

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**



**Mateus Arraes Feitosa Borges**

**Análise de aspectos sísmicos na ruptura da barragem  
de brumadinho**

**Trabalho de Graduação  
2021**

**Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica**

CDU : 624.131:551.1

**Mateus Arraes Feitosa Borges**

**Análise de aspectos sísmicos na ruptura da  
barragem de Brumadinho**

Orientador

Prof. Paulo Ivo Braga de Queiroz (ITA)

**ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA**

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2021

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Divisão de Informação e Documentação**

Borges, Mateus Arraes Feitosa  
Análise de aspectos sísmicos na ruptura da barragem de Brumadinho/ Mateus Arraes Feitosa Borges.  
São José dos Campos, 2021.69f  
Trabalho de Graduação – Engenharia Civil-Aeronáutica– Instituto Tecnológico de Aeronáutica,  
2021. Orientador: Professor Doutor Paulo Ivo Braga de Queiroz

1. Sismologia. 2. Engenharia de Sismos. 3. Métodos Computacionais. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Análise de aspectos sísmicos na ruptura da barragem de Brumadinho

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Borges, Mateus Arraes Feitosa. **Análise de aspectos sísmicos na ruptura da barragem de Brumadinho**. Ano. 69f. Total de folhas. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

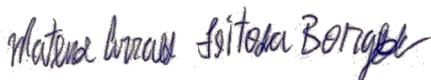
CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Mateus Arraes Feitosa Borges

TÍTULO DO TRABALHO: Análise de aspectos sísmicos na ruptura da barragem de Brumadinho

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação/2021

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

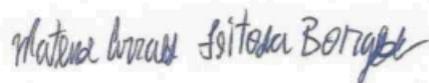


---

Mateus Arraes Feitosa Borges  
Rua Pedroso Alvarenga 173, Apartamento 121  
04531-000, São Paulo - SP

# Análise de Aspectos sísmicos na ruptura da barragem de Brumadinho

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



---

Mateus Arraes Feitosa Borges

Autor



---

Prof. Dr Paulo Ivo Braga de Queiroz

Orientador



---

Prof. Dr João Cláudio Bassan de Moraes

Coordenador do curso de Engenharia Civil-Aeronautica

São José dos Campos, 24 de novembro de 2021

*Dedico este trabalho à minha família, que  
sempre me apoiou incondicionalmente em  
todas situações*

# Agradecimentos

Agradeço aos meus pais e ao meu irmão que foram minha base durante toda minha vida e sempre acreditaram nos meus planos. Vocês são únicos e totalmente responsáveis pelo meu desenvolvimento não apenas profissional, como também pessoal e humano. Me inspiro profundamente em vocês e espero que mesmo pouco corresponder às expectativas depositadas em mim.

Agradeço também a todos os meus amigos e colegas de faculdade que sempre estiveram ao meu lado e permitiram que esse sonho se tornasse realidade. Não citarei nomes, pois não quero cometer a injustiça de esquecer alguém que foi fundamental nessa trajetória, mas gostaria de ressaltar a importância de todos nesse processo, em especial meus colegas da Turma 1 de 2020 e das turmas de engenharia civil de 2020 e 2021.

Por fim, porém não menos importante, agradeço ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Paulo Ivo Braga de Queiroz, que sempre esteve disponível para apoiar-me na realização deste trabalho.

*"Não podemos prever o futuro, mas podemos criá-lo."*

(Peter Drucker)

## **Resumo**

O colapso da barragem de Brumadinho em 2019 pôs em xeque a segurança da mineração no estado de Minas Gerais, em especial pelo fato da barragem ter sido classificada segura por um relatório poucos meses antes do desastre. Dada a importância econômica da atividade para a região, este trabalho buscou revisar as principais referências no tópico de engenharia de sismos para avaliar a possibilidade de algum sismo servir como gatilho para liquefação do solo e consequentemente para o colapso da barragem. Neste sentido, sugeriu-se uma abordagem alternativa através do método de Newton, para a identificação dos epicentros de eventuais sismos que ocorreram na região da barragem no dia do colapso, a partir de dados sismográficos públicos. Além disso, avaliaram-se as amplitudes de pico registradas nos sismógrafos da região para avaliar de modo quantitativo o impacto eventual de tais sismos. Apesar das limitações de dados e premissas simplificadoras, o estudo estipulou que a energia de sismos não seria suficiente para ocasionar a ruptura da barragem, baseando-se em respostas sismográficas anteriores também registradas nos sismógrafos e pela localização e horários estimados dos sismos. Este trabalho contribuiu para a consolidação de estudos previamente desenvolvidos sobre o colapso da barragem, como também propõe eventuais análises complementares para avaliação de impactos sísmicos na região.

## **Abstract**

The collapse of a dam in Brumadinho in 2019 called into question the safety of mining activity in the state of Minas Gerais, especially as the dam was classified as safe by a report a few months before the disaster. Given the economic importance of the activity for the region, this study sought to revisit the main references in the topic of earthquake engineering to assess the possibility of an earthquake serving as a trigger for soil liquefaction and consequently for the collapse of the dam. In this sense, an alternative approach was developed using Newton's method to identify the epicenters of any earthquakes that occurred in the region of the dam on the day of the collapse, based on public seismographic data. The peak amplitudes recorded on seismographs in the region were also evaluated to quantitatively assess the eventual impact of such earthquakes. Despite data limitations and simplifying assumptions, the study stipulated that the energy of earthquakes would not be sufficient to cause the dam to burst, based on previous seismographic responses also recorded on seismographs and the estimated location of the earthquakes. This work contributed to the consolidation of studies previously developed on the collapse of the dam, as well as proposing possible complementary analyzes for the assessment of seismic impacts in the region.

## Lista de Figuras

FIGURA 1.1 – Mapeamento dos principais eventos sísmicos na proximidade de Brumadinho em até 6 meses antes da queda da barragem.....	17
FIGURA 1.2 – Zoneamento de risco sísmico de acordo com a NBR 15421 (ABNT,2006).....	18
FIGURA 1.3 – Fluxograma do processo para chegar ao objetivo geral desta pesquisa.....	20
FIGURA 2.1 – Representação gráfica das definições de Hipocentro e Epicentro.....	26
FIGURA 2.2 – Variação da velocidade de propagação de ondas P em função da profundidade.....	27
FIGURA 2.3 – Esquema de propagação de ondas P em um meio.....	27
FIGURA 2.4 – Esquema de propagação de ondas S em um meio .....	28
FIGURA 2.5 – Esquema de propagação de ondas Love em um meio.....	28
FIGURA 2.6 – Esquema de propagação de ondas Rayleigh em um meio.....	29
FIGURA 2.7 – Comparação de diferentes sismogramas para um mesmo sismo.....	31
FIGURA 2.8 – Avaliação dos métodos de análise de cargas sísmicas sob uma estrutura.....	32
FIGURA 2.9 – Representação do gráfico de um espectro de resposta do terremoto de El Centro com a definição das regiões espectrais de análise.....	34
FIGURA 3.1 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos.....	40
FIGURA 3.2 – Triangulação de dados sismográficos para determinação de epicentro do sismo.....	43

FIGURA 3.3 – Distribuição de estações sismográficas públicas na região da serra da Meruoca-CE.....	48
FIGURA 4.1 – Gráfico do módulo das respostas dos sismogramas por tempo para estação DIAM.....	52
FIGURA 4.2 – Gráfico do módulo das respostas dos sismogramas por tempo para estação BSCB.....	53
FIGURA 4.3 – Gráfico do módulo das respostas dos sismogramas por tempo para estação PMNB.....	53
FIGURA 4.4 – Gráfico do sismograma para o sismo de pico na estação DIAM.....	54
FIGURA 4.5 – Gráfico do sismograma para o sismo de pico na estação BSCB.....	55
FIGURA 4.6 – Gráfico do sismograma para o sismo de pico na estação PMNB.....	55

## Lista de Tabelas

TABELA 1.1 – Requisitos de análise e métodos aplicados para análise de elementos sísmicos para as zonas sísmicas.....	18
TABELA 2.1 – Classificação dos tipos de sismo quanto a profundidade.....	26
TABELA 2.2 – Velocidade de propagação média para uma onda P.....	27
TABELA 3.1 – Relação das estações sismográficas utilizadas no trabalho e a localização da barragem de brumadinho.....	47
TABELA 4.1 – Registro de sismos de pico nas estações sismográficas analisadas .....	57
TABELA 4.2 – Estimativa para os epicentros dos sismos e do horário de início de propagação sismo para as diferentes velocidades.....	58
TABELA 4.3 – Registro de detonação na mina córrego do feijão.....	59
TABELA 4.4 – Relação de energia entre explosão típica em mina e explosão em Beirute (2020).....	59
TABELA 4.5 – Relação de energia e magnitude equivalente para explosões.....	60

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

UNB: Universidade de Brasília;

USP: Universidade de São Paulo;

MFHE: Método da força horizontal equivalente

DNPM: Departamento Nacional de Produção Mineral

FEMA: Federal Emergency Management Agency

FEMA-MG: Fundação Estadual do Meio Ambiente - MG

## Lista de Símbolos

$V_i$  - é a velocidade de propagação de onda determinada para a  $i$ -ésima estação sismográfica;

$X_i$  - é a coordenada este UTM para a  $i$ -ésima estação sismográfica;

$Y_i$  - é a coordenada norte UTM para a  $i$ -ésima estação sismográfica;

$T_i$  - é o instante de detecção de um sismo para a  $i$ -ésima estação sismográfica;

$X_s$  - é a coordenada este UTM para o epicentro de um sismo;

$Y_s$  - é a coordenada norte UTM para o epicentro de um sismo;

$T_i$  - é o instante de início de propagação de um sismo;

$a_{max}$  - Aceleração máxima de pico em solo

$Q$  - Massa de explosivos em equivalentes de kg de TNT

$H_0$  - hipótese nula;

$H_1$  - hipótese alternativa;

# Sumário

<b>1 Introdução</b>	16
<b>1.1 Pergunta de pesquisa</b>	19
<b>1.2 Objetivo Geral</b>	20
<b>1.2.1 Objetivos Específicos</b>	20
<b>1.3 Justificativa</b>	21
<b>1.5 Método de pesquisa</b>	23
<b>1.6 Estrutura do texto</b>	24
<b>2 Conceitos e Trabalhos relacionados</b>	25
<b>2.1 Sismologia</b>	25
<b>2.2 Engenharia de Sismos</b>	32
<b>2.3 Métodos de Cálculo Numérico</b>	36
<b>2.4 Liquefação</b>	38
<b>3 Materiais e Métodos</b>	41
<b>3.1 Definições gerais de metodologia (P1 e P2)</b>	41
<b>3.2 Análise de dados sismográficos (P3, P4 e P5)</b>	46
<b>3.3 Aplicação do método numérico (P6 e P7)</b>	50
<b>3.4 Resultados e próximos passos (P8 e P9)</b>	51
<b>4 Resultados e Discussões</b>	53
<b>5 Conclusões</b>	64
<b>Referências</b>	66

# 1 Introdução

A ruptura da Barragem I da Mina do Córrego do Feijão em Brumadinho, é uma tragédia de natureza incalculável em termos financeiros, ambientais e pessoais. Apesar dos prejuízos com desastre, a ruptura de uma barragem, até então considerada segura por relatórios, levanta uma preocupação ainda maior sobre a recorrência desses eventos no estado de Minas Gerais, que conta não apenas com cerca de 400 minas abandonadas ou desativadas FEMA - MG (2016), como também presenciou em um intervalo inferior a 5 anos 2 grandes rupturas de barragens, fenômeno até então raro em qualquer lugar do mundo..

A correta identificação das causas da ruptura da barragem é então imprescindível para garantir o não apenas o gerenciamento adequado das barragens atuais, como também a promoção de um novo levantamento sobre os riscos potenciais de ruptura para cada uma dessas.

Relatos de alguns moradores de Brumadinho levantaram a possibilidade de uma possível presença de sismos na região durante o período do desabamento, o que poderia servir como gatilho para liquefação da barragem, conforme indicado por um relatório da Superintendência regional do trabalho em Minas Gerais (2019). De acordo com o relatório apresentado pela Vale, administradora da barragem, desenvolvido por Robertson et al. (2019), a hipótese de sismos foi descartada como eventual causa da ruptura da barragem. Apesar disso, alguma suspeita de interesses específicos sobre as investigações, bem como possíveis interesses financeiros de várias partes envolvidas no acidente, podem promover desconfiança sobre os resultados apontados no relatório, especialmente pela pujança econômica da mineração na região e pelos recentes casos de corrupção e negligência de empresas, tanto no Brasil, como no resto do mundo.

O instituto de geociências da Universidade de Brasília (UNB) também emitiu um relatório Informe Sísmico (2019) a respeito da atividade sísmica da região próxima a Brumadinho em um período de até 6 meses anterior à ruptura da barragem. Nesse informe, foi atestado que apesar da grande presença de sismos provocados por detonações pela mineração na região, a atividade sísmica da região não justificaria a ruptura da barragem em Brumadinho.

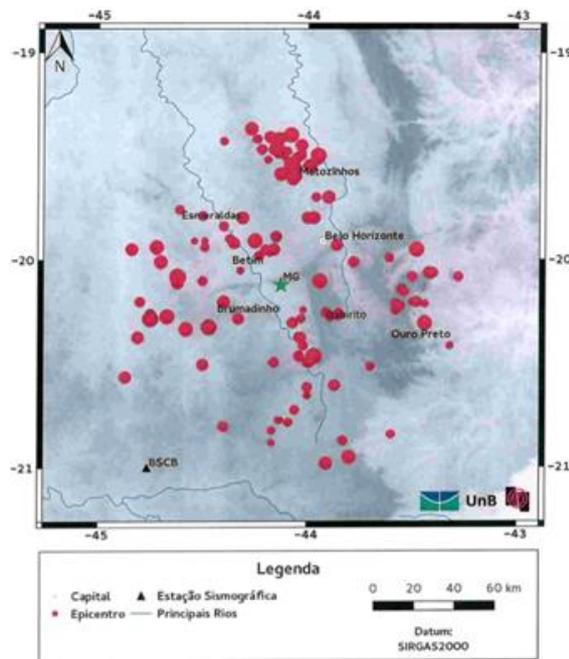


FIGURA 1.1 - Mapeamento dos principais eventos sísmicos na proximidade de Brumadinho em até 6 meses antes da queda da barragem. Informe Sísmico (2019)

A norma NBR 15421 (ABNT,2006) regula a análise e o dimensionamento de estruturas sob efeito de atividade sísmica no Brasil. Devido à baixa incidência de atividade sísmica no Brasil, destaca-se que esse risco é pouco levado em consideração para maior parte do território, incluindo a região da barragem de Brumadinho, sendo classificados como Zona 0, ou seja, baixíssimo risco de eventos sísmicos, segundo a NBR 15421 (ABNT,2006) e desse modo não seria necessária a análise de elementos sísmicos para essas áreas, de acordo com a figura 1.2. e a Tabela 1.1.

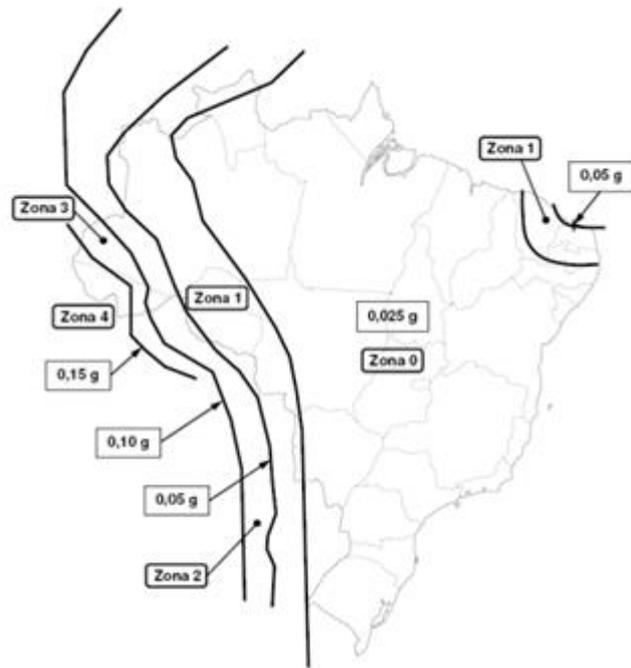


FIGURA 1.2 - Zoneamento de risco de acordo com a NBR 15421(ABNT,2006).

TABELA 1.1 – Requisitos de análise e métodos aplicados para análise de elementos sísmicos para as zonas sísmicas de acordo com a NBR 15421 (ABNT,2006).

Zona sísmica	Aceleração	Categoria	Métodos aplicáveis para a análise estrutural
0	$a_g = 2,5 \% g$	A	Nenhum requisito de resistência sísmica é exigido
1	$2,5 \% g < a_g < 5\% g$	A	Nenhum requisito de resistência sísmica é exigido
2	$5 \% g < a_g < 10\% g$	B	MFHE ou ME ou MHAT
3	$10 \% g < a_g < 15\% g$	C	MFHE ou ME ou MHAT
4	$15 \% g < a_g$	C	MFHE ou ME ou MHAT

Apesar de estruturas excepcionais como barragens não estarem sob o jugo da NBR 15421 (ABNT,2006), ressalta-se que a norma brasileira é menos exigente que a de outros países, mesmo para estruturas gerais. Desse modo, pretende-se também nesse trabalho se apresentar os requisitos para o dimensionamento e avaliação de sismos para edifícios gerais de acordo com o Eurocode 8 (BSI, 1998), norma europeia para o tema além de se efetuar uma verificação a partir do relatório de estações sismográficas da região sobre os eventuais sismos que ocorreram nas proximidades da barragem no momento da queda da barragem.

## **1.1 Pergunta de pesquisa**

Pela perspectiva apresentada na seção anterior, a discussão sobre eventuais sismos durante o período da ruptura da barragem de brumadinho nos levam ao questionamento que este trabalho busca responder:

*“É razoável que um sismo detectado pelas estações sismográficas públicas seja capaz de ocasionar a liquefação do solo da Barragem de brumadinho e conseqüentemente gerar o colapso da estrutura?”*

A partir da pergunta, elaboraram-se 2 hipóteses principais. A primeira  $H_0$  corresponde à hipótese nula, ou seja, que a análise proposta não seria conclusiva para responder à pergunta de pesquisa. Caso a hipótese nula seja rejeitada, entende-se que as análises utilizadas para o projeto foram consideradas capazes de modelar o fenômeno analisado e, desta forma, pode-se chegar a uma conclusão válida sobre a pergunta de pesquisa.

## 1.2 Objetivo Geral

Em vista da discussão levantada pela pergunta de pesquisa, definiu-se como o objetivo geral da pesquisa:

*“Desenvolvimento de uma abordagem alternativa, através de métodos numéricos para estimativa da magnitude de um sismo detectado através de estações sismográficas públicas”.*

O passo a passo para determinação desse objetivo geral pode ser verificado de forma resumida através do fluxograma da Figura 1.3. É importante, no entanto, destacar que os materiais e métodos da pesquisa serão avaliadas com mais profundidade na seção sobre Materiais e Métodos.

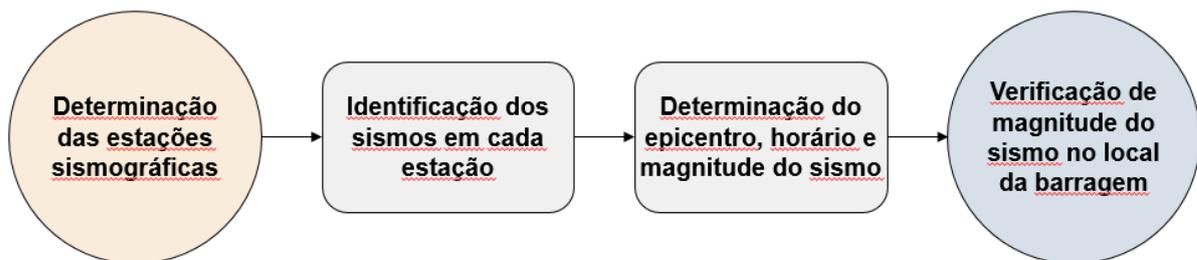


FIGURA 1.3 - Fluxograma do processo para chegar ao objetivo geral desta pesquisa.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Para determinação do objetivo geral, propôs-se a concepção de alguns objetivos específicos, que servirão como pontos de verificação para a pesquisa. Esses objetivos são:

1. *Determinação das estações sismográficas*
2. *Aquisição e Tratamento dos dados;*

3. *Escolha do método de cálculo numérico para determinação de epicentro e horário do sismo;*
4. *Validação dos resultados obtidos a partir de demais relatórios sobre a atividade sísmica da região;*
5. *Revisão de aspectos de engenharia de sismos através do Eurocode 8 (BSI, 1998).*

Os objetivos (1) e (2) estão relacionados aos processos de obtenção dos dados. Nesta etapa, é necessário converter os dados sismográficos de um formato .seed, padrão para os arquivos de sismos, para um formato que possa ser lido por softwares de escopo aberto para posterior análise. Já os objetivos (3) e (4) estão relacionados aos processos computacionais e às análises e interpretações dos resultados, bem como a comparação com demais estudos realizados sobre o tema por outras instituições.

O Objetivo (5) não está diretamente ligado ao Objetivo geral da pesquisa, entretanto busca também estabelecer as bases teóricas para análises mais precisas sobre o dimensionamento de estruturas submetidas a esforços sísmicos, mesmo que essas sejam válidas apenas para estruturas gerais.

### **1.3 Justificativa**

Optou-se por avaliar as justificativas para essa pesquisa levando em consideração as seguintes dimensões: (i) de natureza teórica; (ii) de natureza prática; e (iii) de natureza econômica.

*(i) Teórica: A maioria dos métodos para determinação do epicentro de sismos, adota como conhecida a velocidade de propagação das ondas sísmicas, diferentemente do método proposto neste trabalho.*

Na literatura há diversos trabalhos que abordam sobre a determinação do epicentro de sismos naturais como é o caso de Oliveira (2015). Entretanto há poucos registros de artigos que buscam determinar o epicentro de um sismo não tomando a velocidade de propagação de onda como premissa conhecida. Essa premissa é baseada no registro histórico de sismos conhecidos na região e pode trazer imprecisão para regiões em que há poucos registros sísmicos. Portanto, este estudo busca preencher essa lacuna teórica.

*(ii) Prática: Uma metodologia implementável para automatização das determinações de localização de sismos para regiões em que não se conhece a velocidade de propagação das ondas sísmicas e que também possa ser implementada para sismos induzidos.*

A velocidade de propagação de ondas mecânicas, como é o caso das ondas sísmicas, depende do meio de propagação. Desta forma, esta metodologia permite a determinação aproximada do epicentro de um sismo a despeito de conhecer as condições do meio local. A metodologia também é válida tanto para sismos induzidos quanto para naturais, com aplicação razoavelmente interessante em regiões de baixa atividade sísmica e alta concentração de sismos induzidos.

*(iii) Econômica: A abordagem em desenvolvimento utiliza apenas dados de estações públicas, não exigindo custos adicionais para aquisição de dados externos e não havendo conflitos de interesses para envio desses dados. Além disso, a mineração, área de pesquisa das análises, é a principal atividade econômica da região das barragens.*

No âmbito da pesquisa, os dados foram coletados a partir de dados de bases públicas. Desta forma, pode-se assegurar uma cobertura razoável do território nacional e nos assegurar da qualidade da informação, uma vez que não há conflito de interesses na envio dos dados.

Além disso, destaca-se que o Brasil é o 2º maior produtor mundial de ferro Rohden ( 2016) e de acordo com o Anuário mineral brasileiro (2016).

#### **1.4 Limitação e condição de contorno**

O processamento de dados sísmicos é um procedimento que envolve a determinação do ruído das estações em análise. Dessa forma, os dados para as magnitudes dos sismos identificados podem ser pouco significativos para sismos pequenos. A partir de um relatório de sismos fornecidos pelo centro de sismologia da USP, verificou-se que a profundidade dos sismos na região é baixa. Desta forma, a propagação dos sismos para essa análise foi considerada apenas superficial e para fins de determinação do epicentro, considera-se desprezível a profundidade do sismo. Também foram desconsideradas variações de altitude para o cálculo da distância entre as estações e eventuais epicentros dos sismos. Para o cálculo do horário do sismo, toma-se por medida a detecção do início das ondas P pelo sismógrafo. Por fim, a velocidade de propagação das ondas sísmicas foi considerada isotrópica e constante para cada um dos eventos.

#### **1.5 Método de pesquisa**

Para classificar a presente pesquisa acadêmica foram utilizados os critérios de Gil (2002), que são função dos objetivos gerais delineados e o dos procedimentos técnicos empregados:

*(i) Classificação segundo os objetivos gerais: Existem três grandes grupos em que a pesquisa pode se enquadrar, sendo estes a pesquisa exploratória, pesquisa descritiva e pesquisa explicativa. A presente pesquisa adequa-se tanto como pesquisa exploratória,*

*pois, possui como objetivo principal o aprimoramento de ideias já conhecidas, como também se enquadra como explicativa, pois serão apresentados alguns procedimentos para engenharia de terremotos de acordo com o Eurocode 8 (BSI, 1998).*

*(ii) Classificação segundo os procedimentos técnicos: Pode ser classificada como pesquisa documental, uma vez que são adotados dados secundários extraídos de fontes que não necessariamente haviam passado por tratamento analítico.*

## **1.6 Estrutura do texto**

A redação desta monografia será estruturada em cinco partes: *(i) introdução do assunto e definição dos objetivos do trabalho; (ii) revisão das bases teóricas do estudo; (iii) os métodos e materiais necessários para atingir cada um dos objetivos listados no presente capítulo; (iv) os resultados e a discussão devido à aplicação da metodologia; (v) as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros; (vi) as referências consultadas para apoio acadêmico;*

## **2 Conceitos e Trabalhos relacionados**

Este capítulo objetiva a apresentação de forma resumida dos conceitos teóricos implementados na pesquisa: liquefação, sismologia, engenharia de sismos e métodos de cálculos numéricos. Além disso, aborda-se no capítulo uma revisão de alguns trabalhos de destaque da literatura científica, no que diz respeito aos temas abordados na pesquisa.

### **2.1 Sismologia**

A sismologia é o ramo da Geofísica responsável pelo estudo de sismos, compreendendo tanto a avaliação de causas para os sismos quanto os efeitos de sua propagação Lowrie (2007). Quanto ao estudo da natureza dos sismos, eles podem ser majoritariamente divididos entre sismos naturais e sismos induzidos. Os sismos naturais são provenientes de fenômenos naturais como a movimentações das placas tectônicas, erupções vulcânicas ou até mesmo acomodação de estratos superficiais do solo. Já os sismos induzidos são sismos de origem secundária ou terciária e com origem na ação humana, como no caso de explosões na atividade de mineração ou na construção de reservatórios hidrelétricos, por exemplo.

Os sismos podem ser classificados de acordo com algumas de suas características, como o epicentro e o hipocentro. O hipocentro, ou foco, consiste no local onde se inicia a liberação de energia do sismo. Já o epicentro é a projeção sobre a superfície do hipocentro, podendo ser localizado através de coordenadas geográficas. A representação de ambas definições pode ser visualizada através da figura 2.1.

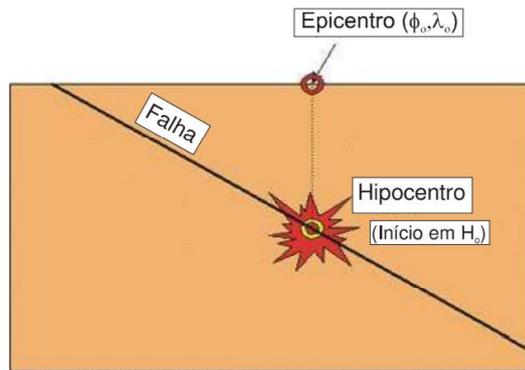


FIGURA 2.1 - Representação gráfica das definições de Hipocentro e Epicentro.

Os sismos podem ser classificados de acordo com a Tabela 2.1, de acordo com sua profundidade (Dias et al., 2003). De acordo com o catálogo de sismos da USP, os sismos catalogados nas proximidades da barragem são majoritariamente classificados como sismos superficiais.

TABELA 2.1 – Classificação dos sismos quanto a profundidade.

Profundidade	Classificação
até 70 km	Superficiais
entre 70 km e 300 km	Intermédios
superior a 300 km	Profundos

A propagação dos sismos também pode ser classificada de acordo com a natureza da onda. De acordo com FEMA 454 (2006) as ondas sísmicas, em especial para os sismos com origem tectônica, podem ser classificadas através da natureza de sua propagação. Dessa forma, caracterizam-se 4 tipos principais de ondas sísmicas, sendo 2 tipos de ondas com propagação espacial e 2 tipos de ondas com propagação superficial.

Ondas P: São ondas mecânicas longitudinais com propagação espacial, assim como as ondas sonoras. Esse tipo de onda pode se propagar em diferentes meios e possui velocidade de propagação relativamente bem estabelecida para alguns meios, conforme descrito pela Tabela

2.2 (FEMA 454, 2006). Este tipo de onda possui a maior velocidade de propagação, sendo portanto a primeira a ser detectada em um sismógrafo. De acordo com Lowrie (2007) a velocidade deste tipo de onda varia consideravelmente em baixas profundidades, como no caso das ondas avaliadas neste trabalho. A variação da velocidade de propagação de ondas P conforme a profundidade do sismo está indicada na figura 2.2. A figura 2.3 indica ainda o esquema de dilatação e compressão na propagação da onda P.

TABELA 2.2 – Velocidade de propagação média para uma onda P.

Meio de Propagação	Velocidade de Propagação
Ar	330 m/s
Água	1450 m/s
Granito	5000 m/s

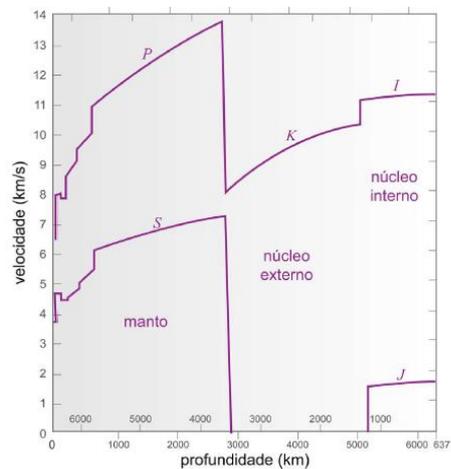


FIGURA 2.2 - Variação da velocidade de propagação de ondas P em função da profundidade.

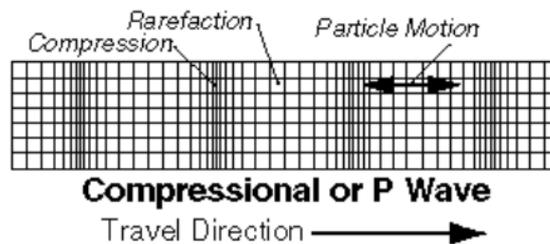


FIGURA 2.3 - Esquema de propagação de ondas P em um meio.

Ondas S: São ondas mecânicas transversais, com propagação espacial. Essas ondas não são capazes de se propagarem através de superfícies líquidas e possuem uma velocidade de propagação de em torno de 60% da velocidade da onda P em um dado meio (FEMA 454, 2006). Em distâncias inferiores a 100 km do epicentro, as ondas S são, em geral, responsáveis pela maior transmissão de energia. O esquema de propagação para essa onda pode ser visualizado de acordo com a figura 2.4

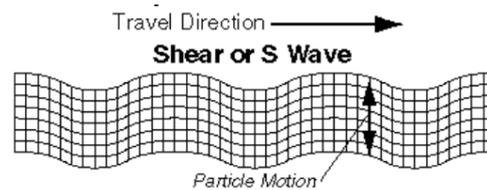


FIGURA 2.4 - Esquema de propagação de ondas S em um meio.

Ondas Love: São ondas com propagação superficial com deslocamentos horizontais perpendiculares ao plano de propagação da onda, sem apresentar deslocamentos verticais. A velocidade de propagação dessas ondas é de cerca de 90% da velocidade das ondas S. O esquema de propagação das ondas love em um meio está descrito na figura 2.5.

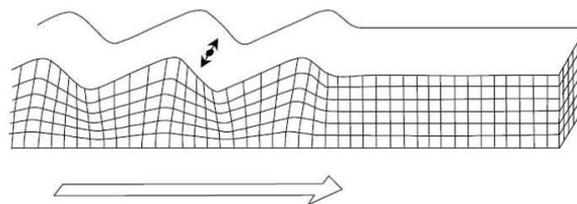


FIGURA 2.5 - Esquema de propagação de ondas Love em um meio.

Ondas Rayleigh: São ondas com propagação superficial cujos deslocamentos induzidos no meio ocorrem de forma perpendicular ao eixo de propagação, tanto de forma vertical, quanto horizontal, proporcionando um padrão de movimento de elipse retrógrada. Sua velocidade de

propagação é de em torno de 70% das ondas S em um meio. O esquema de propagação das ondas Rayleigh em um meio está descrito na figura 2.6.

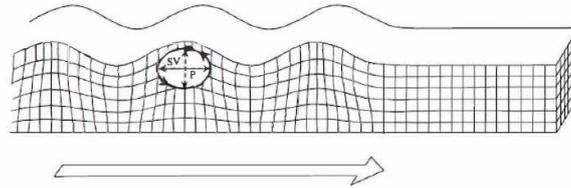


FIGURA 2.6 - Esquema de propagação de ondas Rayleigh em um meio.

Há algumas formas de medir as intensidades e impactos de sismos (FEMA 454, 2006). As escalas classicamente mais conhecidas na literatura são a escala Richter, ou magnitude local, que correlaciona quantitativamente a intensidade do sismo com a amplitude de deslocamento indicado por um sismógrafo e a escala Mercalli, que descreve qualitativamente a intensidade do sismo a partir do impacto e percepção gerados. O cálculo da Magnitude local pode gerar a definição de algumas magnitudes específicas, como o caso de  $M_s$ , que avalia apenas a amplitude de ondas S para o intervalo de 20 s após a detecção dessas ondas,  $M_b$  que avalia a amplitude apenas das ondas P,  $M_w$ , que avalia a magnitude a partir de parâmetros da falha geológica (para sismos com origem tectônica). Para fins deste trabalho, a definição de magnitude utilizada será a utilizada por Richter, representada através da equação 2. O parâmetro A representa a Amplitude em mm do sismograma e  $\Delta t$  representa o intervalo de tempo em segundos entre a detecção das ondas S e P no sismograma.

$$M = \text{Log}_{10} A + \text{Log}_{10} (8\Delta t) - 2,92 \quad (2.1)$$

A partir dessa definição, pode-se também estimar a energia liberada no sismo, através da equação 2.2, que relaciona a energia local E do sismo, com a energia padrão  $E_0$  igual a  $7 \cdot 10^{-3} \text{ kWh}$

$$M = \frac{2}{3} \text{Log}_{10} \frac{E}{E_0} \quad (2.2)$$

Como se considera apenas as amplitudes de ondas não superficiais para o cálculo da magnitude e uma vez definida a energia liberada no sismo, pode-se estimar a energia do sismo para uma determinada distância do epicentro do sismo.

A escala de Modificada de Mercalli é, por sua vez, a escala mais implementada como utilizada mundialmente para avaliar a intensidade de sismos. O seu uso se deve principalmente ao fato de que a intensidade do sismo por si só não é obrigatoriamente um bom indicativo do potencial de dano de sismo, por exemplo, sismos com altas magnitudes e altas profundidades não costumam ocasionar muito dano. Há também outras escalas qualitativas para a intensidade do sismo, como a Escala Macrossísmica Europeia Eurocode 8 (BSI, 1998), entretanto nenhuma das escalas qualitativas será levada em consideração neste trabalho.

Os dados sísmicos são adquiridos a partir de um sismógrafo. O sismógrafo é um aparelho que registra os deslocamentos e/ou a aceleração do solo em eventos sísmicos através de um sismograma. O sismograma consiste no gráfico de deslocamento ou aceleração por tempo em um evento sísmico. Apesar do gráfico mais comum envolver a relação aceleração por tempo, dada a natureza inercial das forças sísmicas, os sismogramas representados neste trabalho representarão a relação deslocamento por tempo, dada o uso desses dados neste trabalho.

A representação de um sismo difere entre estações sismográficas, conforme indicado pela figura 2.7. Percebe-se que quanto maior a distância entre o sismo e a estação, mais fácil a identificação das assinaturas de ondas, devido às diferentes velocidades de propagação.

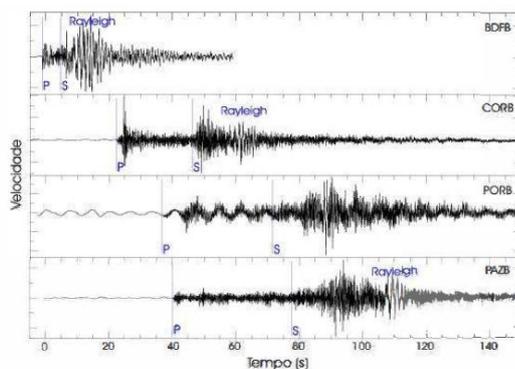


FIGURA 2.7 - Comparação de diferentes sismogramas para um mesmo sismo.

De acordo com o informe sísmico da UNB, o limiar de detecção dos sismógrafos é dado na escala de magnitude regional de acordo com a equação 2.3 (Relatório de Informe Sísmico, 2019). No caso, o valor de  $d$  indica a distância entre a estação e o sismo, enquanto o valor de  $V_{\max}$  é adotado como o dobro do ruído da medição.

$$mR = \text{Log}_{10} V_{\max} + 2,3 \text{Log}_{10} d - 2,28 \quad (2.3)$$

Para o caso de sismos induzidos, a assinatura de onda difere do perfil apresentado anteriormente. Desse modo, a relação entre a magnitude do sismo e a energia dissipada não pode ser dada através das equações 2.1 e 2.2. Neste caso, opta-se por avaliar diretamente os parâmetros sísmicos sob o solo. Dentre esses parâmetros, a aceleração se destaca como o mais significativo, dado inclusive a natureza inercial das solicitações sísmicas. Nesse contexto, Zhang et al. (1981) correlacionaram para o caso de sismos induzidos por explosões a amplitude da aceleração de pico no solo em função da massa de explosivos em kg de equivalente em TNT, da distância em metros para o epicentro do sismo e de constantes  $k$  e  $\alpha$ . A expressão está expressa através da equação 2.4, onde  $a_{\max}$  está representado em  $\text{cm/s}^2$ . Nesta expressão, as constantes  $k$  e  $\alpha$  são determinadas a partir das condições locais, enquanto os valores de  $Q$  e  $R$  são representados como kg equivalente de TNT e metros respectivamente. No estudo em Wang et al. (2002), não se explicita um intervalo de valores típicos para as constantes  $k$  e  $\alpha$ , embora

sejam explicitados os valores de caso do sítio de  $k = 90$  e  $\alpha = 1,55$  calculados empiricamente para o sítio de estudo.

$$a_{max} = k \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (2.4)$$

## 2.2 Engenharia de Sismos

Hill (2008), elabora uma retrospectiva histórica sobre o desenvolvimento da engenharia de sismos e elaboração dos primeiros códigos, destacando a evolução dos métodos de modelagem do carregamento sísmico, que varia desde a modelos de força estática baseados no carregamento de carga de vento no início do século XX, até métodos como o espectro de aceleração de resposta, previsto em normas diversas, como o caso da NBR 15421 (ABNT,2006) e do Eurocode 8 (BSI, 1998) e métodos computacionais não lineares.

Chopra (2012), elenca os objetivos gerais da engenharia de sismos, prezando pela proteção de vidas humanas e pela mitigação de danos nas edificações. Além disso, é proposto um período de 500 anos de vida útil para o dimensionamento de cargas sísmicas, bem superior aos 50 anos usuais para edificações. São também elencados os tipos de danos mais comuns a edificações no caso de cargas sísmicas, conforme elencado abaixo. Desses danos, apenas as charneiras plásticas foram elegíveis para reparos posteriores.

- 1) Falha de cisalhamento
- 2) Falha em elemento sobre reforçado
- 3) Falha na fundação
- 4) Charneiras plásticas

Também são descritos os perfis dos códigos como prescritivos e baseados em desempenho. Em linhas gerais, códigos prescritivos detalham qual deve ser a abordagem e os

requisitos de desempenho a serem alcançados, enquanto os baseados em desempenho dão mais liberdade ao projetista na escolha de métodos e parâmetros. Comparando as legislações europeias e brasileiras, observa-se que ambas apresentam características baseadas em desempenho, permitindo, na maior parte dos casos, aos projetistas a escolha da abordagem preferencial. Apesar disso, destaca-se que o Eurocode 8 (BSI, 1998) apresenta características bem mais próximas ao modelo prescritivo, ao elencar explicitamente parâmetros a serem atendidos para cada um dos métodos, enquanto a NBR 15421 (ABNT,2006) permite parte das escolhas sob escolha do projetista. Além disso, é importante destacar que estruturas especiais, como no caso da barragem em estudo neste projeto, não possuem tratamento prescrito nas normas, cabendo então ao projetista definir os parâmetros de segurança e desempenho, em linha com uma abordagem baseada na desempenho da estrutura.

De acordo com a literatura, a análise dos carregamentos sísmicos pode ser classificada como: linear ou não linear e estática ou dinâmica. De acordo com essas classificações, são definidos os métodos de cálculo descritos pela figura 2.8

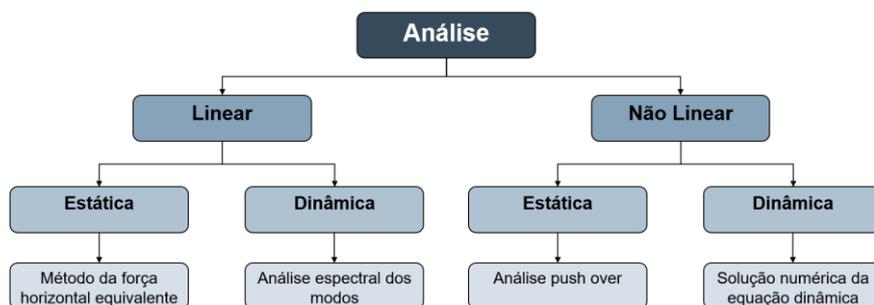


FIGURA 2.8 - Avaliação dos métodos de análise de cargas sísmicas sob uma estrutura.

Tanto o Eurocode 8 (BSI, 1998) quanto a NBR 15421 (ABNT,2006) permitem o uso de métodos tanto lineares, quanto não lineares para avaliação de sismos. Por simplicidade, os projetistas optam, em geral, pelo uso de métodos lineares, cujas premissas e etapas serão descritos a seguir:

O Método da força horizontal equivalente tem como premissa básica a aplicação de uma força efetiva sobre a estrutura que induza uma aceleração no solo igual a provocada pelo sismo. Dessa forma o método, quando utilizado, preconiza o uso da força efetiva a partir da aceleração máxima provocada no sistema, caracterizando uma resposta estática da estrutura. Por essa limitação, o uso desse método só é previsto no Eurocode 8 (BSI, 1998) para algumas edificações que atendem a condições específicas. A NBR 15421 (ABNT,2006) permite o uso deste método independente das condições da edificação, conforme indicado na figura 1.3.

A análise espectral de modos consiste na sobreposição dos esforços para os diferentes modos naturais de vibração da edificação. O conceito de montar o espectro é baseado na variação contínua e irregular da aceleração do solo durante o período do sismo. Para resolver a resposta da estrutura, seria necessário o uso de métodos numéricos para estimar momento a momento a resposta da estrutura, o que é computacionalmente muito custoso. Diante disso, aproxima-se o formato da onda sísmica assumindo-se uma frequência natural de vibração e um coeficiente de amortecimento. No caso do Eurocode 8 (BSI, 1998), há sugestões para esses parâmetros de acordo com o tipo de estrutura e condições do ambiente, mas, dada a natureza baseada em desempenho do código, esses valores podem ser ligeiramente adaptados de acordo com avaliação do projetista. Diferentemente do método força horizontal equivalente, esse método está previsto para todas as estruturas cobertas pelo Eurocode 8 (BSI, 1998). No caso da NBR 15421 (ABNT,2006), a análise espectral é citada brevemente, com algumas recomendações sobre a montagem dos espectros de projeto, entretanto pouco é explicitado sobre quais os parâmetros levados em consideração para a elaboração do espectro.

Chopra (2012), destaca que dependendo do período do sismo, 1 parâmetro entre deslocamento, pseudo-velocidade e pseudo-aceleração deve ter sua análise priorizada, por estar, a priori, mais ligado à resposta estrutural da estrutura. O espectro de resposta pode ser

avaliado através de um gráfico de 3 eixos, conforme indicado na figura 2.9 abaixo, assim como os limites de prioridade para cada um dos fatores

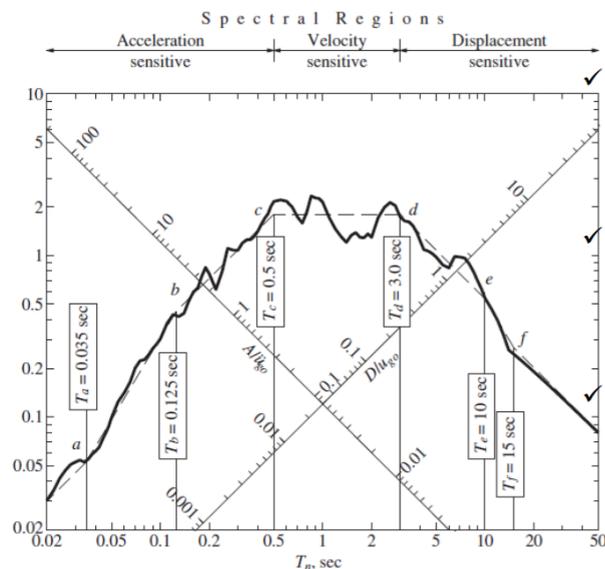


FIGURA 2.9 - Representação do gráfico de um espectro de resposta do terremoto de El Centro com a definição das regiões espectrais de análise. Chopra (2012)

Chopra (2012), indica que, após a definição do espectro utilizado para uma estrutura, devemos determinar os modos naturais de vibração para estruturas com múltiplos graus de liberdade e então fazer a sobreposição dos principais modos, com a devida ponderação das massas efetivas de cada modo. O Eurocode 8 (BSI, 1998) estabelece que a análise modal deve compor pelo menos 90% da massa efetiva da estrutura e não deve deixar de contabilizar nenhum modo com pelo menos 5% de contribuição na massa efetiva. A NBR 15421 (ABNT, 2006) não estabelece parâmetros para a determinação dos modos utilizados em análise. Há diversas formas de sobrepor os modos naturais, como, por exemplo, somar o valor absoluto das grandezas, o que, por estar a favor da segurança, apresenta baixa relação custo-benefício. De modo geral, observa-se na prática a adoção do média quadrática como padrão para sobreposição de modos, conciliando dessa forma segurança no dimensionamento e verificação, com uma boa relação custo-benefício.

Finalmente, destaca-se ainda que o Eurocode 8 (BSI, 1998) também contabiliza as reações entre líquidos e reservatórios em eventos sísmicos, tanto de natureza convectiva, quanto impulsiva, além de estabelecer parâmetros para relação solo-estrutura. Dessa forma, mesmo que a norma não cubra o caso de barragens, os parâmetros adotados para o dimensionamento de caixas d' água e demais reservatórios contendo líquidos podem auxiliar na verificação das cargas até mesmo de estruturas mais complexas. Ressalta-se ainda que essas relações entre líquido-estrutura e sólido-estrutura não são definidas na NBR 15421 (ABNT,2006).

### **2.3 Métodos de Cálculo Numérico**

Com o desenvolvimento da computação, o uso de métodos numéricos para modelagem e solução de problemas se tornou cada vez mais comum (SHOKRARIAN, 2009). Neste contexto, aborda-se neste capítulo um resumo dos métodos de diferenças finitas e método de Newton-Raphson a serem implementados neste trabalho.

Viana (2018) indica que o conceito do método de diferenças finitas é substituir equações diferenciais por equações numéricas, destacando inclusive sua aplicação em 2 dimensões. No caso deste trabalho, o conceito de diferenças finitas é focado apenas em 1 dimensão, permitindo a correlação numérica entre grandezas diferencialmente interligadas, como é o caso de aceleração e velocidade do sismo em função do deslocamento medido pelo sismógrafo. Neste caso, o método é baseado na aproximação de série de Taylor do 1<sup>a</sup> ordem a partir da discretização dos valores de deslocamentos.

Desta forma, os valores de velocidades serão dados conforme a equação 2.5 abaixo, em que  $d(t)$  representa o deslocamento do sismógrafo em dado momento  $t$  e  $h$  representa o intervalo entre as discretizações do sistema. Observa-se que dessa forma, os erros de 2<sup>a</sup> ordem foram desprezados.

$$v = f'(x) = \frac{d(t+h) - d(t)}{h} \quad (2.5)$$

Procedimento análogo pode ser implementado para determinação da aceleração a partir das medidas de velocidade, de modo que as grandezas potencialmente utilizáveis para a análise sísmica podem ser determinadas a partir deste método.

O Método de Newton-Raphson é utilizado para solução de problemas não lineares, como é o caso proposto neste trabalho para a determinação do epicentro dos sismos. Fonseca (2017) apresenta a generalização do método de Newton-Raphson para um caso multidimensional, assim como uma série de aplicações para diferentes sistemas de equações não lineares. De acordo com Fonseca (2017), o método consiste em encontrar as raízes da equação  $f(x) = 0$ , para um sistema com  $n$  variáveis e com  $n$  equações. Cada uma dessas equações pode, sem perda de generalidade, ser escrita da forma  $f_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ . Define-se a matriz Jacobiana, a matriz formada a partir das derivadas parciais de cada um dos  $f_k$  em função de cada  $x_k$ . A partir de um vetor solução inicial  $X_0 = (x_1, x_2, \dots, x_n)_0$  o resultado da próxima interação de  $X$  é dado pela equação 2.6:

$$X_1 = X_0 - \{J[f(X_0)]\}^{-1} f(X_0) \quad (2.6)$$

Na equação 2.6,  $\{J[f(X_0)]\}$  é a matriz Jacobiana e  $f(X_0)$  o vetor formado pelas equações que formam o problema. A partir da equação, observa-se que o método possui uma clara limitação, dada a necessidade da inversibilidade da matriz Jacobiana. Essa restrição também está em linha com as restrições do método de Newton unidimensional, onde a existência de derivada não nula da função era condição necessária para aplicação do método.

Fonseca (2017) ainda destaca que o critério de parada do método é uma escolha do operador, a ser definido particularmente caso a caso e dependendo das variáveis analisadas.

## 2.4 Liquefação

De acordo com Silva (2010), a liquefação consiste no fenômeno de pode ser entendido pela perda da resistência de um material, induzida por acréscimos de poropressões, sob solicitações não drenadas, especialmente em solos saturados. A perda súbita de resistência pode gerar por sua vez rupturas potencialmente catastróficas, caracterizadas por deslocamentos rápidos e de grande extensão das massas mobilizadas.

O início ou gatilho do processo de liquefação é em geral dado pelo aumento de poropressões positivas, em função da impossibilidade de reações do solo em termos de reduções de volume. Em linha geral as rupturas por liquefação podem ser divididas em 3 causas principais:

- 1) Rupturas induzidas por carregamento estático
- 2) Rupturas induzidas por deformação
- 3) Rupturas induzida por eventos sísmicos

De acordo com Davies et al. (2002), várias barragens a montante, como é o caso da barragem de Brumadinho sofreram rupturas ocasionadas por sismos, elevados níveis de saturação, dentre outros motivos.

No caso especial das barragens a montante, destaca-se que o principal mecanismo de ruptura está relacionado a carregamentos estáticos e transientes correlacionados diretamente às baixas densidades dos rejeitos dispostos da barragem. Além disso, essas barragens são particularmente suscetíveis a carregamentos sísmicos intensos, tanto que em países de atividade sísmica mais recorrente, como o Chile, essa técnica construtiva é proibida por norma. As barragens a montante também devem se atentar para a velocidade da execução dos alteamentos, uma vez que velocidades elevadas podem gerar um aumento excessivo nas poropressões e conseqüentemente, reduzir a resistência ao cisalhamento na barragem.

Silva (2010) apontou que os rejeitos da barragem em Brumadinho possuem comportamento contrátil sob cisalhamento e, desta forma, aumentam a suscetibilidade potencial a mecanismos de liquefação. O estudo ainda apontou que a barragem possuía baixo potencial de liquefação por carregamento estático, embora os potenciais sob carregamentos sísmicos e sob deformações não tenham sido avaliados neste trabalho.

No caso particular dos carregamentos sísmicos, observa-se que diferentes estudos propõem abordagens distintas para análise dos parâmetros de liquefação. Em linhas gerais, pode-se separar essas análises em 2 tipos: O primeiro avalia uma verificação simples de parâmetros puramente sísmicos, como deformações e pseudo velocidades e acelerações de solo para avaliação do potencial de liquefação, enquanto uma segunda abordagem, busca estimar as tensões cisalhantes provenientes dos sismos e então repassar para uma análise mecânica dos solos e de suas resistências potenciais à liquefação.

Dentro dessa segunda abordagem, Silva (2010) propôs que as tensões cisalhantes devidas ao carregamento sísmico deveriam ser calculadas em função da aceleração máxima do sismo, a tensão efetiva vertical média sobre a estrutura e alguns parâmetros de correção ( $C_m$  e  $r_d$ ), conforme a equação abaixo:

$$T_{\text{sis}} = \frac{0,65 \left(\frac{a_{\text{max}}}{g}\right) (\sigma_{v0}) r_d}{C_M} \quad (2.7)$$

Neste trabalho, buscou-se avaliar o impacto sísmico conforme abordagem tradicional de engenharia de sismos; portanto priorizou-se a primeira abordagem, onde se avaliam apenas os parâmetros sísmicos para a resposta da estrutura.

Wayne & Donald (2007) expõem em seu estudo um compilado de relações entre massas de explosivos e distância para os epicentros em que se verificou o limite de liquefação no solo. Neste caso, verificou-se que mesmo para grandes massas de explosivos, os efeitos de

liquefação são majoritariamente locais, não ultrapassando 300 m do centro das explosões. Quando levada em consideração a carga de explosões nucleares, bem superiores aos carregamentos eventualmente proporcionados por explosões químicas, verifica-se que a máxima distância verificada para liquefação foi inferior a 2 km, indicando que, salvo o caso de uma explosão extremamente próxima ao local da barragem, a liquefação por sismos induzidos seria extremamente improvável.

Wang et al. (2002), avaliam o potencial de liquefação induzido por sismos, tanto naturais quanto induzidos. No artigo, são apresentados parâmetros de aceleração de pico registrada pelos sismômetros para avaliação da liquefação do solo. Ainda neste estudo, verificou-se que a velocidade de propagação de ondas provenientes de sismos induzidos foi da ordem de 325 m/s, o que é bem inferior à velocidade de propagação para as ondas de sismos naturais em solo.

Os trabalhos de Kato et al. (2015) e Amoroso et al. (2017), buscam respectivamente estabelecer critérios limites para a liquefação de solos em sismos induzidos a partir dos valores de velocidades de pico. O critério de velocidades de pico também foi utilizado pela Vale em seu relatório para justificar que não houve influência sísmica no colapso da barragem.

### 3 Materiais e Métodos

O escopo deste capítulo fundamenta-se em apresentar a estratégia da pesquisa e os critérios que serão empregados para testar a hipótese experimental definida no Capítulo 1. Para tanto, a Figura 3.1 apresenta o fluxograma dos procedimentos metodológicos que serão executados. Cada um desses procedimentos será então detalhado ao longo deste capítulo.

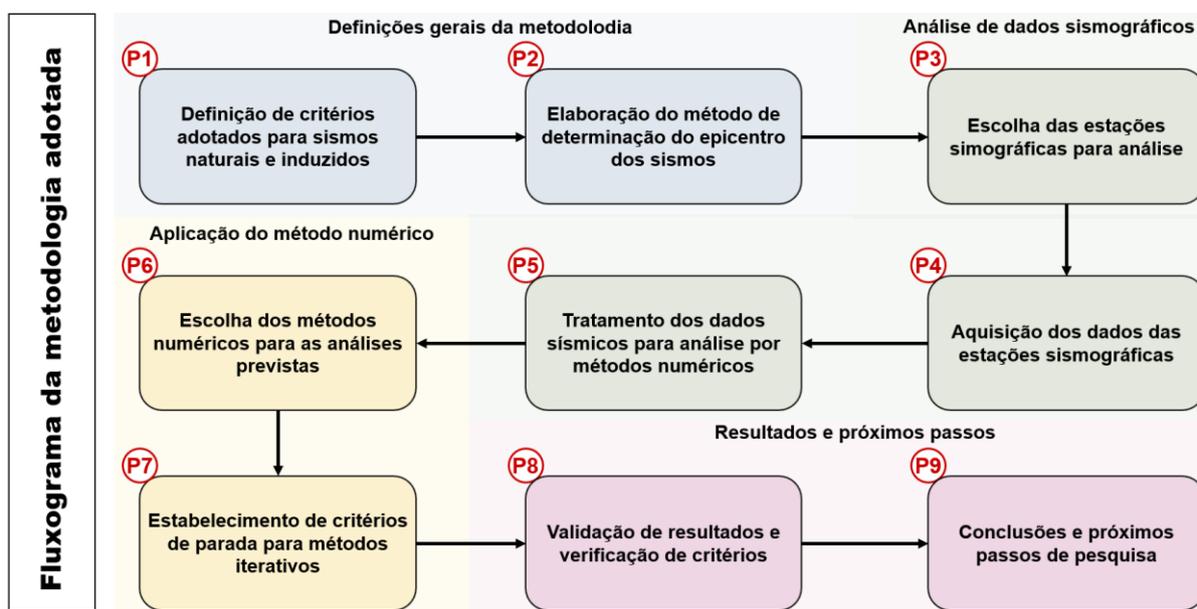


FIGURA 3.1 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos.

#### 3.1 Definições gerais de metodologia (P1 e P2)

Conforme estabelecido no capítulo 1, o objetivo da pesquisa é avaliar, mesmo que em alto nível, a capacidade potencial de dano oriunda da ação sísmica na região da barragem. Devido à natureza diferente dos fenômenos, serão adotados critérios ligeiramente diferentes para a análise dos impactos de sismos naturais e induzidos, desde que sejam identificados nas estações sismográficas.

A energia de um sismo natural pode ser estimada a partir de sua magnitude. Partindo da premissa simplificadora de que as ondas sísmicas se propagam superficialmente, pode-se estimar a energia transmitida pelo sismo no local da barragem em função da distância do epicentro do evento. Essa energia pode então ser utilizada para estipular a eventual possibilidade de ocasionar a ruptura da barragem.

A energia dos sismos induzidos é geralmente representada na literatura como função da massa de explosivos. Como essa quantidade não é facilmente relacionável às medidas sísmicas captadas nos sismógrafos, devido a determinação empírica de parâmetros locais, necessita-se de um novo critério para esse tipo de sismos. Wayne & Donald (2007) determinaram as distâncias limite para a liquefação do solo a partir de diferentes massas de explosivos. Tomando a distância de 300 m indicada na seção sobre liquefação como limite para um eventual gatilho de liquefação, adota-se que explosões que se localizem a uma distância superior à indicada não seriam capazes de gerar a liquefação do solo da barragem. É válido destacar que também foram apresentados na seção 2.4 estudos que avaliam a pseudo-velocidade como gatilho para liquefação do solo, com eventuais correlações entre a velocidade de pico do sismo em função da distância do epicentro do sismo. A análise desses critérios entretanto não é conclusiva para avaliação do eventual impacto sobre a barragem, uma vez que, por mais que haja equações nos estudos que relacionem as medidas de aceleração e velocidade de pico com a distância do epicentro do sismo, tais fórmulas de correção foram aplicadas apenas para distâncias de até poucos quilômetros, o que não está em linha com as distâncias propostas entre as estações utilizadas em análise e a localização da barragem de Brumadinho, conforme indicado na seção 3.2. Desta forma, considerou-se que os parâmetros de pico medidos nas estações sismográficas podem até servir como indicativos para a resposta na região da barragem, embora não sejam conclusivos para determinação desse último valor.

Ainda sobre a análise de parâmetros locais, destaca-se que os dados identificados pela estação sismográfica de propriedade da Vale a cerca de 2 km da barragem só serão levados em consideração para análise de eventuais impactos sísmicos no caso de não se identificarem respostas sismográficas comparáveis entre os dados das estações selecionadas na seção 4.2. Dessa forma, a análise de parâmetros como deslocamento, pseudo-velocidade ou pseudo-aceleração de pico será avaliada apenas na ausência de informações nas estações que corroborem com a possibilidade de um sismo significativo na região da barragem. Ainda sobre a escolha dos critérios a serem adotados, destaca-se que a análise varia de acordo com o tipo de sismo verificado. Caso seja identificado um sismo natural na estação local próxima a barragem, deve-se estabelecer o espectro de resposta do sismo para identificação da região de sensibilidade do sismo, ou seja, definir qual parâmetro deveria ser mais relevante para a resposta da estrutura. No caso de sismos induzidos, não é possível determinar um espectro de resposta para o carregamento sobre a estrutura; logo, não há como se determinar qual o parâmetro mais sensível para a resposta da estrutura. Para o relatório da Vale, indicou-se que houve presença apenas de sismos induzidos e foi implementado apenas um parâmetro de velocidade de pico na estação sismográfica, sem justificativa de por que a região da barragem seria mais sensível a esse parâmetro. Dessa forma, implica-se que caso os dados da estação sismográfica da Vale sejam utilizados no trabalho, também será analisado apenas o parâmetro de velocidade de pico, tendo em vista que esse foi o único dado divulgado em relatório, mesmo que eventualmente se verifique um sismo natural na região que indicasse região de sensibilidade maior a deslocamento e/ ou aceleração. Também se destaca que, embora houvesse estações sismográficas móveis na região da barragem que poderiam complementar o estudo dos impactos locais, estas não foram ativadas durante o período da queda da barragem, logo seus dados não estão disponíveis.

Finalmente, destaca-se que apesar da adoção de critérios diferentes para a avaliação do impacto dos sismos, a localização do epicentro do sismo, ou ao menos a distância entre o sismo e o local da barragem é fundamental para a análise de impactos. Daí, independentemente do tipo de sismo identificado, a próxima etapa natural de análise seria a determinação da localização do epicentro dos sismos.

A literatura aborda tradicionalmente o problema de localização do epicentro de um sismo natural a partir da triangulação dos dados de pelo menos 3 estações sismográficas. Neste caso, a velocidade de propagação das ondas P e S são consideradas conhecidas e fixas, dado que em geral os sismos naturais tem origem em uma determinada falha geológica, logo os meios percorridos pelos sismos devem ser similares, resultando em velocidades de propagação iguais. Além disso, destaca-se que, em geral, são registradas as velocidades de propagação de ondas dos sismos em regiões de alta intensidade sísmica; desta forma, pode-se estabelecer um tratamento estatístico sobre as velocidades de propagação das ondas, assegurando a razoabilidade dos valores de velocidade adotados. O esquema da triangulação dos dados pode ser visto a partir da figura 3.2 abaixo:

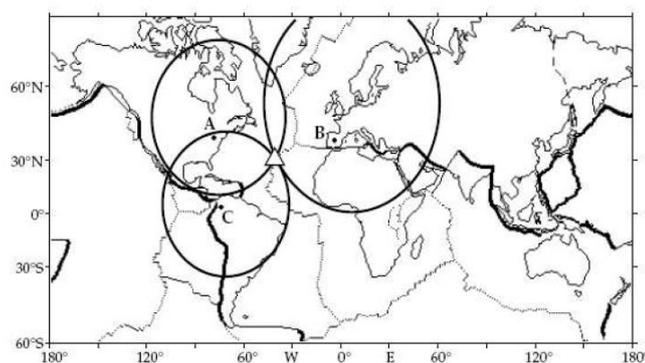


FIGURA 3.2 - Triangulação de dados sismográficos para determinação de epicentro do sismo Lowrie (2007).

Como há registros de sismos induzidos por explosões na região e não há registros em trabalhos sobre as velocidades típicas de propagação de ondas P e ondas S na região de Brumadinho, aliado ao fato das condições do solo alterarem razoavelmente a velocidade de

propagação dessas ondas, conforme abordado na seção 2.1, optou-se por um método alternativo para a determinação dos epicentros.

Serão considerados os dados sísmicos das 4 estações mais próximas à barragem. A adição de uma nova estação se baseia no acréscimo líquido de 1 novo grau de liberdade ao sistema, pois as velocidades de propagação de ondas P e S não são pré-determinadas (o que leva à adição de 2 novos graus de liberdade), enquanto se adotará que a profundidade do sismo será nula (reduzindo 1 grau de liberdade do sistema). A partir da consolidação dos dados sismográficos (passos P3,P4 e P5), será determinado o horário de início de detecção de um sismo em cada estação. Adotando-se que o sismo se propagou de forma isotrópica e, desta forma, que as velocidades de propagação são iguais para cada estação, podem-se estabelecer 3 equações linearmente independentes correlacionando as velocidades de propagação verificadas em cada estação, conforme destacado na equação 3.1 abaixo:

$$\begin{aligned}V_1 - V_2 &= 0 \\V_1 - V_3 &= 0 \\V_1 - V_4 &= 0\end{aligned}\tag{3.1}$$

Onde  $V_i$  é a velocidade de propagação de da onda sísmica para a  $i$ -ésima estação. Essa velocidade de propagação pode por sua vez ser determinada, conforme explicitado na equação 3.2, a partir do momento em que houve o sismo  $T_s$ , das coordenadas do epicentro do sismo  $X_s$  e  $Y_s$ , além do momento de início de detecção do sismo em cada estação sismográfica  $T_i$  e das coordenadas UTM da estação  $X_i$  e  $Y_i$ .

$$V_i = \frac{\sqrt{(X_i - X_s)^2 + (Y_i - Y_s)^2}}{(T_i - T_s)} = 0\tag{3.2}$$

Dessa forma, o sistema de equações em 3.1 é determinável, pois pode ser escrito em função das 3 incógnitas  $T_s$ ,  $X_s$  e  $Y_s$ . Portanto, pode-se através do método de Newton-Raphson determinar o epicentro do sismo bem como sua velocidade de propagação e momento de origem.

Uma vez definidas a velocidade de propagação de onda, as coordenadas do epicentro e o perfil de assinatura nas estações sismográficas, pode-se então classificar os sismos como naturais e induzidos. A partir da classificação, parte-se então para as análises definidas neste capítulo para os determinados tipos de sismos.

Por fim, destaca-se que por mais que seja possível através da metodologia tradicional detectar o horário de um sismo, bem como seu hipocentro com dados de apenas 3 estações sismográficas, também é praxe nos softwares utilizados com esse fim utilizar os dados de no mínimo 4 estações sismográficas, como é o caso do *HYPO71* (Lee & Lahr 1975). A obrigatoriedade de no mínimo um grau de liberdade adicional ao sistema tem por objetivo garantir a mitigação dos erros de medidas nas estações sismográficas e dessa forma assegurar uma maior confiabilidade à medida.

### **3.2 Análise de dados sismográficos (P3, P4 e P5)**

Conforme discutido na seção 2.1, a determinação de dados sismográficos é particularmente suscetível a ruídos, especialmente no caso de sismos de baixa intensidade, como geralmente avaliados na região da barragem. De modo a mitigar a influência potencial dos ruídos, buscou-se adquirir os dados sismográficos das 4 estações com base de dados públicos mais próximos da localização da barragem. Tais estações estão representadas na Tabela 3.1 com as respectivas coordenadas UTM de acordo com o *DATUM WGS-84*. Na tabela também é representada a distância aproximada das estações para a barragem. No caso de

estações no fuso 23 S, considerou-se a distância entre as coordenadas UTM para o cálculo da distância. Já para a estação no fuso 24 S, optou-se pela distância geodésica.

TABELA 3.1 – Relação das estações sismográficas utilizadas no trabalho e a localização da barragem de brumadinho.

<b>Código da Estação</b>	<b>Coordenada Este (m)</b>	<b>Coordenada Norte (m)</b>	<b>Fuso</b>	<b>Distância para a barragem (km)</b>
<b>BSCB</b>	524943	7677834	23 S	118,1
<b>DIAM</b>	641624	7976103	23 S	207,1
<b>SJMB</b>	270103	7930964	24 S	407,0
<b>PMNB</b>	348016	7949462	23 S	299,9
<b>Barragem</b>	591942	7775032	23 S	0

Os dados de frente de onda destas estações foram então coletados a partir do banco de dados sismográficos da USP. Esses dados são inicialmente disponibilizados no formato *.miniseed*. Dos dados fornecidos no formato *.miniseed*, este trabalho foca apenas no deslocamento total e no horário de medição dos deslocamentos fornecidos por cada sismômetro. Esses dados são então transformados para o formato CSV para análise dos dados.

Com os dados em formato CSV, pode-se iniciar a análise dos dados sismográficos, através da plotagem dos dados de deslocamento em função do tempo para cada estação sismográfica. De acordo com a literatura, há, de um modo geral, uma dificuldade em relacionar as respostas sísmicas para diferentes estações, em especial no caso em que a sobreposição de respostas dos sismos impede a detecção de sismos diferentes. Esse fenômeno ocorre especialmente em regiões com densa cobertura de sismógrafos, onde a distância entre os epicentros dos sismos é menor que a distância entre o epicentro de cada sismo e a estação, respectivamente, como pôde-se observar através da figura 3.3, que representa a cobertura sismográfica permanente na região da Serra da Meruoca, com sismicidade 1 de acordo com a NBR 15421 (ABNT,2006). No caso das estações escolhidas neste estudo, esse fenômeno não

deve ser tão relevante, uma vez que as estações estão pelo menos 100 km distantes umas das outras. Apesar disso, encontra-se um novo eventual problema na análise dos parâmetros sísmicos, que seria a não detecção de algum de algum evento sísmico por alguma das estações. Isso, de fato, pode ocorrer na estação, especialmente por se tratar de uma região com sismos de baixa intensidade e de longas distâncias entre cada uma das estações.

Para a análise de eventos sísmicos similares, verifica-se, por simplicidade, um gráfico do módulo do deslocamento pelo tempo. A partir do gráfico, busca-se a identificação de eventos comparáveis em cada uma das estações e então se efetua uma verificação se os eventos realmente seriam comparáveis, a partir de uma validação dos horários de detecção, coordenadas das estações e velocidades de propagação esperadas tanto para sismos naturais, quanto artificiais. Essa validação tem como um dos principais objetivos identificar se o sistema a ser analisado nos métodos computacionais é possível e determinado. Por se tratar de um sistema não linear, não há uma metodologia simples para verificar a existência de uma solução, diferentemente do caso linear, em que basta uma verificação do determinante dos coeficientes do sistema. Dessa forma, verificam-se os eventuais erros na aquisição dos dados para cada uma das estações com auxílio da ferramenta *Solver* do Excel. Caso haja uma convergência razoável entre os resultados das estações, que neste trabalho será considerado um erro combinado da ordem de meio minuto, considerar-se-ão as respostas sísmicas entre as estações como pertencentes ao mesmo sismo.

Caso seja validado que os eventos realmente são semelhantes, parte-se para a aplicação do método numérico. Caso não seja possível identificar um sismo em comum com os dados entre as estações selecionadas, verificar-se-ão os parâmetros de velocidade de pico da estação da Vale próxima à barragem e as condições gerais da barragem, para verificar a possibilidade de um sismo servir de gatilho para liquefação da barragem.

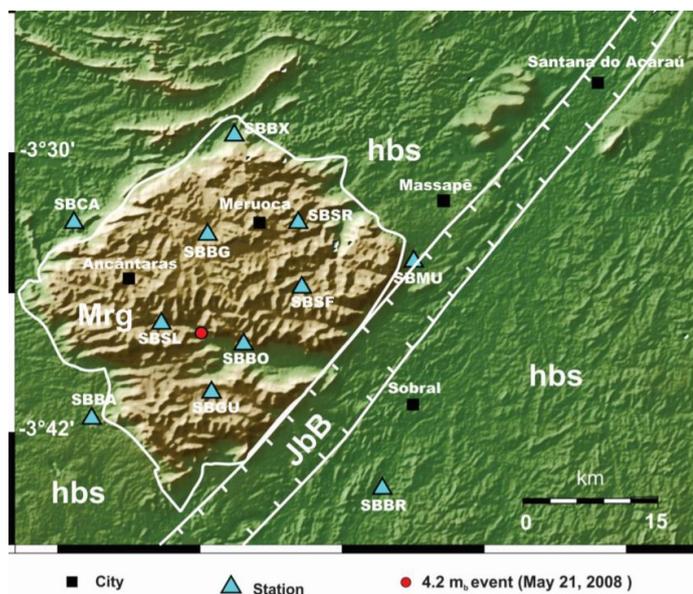


FIGURA 3.3 - Distribuição de estações sismográficas públicas na região da serra da Meruoca-CE

Ainda a partir dos dados das estações, podem-se avaliar as assinaturas dos sismos detectados em cada estação como forma de avaliar a origem de sismos. A literatura indica que sismos naturais possuem uma duração de por volta de 5 s. Apesar da detecção nas estações sismográficas poder ultrapassar essa duração, devido a diferença entre as velocidades de propagação de onda, destaca-se que seria esperado um sismo majoritariamente local, cuja duração não ultrapasse muito esse intervalo. Além disso, destaca-se que especialmente no caso de sismos naturais de maior duração, espera-se encontrar um padrão bem definido de ondas P e S, com diferença de amplitudes e espaçamento entre cada uma das ondas. Esse comportamento por sua vez já não é esperado por sismos induzidos, especialmente no caso de explosões, uma vez que, em linha geral, é efetuada uma sequência de pequenas explosões com curtos intervalos de tempo, havendo portanto sobreposição de efeitos sísmicos e inviabilizando a percepção de intervalo entre respostas sísmicas, conforme verificado entre ondas P e S no caso de sismos naturais. Uma vez com a definição dos dados sísmicos e efetuada a validação dos dados, procede-se com a determinação dos epicentros dos sismos através da aplicação dos métodos numéricos.

### 3.3 Aplicação do método numérico (P6 e P7)

O uso do método de diferenças finitas para determinação de parâmetros de pseudo-velocidade e pseudo-aceleração nas estações só será aplicado caso não haja correlação entre eventos detectados nas respostas sísmicas de cada sismógrafo. Neste caso, será verificada apenas a pseudo-velocidade de pico para efeitos comparativos com os resultados de velocidade de pico relatados no relatório da Vale. Assim como descrito anteriormente, esses dados de velocidades de pico não são significativos para avaliação do potencial de liquefação na região da barragem, dado o efeito local do fenômeno; entretanto, a ausência de respostas relevantes de pseudo velocidade nas regiões das estações corrobora a hipótese de que não houve eventos sísmicos relevantes no momento da ruptura da barragem.

Por sua vez, a localização do epicentro de sismos comparáveis em relação aos dados das estações sismográficas consiste em um sistema de equações determinado e não linear, para o qual se propôs o método de Newton-Raphson para solução do sistema. A escolha desse método tem como premissas a rápida taxa de convergência, amplo uso em trabalhos científicos e potencial replicabilidade por demais estudos.

O método de Newton-Raphson exige a escolha de um vetor solução inicial para o processo de iterações. Neste trabalho, consideramos que, sem perdas de generalidade, adotou-se para a solução inicial a localização dos sismos como as coordenadas UTM da região da barragem de Brumadinho. O tempo de início de propagação para a solução inicial foi determinado como 12:28, horário registrado para a ruptura da barragem de acordo com o laudo da Vale. Já no caso da escolha da velocidade de propagação na solução inicial, destaca-se que para garantir uma convergência mais rápida ao problema, propõe-se a adoção de valores distintos de acordo com a natureza dos sismos analisados. No caso de sismos naturais, propõe-se uma velocidade de propagação inicial de 6 km/s, baseada na velocidade de propagação de

ondas P indicada na figura 2.2. Já no caso de sismos induzidos, propõe-se a velocidade de propagação na solução inicial de 330 m/s, baseado na velocidade de propagação superficial indicada na seção 2.4.

Além da escolha dos parâmetros da solução inicial, o método de Newton-Raphson exige um critério de parada em sua execução. A determinação do critério foi baseada na precisão da localização horizontal do epicentro de sismos em demais estudos para sismos naturais. Tomando como parâmetro a tese de Oliveira (2015), os intervalos típicos de precisão variam entre 200 m - 500 m para sismos localizados na região do Vale do Acaraú, que conta com alta densidade de sismômetros, de acordo com a qualidade dos dados nas estações. Os informes sismológicos da USP para sismos na região da barragem indicaram que, devido à baixa cobertura de sismógrafos na região, essa imprecisão cresceu consideravelmente para em torno de 10 km; dessa forma, optou-se por considerar neste estudo uma precisão de 10 km como critério de parada na determinação dos epicentros.

Uma vez com os critérios de solução inicial e de parada determinados, procede-se com a análise dos resultados dos epicentros de cada um dos sismos.

### **3.4 Resultados e próximos passos (P8 e P9)**

A análise dos resultados do estudo varia de acordo com a verificação de eventos sísmicos correlacionáveis entre as estações sismográficas. Para o caso em que existam sismos comparáveis entre as estações, será avaliada a magnitude dos sismos naturais. Tomando como base que sismos com magnitude inferiores a 3 na escala Richter são perceptíveis apenas por sismógrafos e que em geral esses sismos não geram danos às estruturas, considerar-se-á como parâmetro de danos para sismos naturais a presença de um sismo de pelo menos magnitude 3 na região. Já no caso de sismos induzidos, será avaliado como parâmetro de potencial gatilho para liquefação a distância entre o epicentro dos sismos e o local da barragem. Para tanto, tinha

sido proposto na seção 2.4 uma distância máxima de 300 m entre o epicentro do sismo e o local da barragem para servir de gatilho para a liquefação. Devido a imprecisão da condição de parada do método em 10 km, propôs-se que sismos localizados a uma distância superior a 10 km da barragem seriam incapazes de servir de gatilho para a liquefação.

Já para o caso de não haver sismos comparáveis entre as estações sismográficas, optou-se por verificar o parâmetro de velocidade de pico para as medidas já fornecidas pela estação da Vale. Caso os critérios de velocidade de pico, indicados pelos estudos da seção 2.4 e pelo relatório da Vale sejam respeitados, será considerado que não houve atividade sísmica relevante como gatilho de liquefação da região. Ainda nesse caso, buscar-se-á entender os motivos de não haver correspondência entre eventos sísmicos detectados para as estações, de modo a garantir a qualidade da análise efetuada.

Finalmente, são propostas novas oportunidades de desenvolvimento do método e de sua aplicação em pesquisas na área de sismologia, assim como correlacionam-se os resultados encontrados neste estudo com as conclusões do relatório da Vale sobre o incidente.

## 4 Resultados e Discussões

Conforme estabelecido na seção 3.2, o primeiro passo na análise dos aspectos sismográficos será a comparação entre as respostas dos sismógrafos de modo a identificar alguma resposta semelhante em cada uma das estações. Sem perda de generalidade, será inicialmente efetuada a comparação das 3 estações mais próximas à barragem, cujas respostas sísmicas devem apresentar maior probabilidade de correlação. Desta forma, são representados a seguir os gráficos dos módulos dos deslocamentos sísmicos de para as estações DIAM, BSCB e PMNB, conforme as figuras 4.1, 4.2 e 4.3 abaixo representadas.



FIGURA 4.1 - Gráfico do módulo das respostas dos sismogramas por tempo para estação DIAM

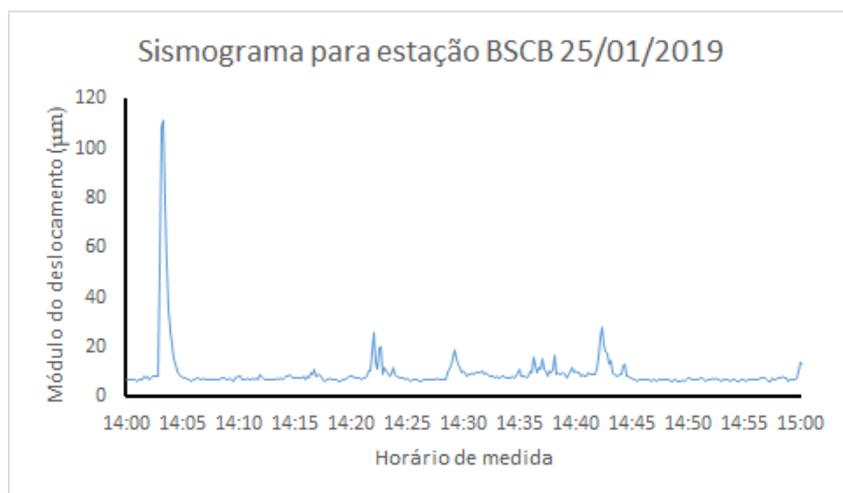


FIGURA 4.2 - Gráfico do módulo das respostas dos sismogramas por tempo para estação BSCB

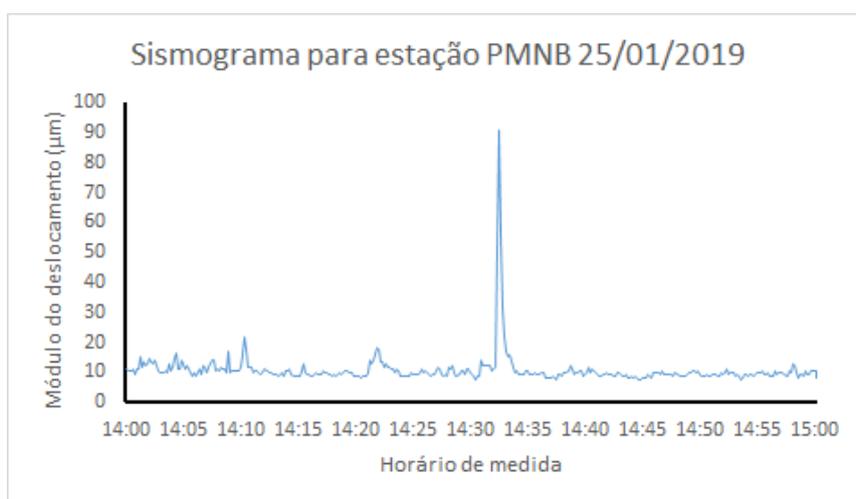


FIGURA 4.3 - Gráfico do módulo das respostas dos sismogramas por tempo para estação PMNB

Em cada um dos sismogramas, verifica-se pelo menos um pico de atividade sísmica, além de algumas pequenas respostas ao longo do período analisado. Como o objetivo do estudo é a verificação de eventuais esforços sísmicos na região, será priorizada a comparação dos eventos sísmicos com maiores respostas nos sismogramas, até porque há pouca diferença entre as pequenas respostas e o ruído de fundo dos sismogramas, inviabilizando a análise comparativa para determinação de epicentro dos sismos. O fato de considerarmos apenas as respostas sísmicas mais relevantes no período também é justificado pela distância entre as 3

estações e a barragem. Dado que tais distâncias são de ordem similar de grandeza, espera-se que um sismo que possa ser detectado ou impactar a região da barragem também deva possuir intensidade razoável nas 3 estações analisadas.

Analisando mais profundamente os picos de atividade sísmica de cada um dos sismogramas, verifica-se que assinatura de onda verificada não corresponde a um sismo de origem natural, devido aos longos períodos de detecção sísmica, além da ausência do padrão bem definido de ondas P, S e superficiais (Rayleigh e Love), que deveriam ser detectados diante do tempo de detecção dos sismógrafos, conforme verificado nas figuras 4.4, 4.5 e 4.6 abaixo.

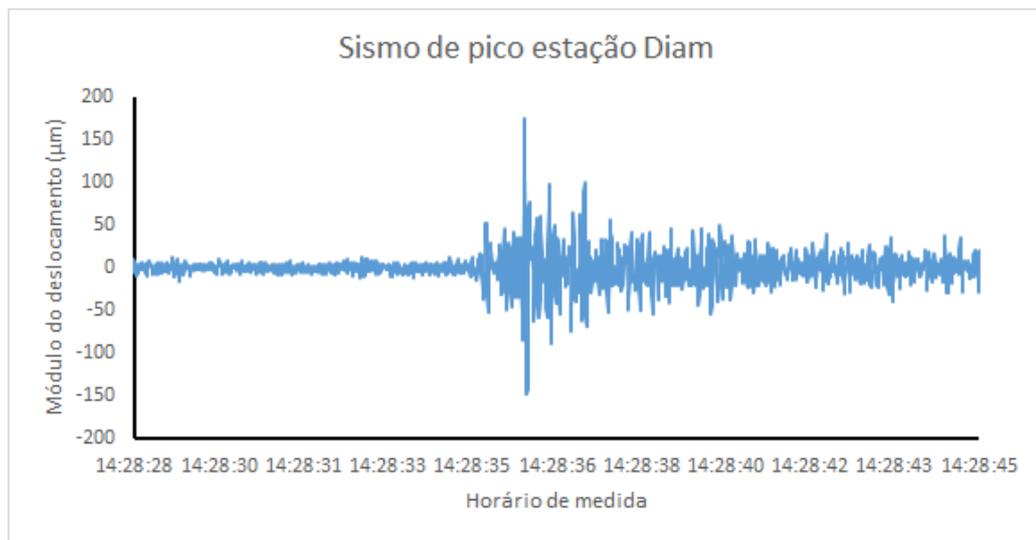


FIGURA 4.4 - Gráfico do sismograma para o sismo de pico na estação DIAM

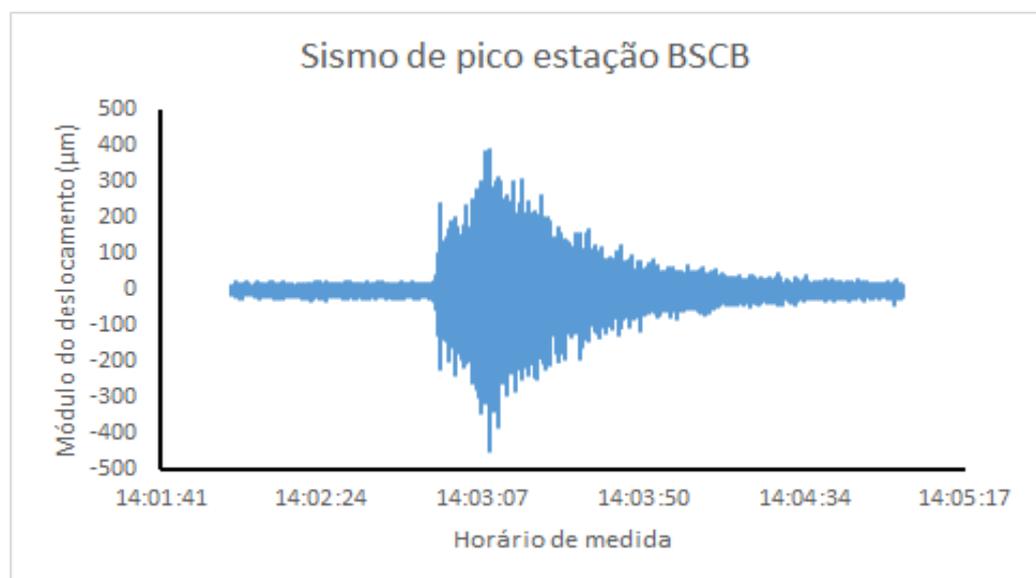


FIGURA 4.5 - Gráfico do sismograma para o sismo de pico na estação BSCB

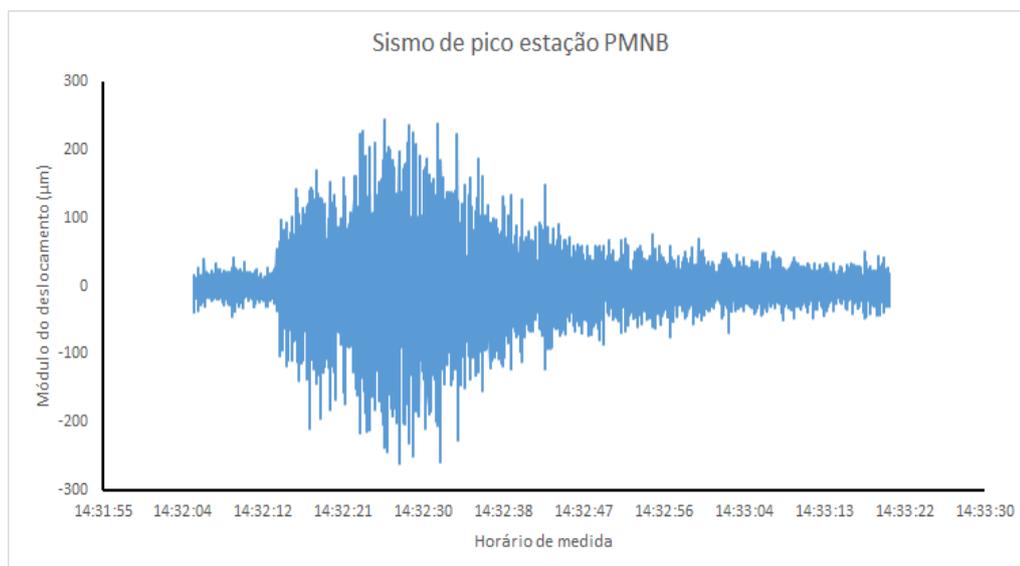


FIGURA 4.6 - Gráfico do sismograma para o sismo de pico na estação PMNB

Sismos naturais têm uma duração aproximada de 5s e por mais que a detecção em uma estação sismográfica possa ultrapassar esse período, dever-se-ia encontrar uma assinatura condizente com o representado na figura 2.7. Nos sismos das figuras 4.4, 4.5 e 4.6, não é verificado um intervalo entre as “possíveis” ondas P, S e superficiais que condizem com a duração total do sismo e as velocidades típicas de propagação dessas ondas em sismos naturais. Além disso, não foi detectado nenhum sismo natural pelos informes da UNB e USP na região no horário observado, corroborando com os resultados obtidos neste relatório.

Uma vez identificado o tipo de sismo, efetuou-se uma análise preliminar para verificar se os sismos identificados nas diferentes estações sismográficas eram correlacionáveis entre si, de modo a definir o procedimento posterior de análise. A Tabela 4.1 destaca as coordenadas das estações e os horários em que os picos de atividade sísmica tiveram início de observação para as 3 estações inicialmente analisadas.

TABELA 4.1 – Registro de sismos de pico nas estações sismográficas analisadas

<b>Estação</b>	<b>Coordenada UTM este - m</b>	<b>Coordenada UTM norte - m</b>	<b>Horário de início do sismo</b>
BSCB	524.943	7.677.834	14:02:54
DIAM	641.624	7.976.103	14:28:35
PMNB	348.016	7.949.462	14:32:14

A partir destes dados, propôs-se avaliar o erro na percepção dos sismos em cada estação a partir de 3 velocidades possíveis:

- 1) 100 m/s, que foi a velocidade de propagação de ondas de cisalhamento informada no relatório da Vale
- 2) 326 m/s, que foi aproximadamente a velocidade de propagação de ondas superficiais indicado no estudo de Wang et al. (2006)
- 3) 6000 m/s, que foi a velocidade de propagação das ondas P indicada pela figura

Por se tratar também de um problema possivelmente de escopo fechado, ou seja, possível de determinar as coordenadas do epicentro desse eventual sismo, assim como o horário de início do sismo, expressa-se também esse resultado na Tabela 4.2, supondo que as respostas sísmicas nas 3 estações são decorrentes do mesmo evento.

TABELA 4.2 – Estimativa para os epicentros dos sismos e do horário de início de propagação do sismo para as diferentes velocidades .

<b>Coordenada UTM origem este - m</b>	<b>Coordenada UTM origem norte - m</b>	<b>Horário de início do sismo</b>	<b>Velocidade de propagação de ondas sísmicas - m/s</b>	<b>Resíduo quadrático dos tempos de observação - s</b>
532.166	7.757.488	13:47:50	100	~ 10 s
733.553	7.260.129	13:51:40	326	~28 s
661.455	-1.525.670	14:02:11	6000	~ 41 s
601.031	7.517.076	13:46:45	183	~ 0,5 s

Ao avaliar os erros para as velocidades típicas de propagação dos sismos, assim como a solução computacional apresentada para o problema, concluímos que tais respostas sísmicas provavelmente são consequência de eventos sísmicos distintos. Até se encontrou uma boa convergência para uma velocidade de 183 m/s; entretanto, como não há nenhum estudo que justifique tal velocidade, assim como dada a grande diferença para as demais velocidades possíveis de propagação, considerou-se tal solução fisicamente improvável. Tal conclusão também é corroborada pelos informes sismográficos da UNB e da USP que também não foram conclusivos para localização de nenhum sismo induzido, como no caso de explosões na região para o período informado. A ausência de correlação entre os resultados sismográficos das estações levanta então um novo questionamento, por que os sismos identificados em uma estação não seriam verificados em outra? Para responder tal questionamento, será avaliado a energia típica de sismos naturais com a energia liberada por explosões na região.

Tomando-se como base o plano de explosões para a mina Córrego do Feijão, disponível no relatório da Vale sobre eventos sísmicos na região, verificam-se as massas de explosivos e a quantidade de perfurações realizadas em diferentes datas na área. Desta forma, pode-se estipular a massa em kg utilizada em cada perfuração, a partir dos dados da Tabela 4.3.

TABELA 4.3 – Registro de detonação na mina córrego do feijão

<b>Data</b>	<b>Quantidade de perfurações</b>	<b>Massa de explosivos - kg (total)</b>	<b>Massa de explosivos - kg por perfuração</b>
07/01/2019	150	10.915	72
10/01/2019	81	8.510	105
14/01/2019	110	2.240 +	20
22/01/2019	70	4.910	70
<b>Média</b>	x	x	67

Como não foi especificado qual o tipo de explosivo usado na detonação, supôs-se para efeito de cálculo que a massa corresponde a Nitrato de Amônio. Tal suposição está baseada na composição de explosivos utilizados na região do quadrilátero ferrífero, indicada na tese de Oliveira (2017).

Para estimar a relação entre a massa de nitrato de amônio e a energia liberada na explosão, tomam-se como referência os valores indicados para a explosão em Beirute 2020, indicado no artigo de Magalhães (2020). Uma vez que se trata de uma reação química, há relação linear entre a massa utilizada e a energia liberada pela explosão. Dessa forma, indica-se na tabela que a energia para uma explosão média em mina seria de aproximadamente 714,45 KJ.

TABELA 4.4 – Relação de energia entre explosão típica em mina e explosão em Beirute (2020) .

<b>Evento</b>	<b>Massa de explosivo kg</b>	<b>Energia</b>
Explosão em Beirute	2.750.000	29.288.000 kJ
Explosão média em mina	67	714,45 kJ

O artigo de Neri (2020) indica que uma explosão subterrânea de 1 kt de equivalente de TNT seria responsável por gerar um sismo da ordem de magnitude 4 na escala Richter. Percebe-se que ao substituir a energia indicada na explosão na equação 2.2, chega-se a um valor superior aos 4 indicados no artigo. Tal diferença ocorre uma vez que nem toda energia da explosão é transformada em energia sísmica. Supondo similar o percentual de energia da explosão transformada em energia sísmica, pode-se estimar a magnitude gerada pela explosão de um sismo médio, conforme indicado na Tabela 4.5.

TABELA 4.5 – Relação de energia e magnitude equivalente para explosões

<b>Evento</b>	<b>Energia</b>	<b>% energia sísmica</b>	<b>Energia sísmica</b>	<b>Magnitude</b>
Explosão em Beirute	41.840.000 kJ	60%	25.200.000 kJ	4
Explosão média em mina	714,45 kJ	60%	430,31 kJ	0,96

De um modo geral, a capacidade de captação dos sismógrafos gira em torno de 1 - 1,5. Considerando que as estações se encontram numa distância bem superior ao habitual para regiões com alta atividade sísmica, é então razoável que eventuais sismos induzidos sejam captados apenas por parte das estações, justificando dessa forma o porquê de os sismos detectados pelas estações sismográficas não serem correlacionáveis.

Dando prosseguimento a análise, analisar-se-á então a velocidade de pico detectada na estação sismográfica nas proximidades da barragem, assim como se levantará a possibilidade de que algum sismo induzido na mina próxima a barragem possa ter servido como gatilho para liquefação da barragem.

De acordo com o relatório da Vale, foi registrada uma velocidade de pico de  $3 \times 10^{-3}$  m/s, sendo que o relatório indicou que valores variando entre  $1,5 \times 10^{-2}$  m/s e  $5 \times 10^{-2}$  m/s seriam considerados seguros para estruturas residenciais frente a resposta sísmica. Ao avaliar mais precisamente a literatura que descreve os limites para liquefação em solos a partir de sismos induzidos, verifica-se que as pseudo-velocidades anteriores a liquefação de solos variaram entre  $8 \times 10^{-2}$  m/s e  $2,6 \times 10^{-1}$  m/s, com ambos valores bem superiores não apenas ao critério de segurança utilizado no relatório da Vale, como também à resposta do sismógrafo próximo à barragem. Dessa forma, será adotado o critério de  $1,5 \times 10^{-2}$  m/s como limiar de segurança para atividade sísmica na região, destacando que aparentemente não houve esforço sísmico significativo que justificasse a liquefação da barragem.

O local mais provável para que um eventual sismo induzido fosse originado e gerasse a liquefação da barragem seria a mina da barragem. De acordo com o relatório da Vale, tal mina se encontra a uma distância de mais de 1,6 km da barragem. Conforme discutido na seção 2.4, a liquefação a partir de sismos induzidos ocorreu no máximo a uma distância de 300 m para explosões não nucleares e mesmo assim, a massa de equivalentes de TNT utilizados na explosão do estudo está quase 1000 vezes superior à utilizada para as perfurações nas minas, incluindo todas as perfurações, conforme indicado por Wayne & Donald (2007) e Magalhães (2020). Mesmo que se trate de solos em condições diferentes, a distância considerável entre a mina e barragem, assim como a diferença na carga de explosivos indica que seria extremamente improvável que um sismo induzido fosse responsável pelo gatilho de liquefação na região

Ainda sobre a coleta de dados sísmicos na região da barragem, destaca-se que idealmente estruturas especiais e que atinjam certa altura devem contar com mais de uma estação sismográfica para acompanhamento da resposta da estrutura. Para efeito comparativo, a barragem chegou a mais de 86 m de altura, o que, de acordo com o Eurocode 8 (BSI, 1998), exigiria mesmo para estruturas comuns a presença de pelo menos mais um sismógrafo na estrutura. A barragem de fato contava com uma ampla cobertura de estações móveis na região, inclusive com uma estação sismográfica no topo, entretanto tais estações não registraram a atividade sísmica anterior à ruptura da barragem, uma vez que as estações portáteis em solo não alcançaram o nível mínimo de gatilho para início da coleta e a estação no topo da barragem foi destruída com o colapso da barragem. A não detecção de demais atividades sísmicas pelas unidades móveis também corrobora com a hipótese de que não houve atividade sísmica relevante para gatilho de liquefação da barragem. Vale destacar também que não se verificou nas estações de dados públicos nenhuma velocidade superior aos parâmetros de segurança considerados neste trabalho, o que também corrobora que a atividade sísmica não deve ter sido gatilho para a liquefação da barragem

Destaca-se que, de acordo com o Relatório da Vale, as respostas dos sismógrafos no dia e nos momentos que antecederam a ruptura da barragem foram inferiores aos detectados anteriormente na região. Tal premissa também está em linha com os informes sismográficos da UNB e da USP sobre a atividade sísmica na região, não apontando nenhum indício de que a atividade sísmica fosse especialmente superior no dia da ruptura da barragem.

Dada a improbabilidade de aspectos sísmicos como gatilho de liquefação, o relatório da Vale apontou que a causa para a ruptura da barragem foi uma combinação crítica de deformações específicas internas contínuas devido e uma redução de resistência devida à perda de sucção na zona não-saturada causada pela precipitação intensa no final do ano 2018. Apesar da potencial identificação da causa para a ruptura da barragem, um relatório independente encomendado pelo Ministério Público e elaborado por Arroyo & Gens (2021) concluiu a partir de análises computacionais que nem os efeitos das chuvas abundantes no final de 2018, nem o creeping da barragem seriam suficientes para servir de gatilho para liquefação, mesmo quando considerando a sobreposição entre ambos efeitos. O relatório de Arroyo & Gens também corrobora que, embora o mecanismo de ruptura da barragem seja por liquefação, não há carregamento sísmico significativo na região da barragem que justifique um gatilho de liquefação. Ainda sobre uma eventual liquefação gerada por carregamento cíclico rápido, que incluem os sismos, o relatório da Vale ainda aponta que seriam esperadas altas deformações relativas na estrutura devido ao carregamento nos momentos ligeiramente anteriores à ruptura da barragem. De acordo com o relatório da Vale, tais deformações não foram verificadas, o que enfraquece ainda mais a possibilidade de um gatilho sísmico.

Por fim, avalia-se que a evidência de que alguns moradores da região indicaram sentir tremores no dia da ruptura da barragem não é obrigatoriamente resultado de atividade sísmica na região. Estima-se que sismos com magnitudes na escala Richter entre 1-3 podem ser detectados apenas por sismógrafos e os dados das estações sismográficas indicam com clareza

que não houve evento com intensidade superior a 3 no dia da ruptura da barragem. Além disso, destaca-se que informes sismográficos indicam eventualmente identificam fenômenos diversos que possam ser confundidos pela população com um sismo. De acordo com um informe da UNB, até mesmo um avião que ultrapasse a velocidade do som em altitude não tão elevada pode ser um falso indicativo de sismo. Dessa forma, considera-se que a percepção de alguns moradores da região não deveria ser levada em conta para as análises no caso de eventuais análises qualitativas sobre o evento.

## 5 Conclusões

Conforme avaliado nesta monografia, não foi identificada através das estações sismográficas públicas nenhuma atividade sísmica relevante na região da barragem de Brumadinho no dia de sua ruptura. Tal observação é corroborada não apenas por informes de institutos sismológicos, como também está em linha com o relatório da Vale e o relatório mais encomendado pelo Ministério Público sobre a ruptura da barragem. Apesar do relatório da Vale ainda apresentar um mecanismo provável de liquefação da barragem devido a deformações durante um longo período, ainda não há consenso na comunidade científica sobre o gatilho de liquefação da barragem.

Devido à baixa atividade sísmica, não foi possível validar o método proposto na dissertação para determinação do epicentro de sismos. Como sugestão de próximos trabalhos, propõe-se a aplicação e verificação do método a partir de sismos definidos e já identificados em bases de dados sísmicas. Ainda sobre o método numérico, aponta-se que há oportunidade de aprimoramento nas etapas de validação de eventos sísmicos em diferentes sismogramas, além da determinação dos critérios de parada para o método de Newton-Raphson.

Destaca-se ainda que, mesmo com a otimização do algoritmo de localização de epicentros, a análise sísmica na região de Brumadinho é severamente limitada devido à baixa cobertura de sismógrafos públicos. Dessa forma, sugere-se, quando possível, a inserção de dados de demais redes sismográficas na análise, visando diminuir a distância entre os eventuais epicentros e as estações sismográficas e conseqüentemente aumentando a comparabilidade das informações.

Por fim, destaca-se que por mais que a região seja classificada como assísmica pela NBR 15421 (ABNT,2006), seria interessante levantar novos estudos a respeito de impactos de sismos induzidos por explosões na região, devido à alta concentração da atividade mineradora. Neste contexto, a metodologia sugerida neste trabalho poderia, caso validada, ser aplicada em tais estudos, uma vez que diferentemente dos métodos usuais para determinação de sismos, seu algoritmo não se baseia na assinatura de um sismo natural, mas apenas no início da detecção dos sismos em cada sismógrafo.

## Referências

- ABNT NBR 15421:2006. **Projeto de estruturas resistentes a sismos - Procedimento.** 30/10/2006.
- Amororo, Sara et al. **The first italian blast-induced liquefaction test (Mirabello, Emilia-Romagna, Italy): description of the experiment and preliminary results.** Italy,2017.
- Antonio Gens and Marcos Arroyo. **Computational analyses of Dam I failure at the Corrego de Feijao mine in Brumadinho Final Report.** Barcelona - Espanha, Agosto/2021
- Catálogo de sismos. **Centro de sismologia da USP.** Disponível em: <http://moho.iag.usp.br/eq/latest>. Acesso em 01/05/2021
- Davi Bastos Martins De Oliveira. **Projeto De Melhoria De Fragmentação Em Desmonte De Rochas.** Ouro Preto - Mg , 2017.
- DAVIES, M.P.; MCROBERTS, E.C. & T.E. MARTIN (2002). **Static liquefaction of tailings – Fundamentals and case histories.** In **proceedings Tailings Dams 2002.** ASDSO/USCOLD, Las Vegas
- Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). **Anuário Mineral Brasileiro.** Maio-2017
- Designing for Earthquakes -**A Manual for Architects,** FEMA 454 / December 2006
- Dias, Guerner et al. **Sismologia.** Revista de Ciência Elementar. Vol 1. páginas 1-4, Outubro 2013.
- Dynamics of Structures - **Theory and Application to Earthquake Engineering,** (Fourth edition), Anil K.Chopra, Prentice Hall, 2012
- Eurocode 8. **Design of structures for earthquake resistance** 1998.
- Evandro Ribas Machado. **Deformações horizontais induzidas por sismo em edificações metálicas.** Ijuí/RS. 2006.
- Fonseca, Jociane dos Santos. **Método de Newton generalizado e Aplicações.** Belém/PA, 2017
- Fundação Estadual do Meio Ambiente, FEMA-MG. **Cadastro De Minas Paralisadas E Abandonadas No Estado De Minas Gerais.** Minas Gerais. 2016.
- GIL, Antonio Carlos et al. **Como elaborar projetos de pesquisa.** São Paulo: Atlas, 2002.
- J M Miranda, J F Luis, P T Costa, F M Santos. Fundamentos de Geofísica.

K. Kato, H. B. Mason, and S. A. Ashford. **Ground vibration from blast-induced liquefaction testing in Christchurch**, New Zealand. 1-4 November 2015. Christchurch, New Zealand.

Lee, W.H.K., Lahr, J.C., 1975. **HYP071 (revised): a computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquakes**. U.S. Geological Survey Open File Report 75-311.

Lowrie Willian. **Fundamentals of Geophysics**. 2nd edition. Cambridge-UK :Cambridge University press, 01 november 2007

Magalhães , Diogo Amaral. **Estimativa da energia liberada na explosão em Beirute**. A Física na Escola, v.18, n.2, 2020.

Mayr Retes et al. **Relatório de análise de acidente de trabalho rompimento da barragem B1 da Vale S.A. em Brumadinho/MG em 25/01/2019**. Superintendência regional do trabalho em Minas Gerais. Belo Horizonte, 13 de setembro de 2019.

Neri, Brandow Lee. **Observatório Sismológico da UnB estuda explosões ocorrida em Beirute - Líbano**. Brasília, 04 de agosto de 2019.

Oliveira, Paulo Henrique Sousa de. **Sismicidade e Esforços Tectônicos na Zona Sísmica Acaraú, Nordeste do Brasil**. Natal - RN, Janeiro de 2015.

P. G. B. NÓBREGA e S. H. S. NÓBREGA. **Perigo sísmico no Brasil e a responsabilidade da engenharia de estruturas**. Universidade Federal do Rio Grande de Norte – UFRN. julho/2016.

Robertson et al. **Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão**. 12 de dezembro de 2019.

Rohden, Julia. **Céu Aberto**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2016.

Seismic design for architects - **outwitting the quake**, Andrew Charleson, Architectural Press is an imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK, First edition 2008

SHOKRARIAN, Salahoddin. **Tópicos em Métodos Computacionais**. São Paulo: Ciência Moderna. 1º Ed. 2009.

Universidade de Brasília - UNB. **Relatório de Informe Sísmico**. Brasília, 29 de Janeiro de 2019.

Viana, Hiago Sales. **MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS APLICADO A UM PROBLEMA DE CONDUÇÃO DO CALOR EM ESTADO ESTACIONÁRIO**. Castanhal-PA, 2018.

Wang Lanmin. **Study on liquefaction of saturated loess by in-situ explosion test.** Shangai China. junho 2002.

Washington Pirete da Silva. **Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001).** Ouro Preto - julho de 2010.

Wayne A. Charlie and Donald O. Doehring. **Groundwater Table Mounding, Pore Pressure, And Liquefaction Induced By Explosions: Energy-Distance Relations.** 14 December 2007.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 24 de novembro de 2021	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-118/2021	4. N° DE PÁGINAS 69
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Análise de aspectos sísmicos na ruptura da barragem de brumadinho.			
6. AUTOR(ES): <b>Mateus Arraes Feitosa Borges</b>			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Sismologia. 2. Engenharia de Sismos. 3. Métodos Computacionais			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Sismologia; Barragens; Rupturas; Análise dos solos; Métodos Computacionais; Geologia; Engenharia civil.			
10. APRESENTAÇÃO: <input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador Prof. Dr. Paulo Ivo Braga de Queiroz. Publicado em 2021.			
11. RESUMO: O colapso da barragem de Brumadinho em 2019 pôs em xeque a segurança da mineração no estado de Minas Gerais, em especial pelo fato da barragem ter sido classificada segura por um relatório poucos meses antes do desastre. Dada a importância econômica da atividade para a região, este trabalho buscou revisar as principais referências no tópico de engenharia de sismos para avaliar a possibilidade de algum sismo servir como gatilho para liquefação do solo e consequentemente para o colapso da barragem. Neste sentido, sugeriu-se uma abordagem alternativa através do método de Newton, para a identificação dos epicentros de eventuais sismos que ocorreram na região da barragem no dia do colapso, a partir de dados sismográficos públicos. Além disso, avaliaram-se as amplitudes de pico registradas nos sismógrafos da região para avaliar de modo quantitativo o impacto eventual de tais sismos. Apesar das limitações de dados e premissas simplificadoras, o estudo estipulou que a energia de sismos não seria suficiente para ocasionar a ruptura da barragem, baseando-se em respostas sismográficas anteriores também registradas nos sismógrafos e pela localização e horários estimados dos sismos. Este trabalho contribuiu para a consolidação de estudos previamente desenvolvidos sobre o colapso da barragem, como também propõe eventuais análises complementares para avaliação de impactos sísmicos na região.			
12. GRAU DE SIGILO: <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO			