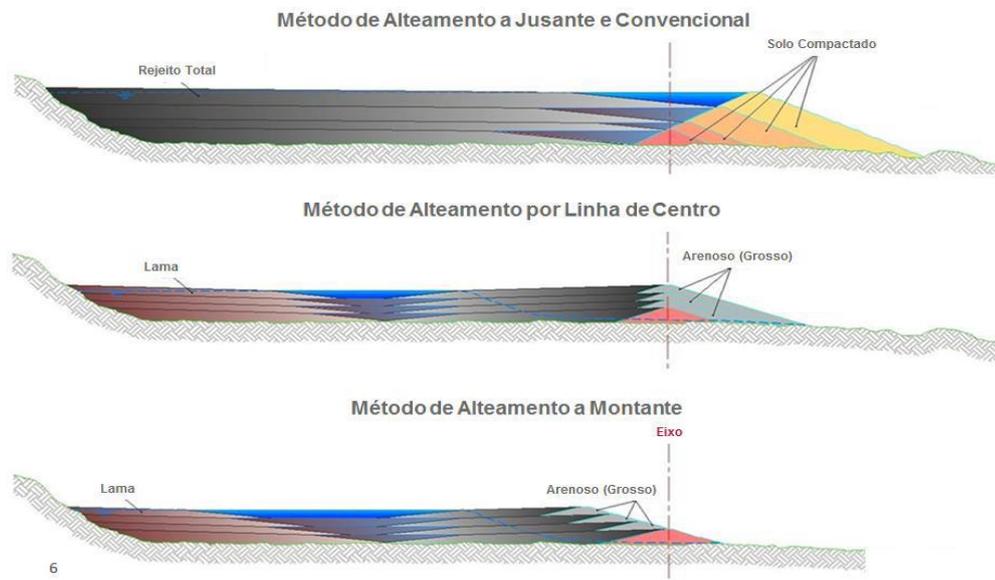
Uma opção existente é utilizar o material da praia após drenagem como fonte de material para construção de diques (Pena, 2008).

3.2.1 Métodos de Alteamento

De acordo com Cerqueira (2017), as barragens de rejeito são aterros compactados construídos em etapas que têm seu maciço constituído utilizando material de empréstimo (solos e rochas locais), estéreis de frente de lavra, ou a parte arenosa proveniente do próprio rejeito. Após a construção de um dique inicial, as contenções são alteadas por diques compactados que podem utilizar os mesmos materiais. As opções de alteamento diferem basicamente da direção de evolução da crista dos diques, sendo os métodos típicos como segue ilustrado na figura 2:

- Alteamento a jusante: Quando há a construção do dique de alteamento sobre o talude de jusante do dique anterior e o terreno a jusante.
- Alteamento à montante: Quando o dique de alteamento é construído sobre a praia de o rejeito depositado no reservatório da barragem, .
- Alteamento em linha de centro: Quando o dique de alteamento mantém a linha de centro, subindo na vertical, apoiando-se na praia de rejeito (a montante) e sobre o dique anterior e terreno natural (a jusante).

Figura 2: Métodos de alteamento de barragens. (Fonte: Vale, 2016)



O método de alteamento a montante se destaca como o mais antigo, simples e econômico dos métodos construtivos de barragens (Araujo, 2006). Apesar de ser utilizado pela maioria das mineradoras pela economicidade, o método requer atenção em relação a segurança, pois depende muito do controle do lago e conseqüentemente da largura de praia. Além disso os alteamentos são realizados sobre material depositado não consolidado na barragem (aterro hidráulico).

3.3 Acidentes em barragens de rejeito

Acidentes em barragem de rejeito ocorrem recorrentemente em todo o mundo, causando graves danos sociais, ambientais e econômicos. Devido a recorrência de acidentes envolvendo rupturas ou vazamentos de barragem, o aspecto de segurança das mesmas se encontra em foco na sociedade. (Galo, 2017)

De acordo com o *International Commission on Large Dams - ICOLD* (2001), diversas instituições tem se mobilizado para definir procedimentos relativos a segurança de barragens. Entre eles estão o Banco Mundial, *Mining Association of Canadá – MAC* e o *International Council on Mining and Metals – ICMM*.

No Brasil, houve a promulgação da Lei nº 12.334 que rege a Política Nacional de Segurança de Barragens, além de portarias e resoluções que visam complementar a legislação. (ANM)

Como exemplo de acidente envolvendo barragem de rejeito, pode-se destacar o acidente ocorrido na cidade de Stava, na Itália, no ano de 1985. Uma barragem de rejeito de fluorita se rompeu e liberou o material em direção a um vale, atingindo as vilas de Tesero e Stava. Além da destruição das vilas, houveram 269 vítimas fatais. A barragem e as consequências ao vilarejo podem ser observados nas Figuras 3 e 4.

Figura 3: Barragens Val di Stava, Itália, pré ruptura. Fonte: <http://engineers-channel.blogspot.com/p/val-di-stava-dam-disaster.html>, acessado em 15/12/2018.



Figura 4: Vila afetada antes e depois do rompimento das barragens. (LUINO, F.; GRAFF, J. V. de; 2012)



No contexto nacional, é importante citar o rompimento da barragem do Fundão, pertencente a Samarco Mineração, na cidade de Mariana –MG. A ruptura da barragem liberou cerca de 60 milhões de m³ de rejeitos de minério de ferro, que causou a destruição do distrito de Bento Rodrigues, enormes danos ambientais, sociais e econômicos, atingindo a bacia do rio Doce até desaguar no oceano Atlântico, como pode ser visto na Figura 5. (Galo, 2017)

Figura 5: Mapa do caminho percorrido pelo rejeito proveniente do rompimento da barragem do Fundão. (Fonte: Samarco, 2018)



A Figura 6 lista os principais acidentes envolvendo barragens no Brasil e seus respectivos impactos :

Figura 6: Quadro demonstrativo sobre acidentes de barragens no Brasil e seus principais danos. (Fonte: Secretaria de Energia e mineração de São Paulo. <http://www.energia.sp.gov.br/wp-content/uploads/2016/07/ACIDENTES-EM-BARRAGENS-Joaquim-Pimenta-Pimenta-de-%C3%81vila-Engenharia.pdf> Acessado em: 16/11/2018).

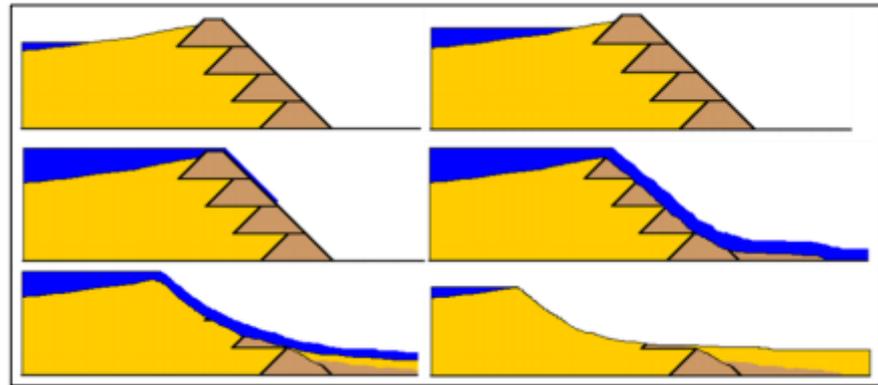
ANO	BARRAGEM - BRASIL	PRINCIPAIS DANOS
1986	Fernandinho, Rio Acima	7 Mortes
2001	Rio Verde, Brasil	5 Mortes
2003	Indústria de Papel, Cataguases	Lixívia negra liberada, interrupção de fornecimento de água
2006	Mineração Rio Pomba, Mirai	Vazamento de rejeitos de bauxita. Interrupção de fornecimento de água
2007	Mineração Rio Pomba, Mirai	Vazamento de rejeitos de bauxita. Interrupção de fornecimento de água
2014	Herculano, Itabirito	3 Mortes
2015	Fundão, Mariana	18 a 22 Mortes

3.3.1 Mecanismos de ruptura

Os principais mecanismos responsáveis por rupturas de barragens de rejeitos são: liquefação, galgamento e erosão interna, também conhecido como “*piping*”. Todos estes modos de ruptura geram instabilidade de taludes, provocando seu colapso (Galo, 2017).

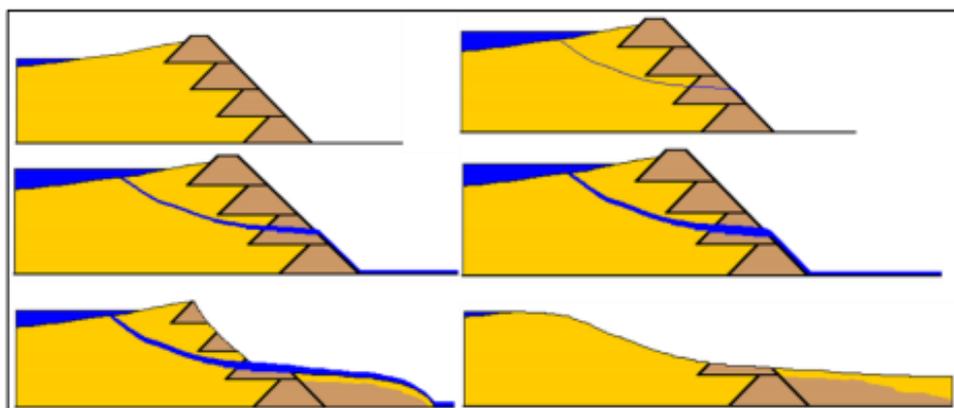
O galgamento (ou *overtopping*) consiste na passagem da água represada pela crista da barragem, causando uma ruptura parcial ou total (como pode ser visto na Figura 7). Este fenômeno está relacionado ao dimensionamento da borda livre da barragem ou ainda do seu vertimento. Um exemplo de acidente relacionado a galgamento no Brasil é o caso da ruptura em 2007 da barragem para contenção de finos de lavagem de bauxita pertencente à empresa de Mineração Rio Pomba Cataguases, em Mirai, no Estado de Minas Gerais.

Figura 7: Sequência ilustrativa de um galgamento. (Fonte: Galo, 2017)



O “*piping*” se caracteriza quando há uma erosão interna, no sentido de jusante para montante, no formato de um orifício alongado. O carreamento de partículas de solo é devido à percolação concentrada de água. Este processo provoca uma desestabilização na matriz do solo e também nas tensões do maciço ou fundação. O *piping* é um fenômeno progressivo até que se formem canais contínuos que levam a estrutura à ruptura. Pode ocorrer no corpo do aterro devido a problemas na drenagem interna da barragem, devido à falhas de compactação do maciço, ou problemas geológicos, quando se trata das ombreiras ou fundação da barragem. A sequência ilustrativa pode ser observada na Figura 8. Exemplos de acidentes causados por *piping* é a ruptura da barragem de Omai, na Guiana, em 1995, e Teton, no estado de Ohio, nos Estados Unidos, em 1976. A Figura 6 mostra esquematicamente a evolução de um *piping* até a ruptura da barragem.

Figura 8: Sequência ilustrativa do fenômeno de *piping*. (Fonte: Galo, 2017)



3.3.2 Liquefação

A liquefação é considerada um fenômeno natural, que pode ocorrer em depósitos de solos granulares quando estes se encontram saturados. Ela se manifesta quando a poropressão se eleva consideravelmente e de forma repentina, fazendo o material passar a se comportar como um líquido denso. Essa elevação na poropressão pode ser causada por um esforço solicitante qualquer, como um carregamento ou vibração. A causa deste fenômeno está relacionada com a resistência ao cisalhamento do solo não coesivo, que depende exclusivamente da tensão efetiva originada da tensão de contato entre os grãos. O aumento da poropressão faz com que estas tensões decaiam, levando ao extremo do solo se comportar como um meio líquido viscoso, sem nenhuma capacidade de suporte.

Os eventos de liquefação podem ser considerados como liquefação estática ou liquefação dinâmica, dependendo do mecanismo disparador do fenômeno. A liquefação dinâmica está normalmente associada a eventos dinâmicos, como por exemplo terremotos ou outras fontes de vibração, enquanto a liquefação estática está relacionada com carregamentos estáticos como sobrecarga ou aumento repentino da freática. (Pena, 2008)

Barragens alteadas pelo método de montante têm características de resistência baixas com relação a eventos sísmicos, podendo o rejeito depositado na barragem liquefazer-se. Logo, grandes quantidades de rejeito podem ser liberadas pela estrutura, causando graves danos. A polpa quando liberada nestas condições, pode atingir grandes distâncias, e velocidades consideráveis. (Penman, 2001, apud Cavalcante, 2004).

No contexto da mineração, há outras possibilidades de vibração além da eventualidade de um sismo natural, pouco provável na maior parte do território brasileiro. A liquefação pode acontecer, por exemplo, devido a vibrações causadas por equipamento pesado (caminhões, tratores, “*scrapers*”, etc.) passando ao longo da crista do dique ou no pé da barragem), ou devido a minas dinamitadas perto da barragem”. (Cavalcante, 2004).

3.4 Monitoramento em barragens de rejeito

Devido aos grandes impactos que podem ser gerados devido a um acidente em uma barragem de rejeitos, é necessário a realização de monitoramento das mesmas, utilizando de tecnologia disponível. Segundo Machado (2007) a instrumentação em uma barragem de rejeitos possibilita a identificação de pontos críticos de segurança, seja na parte estrutural ou operacional da instalação. A parte estrutural da barragem merece atenção especial, pois pode interferir na estabilidade do projeto. A parte operacional se relaciona com o funcionamento de equipamentos da barragem.

Juntamente com as inspeções visuais, a instrumentação das barragens é útil para monitorar medidas de deslocamento, pressão, vazão de percolação, drenagem, precipitação, nível do reservatório, entre outros parâmetros possíveis. Em geral, o monitoramento moderno está relacionado com os mecanismos de ruptura que se quer evitar. Assim, na lista anterior, apenas depois da ruptura de Fundão, a liquefação entrou na lista das preocupações e portanto, se fez necessário pensar nos instrumentos que auxiliariam na sua detecção.

Os instrumentos utilizados para monitorar a barragem de rejeitos devem ser avaliados quanto a eficiência para monitorar a segurança estrutural e a confiabilidade dos dados fornecidos. (Machado, 2007).

3.4.1 Monitoramento de vibrações

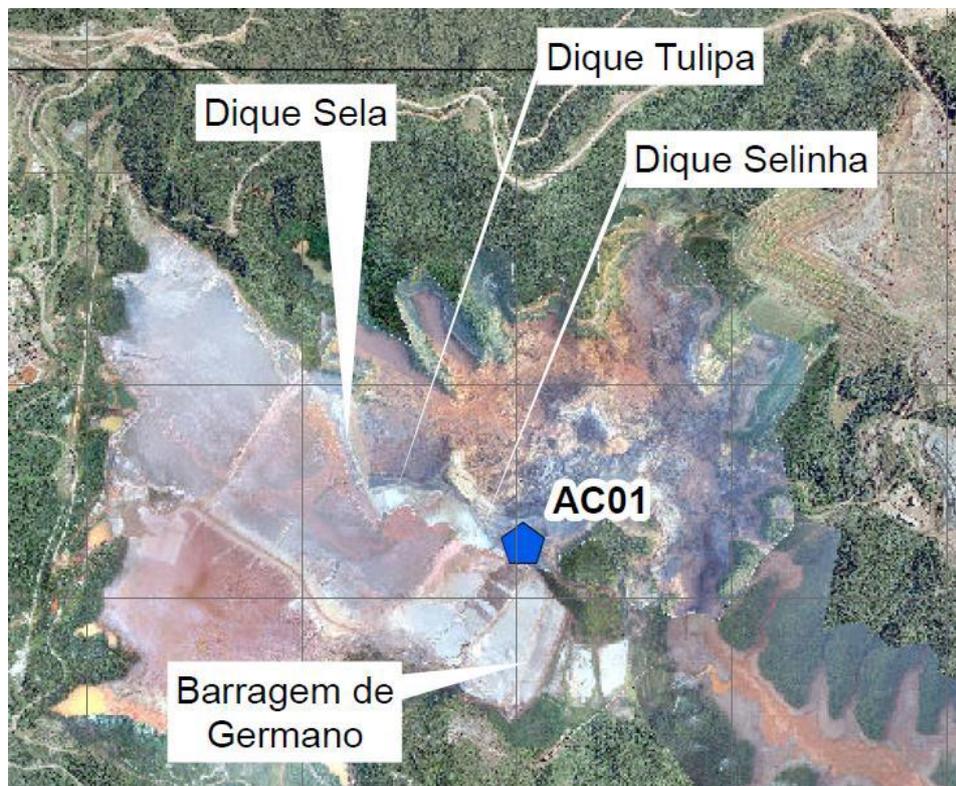
As fontes de vibrações podem ocorrer de forma natural, como um terremoto, ou de formas artificiais, por explosivos ou máquinas. As fontes quando artificiais podem ser utilizadas de maneira controlada para avaliação da geológica local, determinar a segurança de uma área com relação a riscos (de deslizamentos ou sísmicos, por exemplo) ou ainda para prospecção mineral. (Valencio, 2017)

Atualmente, para detectar e analisar eventos sísmicos são utilizadas diferentes tecnologias, incluindo dispositivos com a finalidade de monitorar diretamente o movimento do solo e outros dispositivos secundários. Nesta categoria se encontram os sismômetros (acelerômetros), equipamentos que basicamente medem a velocidade ou aceleração de um ponto no solo. (Valencio, 2017)

Estudos de caso: Barragem do Germano

Em Castilho (2017), o autor relata a utilização de um acelerômetro na ombreira direita do Dique da Selinha, uma estrutura que separava as barragens de Germano (a montante) e do Fundão (a jusante). Esta instalação tinha como objetivo quantificar as acelerações que a estrutura era submetida por eventos dinâmicos. Destaca-se ainda que a utilização do acelerômetro possibilita a análise quantitativa de movimento e aceleração no terreno. A Figura 9 evidencia o local de instalação:

Figura 9: Localização de instalação de acelerômetro (Fonte: Castilho, 2017)



Os dados obtidos durante o período de utilização do acelerômetro foram analisados com base na Escala de Intensidade Instrumental, do Serviço Geológico dos Estados Unidos, que pode ser observado na Tabela 1:

Tabela 1: Escala de Intensidade Instrumental (Castilho, 2017)

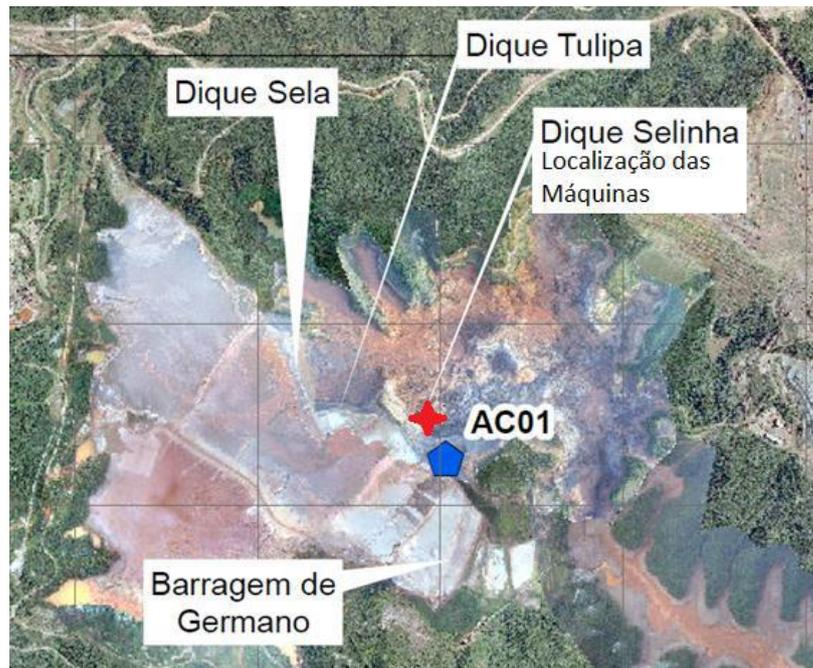
Intensidade Instrumental	Aceleração (%g)	Velocidade (cm/s)	Tremor Percebido	Dano Potencial
I	< 0,17	< 0,1	Não Sentido	Nenhum
II-III	0,17 - 1,4	0,1 - 1,1	Fraço	Nenhum
IV	1,4 - 3,9	1,1 - 3,4	Leve	Nenhum
V	3,9 - 9,2	3,4 - 8,1	Moderado	Muito Leve
VI	9,2 - 18	8,1 - 16	Forte	Leve
VII	18 - 34	16 - 31	Muito Forte	Moderado
VIII	34 - 65	31 - 60	Severo	Moderado a Forte
IX	65 - 124	60 - 116	Violento	Forte
≥ X	≥ 124	≥ 116	Extremo	Muito Forte

Durante o período, foram analisadas vibrações causadas por diversas fontes. O autor relata a análise de vibrações causadas por explosões advindas de desmontes de rochas nas proximidades. Estas acelerações, no entanto, não ultrapassaram $1,6 \text{ cm/s}^2$ ($0,16\%g$), sendo consideradas imperceptíveis. O valor máximo obtido, ocorreu quando duas detonações foram efetuadas em um curto espaço de tempo. Após dozes horas das detonações, 11 dos 22 piezômetros instalados no barramento da Barragem de Germano registraram alterações (mesmo que pequenas) nos valores de poropressão.

No dia 18/11/2015 foi registrado um sismo natural na região, com pico de $4,12 \text{ cm/s}^2$ ($0,42\%g$). Apesar de mais intensa que as acelerações advindas do desmonte, são caracterizadas como fracamente perceptível e sem potencial de dano as estruturas. Estimou-se uma distância de aproximadamente 2,93 km entre o epicentro do evento e o local de instalação do acelerômetro.

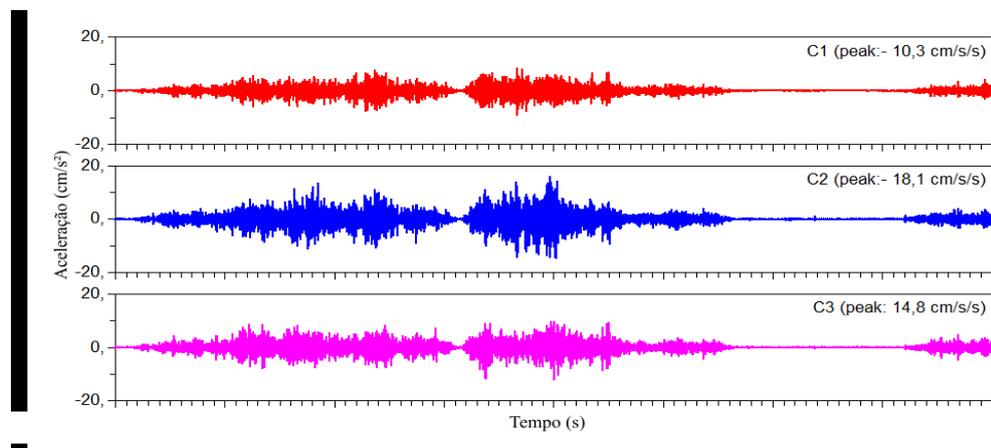
As maiores acelerações obtidas durante o experimento foram resultado de tráfego de máquinas pesadas pelo Dique da Selinha. A maior máquina presente no dique foi a carregadeira 992k, da Caterpillar. Durante o estudo, duas máquinas deste porte trabalhavam ao mesmo tempo no pé do dique, com o peso operacional de aproximadamente 99 toneladas cada, podendo desenvolver velocidades de até 22,4 km/h. A Figura 10 ilustra a posição dos equipamentos em relação ao acelerômetro.

Figura 10: Localização das máquinas em relação ao acelerômetro. (Fonte: Castilho, 2017)



As acelerações advindas chegaram a $18,1 \text{ cm/s}^2$ ($1,8\%g$), sendo classificadas como levemente perceptíveis. A Figura 11 representa o acelerograma dos três eixos de leitura obtido pelas ondas causadas pelos equipamentos.

Figura 11: Acelerogramas obtidos após vibrações causadas por equipamentos de grande porte (Fonte: Castilho, 2017)



Após análise, Castilho (2017) conclui que apesar das pequenas elevações de poropressão, os eventos estudados não causaram danos nas estruturas monitoradas. Relata, no entanto, que em barragens de rejeito com estruturas comprometidas, os gatilhos estudados poderiam instabilizar a estrutura.

Estudo de caso – Monitoramento de vibrações em aterro teste

Em julho de 2008, foi realizado pelo prof. Valdir Costa e Silva um laudo técnico com objetivo de observar se as velocidades e frequências impostas por uma máquina de grande porte (trator Caterpillar D6) poderia gerar instabilidade em determinado aterro teste. Para tal, foi utilizado um sismógrafo denominado BlastMate Series III, como pode ser visto na figura 12. (Silva, 2008)

Figura 12: Sismógrafo utilizado na coleta de dados. (Fonte: Silva, 2008)



As medições foram realizadas em três pontos da barragem, sendo eles o eixo longitudinal do aterro, o talude do aterro e o *off-set* do aterro. Os dados resultantes podem ser analisados na tabela abaixo:

Tabela 2: Velocidades obtidas nas medições. (Fonte: Feito pelo autor, com dados de Silva, 2008)

Velocidades de vibração obtidas no eixo do aterro				
Direção da Vibração	Transveral	Vertical	Longitudinal	Soma
Velocidade (mm/s)	8,28	13,2	9,4	13,4
Frequência (Hz)	73	37	27	N.A.
Velocidades de vibração obtidas no talude do aterro				
Direção da Vibração	Transveral	Vertical	Longitudinal	Soma
Velocidade (mm/s)	4,57	4,7	3,05	5,22
Frequência (Hz)	32	27	23	N.A.
Velocidades de vibração obtidas no off-set do aterro				
Direção da Vibração	Transveral	Vertical	Longitudinal	Soma
Velocidade (mm/s)	3,56	3,43	2,54	4,07
Frequência (Hz)	18	11	15	N.A.

O valor máximo obtido foi decorrente da passagem do equipamento pelo eixo do aterro teste, devido a proximidade do equipamento e do sismógrafo utilizado. No entanto, os valores encontrados estavam dentro da norma ABNT utilizado pelo autor (NBR 9653:2005).

Quanto aos resultados, é possível perceber o decaimento de valores de velocidade e frequência em função da distância da fonte de vibração, indicando que no caso do ponto de medida no *offset*, as frequências estariam mais próximas de frequência natural de terrenos em solo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo de vibrações e seu impacto em barragens de rejeito foram examinados neste trabalho através de experimentos de laboratório que procuraram relacionar o problema de liquefação e suas causas, como o aumento de poropressão devido à vibração.

Antes de se realizar o experimento, foi feita uma revisão bibliográfica de situações reais de ruptura de barragens de rejeito onde a liquefação ocorreu como modo principal ou secundário. A revisão abordou também aspectos de monitoramento de vibrações e de poropressão. Alguma informação sobre as estruturas de barragens também foi coberta na revisão.

4.1 Arranjo Experimental

O experimento proposto consistiu de uma coluna de material granular (areia fina) submetida a uma perturbação externa para o qual foram feitas medições de aceleração e poropressão (no caso do material saturado).

Para a realização dos experimentos, foram utilizadas as dependências do laboratório de tratamento de resíduos do departamento de Engenharia de Minas, da UFOP.

4.2 Equipamentos, calibração e instalação

Como forma de se aferir as variações de vibração, utilizou-se um acelerômetro triaxial, modelo 4332-002, com range de ± 2 g. Para se verificar as variações de pressões no ensaio saturado, foi utilizado um transdutor de pressão TP-ST 18, com capacidade de medição de até 10 mCA. A Figura 13 ilustra os principais instrumentos utilizados nesta pesquisa.

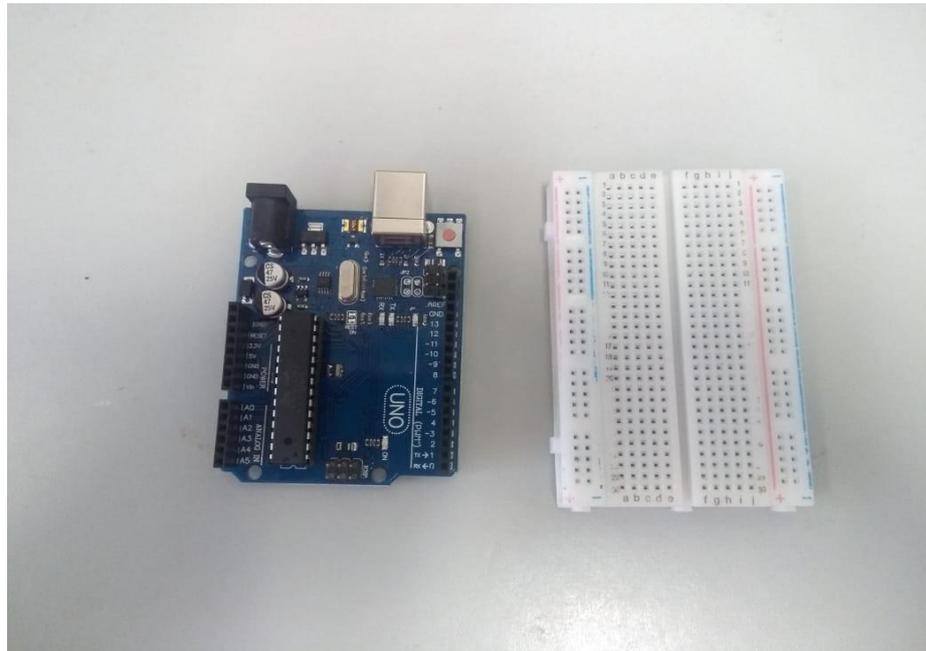
Figura 13: Acelerômetro e transdutor de pressão utilizados nos ensaios.



A calibração do acelerômetro foi feita de acordo com os dados de *output* do equipamento (em voltagem) e seu range, detectados pelo sistema. Já a calibração do transdutor de pressão foi feita utilizando-se uma coluna de água variável, correlacionando, assim, a variação dos dados obtidos pelo equipamento com a pressão a que ele era submetido.

Além dos equipamentos citados, foi utilizado um microprocessador Arduino Uno e uma *protoboard* auxiliar (como pode ser visto na Figura 14) conectado a um computador para leitura dos dados obtidos pelo acelerômetro e também pelo transdutor de pressão. A partir de um *software*, pode-se obter os dados a partir de uma planilha com a opção de macro do *software* Excel.

Figura 14: Arduino Uno (à esquerda) e protoboard (a direita) utilizados no experimento.



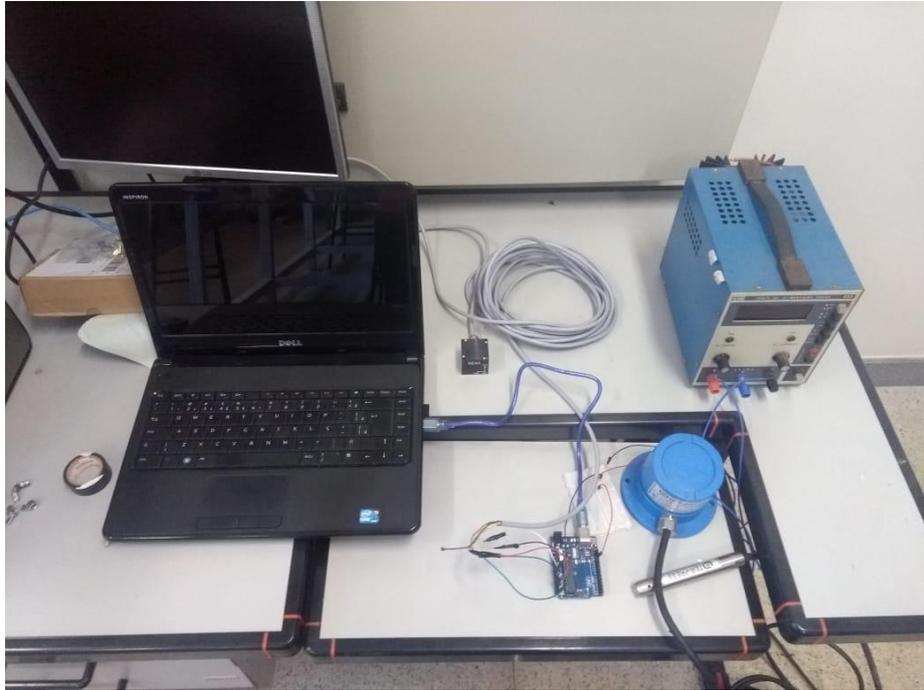
A montagem do equipamento foi feita da seguinte forma: O acelerômetro foi inteiramente conectado ao microprocessador arduíno, sendo um dos fios responsáveis pela sua alimentação (5 volts), um fio responsável pelo aterramento e os outros três fios conectados a portas analógicas de forma a transmitir os dados dos eixos X, Y e Z.

A coleta de dados do acelerômetro se deu a partir de um algoritmo utilizado pelo microprocessador Arduíno. Esse *hardware* capta dados em forma de voltagem, que foram convertidos no formato do *output* do equipamento, nesse caso aceleração em g.

A forma de trabalho com o transdutor de pressão, utilizou-se uma fonte de tensão, mantida em torno de 20V durante todos os experimentos. De acordo com o manual do equipamento, o sinal de saída (*output*) do equipamento é dado em corrente elétrica, numa faixa de 4 a 20 mA, porém o microprocessador Arduíno é apto a funcionar apenas com sinais de voltagem. Desta forma, seguindo a Lei de Ohm, uma resistência foi calculada e aplicada no sistema para que o sinal pudesse ser corretamente enviado. As resistências utilizadas foram de $1k\Omega$ e $330\ \Omega$, sendo elas conectadas em uma *protoboard* conectada a fonte e ao microprocessador, resultando desta forma em uma resistência de aproximadamente $248\ \Omega$. Este valor de resistência foi utilizado para limitar o sinal em aproximadamente 4,8V, de maneira a respeitar o *input* do microprocessador. Outra porta analógica do microprocessador foi utilizada para receber os dados de pressão e utilizando do mesmo algoritmo utilizado para o acelerômetro, quantificar os dados recebidos durante o experimento em voltagem, sendo posteriormente convertidos em função do *range* do equipamento.

A montagem final dos equipamentos pode ser vista na Figura 15:

Figura 15: Montagem final dos equipamentos utilizados para os ensaios.



Programou-se a aquisição de dados para que fossem coletadas 10 amostras por segundo, de acordo com a capacidade dos aparelhos utilizados para os experimentos.

Para montagem da coluna de areia, foi utilizada uma coluna cilíndrica de acrílico, com diâmetro de 145,4 mm e altura de 100 cm, tal como ilustrado na Figura 16. Essa coluna possui em sua base uma ligação para entrada/saída de líquidos, munida de uma válvula, e em suas laterais, hastes metálicas que funcionam como tirantes conectando a base e o topo, gerando vedação por pressão de um anel de vedação instalado no contato da coluna de acrílico com a base.

Figura 16: Coluna utilizada para realização dos ensaios.



4.3 Acelerações no material seco

Para a realização deste ensaio, o material granular foi devidamente seco em estufa por aproximadamente 3 horas. Para a formação da coluna de areia, foi utilizada a técnica usual para reconstituição de amostras granulares de baixa densidade (fofa), conhecida como pluviação no ar com auxílio de um funil (Corrêa, 2018).

Inicialmente, do topo da coluna, fez-se a pluviação de areia com o funil suficiente para formar uma pequena base de material, de modo que o acelerômetro fosse instalado na altura de 2 cm. Posteriormente, continuou-se a deposição do material até que a coluna atingisse a altura de 31 cm.

Como fonte de vibração, golpeou-se, manualmente repetidas vezes a lateral da coluna, utilizando um bastão de madeira. Os impactos foram concentrados na parte central da coluna de material. Os dados foram coletados, durante aproximadamente 12 segundos, e os impactos foram realizados durante aproximadamente 8 segundos.

4.4 Aceleração e Poropressão no material saturado

Na formação da coluna de areia procedeu-se inicialmente como no ensaio anterior com material seco. Construiu-se a base de material para assentamento do acelerômetro, numa altura de 2 cm. A deposição do material continuou até a altura de 7,5 cm, onde o sensor do transdutor de pressão foi inserido. A coluna então foi finalizada, com altura total de 21,2 cm de areia.

Posteriormente, procedeu-se à saturação do material ali desposto. O processo utilizado foi o de percolação ascendente de água (da base para o topo da coluna) vinda de um reservatório externo conectado à base. Procurou-se estabelecer um gradiente hidráulico limitado para evitar qualquer chance de liquefação pela força de percolação induzida. A elevação gradual objetivou também evitar o aprisionamento de ar nos vazios durante o processo de saturação.

Novamente como forma de impacto, golpeou-se a lateral da coluna, aproximadamente na metade de sua altura, repetidas vezes. Os dados foram coletados durante 17 segundos e o impacto foi provocado durante aproximadamente 12 segundos.

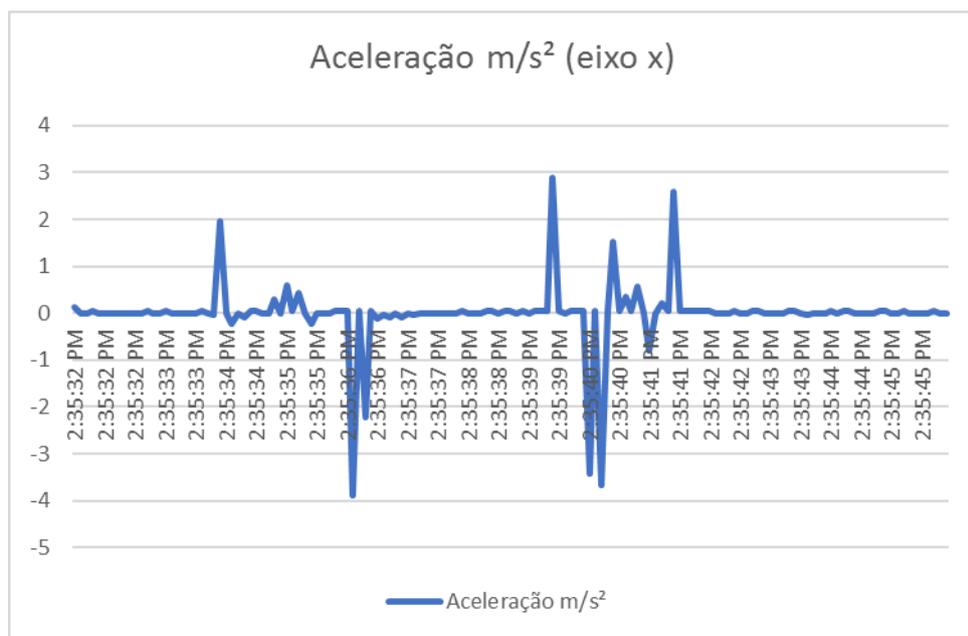
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a montagem dos equipamentos necessários e realizações dos experimentos, com material a seco e saturado, foram obtidos os resultados finais, a serem demonstrados e analisados nesta seção.

5.1 Ensaio a seco

Ao realizar o ensaio a seco, obtivemos os dados relativos as vibrações nas três direções, detectadas pelo acelerômetro, sendo o eixo Z no plano vertical, X e Y no plano horizontal. O resultado mais proeminente foi no eixo X, como pode ser visto na Figura 17.

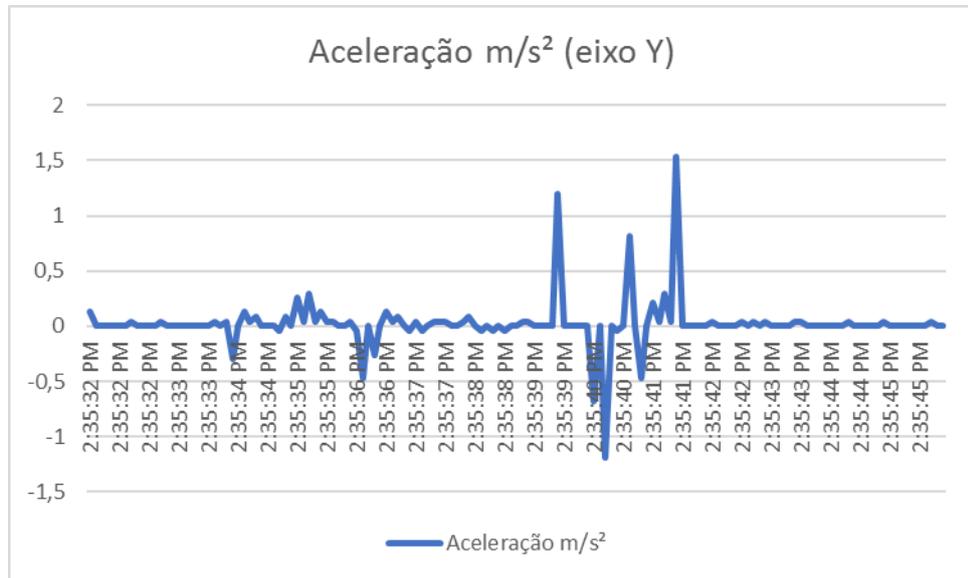
Figura 17: Variação da vibração em função do tempo no eixo X durante o ensaio seco.



Os resultados nos mostram valores de acelerações mais acentuadas que nos demais eixos. Isso se deve ao sentido de aplicação do impacto e propagação das ondas de vibração pelo material. O valor máximo de aceleração registrado foi de 3,88 m/s², registrado durante o quarto segundo do experimento.

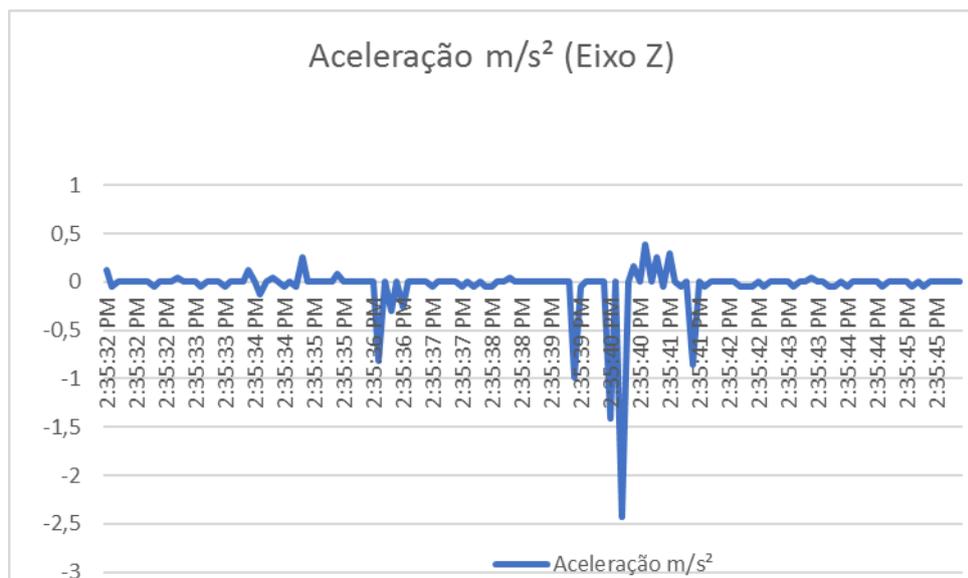
A variação de acelerações no eixo Y se mostrou mais discreta que no eixo X, possuindo menores valores de aceleração, porém os picos registrados foram coerentes com os registrados, como pode ser visto na Figura 18. O valor máximo de aceleração obtido no eixo Y foi de 1,53 m/s², registrado também durante o quarto segundo do experimento.

Figura 18: Variação da vibração em função do tempo no eixo Y durante o ensaio seco.



Assim como observado no eixo Y, as vibrações detectadas no eixo Z apresentaram valores inferiores se comparadas ao eixo X, mas suas variações se mostram coerentes quanto comparadas aos outros eixos. A máxima aceleração obtida no eixo Z foi de 2,43 m/s², no quarto segundo do experimento, conforme pode ser visto na figura 19:

Figura 19: Variação da vibração em função do tempo no eixo Z durante o ensaio seco.



Após o experimento, verificou-se um abatimento da superfície da coluna de areia provocado pelas vibrações. No início do experimento a altura era de 31 cm e posteriormente, 28.4 cm, resultando num abatimento total de 2,6 cm do material. Isso se deve a um rearranjo das partículas durante a vibração, que causa a diminuição de vazios no material e consequentemente, um recalque no mesmo. Na Figura 20, a coluna utilizada para realização do ensaio (pós vibração):

Figura 20: Coluna de material seco após realização do experimento.



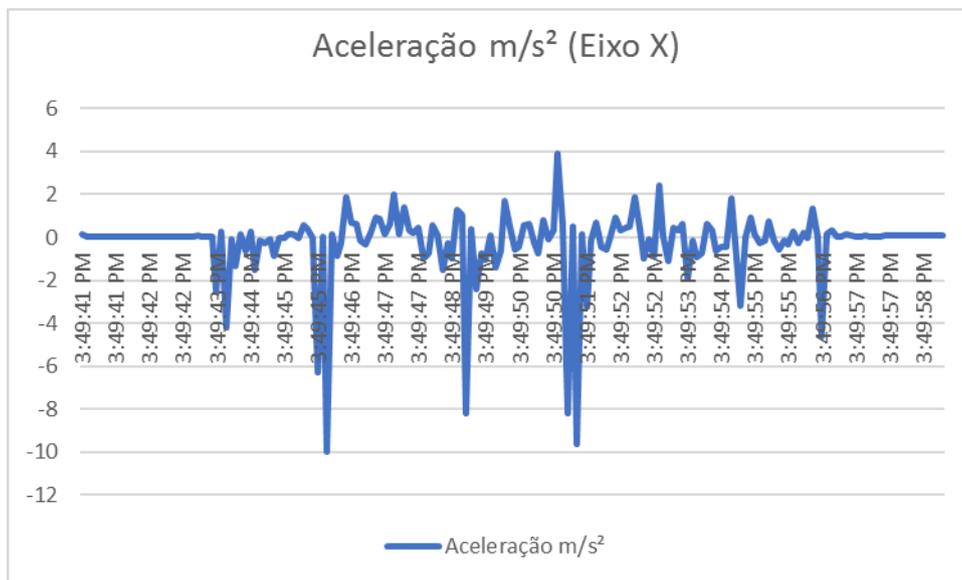
5.2 Experimento com material saturado

Após a realização do experimento a seco, foi realizado o experimento com o material saturado, com o objetivo de se correlacionar as vibrações detectadas com um possível aumento na poropressão do material.

5.2.1 Variações de vibração

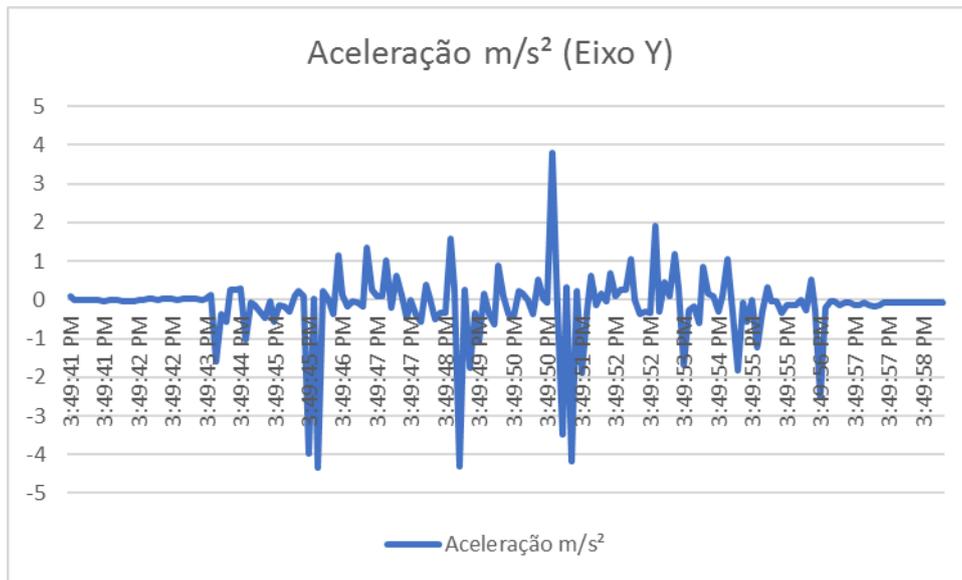
Assim como observado no ensaio a seco, as maiores vibrações foram detectadas no eixo X, devido a fonte de vibração. Além disso, foi possível perceber valores maiores de aceleração neste ensaio, com um máximo de aceleração obtido de 9,97 m/s² como pode ser visto na Figura 21:

Figura 21: Variação da vibração em função do tempo no eixo X durante o ensaio a úmido.



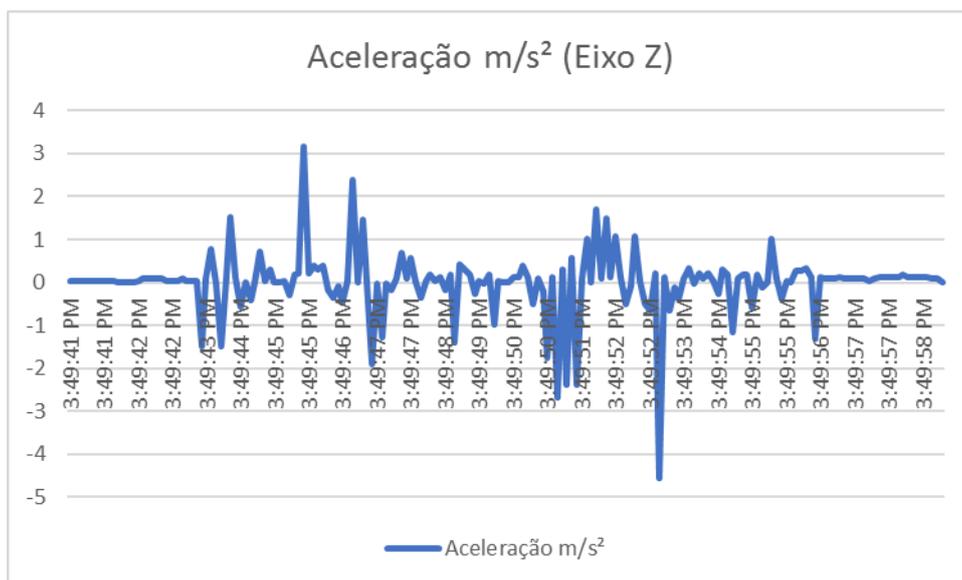
Analogamente ao ensaio a seco, as acelerações detectadas no eixo Y foram inferiores às obtidas no eixo X, porém, seus pontos de maior variação mostram semelhança. A maior aceleração obtida no eixo Y foi de 4,34 m/s², no quinto segundo do experimento, como pode ser visto na Figura 22:

Figura 22: Variação da vibração em função do tempo no eixo Y durante o ensaio a úmido.



As vibrações no eixo Z se mostram bem correlacionadas as vibrações nos demais eixos de acordo com o tempo, mas demonstra seu valor máximo (de 4,56m/s²) em um momento diferente dos outros eixos, como pode ser visto na Figura 23. Pode se associar este pico e outras variações nas acelerações deste eixo com o rearranjo do material durante o experimento, devido ao aumento da pressão.

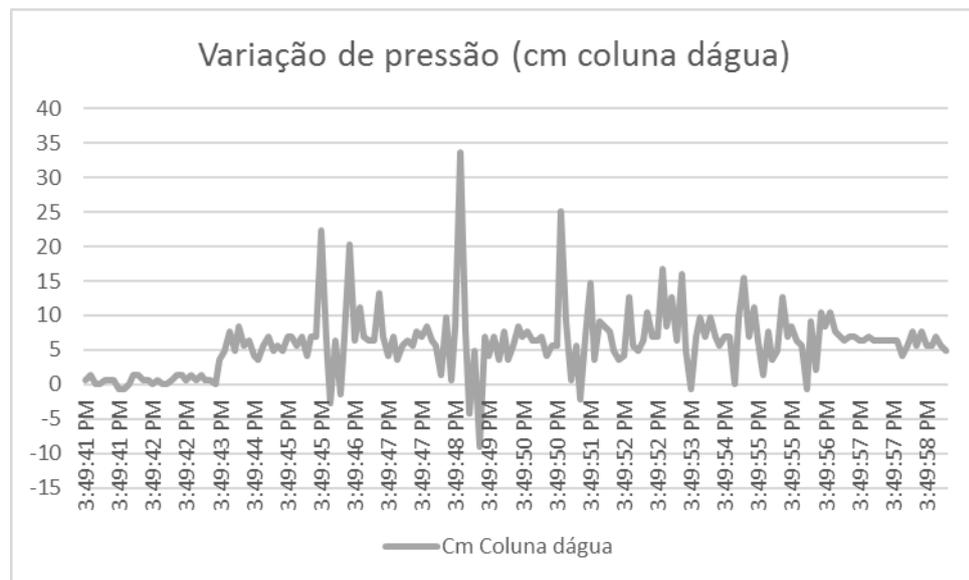
Figura 23: Variação da vibração em função do tempo no eixo Z durante o ensaio a úmido



5.2.2 Variação de poropressão:

Durante o experimento com o material saturado, foram coletados dados referentes à poropressão no local. O transdutor de pressão se localizava a uma altura de 7,5 cm na coluna de material. Os dados obtidos podem ser observados na figura 24.

Figura 24: Variação da poropressão durante experimento. Valores em centímetros de coluna d'água.



Pode se perceber um aumento das pressões de acordo com a realização das vibrações durante o período de tempo. Deve-se salientar, que devido as características dos equipamentos utilizados, pode haver um delay no tempo de resposta entre as grandezas monitoradas (vibração e poropressão). O maior valor registrado para a pressão foi de 33,6 cm de coluna de água, que corresponde a uma variação máxima no experimento de 3,29 KPa.

Deve-se destacar que mesmo após as vibrações, os níveis de pressão continuaram mais elevados do que inicialmente (excesso de poropressão residual). Os níveis de pressão foram aferidos imediatamente antes do experimento e conferiam um valor de 1,4 cm de coluna d'água. Imediatamente após o experimento, os valores se mantinham em uma média de 5,6 cm de coluna d'água e posteriormente houve um decaimento deste valor ao valor inicial.

5.2.3 Abatimento do material e nível de água

A coluna formada inicialmente no estado seco apresentava-se ligeiramente nivelada na altura de 21,2cm. Ao finalizar a saturação da coluna, a altura da areia se mostrava variável,

devido ao rearranjo dentro da coluna cilíndrica. A máxima altura obtida foi de 21,1cm e a mínima altura obtida foi de 19,0 cm. Com a finalização do teste (após a vibração), a altura da areia estava uniforme, na cota de 19,7 cm. Com base nestes dados, pode-se inferir que houve uma acomodação do material durante o experimento.

O nível de água aferido inicialmente no término da saturação era de 21,2 cm e a altura final estava em 20,6 cm. A mudança no nível d'água pode ser explicada por pequenos vazamentos que ocorreram durante o experimento pela base da coluna. Este vazamento pode também ter prejudicado na aquisição exata de dados de pressão. A acomodação de material pode ser observada na Figura 25, que explicita uma imagem antes do experimento e outra logo após.

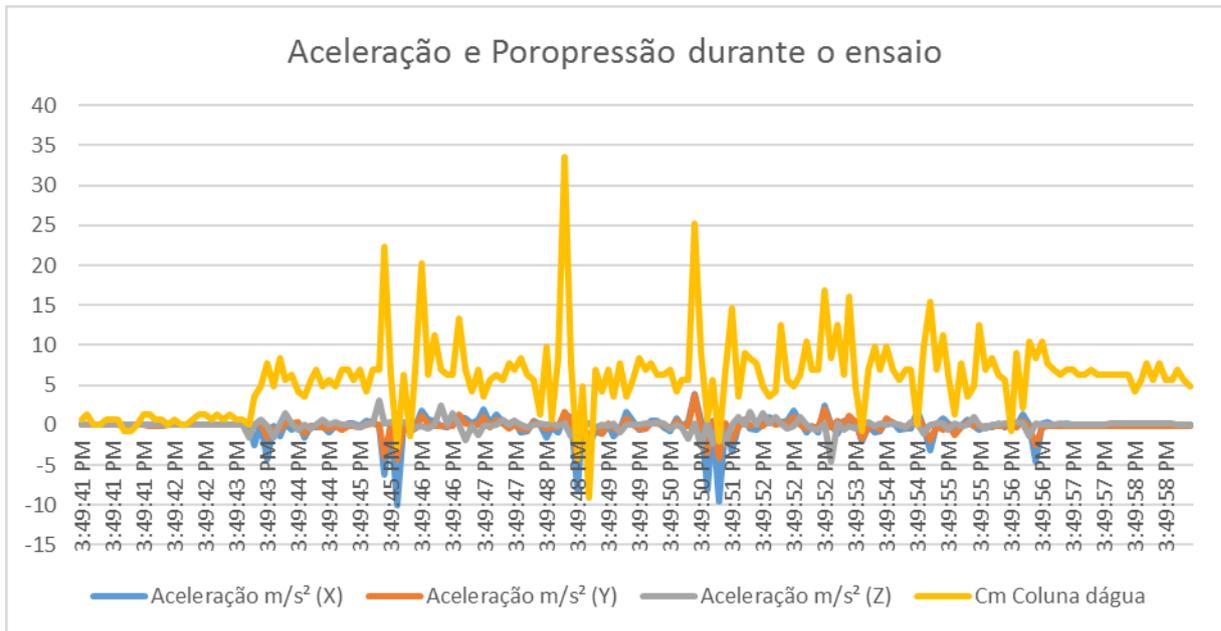
Figura 25: Configuração da coluna antes do experimento (à esquerda) e logo após o experimento (a direita).



5.2.4 Relação vibrações e poropressão

Após a realização do experimento com o material saturado, foi possível reunir as informações das variações de acelerações nos três eixos e correlacioná-las com o resultado obtido da poropressão. O resultado gráfico é explícito na Figura 26

Figura 26: Variações das acelerações e da poropressão durante o ensaio com o material saturado.



Considerando-se os dados obtidos e explicitados na figura 24, pode-se observar que a variação da poropressão está diretamente ligada às variações das vibrações. Pode-se destacar também que mesmo após o encerramento dos impactos geradores de vibração, a poropressão continua em valores mais elevados que os valores iniciais, indicando assim um aumento residual da poropressão pós evento.

Novamente, deve-se considerar um possível *delay* existente entre as leituras dos sensores. Além disso, o sistema de processamento de dados pode acumular pequenos erros em sua leitura e o fato de ter sido detectado um pequeno vazamento durante o experimento podem comprometer um pouco os valores absolutos do experimento. Entretanto, a possibilidade de verificar as variações dos parâmetros medidos foi realizada e se mostra pertinente com a teoria desenvolvida.

6 CONCLUSÃO

Com a realização do trabalho foi possível analisar e correlacionar os efeitos das vibrações com o acréscimo da poropressão em rejeitos granulares saturados, uma situação que ocorre com frequência no âmbito de estruturas de barragens de rejeito da mineração. O acréscimo da poropressão em rejeitos é um fator preponderante para a deflagração de liquefação, um mecanismo que desestabiliza estruturas de barragens de rejeitos e podem levá-las ao colapso, causando grandes devastação e prejuízos.

Com relação aos experimentos realizados, foram encontradas algumas dificuldades em sua montagem, como pequenas variações na leitura do microprocessador e um pequeno vazamento durante o ensaio saturado, mas é importante priorizar as variações obtidas pelo experimento sobre valores absolutos obtidos.

Ao realizar ensaios com o material granular, foi possível quantificar e avaliar as condições de vibração no material seco e saturado, as variações de poropressão no experimento a úmido e observar os recalques do material.

O ensaio a seco se mostrou coerente com os resultados esperados, apresentando variações de aceleração em momentos semelhantes em todos os eixos do equipamento, e com maior intensidade na direção dos impactos. Além disso, houve o recalque considerável de material.

Com a realização do ensaio com o material saturado, foi possível perceber que as magnitudes de vibração se intensificaram. Foi possível perceber também uma relação direta entre o aumento da poropressão na coluna de material e as vibrações realizadas, objetivo primário do trabalho. Ademais, foi possível observar o rearranjo do material na coluna e suas variações de altura.

Observando os resultados obtidos, pode-se concluir que o trabalho atingiu seus objetivos principais e foi de grande valia para o desenvolvimento de conhecimento na área.

Infelizmente, a fonte de vibração não pode ser quantificada. Seria de grande importância esta quantificação para comparar a respostas do meio em termos de variação de frequência e intensidade. Esta quantificação poderia ser realizada utilizando outro acelerômetro, por exemplo. Seria também interessante a utilização de um osciloscópio para obtenção mais precisa de dados (amostragem em milissegundos).

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, C. B. de. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. 2006. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9653: Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas**. 2005

CASTILHO, B. de M. **Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da barragem do Germano**. 2017. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – NUGEO/Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017

CAVALCANTE, A. B. C. **Modelagem e simulação do transporte por arraste de sedimentos heterogêneos acoplados ao mecanismo de tensão-deformação-poropressão aplicado a barragens de rejeito**. 2004. 313p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/Universidade de Brasília. Brasília, 2004.

CERQUEIRA, H. M. L. de. **Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas em mineração**. 2017. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia, Ouro Preto, 2017.

CORRÊA, M. M. **Impacto da reconstituição de amostras de laboratório na avaliação potencial de liquefação em depósito de rejeito**. 2018. Dissertação (Mestrado) – PPGEM/Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM) – **Gestão e manejo de rejeitos na mineração**. 2016. 128 p. 1ª Edição. Brasília, 2016.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS-ICOLD. **Tailings dams risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121.** Paris, 2001.

GALO, D. de B. **Análise de Riscos em Barragens de Rejeitos com Uso de Técnicas Semiprobabilísticas de Estabilidade de Taludes: Um Estudo de Caso.** 2006. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador – Ba, 2017.

PENA, L. R. **Estudo da construção de aterros em depósitos estratificados de rejeito de mineração.** 170 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Ouro Preto, PPGEM, Ouro Preto, 2008.

MACHADO, W. G. de F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração.** 155 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, São Paulo, 2007.

MAIA, J.A.C. **Métodos probabilísticos aplicados à estabilidade de Taludes e e cavidades em rocha.** 2003. 196 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

Silva. V. C e. **Monitoramento das vibrações no aterro teste decorrentes da passagem do trator caterpillar D6.** Laudo Técnico. Ouro Preto, 200

VALENCIO, A.; VALENCIO, N. F. L. da S.; HANAI, F. Y. **Mantendo os pés no chão: Refletir, monitorar e agir diante Eventos Sísmicos.** Revista Eletrônica de Tecnologia e Cultura. 20ª Edição. Páginas 21-40. Abril de 2017.

Ouro Preto, 20 de dezembro de 2018

Sugestão de alterações

Certifico que o aluno Lucas Bianchetti Drumond, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado "Análise de vibrações e desenvolvimento de poropressão em rejeito de mineração", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



Waldyr Lopes de Oliveira Filho

(Orientador)