

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO QUANTO A EFICIÊNCIA DE BARREIRAS  
RÍGIDAS NA MITIGAÇÃO DE CORRIDAS DE LAMA DE  
REJEITO**

**LORENNA MONTEIRO DE FREITAS**

**ORIENTADOR: MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc**

**PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL**

**BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2020**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO QUANTO A EFICIÊNCIA DE BARREIRAS RÍGIDAS NA  
MITIGAÇÃO DE CORRIDAS DE LAMA DE REJEITO**

**LORENNA MONTEIRO DE FREITAS**

**TRABALHO DE PROJETO FINAL SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO  
PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM  
ENGENHARIA CIVIL.**

**APROVADO POR:**

---

**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc (UnB)  
ORIENTADOR**

---

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)  
EXAMINADOR INTERNO**

---

**DANIELA TORO ROJAS, MSc  
EXAMINADOR EXTERNO**

**BRASÍLIA/DF, 15 DE DEZEMBRO DE 2020.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

FM775a                      FREITAS, LORENNA MONTEIRO DE  
Avaliação quanto a eficiência de barreiras rígidas na mitigação de  
corridas de lama de rejeito / Lorena Monteiro de Freitas; orientador Manoel  
Neto. – Brasília, 2020.  
51 p.

Monografia (Graduação – Engenharia Civil) – Universidade de  
Brasília, 2020.

1. Barreiras rígidas. 2. Barragens de rejeito. 3. Método do Ponto  
Material. 4. Movimentos de massa. I. Neto, Manoel, orient. II. Título.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FREITAS, L. (2020). Avaliação quanto a eficiência de barreiras rígidas na mitigação de corridas de lama de rejeito. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 51 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lorena Monteiro de Freitas

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação quanto a eficiência de barreiras rígidas na mitigação de corridas de lama de rejeito.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil/ 2020

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Lorena Monteiro de Freitas  
QR 319 conjunto 3 casa 3,  
CEP: 72309-103, Samambaia, DF – Brasil.  
l.lorennaf@gmail.com

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus, presente de diferentes formas em todos os momentos da minha vida.

À minha mãe Valdenice, por nunca colocar empecilhos em meus sonhos e ter sempre me dado apoio em todas as minhas escolhas, com um olhar de esperança me incentivando com o “vai dar certo, nós vamos dar um jeito!”. A graduação na UNB é a concretização de mais um sonho e sem todo seu carinho e suporte nada disso faria sentido.

Às minhas irmãs Luenne e Letícia, por serem companhia, auxílio e aconchego em dias bons e ruins desde que nos conhecemos. Agradeço a existência de vocês.

Ao meu amigo, técnico de natação, Agnaldo Amorim, um dos primeiros a saber da minha aprovação na universidade e uma das pessoas que mais me incentivou a buscar crescimento profissional, mesmo que isso significasse colocar os treinos em segunda posição.

A todos os meus amigos de turma. Compartilhamos momentos tensos, noites de estudo, provas longas e projetos super trabalhosos, e por tudo isso que passamos juntos guardo voc es em meu coração. Agradeço de forma especial às minhas primeiras amigas de caminhada acad mica Isabella Lima, Lara Cordeiro e Flávia Angelim, e   Katherine Mirella Flores, que praticamente andou junto comigo nessa reta final do curso. Agradeço pela amizade de voc es.

Aos meus professores por toda a disposição em nos passar seus conhecimentos. Em especial aos professores Ennio Palmeira, que me orientou no projeto de iniciação científica, André Assis por suas aulas excepcionais.

  Daniela Toro, por sua disposição e empenho em me auxiliar com seu conhecimento na elaboração desta pesquisa. Durante a execução deste trabalho a sua ajuda e seus conselhos foram de extrema relevância e sou sinceramente grata por isso.

Ao meu orientador Manoel Porfírio Cordão Neto pelos conselhos, incentivos, correções e dicas para vida profissional durante a execução deste trabalho, certamente aprendi muito com todos seus ensinamentos e os usarei em minha vida.

À Universidade de Brasília, por me proporcionar a vivência de tantas experiências e a oportunidade de mudar a minha história através da educação.

## RESUMO

Nos últimos 5 anos o Brasil passou por grandes tragédias causadas por rupturas de barragens de rejeitos, onde os impactos foram sentidos nas esferas ambiental, social e econômica. Alternativas estão sendo pensadas para evitar que essas tragédias continuem acontecendo, sejam elas na tentativa de evitar a ruptura ou de reduzir os danos causados quando a mesma é inevitável. Dentre as opções existentes, as barreiras rígidas foram as escolhidas para serem avaliadas por métodos numéricos quanto aos efeitos que geram em corridas de rejeitos provenientes da ruptura de uma barragem hipotética. Para isso, foram simulados com o uso do Método do Ponto Material (MPM) cinco modelos com barreiras unitárias em diferentes posições, onde a barragem hipotética possuía 83 m de altura e as barreiras foram definidas com 28 m. Como resultado viu-se que todas as disposições de barreiras foram eficientes na mitigação do fluxo do material, em alguns casos reduziu em 39% a distância percorrida pelo material e em outros casos possibilitou a contenção completa do material. Além disso, foi observado que o afastamento da barreira permite que o material em movimento atinja maiores velocidades, o que afeta diretamente no dimensionamento desses elementos de proteção quando a velocidade de pico ocorre no mesmo momento do impacto.

Palavras-chave: Barreiras rígidas, Barragens de rejeito, Método do Ponto Material, Movimentos de massa.

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	MOTIVAÇÃO .....	2
1.2	PROBLEMA.....	3
1.3	HIPÓTESE.....	3
1.4	OBJETIVO.....	3
1.5	METODOLOGIA DE PESQUISA.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1	MOVIMENTOS DE MASSA.....	5
2.1.1	CORRIDAS DE LAMA .....	7
2.2	BARRAGENS DE REJEITOS .....	9
2.2.1	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ARMAZENADOS .....	11
2.2.2	RUPTURAS DE BARRAGENS DE REJEITO E SEUS MECANISMOS .....	14
2.2.3	REGULAMENTAÇÃO PARA DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS.....	18
2.3	BARREIRAS .....	19
2.3.1	TIPOS DE BARREIRAS.....	20
2.3.2	PROCESSO DE DIMENSIONAMENTO.....	23
2.4	MÉTODOS NUMÉRICOS PARA ANÁLISE DE GRANDES DEFORMAÇÕES .....	25
2.4.1	MÉTODO DO PONTO MATERIAL (MPM).....	25
2.4.2	<i>SOFTWARE</i> : ANURA 3D® .....	27
3	METODOLOGIA .....	29
3.1	CRIAÇÃO DA GEOMETRIA DO PROBLEMA.....	29
3.2	DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS .....	32
3.3	DADOS DO MÉTODO MPM E CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	34
3.4	GERAÇÃO DA MALHA E DEFINIÇÃO DE DADOS INICIAIS DE CÁLCULO.....	35
3.5	EXTRAÇÃO DE DADOS DO PROCESSAMENTO.....	37

4	RESULTADOS E ANÁLISES .....	38
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características dos movimentos (modificada de INFANTI JÚNIOR & FORNASARI FILHO, 1998).....	6
Tabela 2.2 – Resultado dos ensaios realizados por Pereira (2005) (MIRANDA, 2018). .....	13
Tabela 2.3 – Principais rupturas de barragens de rejeitos no Brasil desde o ano 2000 .....	16
Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais existentes no modelo.....	33
Tabela 3.2 – Malha dos modelos .....	36
Tabela 3.3 – Etapas de processamento .....	37
Tabela 4.1 – Simulação sem barreiras .....	38
Tabela 4.2 – Momento de impacto do material na barreira .....	41



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Corrida de lama em Nova Friburgo (esquerda) e corrida com detritos em Teresópolis (direita), em janeiro de 2011 (NUNES, 2013; AMARÍLIS & AMORIM, 2011)..5	
Figura 2.2 – Representação dos tipos de movimentos de massa: rastejo (a), escorregamento (b), quedas (c) e corridas (d) (HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008). ....6	
Figura 2.3 - Frequência mensal de movimentos de massa no Brasil de 1991 a 2012, discriminados pelas regiões (PARANÁ, 2013). ....7	
Figura 2.4 - Croqui de um empreendimento de mineração (INFANTI JÚNIOR & FORNASARI FILHO, 1998). ....9	
Figura 2.5 - Quantidade de rejeitos de mineração gerados de 1996 a 2005 no Brasil por quatorze substâncias (em 1 mil toneladas) (SILVA <i>et al.</i> , 2012). .... 10	
Figura 2.6 - Métodos de alteamento de barragens de rejeitos: alteamento para montante (a), alteamento de jusante (b) e alteamento por linha de centro (c) (IBRAM, 2016)..... 11	
Figura 2.7 – Imagens da lama despejada após o rompimento da Barragem do Fundão (FREITAS, 2015; MARENCO, 2015). .... 16	
Figura 2.8 – Corrida de lama provocada pela ruptura da barragem em Brumadinho derrubou trecho de ponte ferroviária (CORREA, 2019). .... 17	
Figura 2.9 – Corrida de lama de rejeitos após ruptura da Barragem de Rio Pomba Cataguases em Miraí, Minas Gerais (BARRETO, 2007) ..... 18	
Figura 2.10 – Uso de barreiras flexíveis em casos de corridas de detritos .....21	
Figura 2.11 – Casos em que foram instaladas barreiras multiníveis (VOLKWEIN <i>et al.</i> , 2011). .....21	
Figura 2.12 – Seção típica de tipo de barreira rígida (VANDINE, 1996) .....22	
Figura 2.13 – Barreiras rígidas atuando de forma unitária ou em cascata (VANDINE, 1996; WAGNER, 2017)..... 22	
Figura 2.14 – Exemplos de barreiras rígidas (HÜBL <i>et al.</i> , 2009).....23	
Figura 2.15 - Sequência do MPM (TORO ROJAS, 2019). ....26	
Figura 3.1 – Primeira barragem simulada: geometria descartada por não sofrer ruptura global. ....30	

Figura 3.2 – Comparação entre a geometria da barragem de Brumadinho (adaptada do relatório) e a barragem adotada para esta pesquisa.....	30
Figura 3.3 – Geometrias do modelo: barreiras posicionadas a 50 m (a), 100 m (b), 150 m (c), 200 m (d), 250 m (e) do pé da barragem, e opção combinada de barreiras a 100 e 250 m (f).	31
Figura 3.4 – Ferramentas de criação da geometria do modelo através do GID.....	32
Figura 3.5 – Atribuição de materiais aos volumes do modelo.....	34
Figura 3.6 – Quantidade de pontos materiais por elemento.....	34
Figura 3.7 – Condições de contorno: restrição de deslocamento na direção Z (0 0 1 – verde), nas direções Y e Z (0 1 1 – amarelo), na direção X (1 0 0 – azul) e nas direções X e Z (1 0 1 – rosa).....	35
Figura 3.8 – Malha do modelo com barreira a 100 m.....	36
Figura 3.9 – Dados iniciais de cálculo .....	36
Figura 4.1 – Movimento do rejeito sem a barreira.....	38
Figura 4.2 – Velocidade e distância percorrida pelo rejeito sem a barreira.....	39
Figura 4.3 – Deslocamento dos pontos materiais em diferentes disposições de barreiras .....	40
Figura 4.4 – Deslocamento do material que ficou contido nas barreiras.....	41
Figura 4.5 – Deslocamento do material que ultrapassou a barreira.....	42
Figura 4.6 – Velocidade dos materiais contidos nas barreiras.....	43
Figura 4.7 – Movimento do material com barreiras duplas .....	43

# 1 INTRODUÇÃO

Os desastres associados a movimentos de massa são comuns no Brasil. Somente no período de 1991 a 2012 foram registrados 699 eventos dessa categoria no país (PARANÁ, 2013). Tais eventos são desencadeados em virtude da combinação entre altas declividades do relevo, disponibilidade de massa instabilizada, características geológicas do maciço e elevados índices pluviométricos, condições estas existentes em diversas regiões do Brasil (MASSAD *et al.*, 1997; PARANÁ, 2013).

Esses movimentos ocorrem por processo de rastejo, escorregamento, quedas ou corridas, e cada um deles pode mobilizar, individualmente ou de forma agregada, detritos, solos e rochas (INFANTI JUNIOR & FORNASARI FILHO, 1998).

As corridas, de forma particular, podem ser divididas basicamente em dois tipos: corridas de detritos (*debris flow*) e corridas de lama (*mud flow*). As corridas de detritos mobilizam prioritariamente materiais grosseiros, como fragmentos de rochas. Enquanto isso, as corridas de lama consistem em movimentos de solo com alto teor de água (INFANTI JUNIOR & FORNASARI FILHO, 1998).

De acordo com isso, também podem ser caracterizadas como corridas de lama aquelas em que a movimentação de massa é formada não somente por solo e água, mas por rejeitos de mineração, por exemplo. Essa semelhança se torna apropriada em razão das características dos materiais e da forma como acontece o escoamento da lama produzida. E, de fato, o material que escoou após o rompimento de uma barragem se comporta aproximadamente como o solo que é carregado em uma corrida de lama.

Na prática, nos últimos anos várias barragens de rejeitos sofreram ruptura no Brasil. Em todos os casos houve prejuízos ambientais e econômicos, mesmo que não tenham sido explicitados em relatórios técnicos, e na maioria deles ocorreram vítimas fatais.

De antemão, a engenharia deve utilizar as soluções disponíveis para que todas as barragens possuam o menor risco associado possível. Entretanto, quando é impraticável minimizar a susceptibilidade de rompimento de uma barragem, se torna necessário ao menos controlar os danos que serão provocados posteriormente pelo fluxo do material que estava armazenado.

Em situações onde ocorre fluxo de detritos já se tem o emprego de soluções técnicas com barreiras, reservatórios e canais de fluxo. Nessas circunstâncias, as barreiras são utilizadas com finalidade de dissipar energia do fluxo e reter os detritos, ao passo que os reservatórios

permitem a deposição dos detritos e sedimentos a partir do espalhamento da massa em sua área escavada. Também são utilizados os canais de fluxo, que servem como alternativa para controlar a trajetória da corrida detríticas (CRUZ *et al.*, 2003).

Contudo, depara-se com certa dificuldade para encontrar registros de situações no Brasil ou no mundo onde tenham sido empregadas soluções como essas, resumidas anteriormente, para permitir o controle das corridas de lama, especialmente constituídas por rejeitos provenientes de ruptura de barragens.

## **1.1 MOTIVAÇÃO**

Grandes impactos sociais, econômicos e ambientais são causados após cada ruptura de barragem de rejeitos, sejam eles de pequenas ou grandes dimensões. Dificilmente são vistas soluções sendo aplicadas na tentativa de reduzir os danos que seriam provocados por ruptura de barragens que estão em situação de risco médio ou alto.

O dimensionamento de barreiras de impacto para mitigar o fluxo de lama pode ser uma forma de reduzir os danos causados, pelos menos aqueles relacionados à perda de vidas humanas.

Entretanto, para dimensionar esse tipo de estrutura se faz necessário compreender assuntos relacionados às propriedades dos materiais que sofrem o escoamento, ao volume e à velocidade da massa no impacto. Para o caso de ruptura de barragem, o primeiro assunto é obtido por ensaios laboratoriais, que são difíceis de serem executados e apresentam resultados às vezes pouco confiáveis em relação à situação real de campo. O segundo pode ser definido como o volume total do reservatório, com ajustes por fatores de segurança. E a velocidade só pode ser estimada por análise com métodos numéricos, onde fatores como relevo e rugosidade do terreno afetam consideravelmente o resultado. Isso faz com que a análise tenha que ser feita por modelos 3D, o que eleva consideravelmente a qualidade da simulação, mas também o tempo de processamento do problema e seu custo computacional.

Assim, esse trabalho pretende produzir um apanhado geral dos conceitos e definições importantes para o estudo de soluções para contenção e controle de movimentos de massa, com enfoque nas corridas de lama. Além disso, ele pretende identificar os resultados que são produzidos no escoamento quando são dispostas barreiras rígidas a jusante do movimento.

## **1.2 PROBLEMA**

É possível que estruturas rígidas, que não possuem a função de acúmulo de material, promovam a dissipação de energia e mitiguem as corridas de lama oriundas de rompimento de barragens de rejeitos?

## **1.3 HIPÓTESE**

Para que haja a mitigação do escoamento de lama é preciso que ele perca energia durante seu percurso. Desta forma, a hipótese proposta é que a colocação de barreiras rígidas a jusante de barragens com elevado risco de ruptura propicia a dissipação de energia do escoamento e viabiliza a mitigação das corridas de lama.

## **1.4 OBJETIVO**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar numericamente os efeitos que barreiras rígidas dispostas a jusante de uma barragem de rejeitos geram em corridas de lama provenientes da ruptura desta.

Como objetivos específicos serão tratados os seguintes assuntos:

- Revisar a bibliografia relacionada a corridas de lama, barreiras rígidas, rompimento de barragens de rejeitos e métodos numéricos que viabilizam a análise da situação proposta.
- Avaliar diferentes leiautes de disposição de barreiras rígidas quanto à eficiência de dissipação de energia e mitigação do movimento da massa pós ruptura.

## **1.5 METODOLOGIA DE PESQUISA**

Este trabalho se trata de um estudo de caso com análise por métodos numéricos do cenário de corrida de lama provocada por rompimento de uma barragem de rejeitos hipotética. Assim, para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foram definidas quatro atividades para serem desenvolvidas.

### **Atividade 01 – Revisão bibliográfica**

Para produzir este trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica a fim de melhorar a compreensão sobre movimentos de massa, barragens de rejeitos e tipologias de barreiras de contenção e dissipação.

### **Atividade 02 – Estudo do *software***

Para conhecer o funcionamento o *software* ANURA 3D® foi utilizado o manual da ferramenta como base de estudo e de testes. O *software* foi validado para modelação de movimentos de massa em Toro Rojas (2019) e por isso foi considerado adequado para tal estudo.

### **Atividade 03 – Modelação do problema**

Na atividade 3 foi definida a geometria da barragem hipotética assim como a geometria, o posicionamento e o arranjo das barreiras rígidas a jusante. Além disso, foram estabelecidos os parâmetros de resistência e deformabilidade dos materiais e executado o processamento do modelo no *software*.

### **Atividade 04 – Análise dos resultados e conclusões**

Nessa etapa foi avaliada eficiência das barreiras na mitigação da corrida de lama de rejeitos com base nos resultados obtidos para as diferentes formas de disposição das barreiras e elaborada a descrição das conclusões decorrentes das análises.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos, teorias e regulamentações importantes para subsidiar o desenvolvimento do trabalho. Dentre os assuntos estão incluídos os movimentos de massa, as barragens de rejeitos, as barreiras e o método do ponto material.

### 2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa, são movimentos gravitacionais de materiais de encostas ao longo das vertentes. Tais materiais podem ser solos, rochas e vegetações e o movimento pode, ou não, se iniciar a partir da contribuição de outro meio, como a água (TOMINAGA *et al.*, 2009).

Esses movimentos são processos naturais, que fazem parte da evolução geomorfológica, mas podem ser agravados ou acelerados devido a interferência humana. Fatores que podem acentuar os danos causados são aqueles relacionados à falta de planejamento urbano e a ocupação de áreas irregulares. Esse fato é observado no Brasil, onde os movimentos de massa estão entre os desastres que mais causam danos humanos (CARDOZO, G. & CARDOZO, C., 2016)

Entre os casos registrados está o Mega desastre da Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, ocorrido em janeiro de 2011, após a intensa chuva que caiu sobre a Serra Fluminense. Após esse evento os pesquisadores diagnosticaram que ocorreram movimentos de massa por processo de corridas, sendo elas tanto de detritos, como a que ocorreu no Bairro do Vieira em Teresópolis, como de lama observada em Nova Friburgo, ambas mostradas na Figura 2.1 (PAIXÃO *et al.*, 2011; RODRIGUES *et al.*, 2011).



Figura 2.1 – Corrida de lama em Nova Friburgo (esquerda) e corrida com detritos em Teresópolis (direita), em janeiro de 2011 (NUNES, 2013; AMARÍLIS & AMORIM, 2011).

Existem diferentes tipos de movimentos de massa, mas os que se apresentam com maiores frequências no país são: rastejo, escorregamento, quedas e corridas. A Tabela 2.1 mostra de forma resumida as características de cada um desses tipos de movimentos de massa e a Figura 2.2 permite a melhor visualização deles.

Tabela 2.1 - Características dos movimentos (modificada de INFANTI JÚNIOR & FORNASARI FILHO, 1998)

Processos	Velocidade	Geometria	Materiais
Rastejo	Muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade	Indefinida	Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada
Escorregamento	Velocidades médias (m/h) a altas (m/s)	Planar	Solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza
		Circular	Solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas
		Formato de cunha	Solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas	Velocidades muito altas (vários m/s)	Variável	Material rochoso
Corridas	Velocidades médias (m/h) a muito altas (m/s)	Indefinida	Solo, rocha, detritos e água

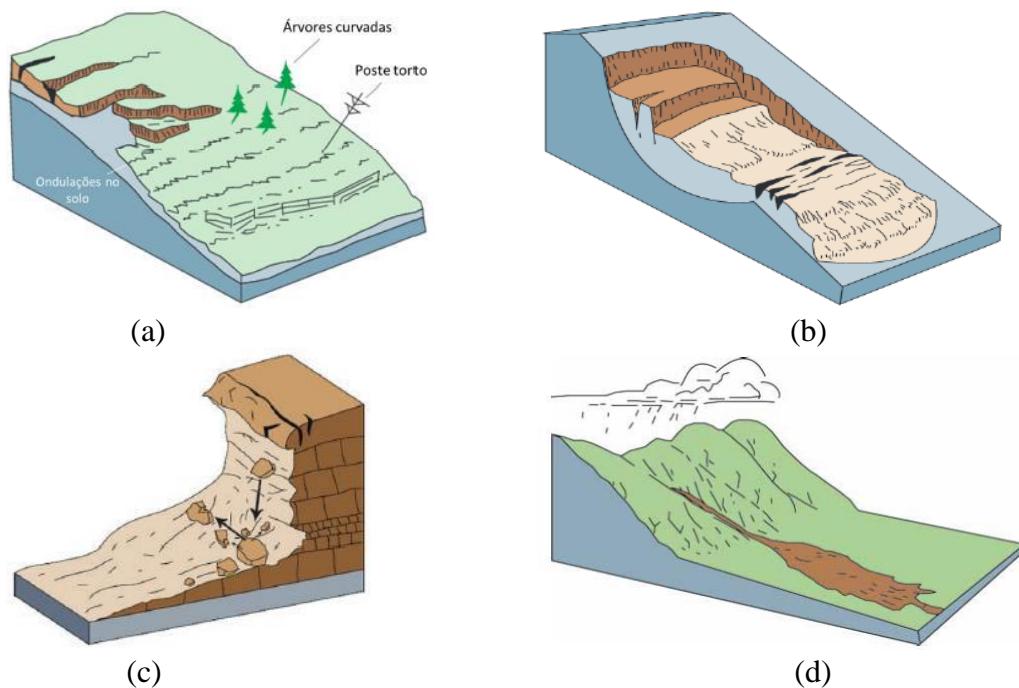


Figura 2.2 – Representação dos tipos de movimentos de massa: rastejo (a), escorregamento (b), quedas (c) e corridas (d) (HIGHLAND & BOBROWSKY, 2008).



No Brasil ocorrerem muitos desastres relacionados aos movimentos de massa. O Atlas Brasileiro de Desastres Naturais traz o registro de 699 eventos desse tipo entre os anos de 1991 e 2012 (PARANÁ, 2013). A Figura 2.3 apresenta um gráfico, extraído desse mesmo Atlas, que foi baseado no banco de dados da Secretaria Nacional de Defesa Civil, onde é vista a frequência mensal dos movimentos de massa ocorridos no Brasil durante os 21 anos de análise, entretanto é importante ressaltar que os movimentos de massa ocorridos no Rio de Janeiro em 2011 não entraram nesse quantitativo pois, por algum equívoco, eles só foram registrados pelas prefeituras como eventos de enxurradas e inundações. Neste gráfico se observa que o maior número de eventos está compreendido entre os meses de chuvas mais intensas.

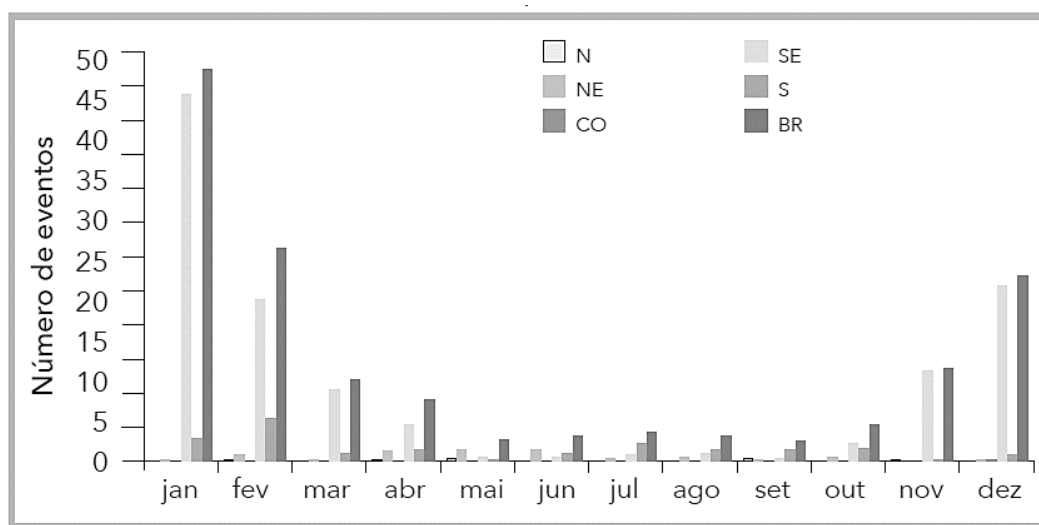


Figura 2.3 - Frequência mensal de movimentos de massa no Brasil de 1991 a 2012, discriminados pelas regiões (PARANÁ, 2013).

Como apresentadas na Tabela 2.1, as corridas podem carrear diferentes tipos de materiais. Quando os materiais em movimentos são predominantemente detritos e rochas, que são materiais de granulometrias maiores, se dá no nome de corridas detríticas ou corridas de detritos (*debris flow*). Já para aquelas em que prevalece no movimento os materiais de menores dimensões, como o solo, é dado o nome de corridas de lama (*mud flow*) (VOLKWEIN *et al.*, 2011). Esse último tipo de movimento será melhor apresentado na próxima seção.

### 2.1.1 CORRIDAS DE LAMA

As corridas, de forma geral, possuem grande quantidade de energia envolvida em seu movimento, o que lhes garante alto poder destrutivo. Mesmo em terrenos considerados planos,

esse tipo de movimento pode se propagar por vários quilômetros devido a sua grande mobilidade, a qual se assemelha a de um líquido viscoso (INFANTI JÚNIOR & FORNASARI FILHO, 1998).

Além disso, as corridas são caracterizadas pelo fluxo bifásico de materiais, compreendendo água misturada com solos ou com detritos (LO, 2000). Ela tem, portanto, dinâmica híbrida, onde o movimento é regido pela mecânica dos sólidos e dos fluidos (INFANTI JÚNIOR & FORNASARI FILHO, 1998).

A corrida de detritos é um fenômeno dito intermediário, pois mescla as características de deslizamentos de terra, desmoronamento de rochas e transporte de sedimentos por ação fluvial (RICKENMANN, 1999). Seu fluxo é de alta densidade, onde 60% ou 70% do peso da massa em movimento é constituída por sólidos, e soma-se a isso a capacidade de transportar grandes blocos de rochas (BELL, 2007).

Enquanto isso, as corridas de lama se diferenciam das corridas de detritos pela porcentagem de partículas finas existente em sua composição. Para Bell (2007), as corridas de lama são aquelas em que as partículas com dimensões de areia, ou inferiores a ela, constituem pelo menos 50% de toda a massa em movimento. Durante o evento, a massa apresenta consistência pastosa e não necessita de altas inclinações para se desenvolver. De fato, vários casos ocorridos apresentam declives com inclinações de 5 a 15%, mas o movimento acontece até mesmo em inclinações inferiores a 1%.

Para o caso específico das corridas de lama, o fluxo apresenta velocidades que variam com o teor de água, onde quanto maior for o teor, maior é a velocidade do movimento (BELL, 2007). Coussot (1994) observou que as características do fluxo dependiam também da distribuição dos grãos. Para que o comportamento do movimento fosse analisado por modelos granulares, a porcentagem do material com grãos de diâmetro inferior a 0,04 mm deveria ser no máximo 10%. Para casos em que essa porcentagem fosse maior, o comportamento do movimento seria comandado por forças viscosas.

Além disso, as corridas podem ter duas origens: primária e secundária. Quando as corridas são formadas a partir da desestruturação de materiais que estão sofrendo escorregamentos nas encostas se diz que são de origem primária. Nos casos em que as corridas são iniciadas por remobilização de material já sedimentado nos canais de drenagem, mediante grandes volumes de água e até mesmo de fluxo de lavas vulcânicas, se diz que são de origem secundária (INFANTI JÚNIOR & FORNASARI FILHO, 1998; BELL, 2007).

## 2.2 BARRAGENS DE REJEITOS

A mineração é uma atividade que consiste na extração e no beneficiamento de minérios. O minério, material com valor econômico, é extraído das minas juntamente com materiais estéreis sem valor econômico, como solo e rochas, e levado às usinas de beneficiamento ou concentração. Dentro dessas instalações, o minério é beneficiado e todo o restante do material sem valor econômico que o acompanhou até ali é descartado. A esse material descartado após o beneficiamento é dado o nome de rejeito. Como consequência do processo surgem então as barragens de rejeitos, para armazenar o material que foi descartado depois do beneficiamento do minério (INFANTI JÚNIOR & FORNASARI FILHO, 1998). A Figura 2.4 mostra um exemplo de empreendimento de mineração.

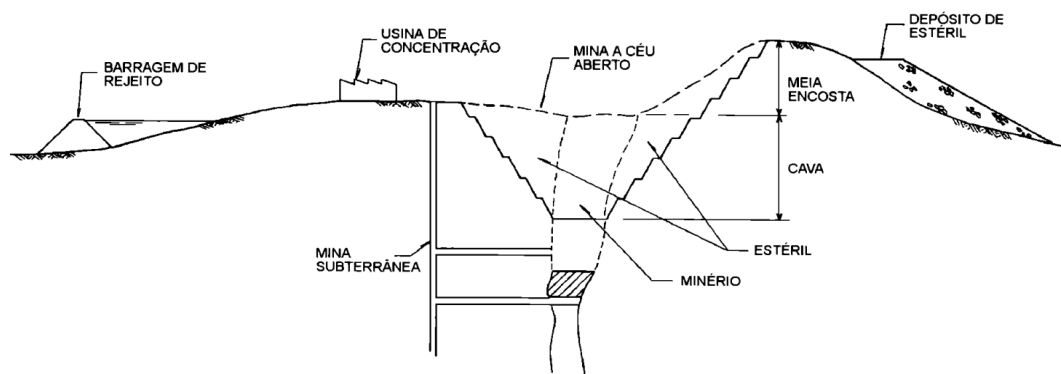


Figura 2.4 - Croqui de um empreendimento de mineração (INFANTI JÚNIOR & FORNASARI FILHO, 1998).

O processo de extração e beneficiamento dos minérios afeta a produção de rejeitos. Os minérios de interesse, por conta de seus variados valores comerciais, produzem diferentes quantidades de resíduos. Quanto maior o valor agregado, maior é o interesse das empresas mineradoras em aproveitar os minérios, mesmo aqueles de teores bem baixos, o que resulta em grande quantidade de resíduos para pouco minério aproveitado (INFANTI JÚNIOR & FORNASARI FILHO, 1998; SILVA *et al.*, 2012).

No Brasil, as maiores quantidades de rejeitos são produzidas por extração e beneficiamento de minérios de ferro. Em contraposição ao que foi apresentado anteriormente, a concentração dos minérios de ferro apresenta bom aproveitamento, relacionada aos elevados teores de ferro nos minérios explorados no país, e os resíduos gerados são devidos, realmente, ao fato da sua grande disponibilidade (CARVALHO *et al.*, 2014). Na Figura 2.5 se observa que do ano de 1996 a 2005 a mineração para obtenção do ferro gerou quase 766 milhões de toneladas de rejeitos. Grande parte desses materiais descartados teve que ser armazenado em barragens.

	Ferro	Ouro	Titânio <sup>1</sup>	Fosfato	Estanho <sup>2</sup>	Zircônio <sup>3</sup>	Calcário	Alumínio	Cobre	Níquel	Nióbio	Caulim	Zinco	Manganês	Total
1996	86.288	26.649	18.184	20.632	17.361	7.410	9.439	5.398	4.516	2.059	1.634	1.139	1.003	1.240	<b>202.952</b>
1997	72.954	39.014	26.693	21.584	16.559	9.168	12.115	5.301	3.179	2.740	1.681	1.599	1.126	841	<b>214.553</b>
1998	57.986	25.304	17.056	21.269	13.604	10.230	12.758	5.656	2.509	2.863	1.959	1.668	1.059	855	<b>174.777</b>
1999	67.432	25.484	33.942	21.990	12.867	12.880	9.872	5.776	1.150	3.464	2.496	1.910	1.068	520	<b>200.850</b>
2000	61.619	32.810	41.160	25.243	12.883	13.493	8.151	5.154	1.084	3.685	2.281	2.101	1.079	1.065	<b>211.809</b>
2001	66.335	35.250	18.365	24.974	15.309	12.439	10.617	5.880	3.983	3.840	2.056	2.348	1.098	940	<b>203.433</b>
2002	71.425	31.629	15.200	26.410	8.815	13.972	12.596	6.455	4.052	3.802	2.155	2.167	1.216	1.391	<b>201.285</b>
2003	81.760	26.058	31.431	29.108	6.652	10.358	2.042	9.424	4.396	3.752	6.617	3.354	1.509	1.146	<b>217.606</b>
2004	104.536	24.729	38.118	24.162	21.302	12.873	2.750	9.852	10.879	4.109	2.284	3.758	1.583	1.500	<b>262.436</b>
2005	95.641	28.369	36.074	29.083	24.018	13.414	9.058	10.887	17.750	4.762	12.526	4.303	1.821	2.567	<b>290.274</b>
<b>Total</b>	<b>765.977</b>	<b>295.295</b>	<b>276.224</b>	<b>244.456</b>	<b>149.369</b>	<b>116.236</b>	<b>89.398</b>	<b>69.783</b>	<b>53.498</b>	<b>35.076</b>	<b>35.690</b>	<b>24.346</b>	<b>12.562</b>	<b>12.064</b>	<b>2.179.975</b>

Figura 2.5 - Quantidade de rejeitos de mineração gerados de 1996 a 2005 no Brasil por quatorze substâncias (em 1 mil toneladas) (SILVA *et al.*, 2012).

Na grande maioria dos casos, para armazenar tais rejeitos que normalmente possuem grande quantidade de água, são construídas barragens (IBRAM, 2016). Elas são estruturas com função de barreira que podem ser construídas com o próprio rejeito, solo, enrocamento ou concreto, e até agosto de 2019 no Brasil elas podiam ser alteadas de forma convencional por alteamento em etapa única ou pelos métodos a montante, a jusante, por linha de centro e por empilhamento drenado (BOSSI & VILLAR, 2015; BRASIL, 2019). Acerca desses quatro últimos métodos construtivos, por via de resolução brasileira, se entende por:

- método "a montante": a metodologia construtiva de barragens onde os maciços de alteamento, se apoiam sobre o próprio rejeito ou sedimento previamente lançado e depositado, estando também enquadrados nessa categoria os maciços formados sobre rejeitos de reservatórios já implantados;
- método "a jusante": consiste no alteamento para jusante a partir do dique inicial, onde os maciços de alteamento são construídos com material de empréstimo ou com o próprio rejeito;
- método "linha de centro": método em que os alteamentos se dão de tal forma que o eixo da barragem se mantém alinhado com o eixo do dique de partida, em razão da disposição do material construtivo parte a jusante e parte a montante em relação à crista da etapa anterior;
- empilhamento drenado: estrutura construída hidráulica ou mecanicamente com rejeitos, que se configura como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, com formação de espelho de água reduzido podendo ser implantada em fundo de vale, encosta ou outra área (BRASIL, 2019).

Na Figura 2.6 são mostrados croquis dos modelos para alteamento de barragens a montante, a jusante e por linha de centro.

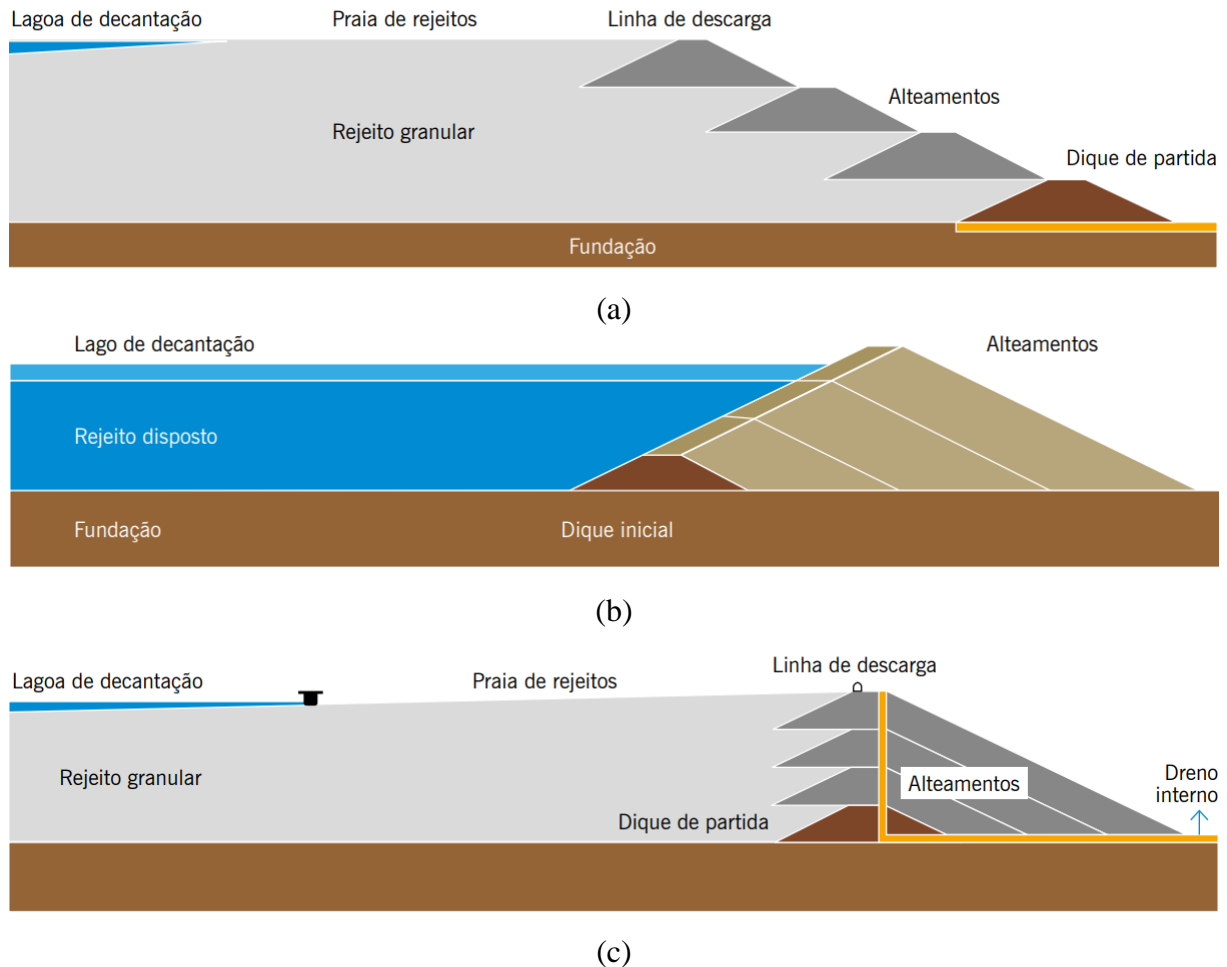


Figura 2.6 - Métodos de alteamento de barragens de rejeitos: alteamento para montante (a), alteamento de jusante (b) e alteamento por linha de centro (c) (IBRAM, 2016).

## 2.2.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ARMAZENADOS

A grande maioria dos rejeitos transportados para armazenagem em barragens já chega com altos teores de água, variando de 75% até 90% do volume total (IBRAM, 2016).

A depender do tipo de minério e dos processos de extração e beneficiamento adotados durante a mineração, os rejeitos produzidos apresentam diferentes características geotécnicas, mineralógicas e físico-químicas (PEREIRA, 2005; IBRAM, 2016). Em decorrência das operações de britagem e moagem, que são comuns em praticamente todos os processos de mineração, as partículas frequentemente apresentam superfícies rugosas com bordas finas e formas angulosas (MIRANDA, 2018).

Motta *et al.* (2010) realizaram ensaios triaxiais dos tipos CU (consolidado não-drenado) e CD (consolidado drenado) e de cisalhamento direto com rejeitos transição silto-arenoso, resultantes

da exploração de ferro, que estavam armazenados na Barragem do Germano em Mariana, Minas Gerais, e obtiveram ângulos de atrito variando entre 41° e 42° para os ensaios triaxiais e de 30° a 32° para os ensaios de cisalhamento direto. Para cada um desses ensaios foram registradas as massas específicas do material ensaiado e esses valores estavam entre 2,06 g/cm<sup>3</sup> e 2,09 g/cm<sup>3</sup> nos ensaios triaxiais e entre 1,80 g/cm<sup>3</sup> e 2,20 g/cm<sup>3</sup> nos ensaios de cisalhamento direto. Segundo os autores, a variação entre os resultados obtidos não teve causas conhecidas, mas pode ter sido ocasionada pelos níveis de tensão impostos durante os ensaios e pelo arranjo das partículas em cada método utilizado.

Além desses, as características físicas e geotécnicas em rejeitos de ferro também foram estudadas por Bossi e Villar (2015). Para a realização dos ensaios, foram coletadas amostras da Barragem Forquilhas IV em Ouro Preto, Minas Gerais, e levadas ao laboratório para os ensaios. Foram obtidos como resultados: massa específica real dos grãos variando de 3,271 g/cm<sup>3</sup> a 3,711 g/cm<sup>3</sup>, com base no teor de partículas finas, limite de plasticidade (LP) de 15,3, limite de liquidez (LL) de 9,4, índice de plasticidade (IP) de 5,9 e permeabilidade do rejeito total com ordem de grandeza de 10<sup>-5</sup> m/s. Em termos de tensões efetivas, a partir da compactação das amostras com graus de compactação (GC) de 90% e 95%, obtiveram valores de coesão nulos e ângulo de atrito de 33,2° e 34,3, respectivamente aos graus de compactação. Enquanto isso, em termos de tensões totais, foram encontradas coesões de 4,73 kPa e 23,3 kPa e ângulos de atrito de 10,5° e 20,3°, ambos os parâmetros para GC 90% e GC 95%, respectivamente.

Pereira (2005) também realizou ensaios em rejeitos de minério de ferro. As amostras foram coletadas em diversas barragens do Quadrilátero Ferrífero e os resultados dos ensaios, que foram sintetizados por Miranda (2018), podem ser vistos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Resultado dos ensaios realizados por Pereira (2005) (MIRANDA, 2018).

Barragem	Massa específica dos grãos	Índice de vazios		Granulometria			Composição química		
	(g/cm <sup>3</sup> )	$e_{\min}$	$e_{\max}$	Fração argila (%)	Fração silte (%)	Fração areia (%)	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Outros (%)
<b>Germano amostra 01</b>	3,395	0,624	1,327	13	48	39	22,22	69,2	8,58
<b>Germano amostra 02</b>	3,266	0,621	1,255	13	49	38	17,6	76,65	5,75
<b>Itabiruçu amostra 01</b>	3,337	0,67	1,392	13,5	20,5	66	19,18	72,1	8,72
<b>Forquilha III amostra 01</b>	3,945	0,642	1,766	18,5	55	26,5	35,17	43,17	21,66
<b>Forquilha III amostra 02</b>	3,806	0,57	1,588	18	45	37	33,72	46,46	19,82
<b>Forquilha II</b>	4,796	0,735	1,625	13	11	76	53,96	18,47	27,57
<b>Campo Grande</b>	4,152	0,739	1,245	12	38	50	42,45	37,71	19,84
<b>Doutor amostra 01</b>	3,366	0,604	1,368	12	35	53	23	66,29	10,71
<b>Doutor amostra 02</b>	3,397	0,612	1,245	13	39	48	21,41	70,85	7,74

Quanto à granulometria, os rejeitos podem ser divididos em duas categorias, de acordo com Duarte (2008). Quando os rejeitos possuem granulometria acima de 0,074 mm, ou seja, com dimensões de areia ou superiores, são chamados de rejeitos granulares e quando sua granulometria é majoritariamente inferior a esse valor, se considera lama. Em contrapartida, para Pereira (2005) os rejeitos possuem características granulométricas de materiais granulares, mas dependendo do diâmetro dos grãos eles são divididos em finos e grossos. Os rejeitos grossos são aqueles com partículas nas frações de areias finas ou médias. Já os rejeitos finos são aqueles com partículas em frações de argilas e silte. Importante lembrar que as partículas finas de rejeito de ferro não propiciam o aumento da coesão do material, pois são resíduos de rochas após beneficiamento do minério.

Na prática, os rejeitos possuem grande quantidade de suas partículas com diâmetros inferiores a 0,074 mm, em alguns casos essa quantidade chega a corresponder a 90% dos sólidos (MIRANDA, 2018). Os rejeitos mais finos possuem índices de plasticidade geralmente altos e o alto teor de finos acaba reduzindo o ângulo de atrito e afetando a compressibilidade dos rejeitos (BOSSI & VILLAR, 2015).

A partir da taxa de partículas finas no rejeito o fluxo do material após ruptura de barragem pode

se comportar como um fluido newtoniano ou não newtoniano, sendo o comportamento não newtoniano mais coerente para a situação real (O'BRIEN & JULIEN, 1988). Von Boetticher *et al.* (2014) mostra que materiais finos misturados com água sofrem efeito de desbaste, onde a viscosidade diminui com o aumento da tensão cisalhante, porém, quando se considera o comportamento de um fluido não newtoniano para análise de fluxo de rejeitos é preciso muita cautela, pois o uso de parâmetros incoerentes pode afetar negativamente a modelação. Dados de viscosidade e tensão de escoamento adotados de forma inadequada podem fornecer, por exemplo, resultados otimistas com situações menos desastrosas do que realmente seriam, fornecendo dimensões subestimadas para a mancha de inundação, devido a parada prematura da corrida, e retardo no tempo de chegada da onda de rejeitos (ROCHA *et al.*, 2017).

Dito isso, a modelação do escoamento de lama com comportamento newtoniano, apesar de ser uma simplificação do caso, pode gerar erros menores que aqueles devidos à inadequação dos parâmetros utilizados na análise com comportamento não newtoniano do fluxo. Isso não se deve a erros epistêmicos durante adoção de valores das propriedades dos materiais, mas sim à dificuldade e complexidade da análise em termos de dados relativos à reologia do material bifásico armazenado na barragem e da dinâmica do escoamento pelo terreno (ROCHA *et al.*, 2017).

### **2.2.2 RUPTURAS DE BARRAGENS DE REJEITO E SEUS MECANISMOS**

A ruína de barragens pode ser ocasionada por diversos fatores. Os mecanismos de falha mais estudados para ruptura de barragens são a erosão interna ou *piping*, a perda de estabilidade dos taludes, o galgamento e a liquefação (FOSTER *et al.*, 2000 apud. PERINI, 2009).

O fenômeno de *piping* ocorre por três processos de erosão: regressiva, por percolação em trincas e por carreamento de finos. A primeira se inicia no talude de jusante quando a velocidade de percolação da água na saída do barramento é alta o suficiente para ir arrastando as partículas para fora do barramento até que a progressão do movimento para montante gera uma espécie de tubo na barragem. A segunda acontece quando a barragem possui trincas ou camadas mal compactadas, onde é formado um caminho preferencial por onde se dará a passagem da água e, posteriormente, a erosão da trinca. Por último, a terceira erosão ocorre quando partículas finas são carregadas pela água, sobrando então espaços vazios que vão sendo aumentados até que se forma uma brecha de ruptura (FOSTER *et al.*, 2000 apud. PERINI, 2009).

Esse último processo de erosão pode ocorrer, por exemplo, por existência de argilas dispersivas



na estrutura do barramento. Nesse caso, quando o solo argiloso com ligações eletroquímicas fracas entre as partículas e com característica dispersiva entra em contato com a água, se inicia um processo semelhante à defloculação. Depois disso ter ocorrido, o fluxo de água vai arrastando as partículas defloculadas que já estão dispersas gerando assim uma erosão tubular interna à estrutura da barragem (HUNT, 2007).

Por outro lado, o galgamento acontece quando o fluido armazenado na barragem, por motivos diversos, flui sobre a sua crista. Esse fluido, ao descer pelo talude de jusante, atinge velocidades elevadas que promovem aumento no potencial erosivo. Por conta disso, o talude de jusante passa a ser erodido e a barragem vai perdendo seção até que ocorra a completa ruptura.

Segundo Miranda (2018), o fenômeno de liquefação ocorre quando se tem redução da tensão efetiva frente à elevação da poropressão. Por meio de ensaios triaxiais drenados em areias, Arthur Casagrande mostrou também a existência de um índice de vazios crítico, onde um mesmo valor poderia significar estado fofo com diminuição de volume ou estado compacto com aumento do volume, ambos acontecendo sob esforço de cisalhamento. No entanto, quando essas mudanças de volume não são possíveis por conta de uma situação não drenada, a poropressão aumenta e resistência ao cisalhamento cai de maneira brusca (MIRANDA, 2018). Tendo o solo perdido grande parte de sua resistência ao cisalhamento, para que o material comece a fluir falta somente um mecanismo de gatilho para iniciar o processo que mobiliza o cisalhamento não drenado (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

Os gatilhos podem ser do tipo estático ou dinâmico, sendo os estáticos aqueles que exercem carregamentos monótonos, como o alteamento rápido de uma barragem e a subida repentina da linha freática aumentando as poropressões, e os dinâmicos são aqueles que provocam carregamento cíclico, como abalos sísmicos, detonações ou movimentação de máquinas de grande porte (CASTILHO, 2017).

De acordo com os registros, várias barragens de rejeitos sofreram ruptura no Brasil nos últimos anos, como pode ser visto na Tabela 2.3. Em todos os casos houve prejuízos ambientais e econômicos, mesmo que não tenham sido explicitados em relatórios técnicos, e na maioria deles ocorreram vítimas fatais.

Tabela 2.3 – Principais rupturas de barragens de rejeitos no Brasil desde o ano 2000  
(ANA, 2013, 2015, 2017; WISE, 2019).

Ocorrência	Localização	Maiores danos constatados
Janeiro, 2019	Brumadinho, Belo Horizonte, Minas Gerais.	249 óbitos e 21 pessoas desaparecidas.
Novembro, 2015	Bento Rodrigues, Mariana, Minas Gerais.	17 óbitos e 2 pessoas desaparecidas. Prejuízo financeiro total estimado em R\$1.200.288.902,75.
Setembro, 2014	Itabirito, Minas Gerais.	2 óbitos e 1 pessoa desaparecida.
Janeiro, 2007	Miraí, Minas Gerais.	Aproximadamente 2 mil pessoas desabrigadas.
Março, 2003	Cataguases, Minas Gerais.	Desabastecimento de 600 mil habitantes por quase 1 mês.
Junho, 2001	Sebastião das Águas Claras, Nova Lima, Minas Gerais.	5 óbitos.

Em Mariana, por exemplo, foram registrados dois eventos de detonação e um abalo sísmico pouco antes da ruptura da Barragem do Fundão (CASTILHO, 2017). Porém, o relatório sobre as Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão apresenta como causa da ruptura a liquefação estática de uma camada fraca existente abaixo da barragem. Ainda segundo esse relatório, os abalos sísmicos provavelmente só aceleraram o processo de ruptura que já viria a acontecer (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

Esse fato, ocorrido em 5 de novembro de 2015 despejou cerca de 42 milhões de metros cúbicos de lamas oriundas do beneficiamento do minério de ferro e alguns dos trechos afetados podem ser vistos na Figura 2.7 (ANA, 2017).



Figura 2.7 – Imagens da lama despejada após o rompimento da Barragem do Fundão  
(FREITAS, 2015; MARENCO, 2015).

O relatório com a avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana apresentou uma série danos ambientais sobre qualidade e disponibilidade da água, danos na qualidade e disponibilidade de solo e danos sobre a biodiversidade. Ele mostrou também os danos materiais, relacionados desde “[...] atividades com impedimento devido à destruição causada pela onda de lama, até atividades que foram indiretamente impactadas e seus efeitos sobre a estrutura econômica regional” (MINAS GERAIS, 2016, p. 30). Além desses, também foram apresentados os danos humanos que representam, além da morte de 19 pessoas, os danos à saúde pública, à segurança, ao acesso à educação e os impactos sobre as formas de organização social da população. Ao final do relatório, por meio da estimativa de custo produzido por cada um desses danos, o resultado foi um montante de R\$1.200.288.902,75 aos cofres públicos e privados dos locais afetados.

Outro desastre de bastante comoção inclusive internacional foi o ocorrido em 25 de janeiro de 2019, quando a barragem da Mina Córrego do Feijão rompeu (WISE, 2019). A Figura 2.8 mostra o estrago provocado pela corrida de lama de rejeito em uma ponte de linha férrea que atendia a Mina do Feijão para escoamento do minério.



Figura 2.8 – Corrida de lama provocada pela ruptura da barragem em Brumadinho derrubou trecho de ponte ferroviária (CORREA, 2019).

Além desses, muitos outros acidentes ocorreram no Brasil, como pode ser visto na Tabela 2.3. Outro exemplo é mostrado na Figura 2.9 onde se vê a corrida de lama de rejeitos que cobriu várias casas em 2007 na cidade de Miraf, Minas Gerais. O fluxo de lama deixou cerca de 4.000 moradores desabrigados e o abastecimento de água foi comprometido em cidades dos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro (WISE, 2019).



Figura 2.9 – Corrida de lama de rejeitos após ruptura da Barragem de Rio Pomba Cataguases em Mirai, Minas Gerais (BARRETO, 2007)

Em vista dos últimos acidentes ocorridos envolvendo barragens de rejeitos, muito se tem falado sobre análise de risco em barragens. Nessa análise de risco deve ser feito o mapeamento da inundação, onde são elaborados os mapas com a envoltória máxima de inundação e com risco hidrodinâmico associado a seu possível rompimento (ROCHA, 2017).

A partir da análise do escoamento é feita a delimitação da Zona de Autossalvamento, a ZAS, que é a região a jusante da barragem onde não se tem tempo hábil para intervenção das autoridades competentes em situação de emergência (BRASIL, 2020).

### **2.2.3 REGULAMENTAÇÃO PARA DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS**

No dia 8 de agosto de 2019 foi publicada pela Agência Nacional de Mineração (ANM) a Resolução N° 13, que estabelece novas regras para barragens de mineração.

Entre as medidas estabelecidas, está a proibição por parte dos responsáveis pelas barragens de mineração de “conceber, construir, manter e operar, nas localidades pertencentes a poligonal da área outorgada ou em áreas averbadas no respectivo título minerário e inseridos na Zona de Autossalvamento” a grande maioria das edificações e as estruturas de armazenamento de efluentes líquidos que estão localizadas a jusante da barragem de mineração e que podem comprometer sua segurança. Por conta dessa exigência, foram definidos prazos para que essas estruturas sejam desativadas e as barragens de mineração sejam descaracterizadas (BRASIL, 2019).

Até o momento, o prazo referido para concluir a descaracterização das barragens de rejeitos varia do dia 15 de setembro de 2022 para aquelas com volume até 12 milhões de metros cúbicos até o dia 15 de setembro de 2027 para aquelas com 30 milhões de metros cúbicos.

A descaracterização ocorre quando são removidas das barragens de rejeitos todas as suas características e funções de barragens. De forma mais simples, isso significa dizer que as barragens deverão, dentro dos prazos estipulados, ter o seu material armazenado removido e toda a sua estrutura retirada inexistindo assim as funções de barragens (BRASIL, 2019). Entende-se aqui como função principal de uma barragem o armazenamento de materiais.

No entanto, tal processo de descaracterização exige mecanismos que garantam a segurança de seus operários e de todos aqueles que estão a jusante da barragem. Por isso, a mesma resolução apresenta como objetos mínimos do projeto de descaracterização a criação de sistemas para estabilização da barragem existente ou a construção estruturas de contenção a jusante, a fim de reduzir o dado potencial associado ao risco de rompimento.

Em vista dessa exigência, mais uma vez a análise quanto a atuação de barreiras rígidas frente ao fluxo de rejeitos provenientes de ruptura de barragem se apresenta necessária e importante, uma vez que a avaliação numérica do comportamento da corrida de lama de rejeitos é essencial para que sejam dimensionadas as estruturas de mitigação dos impactos.

### **2.3 BARREIRAS**

A fim de evitar ou reduzir os danos causados por movimentos de massa, algumas medidas de proteção já foram adotadas no Brasil e em outros países e entre elas estão incluídas as técnicas de estabilização do material, a instalação de barreiras, a construção de bermas de deflexão e cercas de enrocamento. A adoção de uma medida está atrelada ao tipo de movimento de massa e à sua aplicabilidade (SALCIARINI *et al.*, 2009).

Quando constatada a situação de risco e potencial instabilidade da massa, as técnicas de estabilização devem ser as primeiras soluções a serem aplicadas, sendo elas as medidas consideradas ativas. Quando elas passam a ser economicamente inviáveis ou tecnicamente impraticáveis é necessário realizar um trabalho defensivo com a utilização de medidas passivas a fim de reduzir os danos e prejuízos (SALCIARINI *et al.*, 2009; NUNES, 2013).

Mundialmente, as barreiras têm sido a solução defensiva mais adotada para controlar ou conter movimentos de massa, principalmente as quedas de rocha, os escorregamentos e as corridas,

com enfoque nas corridas de detritos. Elas podem ser produzidas com diferentes materiais de acordo com a forma de atuação proposta para elas (VOLKWEIN *et al.*, 2011, CANELLI *et al.*, 2012).

Por isso, o dimensionamento de uma nova barreira deve ser baseado em bons conhecimentos sobre o fenômeno do impacto e da energia envolvida. No caso das corridas de lama, que é movimento de massa de principal interesse para esse trabalho, o material que escoar apresenta diferentes comportamentos e estes dependem tanto dos materiais originários do fluxo quanto daqueles que foram incorporados a ele durante o escoamento. A mistura desses materiais pode, por fim, afetar a distribuição de impacto da massa na barreira (CANELLI *et al.*, 2012).

Além disso, o cuidado ao tentar compreender o mecanismo de impacto também tem relação com a possibilidade de falha da barreira que pode provocar grandes danos frente ao que era proposto quando se optou por utilizar essa solução (CANELLI *et al.*, 2012).

Diante disso, a partir de uma análise bem elaborada do escoamento da massa pode então definir qual o tipo de barreira que mais se adequa à situação.

### **2.3.1 TIPOS DE BARREIRAS**

Os princípios de utilização de barreiras para proteção contra corridas apresentam certa semelhança com as barreiras que são utilizadas contra quedas de rochas. Em alguns casos foi observado que estruturas instaladas para proteção contra quedas de rochas ocasionalmente ao serem atingidas por corridas detríticas continuavam apresentando eficácia na retenção do material (CANELLI *et al.*, 2012). Em vista disso, para reduzir os danos provocados por corridas, principalmente de detritos, desenvolveram dois tipos de barreiras: as flexíveis e as rígidas.

No caso das barreiras flexíveis, existe uma rede de anéis metálicos capazes de suportar as cargas estáticas e dinâmicas e transferir os esforços para os cabos de aço que estão ancorados nas margens dos canais de fluxo. Elas podem ainda possuir freios absorventes que são outras peças metálicas com função de sofrer alongamento para reduzir as cargas de pico durante o impacto e promover a melhor distribuição de carga na barreira (VOLKWEIN *et al.*, 2011). A Figura 2.10 apresenta dois casos onde foram utilizadas barreiras flexíveis.



Figura 2.10 – Uso de barreiras flexíveis em casos de corridas de detritos (VOLKWEIN *et al.*, 2011).

Além disso, elas podem ser dispostas no canal de forma sucessiva, com barreiras de menores dimensões, ou de forma unitária, com uma barreira de grande dimensão para conter todo o volume de detritos. As barreiras multiníveis são instaladas de forma sucessiva nos canais mostrados na Figura 2.11, permitem a contenção de maior volume de material (VOLKWEIN *et al.*, 2011).



Figura 2.11 – Casos em que foram instaladas barreiras multiníveis (VOLKWEIN *et al.*, 2011).

Enquanto isso, as barreiras rígidas podem ser dimensionadas como muros de contenção ou como muros de gravidade (Figura 2.12). Elas têm sido muito utilizadas na Áustria, na China e no Japão para proteção frente às decorrentes corridas e quedas de rochas (ALBABA *et al.*, 2015). No Japão, por exemplo, onde ocorrem diversas corridas de lama por derramamento vulcânico, essas estruturas são adotadas com função de dissipação de energia do escoamento e também como contenção de material (SABO PUBLICITY CENTER, 2001).

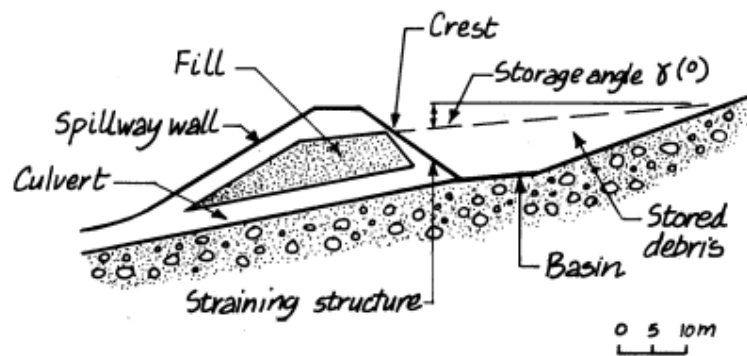


Figura 2.12 – Seção típica de tipo de barreira rígida (VANDINE, 1996)

Segundo Znamensky e Tamada (2003), esse último tipo de barreiras pode ter função de dissipação de energia, seleção granulométrica, retenção seletiva das corridas e de retenção total das corridas. Esses autores ainda dizem que elas já são construídas com enrocamento pesado, concreto armado (*Sabo Dams* ou Barreiras de Sabo) e até mesmo com estacas pranchas metálicas formando uma parede preenchida por areia e enrocamento. Nas Figuras 2.13 e 2.14 são mostrados alguns exemplos de barreiras rígidas.

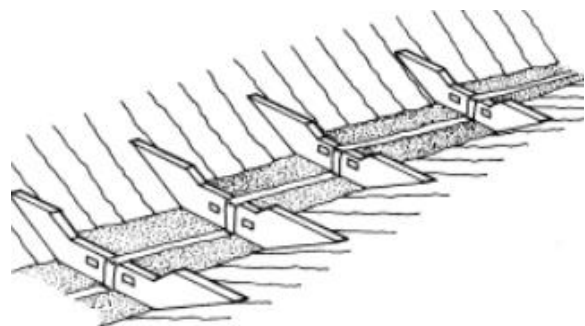


Figura 2.13 – Barreiras rígidas atuando de forma unitária ou em cascata (VANDINE, 1996; WAGNER, 2017)





Figura 2.14 – Exemplos de barreiras rígidas (HÜBL *et al.*, 2009)

### 2.3.2 PROCESSO DE DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento desse tipo de barreira requer a previsão quantitativa do volume da massa que será armazenada, da velocidade do movimento e da carga que será transmitida à barreira tanto no momento de impacto quanto na condição de repouso do material (SALCIARINI *et al.*, 2009).

Na prática, é muito difícil obter essa velocidade para o fluxo real em campo. Algumas das equações propostas para estimar os valores de velocidade para o fluxo foram calibradas por meio de ensaios em escala de bancada, pela vazão de um fluido que escoava por uma seção com dimensões conhecidas, inclinação constante e regular, parâmetros granulométricos controlados e instrumentação para medição de propriedades de interesse (RICKENMANN, 1999). Outras equações foram calibradas por retro análise das corridas, o que as tornou inadequadas para casos em que a topografia, a rugosidade da superfície de escoamento ou as dimensões das partículas se diferem muito daquelas para as quais foram criadas as equações.

Para a proposta desta pesquisa, a existência dessas equações permite a realização de pré-dimensionamento da geometria das barreiras que serão dispostas na região a jusante da barragem, ainda com consideráveis simplificações. Dessa forma, entre as formulações criadas para estimar força de impacto do fluxo foram escolhidas para serem descritas aqui aquelas propostas por Kwan (2012).

No relatório produzido por Kwan (2012), foram seguidas as normas austríacas, chinesas, norma técnica do Japão e norma técnica de Taiwan, todas para suplementar o conhecimento em projetos de barreiras rígidas resistentes a detritos.

A carga de impacto de detritos é dada por:

$$F = \alpha * \rho * v^2 * \text{sen}(\beta) * h * w \quad (1)$$

Onde:

$\alpha$ : coeficiente de pressão dinâmico

$\rho$ : densidade do fluxo de detritos (em kg/m<sup>3</sup>)

$v$ : velocidade dos detritos no impacto (em m/s)

$h$ : espessura da lâmina de corrida dos detritos (em m)

$w$ : largura de fluxo dos detritos (em m)

$\beta$ : ângulo entre a face de impacto da barreira e a direção do movimento dos detritos

Caso seja possível obter por meio de métodos numéricos os valores para espessura do fluxo ( $h$ ), velocidade da corrida ( $v$ ) e largura do fluxo de detritos, esses devem ser os valores implementados nessa equação. Devem ser realizadas combinações entre esses parâmetros para obter o resultado mais adequado, uma vez em que a velocidade máxima não ocorre juntamente com a espessura máxima de lâmina do fluxo, por exemplo, e o cálculo com esses valores máximos resultaria numa carga muito elevada.

A altura da barreira é proposta com base no princípio de energia, dado por:

$$H = h + \frac{v^2}{2 * g} \quad (2)$$

Onde:

$h$ : espessura da lâmina de corrida dos detritos (em m)

$g$ : aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

$v$ : velocidade dos detritos no impacto (em m/s)

A propagação da corrida de rejeitos pode se dar por longas distâncias, a depender do volume armazenado nas barragens. Como esse volume costuma ser grande, as corridas conseguem atingir distâncias até superiores a 100 km (ROCHA, 2017). Para percursos com essas dimensões dificilmente um único modelo reológico para análise, por conta das mudanças nas tensões viscosas, turbulentas e dispersivas, mas a dificuldade em obter dados para analisar o fluxo com comportamento não newtoniano implicaria em maior chance de erro na modelação (ROCHA, 2017).

## **2.4 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA ANÁLISE DE GRANDES DEFORMAÇÕES**

Os movimentos de terra, para as análises computacionais, são caracterizados como problemas de grandes deformações. Esses tipos de problemas tiveram, por muito tempo, complicações em suas análises numéricas, que só se tornaram mais viáveis devido aos avanços tecnológicos dos computadores e ao desenvolvimento de teorias relevantes ao entendimento das grandes deformações (SHIN, 2009).

Segundo Shin (2009), para que seja possível a simulação numérica de grandes deformações o método utilizado deve ser capaz de acompanhar as variáveis de estado que são dependentes do histórico, ao mesmo tempo em que suporta as grandes distorções que ocorrerão em sua malha.

No entanto, os métodos computacionais clássicos são agrupados em lagrangeanos e eulerianos, e nestes são usadas basicamente duas entidades: as partículas do material e os nós computacionais (SHIN, 2009). Nos métodos lagrangeanos grande importância é dada às partículas, enquanto o corpo material se movimenta e, por isso, os nós computacionais acabam se movendo juntamente com as partículas. Em contrapartida, nos métodos eulerianos a atenção é dada aos nós fixos, onde são efetuados os cálculos do movimento que ocorre dentro do domínio espacial.

Por tais particularidades, esses métodos atuando separadamente costumam apresentar problemas durante as simulações. Nos métodos lagrangeanos ocorre distorção da malha e nos eulerianos é difícil definir os limites dos materiais e acompanhar as variáveis de estado no decorrer do movimento do corpo material (SHIN, 2009).

Nesse sentido, para contornar as limitações individuais dos métodos computacionais típicos, diferentes abordagens foram desenvolvidas nas últimas décadas. A dissertação apresentada por Toro Rojas (2019) sintetiza as principais e aponta entre estas o Método dos Pontos Materiais (MPM), que será utilizado durante os procedimentos desta pesquisa e que é caracterizado na próxima seção.

### **2.4.1 MÉTODO DO PONTO MATERIAL (MPM)**

O método do ponto material (MPM) adota uma perspectiva híbrida lagrangeana-euleriana para resolver problemas que envolvem grandes deformações. Nele, os corpos materiais modelados são divididos em um número finito de pontos materiais e cada ponto recebe valores de massa, aceleração, densidade, tensão e outras propriedades que são relevantes para sua caracterização.

A massa que foi atribuída a cada ponto material é transportada por ele durante todo o movimento, assim mantendo a conservação de massa no processo (ANDERSEN, S. & ANDERSEN, L., 2010).

Nesse método, o cálculo das equações de movimento, que regem a interação entre as partículas, é realizado nos nós de uma malha computacional euleriana estacionária que cobre todo o domínio espacial do problema (TORO ROJAS, 2019). Essa malha permanece constante durante todo o processo e, a cada passo da análise, as informações armazenadas são apagadas. Assim, esse recurso euleriano, que permite apagar as informações contidas no passo anterior, viabiliza a eliminação de problemas de distorção de malha, que eram provocadas pela abordagem lagrangeana (SHIN, 2009).

Além disso, as informações necessárias para resolução das equações que regem o movimento estão disponíveis nos pontos, que transportam sob a perspectiva lagrangeana os parâmetros do material. A cada etapa da simulação é feita uma interpolação dessas informações para os nós da malha e isso ocorre por meio das funções de forma que estão associadas aos nós (TORO ROJAS, 2019). Logo após, as equações são solucionadas e as novas informações dos nós são atualizadas nos pontos. De forma esquemática, a Figura 2.15 apresenta a sequência do MPM.

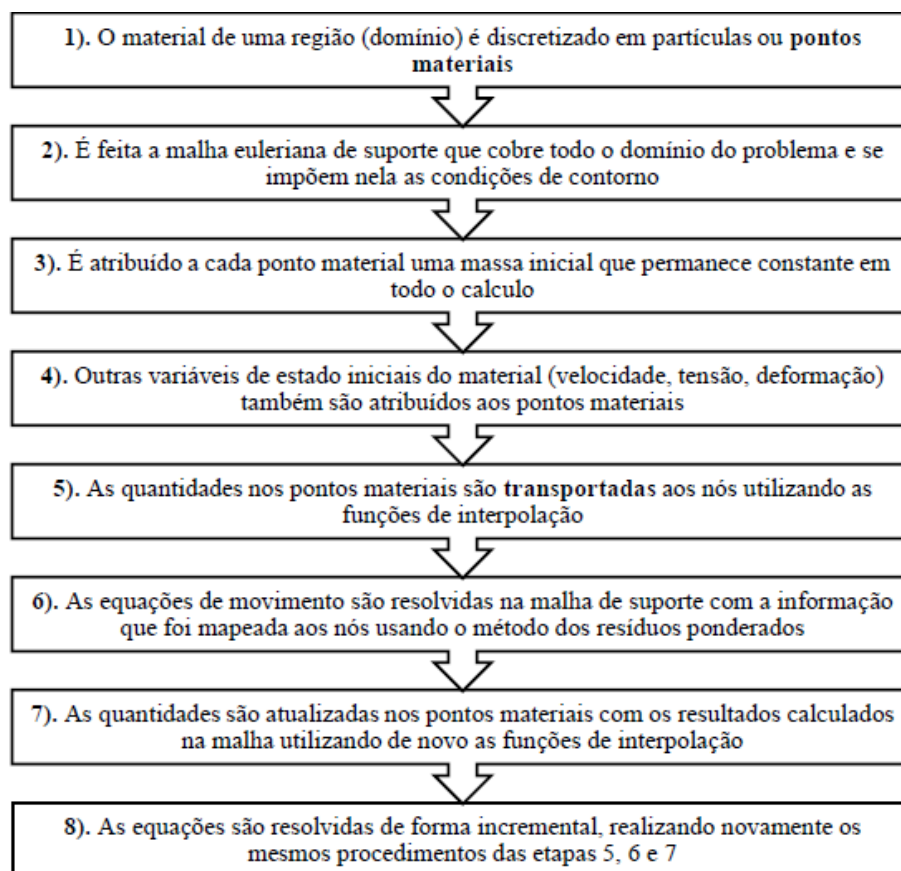


Figura 2.15 - Sequência do MPM (TORO ROJAS, 2019).

De acordo com Shin (2009), o MPM apresenta como vantagens: as possibilidades de simular problemas com grandes deformações sem que haja distorção da malha, a versatilidade para escolha do modelo constitutivo dos materiais, a conservação de massa no processo e a semelhança das teorias desse método com outros, facilitando seu entendimento. Contudo, o MPM também apresenta desvantagens, tais como a apresentação de resultados inconsistentes quando se tem pontos materiais nos limites da malha e a dificuldade em determinar o limite do material.

Ainda com essas desvantagens, o método dos pontos materiais se apresenta satisfatório por permitir a realização de análises completas, onde são avaliados os aspectos e efeitos do movimento desde o seu início até o final de seu desenvolvimento (TORO ROJAS, 2019).

Logo, o método MPM foi escolhido como método numérico para análise desse caso por apresentar confiabilidade nos resultados obtidos em simulações de grandes dimensões. Uma das simulações realizadas por Toro Rojas (2019) comparou os resultados obtidos utilizando o MPM, usando o ANURA 3D®, com os resultados do MEF associado com o ALE, no *software* ABAQUS/Explicit®, e também com uma solução analítica para um caso de deslizamento de blocos sobre plano inclinado. A resposta foi praticamente idêntica em todos eles, enquanto os blocos estavam no plano inclinado.

#### **2.4.2 SOFTWARE: ANURA 3D®**

Dentre as ferramentas computacionais disponíveis existe o *software* ANURA 3D®. Como descrito pela *Japan Sabo Association* (2001), este *software*, que implementa o método do ponto material (MPM) na forma 3D, é capaz de simular situações de grandes deformações e lidar com a interação solo-água-estrutura.

Além disso, o *software* oferece quatro tipos de modelos constitutivos: elástico-linear, Mohr-Coulomb, Mohr-Coulomb suavizado e Cam-Clay modificado. Isso permite que o comportamento dos materiais modelados seja avaliado a partir definição das propriedades relativas ao modelo constitutivo.

Ainda, um dos parâmetros que interfere bastante no comportamento do material é o fator de amortecimento, do inglês *damping*. Esse parâmetro quando grande (0,7 a 0,9) faz a simulação ter comportamento praticamente estático e quando pequeno (0,01 a 0,15) possibilita que seja então visualizado o comportamento dinâmico do material (TORO ROJAS, 2019).

Nas simulações feitas por Toro Rojas (2019) foi verificado, por meio de comparações com soluções analíticas e com simulações numéricas feitas por outros métodos, que o ANURA 3D® apresenta as condições necessárias para realizar avaliações de movimentos de massa, o que possibilita a modelação do caso proposto para esta pesquisa.

### 3 METODOLOGIA

A proposta dessa pesquisa foi avaliar numericamente os efeitos físicos que barreiras rígidas provocam no escoamento do rejeito após a ruptura de uma barragem. Para isso, foi necessário criar a geometria do problema, definir os materiais constituintes, determinar as condições de contorno, definir os dados do método e obter os dados do processamento.

Para a execução de todas essas etapas foram utilizados três *softwares*. O primeiro é o GID versão 13, um *software* comercial, utilizado no momento de pré-processamento para geração do domínio e da malha, e dele é que sai o *input* do problema para processamento. O segundo é o ANURA 3D®, *software* gratuito de processamento que utiliza o método do ponto material para análise de grandes deslocamentos. Por fim, foi utilizado um *software* também gratuito chamado Paraview, para a realização da etapa de pós-processamento. Esse último *software* produz o *output* da modelação feita e permite uma análise técnica dos resultados.

A ideia da simulação parte do princípio que o talude sofrerá ruptura por instabilidade devido ao seu próprio peso e às suas propriedades em estado crítico. Dessa forma, todo processo que gerou o modelo é apresentado com mais detalhes nos próximos subcapítulos.

#### 3.1 CRIAÇÃO DA GEOMETRIA DO PROBLEMA

Para obtenção de respostas para o problema proposto nesta monografia, foram analisados o fluxo e a colisão do rejeito na barreira posicionada de seis formas diferentes, verificando se o material ultrapassava a barreira ou ficava retido nela.

Tomando o pé da barragem como referência, a barreira foi posicionada de forma unitária em distâncias de 50, 100, 150, 200 e 250 m, e por último foi modelada com uso de duas barreiras, uma a 100 e outra a 250 m.

Inicialmente, várias simulações foram realizadas até que se pudesse adotar uma geometria de barragem que se assemelhasse a uma barragem ainda não descaracterizada, construída por alteamentos a montante, e que sofresse a ruptura e possibilitasse a análise do fluxo do material pós-rompimento. A primeira barragem hipotética desenhada, exibida na Figura 3.1, apresentava inclinação geral de 12° com 10 alteamentos e volume total de 19,8 mil m<sup>3</sup>/m, e ela, apesar de ter sido simulada com parâmetros que reduziam drasticamente sua resistência global, só apresentou ruptura localizada em um de seus alteamentos, o que inviabilizou a análise de fluxo e forçou a mudança da geometria adotada.

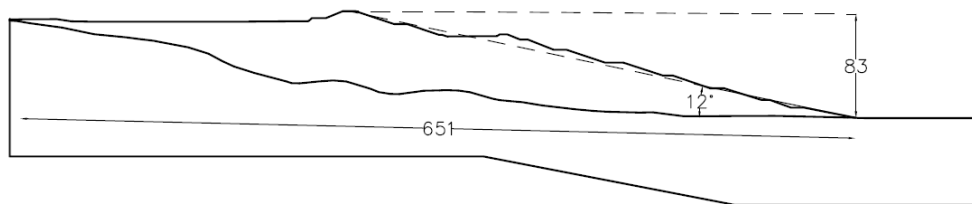


Figura 3.1 – Primeira barragem simulada: geometria descartada por não sofrer ruptura global.

A geometria final da barragem foi determinada a partir do aumento na inclinação de todos os alteamentos para que os taludes ficassem com 1:2, que é um valor próximo ao apresentado pelo relatório sobre Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão para a maioria dos alteamentos da barragem que se rompeu em 2019 (ROBERTSON *et al.*, 2019). A sua altura final foi de 83 m e a Figura 3.2 traz um comparativo entre a geometria adotada e geometria da barragem de Brumadinho, produzida a partir das dimensões apresentadas em tal relatório, mas utilizando a mesma geometria de fundação da geometria adotada.

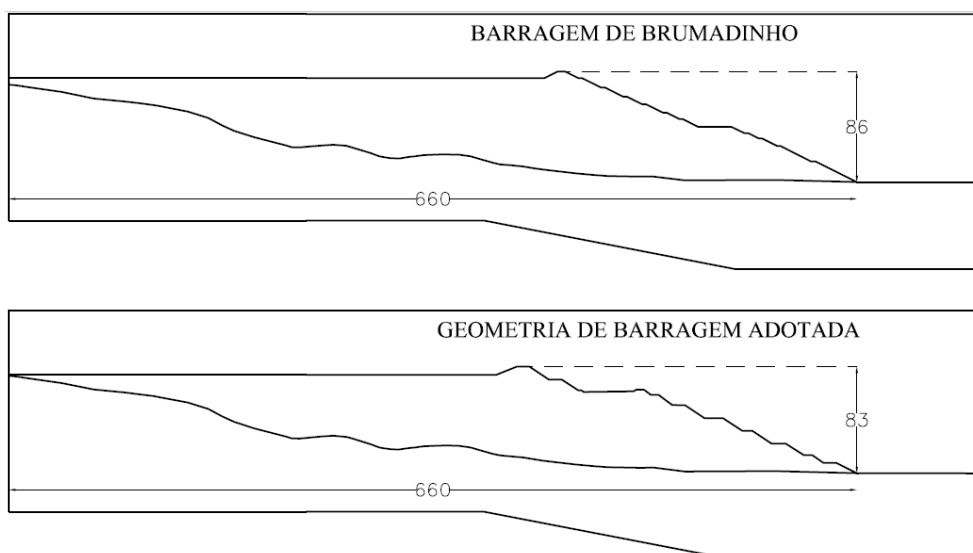


Figura 3.2 – Comparação entre a geometria da barragem de Brumadinho (adaptada do relatório) e a barragem adotada para esta pesquisa.

A criação da geometria da barreira foi feita a partir da definição do material que a formaria, pois, como mostrado na revisão bibliográfica, as barreiras rígidas podem ser produzidas com diversos materiais de alto peso específico e isso implica em vários formatos diferentes para construí-las. Para esse caso, foi adotado como material constituinte o enrocamento e o formato geométrico de trapézio, simulando uma barreira de um único alteamento.

Por ser de enrocamento, a barreira pôde ter maior inclinação, o que resultou em taludes de montante e jusante de 1:1,5 e altura de 28 m, equivalente a um terço (1/3) da altura da barragem



de rejeitos, aproximadamente. Além disso, o modelo foi delimitado na borda direita da geometria – após a barreira – a uma distância a partir do pé da barreira e isso se fundamenta na tentativa de evitar o grande aumento no número de elementos da malha do modelo caso fosse adotada uma extremidade única para atender aos leiautes com barreiras de 50 a 250 m de distância (Figura 3.3).

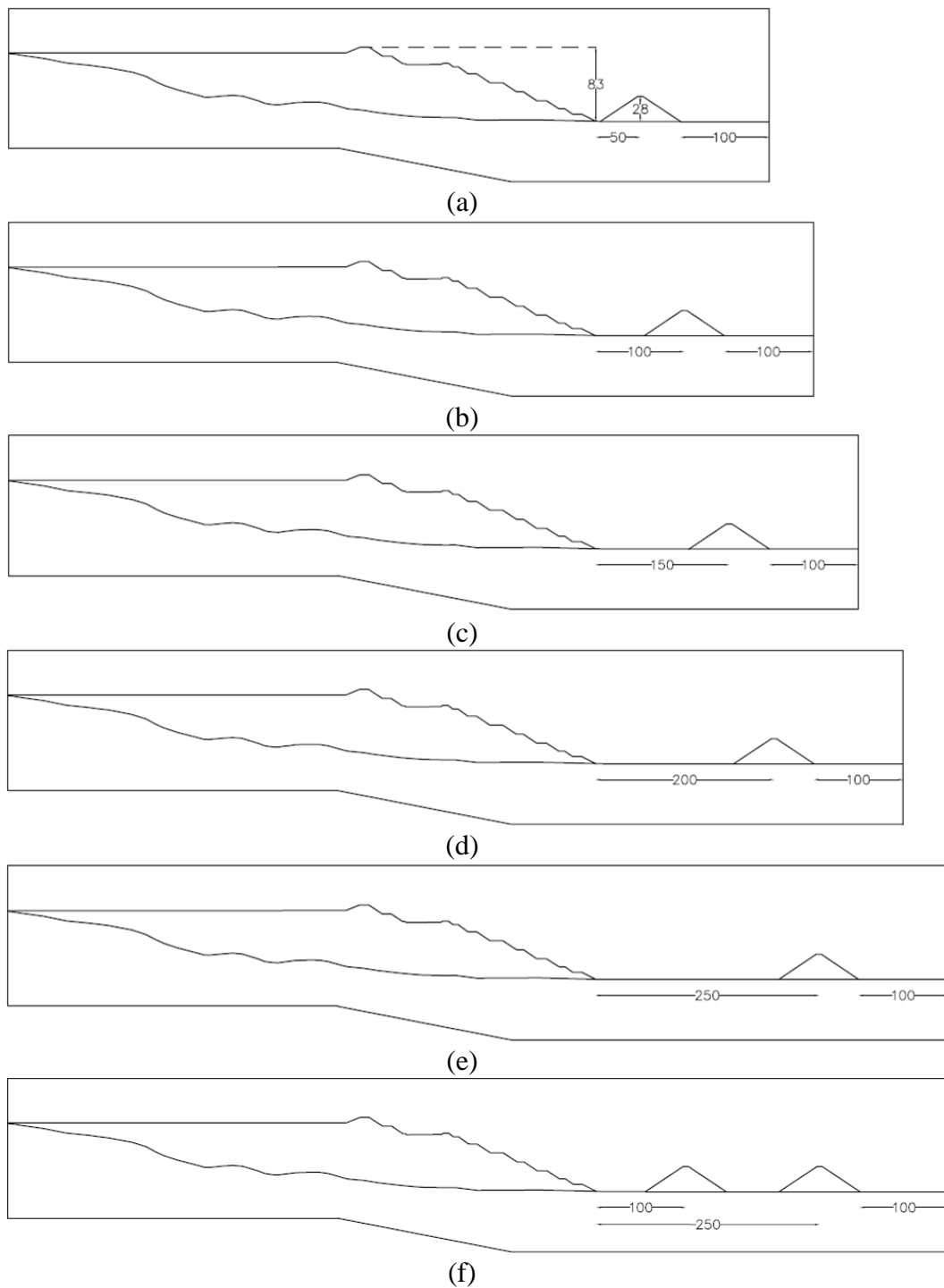


Figura 3.3 – Geometrias do modelo: barreiras posicionadas a 50 m (a), 100 m (b), 150 m (c), 200 m (d), 250 m (e) do pé da barragem, e opção combinada de barreiras a 100 e 250 m (f).

A Figura 3.3, apresentada acima, mostra que as geometrias possuem apenas duas dimensões, entretanto, todos os elementos que foram desenhados possuem espessura de 4 m. Essa medida poderia ser qualquer uma desde que maior que zero, pois, nas simulações tentou-se reproduzir uma situação 2D, porém o processamento no ANURA 3D® demanda um modelo com três dimensões. Logo, foi adotada a espessura de 4 para atender ao requisito tridimensional do programa e para facilitar a identificação das superfícies para definição das condições de contorno.

Dessa maneira, no GID a geometria é produzida ou importada de outro programa tipo CAD em formato 2D. Baseadas nessa representação de linhas e pontos, são geradas então as superfícies e os volumes, como é apresentado na Figura 3.4. A partir desse passo são atribuídos parâmetros aos volumes.

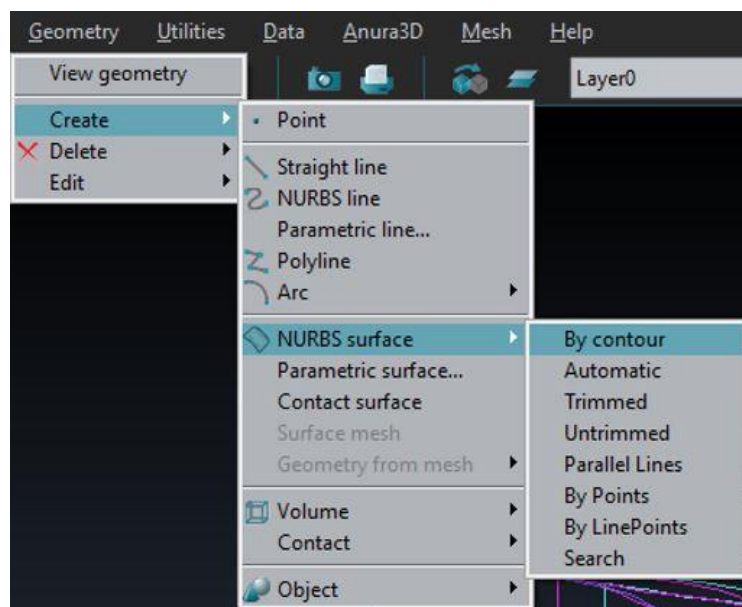


Figura 3.4 – Ferramentas de criação da geometria do modelo através do GID.

### 3.2 DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS

Todos os materiais presentes no modelo – rejeito da barragem, enrocamento da barreira e solo de fundação – foram definidos como material seco, como forma de simplificação para o processamento. Além disso, o material de toda a barragem foi considerado homogêneo, onde tanto os alteamentos quanto o rejeito armazenado possuem as mesmas propriedades e essa mesma consideração foi feita para a totalidade da barreira e para toda a região da fundação.

Dessa forma, seguindo os intervalos de valores descritos na Seção 2.2.1 para as propriedades de rejeitos, foram definidas as propriedades do material da barragem. Contudo, é importante

frisar que alguns desses parâmetros precisavam representar o instante de rompimento, o que significa reduzir drasticamente seus valores, como o que acontece com a coesão. Por isso, foram atribuídos valores de ângulo de atrito e coesão com base na referência de parâmetros críticos apresentados em Toro Rojas (2019), que permitiram o material se comportar como um fluido, ou seja, sofrer a ruptura e iniciar fluxo em direção às barreiras.

Em contrapartida, na fundação as propriedades do solo foram escolhidas de forma oposta à escolha feita para o rejeito. Nesse modelo a fundação não representa um elemento de interesse para estudo, apenas possibilita a redução dos efeitos de borda existentes nos métodos numéricos. Dessa forma, a fundação foi modelada como material de rigidez muito superior aos demais para não sofrer deformação e influenciar na ruptura da barragem ou no fluxo do rejeito.

Já no caso da barreira, a literatura apresenta valores altos para módulo de elasticidade, ângulo de atrito e coesão de enrocamentos, o que reflete na resistência e na estabilidade do elemento construído. Os valores adotados para as propriedades do material da barreira foram definidos por conversas com o orientador deste projeto.

Além disso, para o rejeito e o enrocamento, foi adotado Mohr-Coulomb como modelo constitutivo para descrever a resposta dos materiais sólidos. Já para o solo de fundação, a opção escolhida foi Linear Elástica, pois não fazia parte do escopo deste projeto e nem era de interesse para essa pesquisa avaliar a ruptura do material da fundação. Dessa forma, a Tabela 3.1 apresenta as propriedades definidas para todos os materiais do modelo.

Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais existentes no modelo

Parâmetro	Material		
	Rejeito	Fundação	Barreira
Condição do material	Seco	Seco	Seco
Porosidade (n)	0,46	0,46	0,46
Peso específico ( $\gamma$ )	25 kN/m <sup>3</sup>	28 kN/m <sup>3</sup>	22 kN/m <sup>3</sup>
Coefficiente de empuxo ao repouso (k0)	0,5	0,5	0,5
Modelo constitutivo	Mohr-Coulomb	Linear elástico	Mohr-Coulomb
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,42	0,30	0,30
Módulo de elasticidade efetivo (E')	30 000 kPa	300 000 kPa	50 000 kPa
Coesão efetiva (C')	0 kPa	-	10 kPa
Ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ )	8°	-	37°
Ângulo de dilatância ( $\Psi$ )	0°	-	0°
Resistência à tração	0 kPa	-	0 kPa

Enquanto isso, no *software* os materiais foram criados de acordo com os dados apresentados na Tabela 3.1 e atribuídos separadamente aos volumes, como mostra a Figura 3.5. Vale ressaltar que não foram adicionadas propriedades de contato na interface dos materiais.

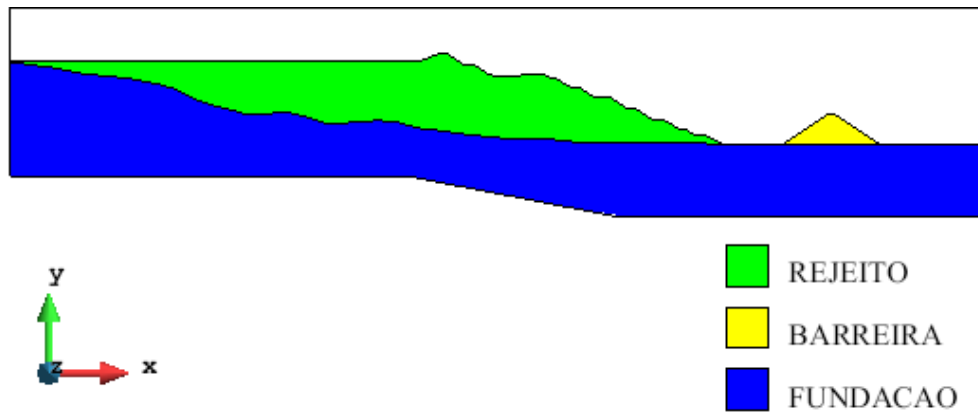


Figura 3.5 – Atribuição de materiais aos volumes do modelo.

A primeira simulação foi realizada com um modelo sem barreira, utilizando os mesmos dados apresentados na Tabela 3.1, para servir como referência para os resultados das barreiras rígidas.

### 3.3 DADOS DO MÉTODO MPM E CONDIÇÕES DE CONTORNO

A especificação da quantidade de pontos materiais por célula é indispensável para o MPM foi baseada na metodologia apresentada em Toro Rojas (2019), de forma mais específica, na análise de sensibilidade da discretização com as simulações de 1, 4 e 8 pontos materiais por elemento. Segundo a autora, a variação da quantidade de pontos materiais não representa variação significativa na velocidade de um ponto em movimento, o que resulta em variação desprezível ao deslocamento do mesmo ponto quando se altera a quantidade de pontos materiais. Dessa forma, foi selecionada a quantidade de 4 pontos materiais por elemento para os volumes da barragem, da barreira e da fundação, como é exibido na Figura 3.6.

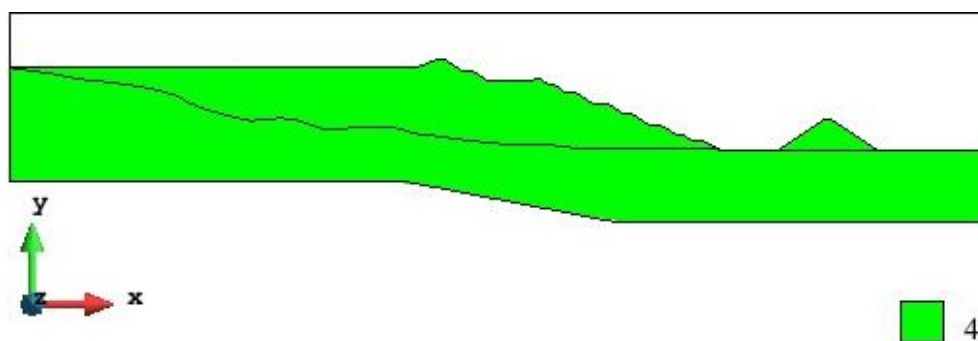


Figura 3.6– Quantidade de pontos materiais por elemento

Como condições de contorno, restringiu-se os deslocamentos de profundidade ( $Z=1$ ) em todos os planos, além de restringir os deslocamentos verticais ( $Y=1$ ) nos planos superior e inferior do problema e os horizontais ( $X=1$ ) nos dois planos laterais, como mostra a Figura 3.7.

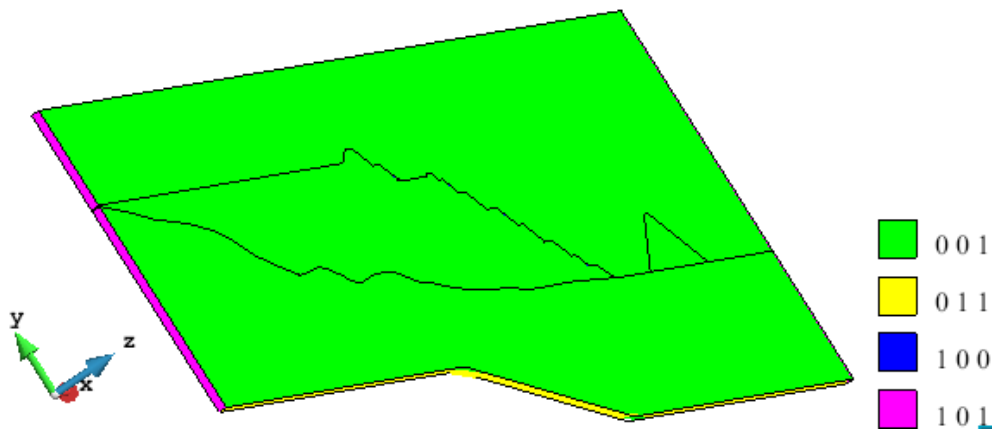


Figura 3.7 – Condições de contorno: restrição de deslocamento na direção Z (0 0 1 – verde), nas direções Y e Z (0 1 1 – amarelo), na direção X (1 0 0 – azul) e nas direções X e Z (1 0 1 – rosa).

### 3.4 GERAÇÃO DA MALHA E DEFINIÇÃO DE DADOS INICIAIS DE CÁLCULO

A malha foi previamente configurada para ser quadrática e gerar elementos do tipo tetraédricos. Além disso, conforme a apresentação dos tipos de malha existentes no GID no Capítulo 2, foi selecionada a malha semiestruturada por ser uma opção mais regular e com melhor adaptação dos elementos gerados aos volumes que apresentam formas irregulares.

As primeiras simulações foram realizadas com elementos de malha de 50 m e reduzida aos poucos até que a capacidade computacional se tornou muito baixa para processar os modelos criados.

Isto posto, foi gerada a malha final de fundo com elementos tetraédricos semiestruturados de aproximadamente 6 m em cada modelo. Contudo, cada geometria apresentou quantidades diferentes para o número de elementos e de nós, referentes as diferentes posições da barreira e também em relação à distância da lateral direita do modelo, que aumentou o domínio do problema com o afastamento da barreira. A Tabela 3.2 mostra a quantidade de elementos de malha em cada modelo e a Figura 3.8 apresenta de forma esquemática a malha gerada para um dos modelos.

Tabela 3.2 – Malha dos modelos

Posição da barreira	Número de elementos	Número de nós
50 m	27648	56331
100 m	29529	60144
150 m	31320	63777
200 m	32988	67161
250 m	35043	71322
100 e 250 m	35061	71358

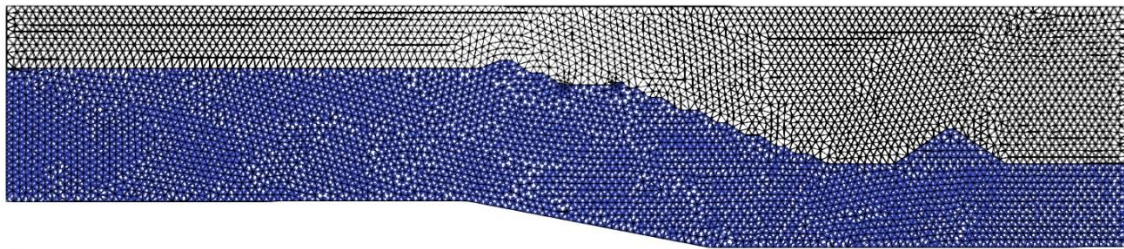


Figura 3.8 – Malha do modelo com barreira a 100 m

Diante disso, para completar o modelo restou apenas definir os dados iniciais de cálculo, disponíveis para modificação na aba apresentada na Figura 3.9. Nela pode ser vista a opção que inclui o fator de amortecimento, do inglês *damping*, como parâmetro para cálculo do modelo.

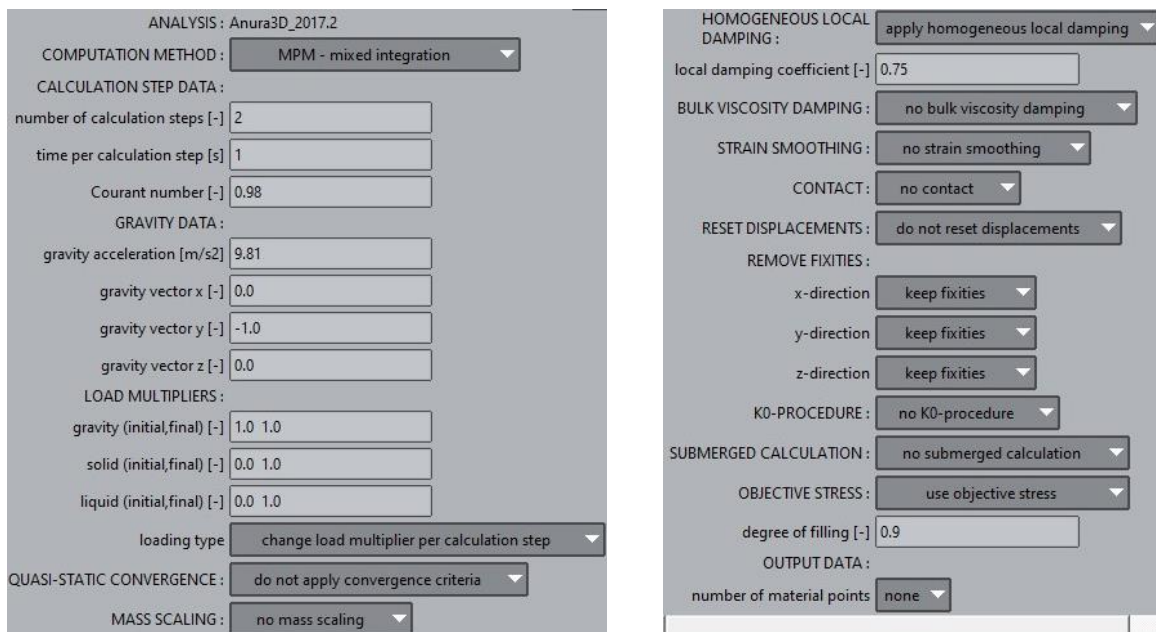


Figura 3.9 – Dados iniciais de cálculo

Assim, considerando a metodologia apresentada em Toro Rojas (2019) para modelação com

MPM, cada simulação foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa o processamento foi responsável por gerar o estado de tensão inicial do modelo, evitando-se inclusive a ruptura precoce do talude da barragem pela restrição dos deslocamentos horizontais em toda sua superfície (restrição azul oculta na Figura 3.7). Já na segunda etapa, foi removida a condição de contorno da barragem para permitir a instabilidade do maciço e também alterado o valor da propriedade de amortecimento. A Tabela 3.3 apresenta o tempo de cálculo de cada uma dessas etapas e o fator de *damping* adotado.

Tabela 3.3 – Etapas de processamento

<b>Etapa</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Número de passos</b>	2	70
<b>Tempo por passo (s)</b>	1	0,5
<b><i>Damping</i></b>	0,75	0,05

Optou-se por aplicar o fator de amortecimento inicial com valor alto (0,75) para que a primeira etapa ocorresse realmente com deslocamentos e velocidades bem baixas, simulando uma situação próxima à estática. Enquanto isso, na segunda etapa o *damping* foi alterado para um valor bem baixo (0,05) para permitir a análise do comportamento dinâmico do movimento de massa, como recomendam os desenvolvedores do ANURA 3D® (TORO ROJAS, 2019; ANURA 3D, 2018).

Dessa maneira, os arquivos iniciais foram gerados e processados até o passo dois e, em seguida, alterados para realização de mais 70 passos com os novos valores dos parâmetros apresentados.

### **3.5 EXTRAÇÃO DE DADOS DO PROCESSAMENTO**

Após o processamento, os arquivos gerados foram abertos no Paraview possibilitando a visualização do movimento e a análise de dados como deslocamento, velocidade e aceleração de um ponto variando no tempo.

Para cada simulação foram escolhidos três pontos materiais que atingiram a barreira em diferentes alturas: topo, centro e base. Em cada um desses pontos foi avaliada a velocidade e o deslocamento em relação ao tempo. Além destes, foi escolhido um último ponto, aquele que alcançou o maior deslocamento de toda a simulação, para verificar se ele atinge ou não a estabilidade do movimento dentro do intervalo total de tempo atribuído durante o processamento (Tabela 3.3).

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

A primeira simulação, que foi realizada com um modelo sem barreira, mostrou que o rejeito nas condições mencionadas anteriormente apresenta deslocamento máximo de 359 m e ao final de 86 passos de tempo de 0,5 s têm-se a situação mostrada na Tabela 4.1 e na Figura 4.1.

Tabela 4.1 – Simulação sem barreiras

<b>Número de elementos de malha</b>	14559
<b>Número de nós da malha</b>	29958
<b>Deslocamento máximo do rejeito (m)</b>	359
<b>Velocidade máxima atingida (m/s)</b>	18,6

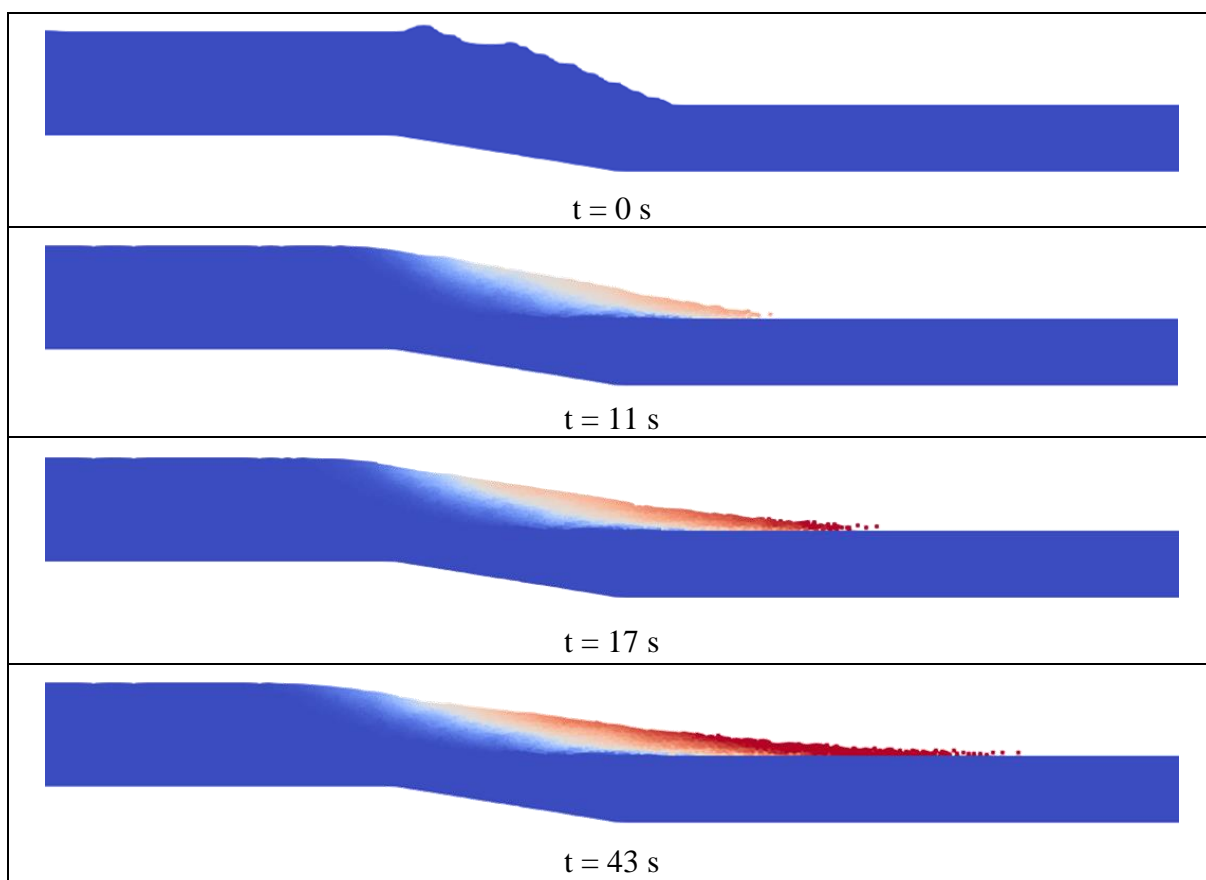


Figura 4.1 – Movimento do rejeito sem a barreira

Foram verificadas as variações de deslocamento e velocidade durante o tempo por meio da média de três pontos materiais que alcançaram as maiores distâncias após o rompimento da barragem (Figura 4.2). Os dados de deslocamento puderam ser impressos de forma original, já os dados de velocidade foram reproduzidos de forma indireta, através das informações de deslocamento e tempo. Além disso, foi utilizada a média móvel como ferramenta matemática



para suavizar a curva de velocidades, pois ela apresentava muitos ruídos.

A média móvel foi calculada para um período de 5 s e mostrou que durante um intervalo de 10 s, aproximadamente, o material escoou com velocidade média de 17 m/s, alcançando aceleração positiva máxima de 1,8 m/s<sup>2</sup> entre o quinto e o décimo segundo após o início da ruptura. Além disso, a linha de deslocamento do gráfico mostra que em 33,5 s o material que escoou de forma livre alcança a estabilidade e cessa o movimento chegando em 359 m. Desse modo, os dados obtidos serviram então como referência para análise dos resultados com as barreiras.

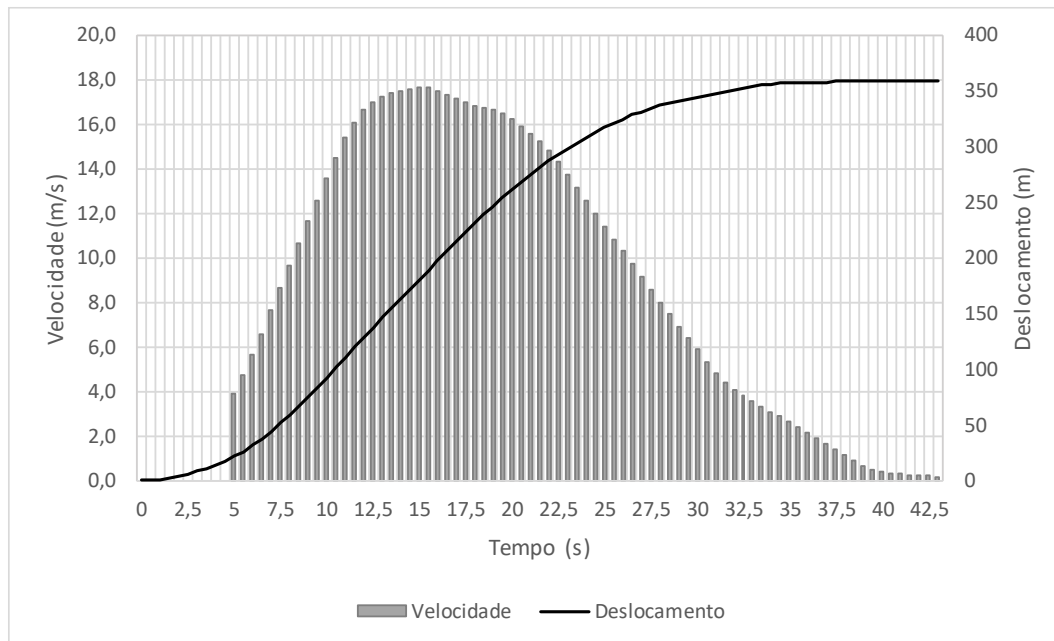


Figura 4.2 – Velocidade e distância percorrida pelo rejeito sem a barreira

Para melhor entendimento, as figuras seguintes apresentam legendas com descrição do tipo “BX” que significam: modelo com barreira em X metros.

Analisando a Figura 4.3, as cinco posições definidas para as barreiras foram eficientes na mitigação do fluxo do material. Nos modelos com barreiras posicionadas a 200 e 250 m todo o material que estava em movimento foi contido pelo elemento de barreira, com deslocamento máximo análogo à distância do eixo da barreira, como mostra a Figura 4.4. Já nas barreiras posicionadas a 50, 100 e 150 m um pouco do material conseguiu ultrapassar o elemento rígido, mas a quantidade passante foi pouco representativa em comparação com o volume de material que ficou retido.

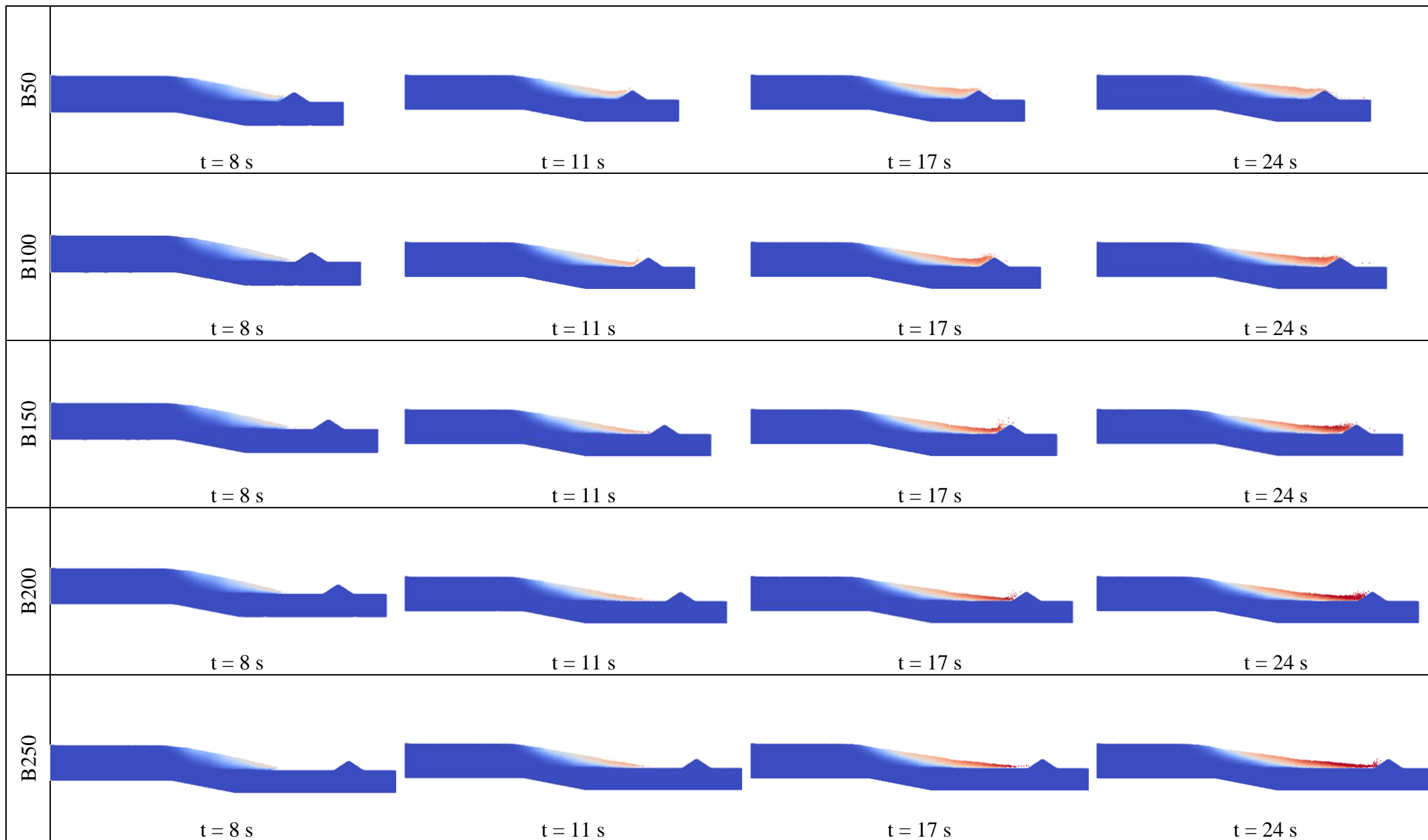


Figura 4.3 – Deslocamento dos pontos materiais em diferentes disposições de barreiras

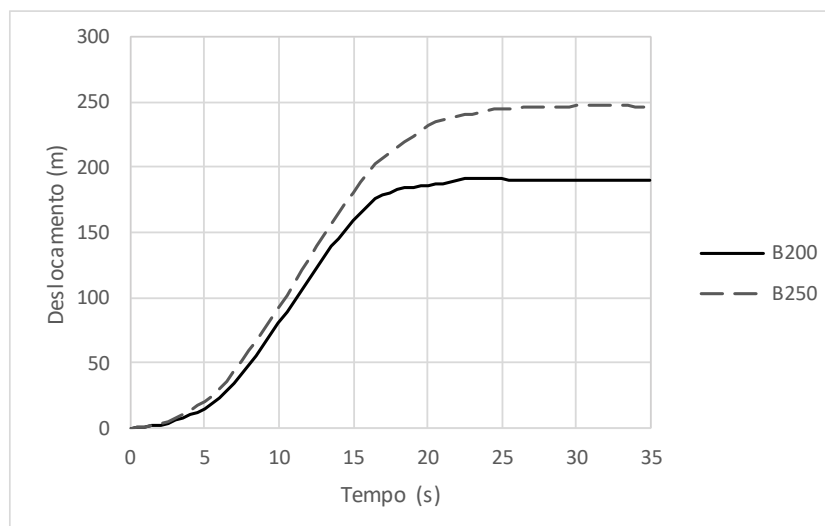


Figura 4.4 – Deslocamento do material que ficou contido nas barreiras

Pela visualização completa do movimento em cada modelo pode-se verificar em qual instante se inicia e finda o impacto do material na barreira, e essas informações estão disponíveis na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Momento de impacto do material na barreira

<b>Modelo</b>	<b>Instante inicial (s)</b>	<b>Instante final (s)</b>
B50	6,0	14,5
B100	9,0	16,5
B150	11,0	19,0
B200	15,0	23,0
B250	17,0	26,0

Nos modelos onde o material conseguiu ultrapassar a barreira (B50, B100 e B150), a distância máxima percorrida pelo material foi de 220 m, em média. Como pode-se ver na Figura 4.5, a diferença entre as distâncias alcançadas pelo material ao ultrapassar a barreira em diferentes posições é muito pequena quando considerado que o elemento de malha possui 6 m, que o afastamento entre as barreiras era de 50 m e que o MPM é um método que apresenta muitos resíduos nos cálculos, podendo até ser considerado um resultado igual para os três casos. Isso mostra que, dentro de uma certa região próxima à barragem, independentemente da posição dada à barreira, o material que a ultrapassou sofrerá um deslocamento equivalente à dissipação de sua energia cinética pela totalidade do movimento e não pela dissipação durante o movimento no trecho a montante da barreira.

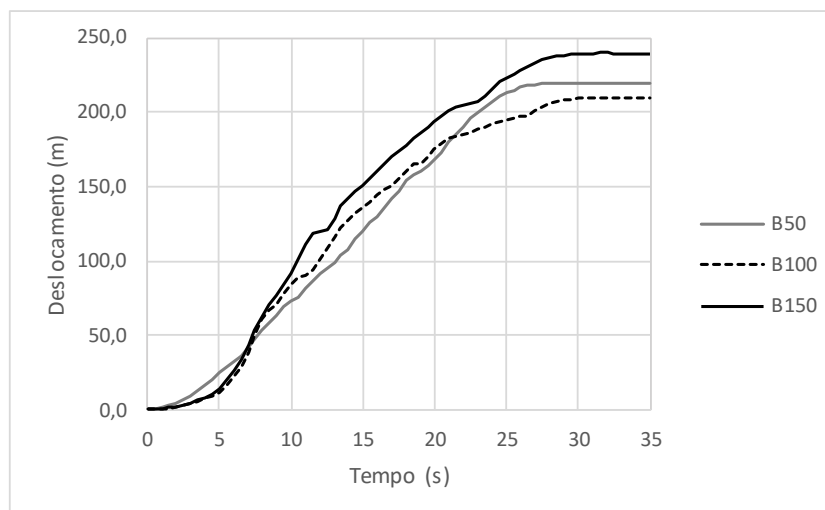


Figura 4.5 – Deslocamento do material que ultrapassou a barreira

A distância alcançada pelo material que ultrapassou as barreiras corresponde a aproximadamente 61% daquela alcançada quando o fluxo era livre de obstáculos, significando uma redução de 39% da área afetada pelo fluxo do rejeito. Esse resultado mostra que a existência de barreiras rígidas provoca dissipação de energia do material e, mesmo quando não é suficiente para contê-lo, possibilita redução da área afetada pela ruptura da barragem.

Enquanto isso, foram verificadas também as velocidades dos materiais que ficaram retidos na barreira, calculadas através da derivada do deslocamento no tempo. Os dados de deslocamento por sua vez foram obtidos por média aritmética de três pontos que se chocaram contra a barreira na base, no centro e no topo do talude de montante, e ajustados por média móvel para período de 2,5 s para suavização da curva de velocidades.

Assim, na Figura 4.6 se observa que a velocidade máxima alcançada pelo material aumenta conforme a barreira se distancia da barragem. Vale destacar também que as curvas B50, B100 e B150 representam as velocidades dos materiais que ficaram retidos, pois aqueles que conseguiram saltar a barreira não apresentam a redução de velocidade no mesmo intervalo que estes mostrados na figura.

Os modelos B200 e B250 fizeram a contenção total do material do rompimento, entretanto o B250 se apresentou menos eficiente no quesito dissipação de energia, uma vez que o impacto na barreira ocorreu quando a curva de velocidade já estava em avançado declínio ( $t = 17$  s). Esse resultado significa que a barreira posicionada a 250 m necessita ser dimensionada para uma capacidade resistente menor que a barreira posicionada a 200 m, pois os materiais que vão a atingir terão velocidades inferiores e, em consequência disso, energia cinética de impacto

menor. Nos demais modelos a velocidade é reduzida logo após o impacto.

Além disso, também pode se ver que o modelo a 250 m teve material alcançando velocidade muito próxima à velocidade de material que escoou livremente sem a adição de barreiras, mas que possibilitou a desaceleração bem mais rápida, em aproximadamente 10 s a menos.

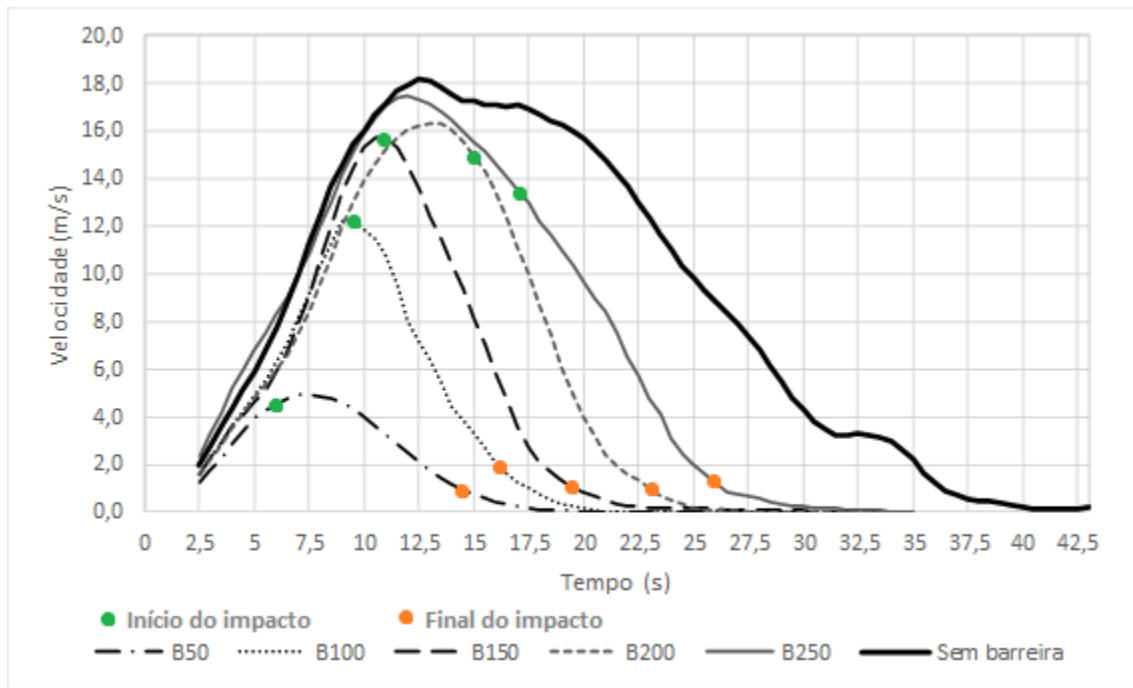


Figura 4.6 – Velocidade dos materiais contidos nas barreiras

Dessa forma, uma opção viável seria combinar barreiras para aumentar ainda mais o potencial de mitigação do movimento, como foi feito com o modelo com barreiras a 100 e 250 m. Nesse caso a primeira barreira tem função principal de reduzir a velocidade do material, diminuindo assim a energia cinética da massa em movimento, enquanto a segunda barreira funciona como uma contenção do material.

Nesse modelo (B100\_250) a dissipação de energia do material na primeira barreira foi tanta que o pouco material que passou não possuía velocidade suficiente para chegar à segunda barreira e somente ficou depositado na região (Figura 4.7).

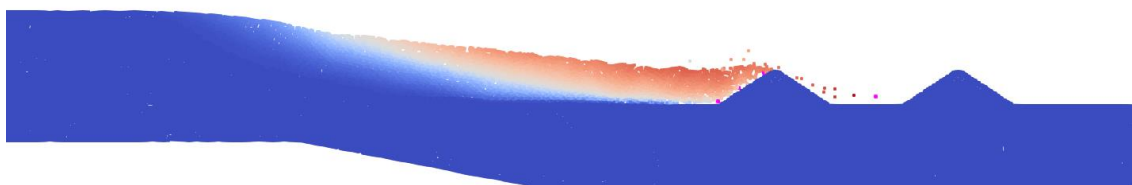


Figura 4.7 – Movimento do material com barreiras duplas

Levando em consideração todas essas informações, a barreira atendeu ao objetivo proposto e em todos os modelos esse obstáculo possibilitou mitigação do fluxo do material e redução da área afetada pelo rompimento.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com essa pesquisa constata-se que o Método do Ponto Material (MPM) foi capaz de simular o comportamento esperado para um fluxo de rejeitos após a ruptura de uma barragem. Por ser um modelo de grandes dimensões, a malha de 6 m adotada foi adequada e possibilitou a obtenção dos resultados planejados.

Como resposta ao problema apresentado foi verificado que as barreiras rígidas podem sim possibilitar a mitigação do fluxo de rejeitos mesmo quando elas não são capazes de conter todo o material. Isso foi visto nos modelos B50, B100 e B150 onde houve redução de aproximadamente 39% da distância alcançada pelo rejeito quando ele escoava livremente após a ruptura. Dessa maneira, a disposição das barreiras viabilizou a mitigação da corrida de rejeitos ao dissipar boa parte da energia cinética do material durante o impacto.

Além disso, o gráfico de velocidades indicou que conforme se aumenta a distância da barreira em relação à barragem, maior será a velocidade adquirida pelo material podendo alcançar inclusive a velocidade do material em escoamento livre de obstáculos. No entanto, isso não implica diretamente na elevação da capacidade resistente da barreira durante o dimensionado pois, como mostrado para o caso B250, o material chega a atingir uma alta velocidade, mas antes mesmo de se chocar na barreira já tem sua energia dissipada a ponto da velocidade de fluxo ser menor que aquela que atinge a B150.

Ainda, foi notado que para o caso analisado, a adoção de duas barreiras com altura de 28 m cada uma possibilita a contenção do material por dissipação de energia e por acúmulo de material, mas poderia ser uma solução mais econômica caso fossem avaliadas combinações de alturas entre as barreiras para que as duas pudessem atuar com maior efetividade para cessar o movimento do rejeito.

Por outro lado, para o comportamento observado nas simulações dos modelos não é possível afirmar se as propriedades de viscosidade do material que sofre o escoamento após a ruptura estão bem representadas, uma vez que foram utilizadas algumas simplificações nos modelos desta pesquisa. Como exemplo pode-se citar a adoção do modelo constitutivo de Mohr Coulomb para análise, assim como a não adoção de propriedades de contato na interface dos materiais, e isso pode ter afetado diretamente nas velocidades obtidas.

Além disso, é importante ressaltar que não foi considerado nenhum desnível na superfície que representasse uma topografia mais acidentada por onde o material se movimentou, o que pode ter favorecido a parada prematura do movimento do material se comparado à desastres que já

ocorreram em barragens de dimensões semelhantes.

Ainda, era de interesse dessa pesquisa realizar uma simulação acoplada dos modelos, entretanto, a grande quantidade de elementos de malha somada a este processo de cálculo mais arrojado elevou consideravelmente o custo computacional e o tempo de processamento passou a ser incoerente para esta pesquisa.

Vale lembrar que a Resolução N° 13 publicada pela Agência Nacional de Mineração proíbe a construção de qualquer tipo de estrutura dentro da Zona de Autossalvamento, assim como as barreiras rígidas apresentadas nesta monografia, porém os especialistas não recomendam o início da descaracterização de barragens e nem adoção de medidas paliativas para aumentar a segurança, como a criação de berma de jusante, quando estas são classificadas com risco alto (SCHNAID, 2020). Assim, adoção de barreiras rígidas dispostas a jusante de barragens assim classificadas poderia reduzir danos causados por rupturas, além de que as tecnologias já permitem que estruturas desse tipo sejam construídas por equipamentos não tripulados.

Por fim, com base na revisão bibliográfica, nas limitações encontradas durante as simulações e nas conclusões desta monografia, sugere-se que trabalhos futuros com temas semelhantes abordem:

- Avaliação da influência da fundação, referente a forma e parâmetros, no desenvolvimento do movimento do material.
- Comparação de diferentes formatos de barreiras rígidas com avaliação do potencial de dissipação de energia do fluxo em cada uma.
- Realização de simulação com superfície topográfica mais complexa a jusante da barragem, verificando aplicabilidade de barreiras em diferentes posições.
- Influência da adoção de propriedades de contato na velocidade do fluxo do material.
- Realização de simulações acopladas para a mesma situação hipotética, avaliando a influência disso nos resultados.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBABA, A.; LAMBERT, S.; NICOT, F. & CHAREYRE, B. (2015). Relation between microstructure and loading applied by granular flow to a rigid wall using DEM modeling. In: Granular Matter. Springer, v. 17 ed. 5. Berlin, Germany.

AMARÍLIS, B. & AMORIM, S. (2011). A tragédia da região serrana do Rio de Janeiro em 2011: procurando respostas. In: Casoteca de Gestão Pública, ENAP. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/328/2/A%20trag%C3%A9dia%20da%20regi%C3%A3o%20serrana%20do%20Rio%20de%20Janeiro%20em%202011%20procurando%20respostas.pdf>. Acesso em: 15/11/2019.

ANA (Brasil) (2013). Relatório de Segurança de barragens 2011. Brasília, DF: ANA. 95 p.

ANA (Brasil) (2015). Relatório de Segurança de barragens 2014. Brasília, DF: ANA. 156 p.

ANA (Brasil) (2017). Relatório de Segurança de barragens 2016. Brasília, DF: ANA. 225 p.

ANDERSEN, S. & ANDERSEN, L. (2010). Modelling of landslides with the material-point method. In: Computers & Geosciences, Springer, v. 36, p. 137-147.

ANURA 3D (2018). ANURA 3D MPM Software: Tutorial Manual. In: 9ª GID Convention 2018, Course, Anura 3D MPM Research Community, CIMNE. Disponível em: [https://www.gidhome.com/archive/GiD\\_Convention/2018/courses/Module\\_Anura3D/TutorialManual\\_2017.2.pdf](https://www.gidhome.com/archive/GiD_Convention/2018/courses/Module_Anura3D/TutorialManual_2017.2.pdf). Acesso em: 03/10/2019.

BARRETO, C. A. (2007). Drama em Mirai (MG): cidades de Rio também foram atingidas. 1 fotografia. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/brasil/memoria-ha-oito-anos-vazamento-de-lama-toxica-17979226>>. Acessado em: 05/12/2020.

BELL, F. G. (2007). Engineering Geology. Butterworth-Heinemann, 2 ed., 581 p. Great Britain.

BOSSI, E. T. & VILLAR, L. F. S. (2015). Avaliação do efeito da porcentagem de finos no comportamento geotécnico de rejeitos de minério de ferro, In: Anais do REGEO 2015 e do GEOSSINTÉTICOS' 2015, p. 785-792. ABMS.

BRASIL (2019). Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Mineração. Resolução N° 13, de 8 de agosto de 2019. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração. Diário Oficial da União. Brasília, [2019]. Disponível em: <http://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-13-de-8-de-agosto-de-2019-210037027>. Acesso em: 10/09/2019.

BRASIL (2020). Lei n° 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei n° 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei n° 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei n° 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei n° 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Diário Oficial da União. Brasília, [2020]. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.066-de-30-de-setembro-de-2020-280529982>. Acesso em: 10/12/2020.

CANELLI, L.; FERRERO, A. M.; MIGLIAZZA, M. & SEGALINI, A. (2012). Debris flow

risk mitigation by the means of rigid and flexible barriers – experimental tests and impact analysis. In: Natural Hazards and Earth System Sciences. Copernicus Publications. p. 1693-1699.

CARDOZO, G. & CARDOZO, C. (2016). Gestão de riscos associados a movimentos de massa. Revista Ordem Pública, v. 9, n. 1, p. 261-270.

CARVALHO, P.; SILVA, M.; ROCIO, M. & MOSZKOWICZ, J. (2014) Minério de ferro. BNDES Setorial, n. 39, p. 197-234. Rio de Janeiro, Brasil.

CASTILHO, B. M. (2017). Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da Barragem Germano. 116 f. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.

CORREA, L. (2019). Ponte ferroviária partida após o rompimento da barragem da Vale, em Brumadinho. 1 fotografia. Disponível em: < <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/25/barragem-da-vale-se-rompe-em-brumadinho-mg-fotos.ghtml>>. Acessado em: 05/12/2020.

COUSSOT, P. (1994): Steady, laminar flow of concentrated mud suspensions in open channel. Journal of Hydraulic Research, Vol. 32, p. 535-559.

CRUZ, P. T.; KANJI, M. A.; MASSAD, F. & ARAÚJO FILHO, H. A. (2003). Barragens para controle de fluxo de detritos. In: XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens.

DUARTE, A. P. (2008). Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco. Dissertação de mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 130. Belo Horizonte, Brasil.

FREITAS, R. (2015) Paracatu de Baixo foi tomado pela lama. 1 fotografia. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2018/09/13/quase-3-anos-apos-tragedia-de-mariana-projeto-para-novo-distrito-de-paracatu-de-baixo-e-aprovado.ghtml>>. Acessado em 05/12/2020.

HIGHLAND, L. M. & BOBROWSKY, P. (2008) O manual do deslizamento de terra: uma guia para entender os deslizamentos de terra. Tradução de Paulo R. Reston, Virginia, United States Geological Survey Circular 1325, 129 p.

HÜBL, J.; SUDA, J.; PROSKE, D.; KAITNAL, R. & SCHEIDL, C. (2009). Debris Flow Impact Estimation. In: International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering, A56, Ohrid Macedonia. Sep. 2009.

HUNT, R. E (2007). Landslides and Other Slope Failures. In: HUNT, R. E (2007). Geologic hazards: a field guide for geotechnical engineers. 1. ed. United States of America. p. 3-35.

IBRAM (Brasil) (2016). Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração. 1 ed. Brasília. 128 p.

INFANTI JUNIOR, N. & FORNASARI FILHO, N. (1998) Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.) (1998). Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), cap. 9, p. 131-152. São Paulo, Brasil.

JAPAN SABO ASSOCIATION (2001). Sabo in Japan. Tokyo: Sabo Publicity Center. Tokyo, Japan.

KWAN, J. S. H. (2012). Guidance on Design of Rigid Debris-resisting Barriers. In: G.E.O. Report No. 270. Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering.

LO, D. O. K. (2000). Review of natural terrain landslide debris-resisting barrier design. In: G.E.O. Report No. 104. Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, The Government of Hong-Kong

MARENCO, D. (2015). Barragem de Fundão rompeu em novembro. 1 fotografia. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/brasil/mp-de-minas-gerais-ve-falhas-em-licenciamento-da-barragem-de-fundao-18494612>>. Acesso em: 08/09/2020.

MASSAD, F.; CRUZ, P. T; KANJI, M. A. & ARAÚJO FILHO, H. A. (1997). Comparison between estimated and measured debris flow discharges and volume of sediments. In: Anais do 2º Congresso Brasileiro de Estabilidade de Encostas. ABMS/ABGE/ISSMGE, p. 213-222. Rio de Janeiro, Brasil.

MINAS GERAIS (Estado) (2016). Secretaria de Desenvolvimento Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana. Relatório: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG. Belo Horizonte, 2016.

MIRANDA, T. M. (2018) Análise do potencial de liquefação de um rejeito de minério de ferro por meio de ensaios de laboratório e de campo. 136 f. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil.

MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B. & WATTS, B. D. (2016). Relatório sobre as causas imediatas da ruptura da Barragem de Fundão. Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão. Disponível em: <<http://fundaoinvestigation.com/wp-content/uploads/general/PR/pt/FinalReport.pdf>>. Acesso em: 05/09/2019.

MOTTA, H. P. G.; ALMEIDA, M. S. S. & ESPÓSITO, T. J. (2010). Comportamento de resistência de um rejeito de Transição. In: Congresso Brasileiro de Mecânica Dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2010, Anais. Gramado, Brasil.

NUNES, A. L. L. S. (2013). Convivência com rupturas – Barreiras contra queda de blocos. In: VI Conferência Brasileira de Encostas.

O'BRIEN, J. S. & JULIEN, P. Y. (1998). Laboratory Analysis of Mudflow Properties. In: Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v.114, p. 877-887.

PAIXÃO, R.; MOTTA, M. & SANTANA, M. (2011) Megadesastre 11 da Serra Fluminense: análise preliminar da corrida de massa do córrego D'antas, em Nova Friburgo. In: 13º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo: ABGE.

PARANÁ (Estado) (2013). Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012. UFSC, 2 ed. Florianópolis, 127 p.

PEREIRA, E. L. (2005). Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob

carregamento estático. Dissertação de Mestrado em Engenharia civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 185 p. Ouro Preto, Brasil.

PERINI, D. S. (2009). Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Publicação G.DM- 180/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, p. 128. Brasília, Brasil.

RICKENMANN, D. (1999). Empirical Relationships for Debris Flows. *Natural Hazards*, v. 19, p. 47-77.

ROBERTSON, P. K.; MELO, L.; WILLIAMS, D. J. & WILSON, G. W. (2019). Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão.

ROCHA, F. F.; SANTOS, L. S.; LOPES, C. & COELHO, L. C. (2017). Critérios técnicos para realização de estudos de ruptura de barragens de rejeitos. In: II Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeitos – SGBR. CBDB/ ABMS, p. 20. Belo Horizonte, Brasil.

RODRIGUES, J. G.; AMARAL, C. & TUPINAMBÁ, M. (2011) Megadesastre 11 da Serra Fluminense: a corrida de massa do Vieira, em Teresópolis – Análise Preliminar dos condicionantes geológicos. In: 13º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo: ABGE.

SALCIARINI, D.; TAMAGNINI, C. & CONVERSINI, P. (2010). Discrete element modeling of debris-avalanche impact on earthfill barriers. In: *Physics and Chemistry of the Earth*. Journal Elsevier. Perugia, Italy.

SCHNAID, F. (2020) Barragens de rejeitos. In: SIMPÓSIO DIGITAL DE GEOTECNIA (WEBGEO). Online.

SHIN, W. K. (2009). Numerical Simulation of Landslides and Debris Flows Using an Enhanced Material Point Method. Doctoral Thesis, UMI Number: 3370565, University of Washington, 286 p. Washington, United States.

SILVA, A. P. M.; CAVALCANTE, A. L. B. & VIANA, J. P. (2012). Diagnóstico dos resíduos sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília, Brasil.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J. & AMARAL, R. (org.) (2009). Desastres naturais: conhecer para prevenir. Instituto Geológico. São Paulo, Brasil.

TORO ROJAS, D. (2019). Avaliação da influência das propriedades do material na evolução dos movimentos de massa utilizando o método do ponto material. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-322/2019, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 140 p. Brasília, Brasil.

VANDINE, D. F. (1996). Debris flow control structures for forest engineering. Research Branch, B. C Ministry of Forest. Working Paper. Victoria, British Columbia.

VOLKWEIN, A.; WENDELER, C. & GUASTI, G. (2011). Design of flexible debris flow barriers. In: *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, v. 2. Sapienza Università Editrice. Rome, Italy.

VON BOETTICHER, A.; HÜBL, J.; WENDELER, C. & VOLKWEIN, A. (2011). Modeling the impact of shallow landslides on flexible protection barriers. In: IAMG Conference. 11 p.

WAGNER, P. (2017). Sediment and woody debris transport – countermeasures. 1 photography. Bavarian Environment Agency. Germany.

WISE (2019) World Information Service on Energy Uranium Project. Chronology of major tailings dam failures. Disponível em: <<https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>>. Acesso em: 10/11/2019.

ZNAMENSKY, D. & TAMADA, K. (2003). Estruturas de controle e de manejo das corridas detríticas ou de debris flow. In: XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens.