



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE
DESATIVAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO**

HENRIQUE ANTÔNIO OLIVEIRA ARAÚJO

Brasília, 10 de dezembro de 2019

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

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

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE
DESATIVAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO**

HENRIQUE ANTÔNIO OLIVEIRA ARAÚJO

ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM GEOTECNIA

BRASÍLIA / DF

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

**AValiação DA ESTABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE
DESATIVAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO**

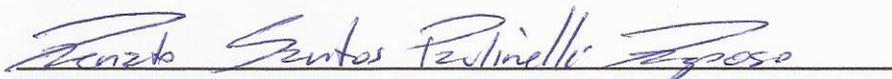
HENRIQUE ANTÔNIO OLIVEIRA ARAÚJO

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

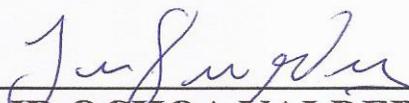
APROVADA POR:



**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, Ph.D (UnB)
(ORIENTADOR)**



**RENATO SANTOS PAULINELLI RAPOSO, Msc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**



**JAIR OCHOA VALDERRAMA, Msc (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 10 de dezembro de 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

ARAÚJO, HENRIQUE ANTÔNIO OLIVEIRA

Avaliação da estabilidade das estruturas de desativação de barragens de rejeito [Distrito Federal] 2019.

xiv, 94p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2019)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Barragem de Rejeito

2. Método do Ponto Material

3. Impacto

4. Estabilidade

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, H.A.O. (2019). Avaliação da estabilidade das estruturas de desativação de barragens de rejeito. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-AA004/19, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 94 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Henrique Antônio Oliveira Araújo

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação da estabilidade das estruturas de desativação de barragens de rejeito

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2019

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.

Henrique Antônio Oliveira Araújo

SQN 306, Bloco G, Apartamento 107, Asa Norte

70745-070 – Brasília/DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus, por ter me capacitado e me abençoado ao longo de todos os dias da minha vida. Cada desafio, se venci, foi com sua ajuda. Sua companhia e sua misericórdia me fizeram tornar uma pessoa mais forte, capaz de superar mais esta etapa da minha vida.

Agradeço também ao Professor André Assis, por todos os momentos convividos. Suas orientações foram de fundamental importância para a conclusão deste trabalho. Sempre se mostrou solícito quando precisei, com uma simpatia característica do ser humano que és. Vejo o senhor como um profissional de referência e te desejo sucesso nesta nova etapa da sua vida, já que estará se aposentando da UnB.

Meus agradecimentos ao Eng. Renato Raposo, principalmente nas minhas dúvidas com relação ao Geostudio®. Muito obrigado por me receber na sua casa nos momentos em que precisei das suas orientações. Te admiro bastante e também desejo sucesso na sua carreira profissional.

Agradeço também ao Eng. Jair Ochoa, pelas orientações no Projeto Final I.

Agradeço à Eng.^a Daniela Toro Rojas, por ter me ajudado a entender e a manusear o software Anura3D.

Agradeço aos meus colegas da graduação, com vocês tudo se tornou menos difícil. Desejo a cada um, muito sucesso e muitas conquistas.

Por último, mas não menos importante, agradeço à minha família, em especial ao meu pai, Valdemir, minha mãe, Aclésia e minha irmã, Ysadora. Tudo que faço é por vocês e para vocês. Também agradeço aos meus avós, Arlete e Antônio, que apesar de morarem longe de mim, na minha querida e amada cidade Caicó-RN, sempre me deram o amor necessário para aliviar a grande saudade que sinto de vocês.

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE DESATIVAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO

RESUMO

A produção mineral no Brasil tem sido bastante incrementada nos últimos anos, particularmente na região da província mineral do Quadrilátero Ferrífero, o que tem exigido, por parte das empresas de mineração, a adoção de políticas de controle e monitoramento dos seus sistemas de disposição de rejeitos. Uma das estruturas mais usadas para a disposição desses rejeitos são as barragens alteadas para montante, devido a sua facilidade e menor custo de construção, estando também associadas a maioria dos casos de ruptura de barragens de rejeito em todo o mundo; como exemplo podem-se citar os casos da Barragem de Fundão (2015) e de Brumadinho (2019), no estado de Minas Gerais, motivando a decisão tomada pela Agência Nacional de Mineração, em fevereiro de 2019, de proibir a utilização do método de alteamento para montante e, além do mais, concluir até 2021 o descomissionamento ou a descaracterização desse tipo de barragem existente no Brasil. Com relação ao projeto técnico de descomissionamento, uma das possibilidades é a construção de uma nova estrutura de contenção, localizada a jusante da barragem que está sendo descomissionada, que terá de suportar o impacto do fluxo de rejeitos no caso de uma eventual ruptura. Essa nova estrutura a ser dimensionada, dependerá de uma série de parâmetros geotécnicos e hidráulicos associados aos riscos provenientes do processo de descomissionamento. Sendo assim, esta monografia tem como objetivo avaliar o impacto de uma massa instável de rejeitos em uma barragem de seção homogênea que será utilizada como estrutura de desativação. Para isto, se fez uso de modelagens numéricas baseadas no Método do Ponto Material (MPM) de forma a obter o carregamento proveniente do impacto na barragem. Com o carregamento, realizou-se uma análise de estabilidade da barragem para avaliar a variação do Fator de Segurança durante o impacto. Nas simulações, duas distâncias foram consideradas entre o início do fluxo de rejeito e a barragem homogênea: 500 m e 1000 m. Para a distância de 500 m, verificou-se que a barragem não suportou o impacto, já para a distância de 1000 m, a mesma se comportou bem quanto à sua estabilidade durante o tempo de impacto analisado.

EVALUATION OF THE STABILITY OF WASTE DAM DISABLING STRUCTURES

ABSTRACT

Mineral production in Brazil has been severely increasing in the past years, particularly in the mineral province known as “Quadrilátero Ferrífero”, which has required by the mining companies to adopt control politics and the monitoring of their rejects disposal systems. Recent ruptures of these structures has mobilized great concerning by environmental organs, regulatory agencies and by project and construction companies themselves, hereby justifying the deactivation of those tailing dams. Among the methods used to the construction of tailing dams, the upstream raising method is the most employed, as also being the simpler and most cost effective. Nevertheless, this type is associated with the majority of tailing dams’ ruptures around the world, as seen in the dam of Fundão’s case, in the subdistrict of Bento Rodrigues of Minas Gerais in November 5th of 2015 and the disruption of the Brumadinho dam, in January 25th of 2019. In terms of that, ANM, through Resolution #4 of February 15th 2019, decided to prohibit the use of the Upstream Elevation Method. Furthermore, ANM intends to conclude until 2021 the decommissioning or decharacterization of dams built using this method. Regarding the technical project of decommissioning, one alternative is the construction of a new containment structure, located downstream of the dam being decommissioned, which will have to withstand the impact of the tailings flow in the event of a possible rupture. This new structure to be sized will depend on geotechnical and hydraulic parameters associated with the risks arising from the decommissioning process. Thus, this monograph aims to evaluate the impact of an unstable mass of tailings in a homogeneous section dam that will be used as a decommissioning structure. For this, numerical modeling based on the Material Point Method (MPM) was used to obtain the loading from the dam impact. With loading, a dam stability analysis was performed to assess the variation of the Safety Factor during impact. In the simulations, two distances were considered between the start of the tailings flow and the homogeneous dam: 500 m and 1000 m. For the distance of 500 m, it was found that the dam did not withstand the impact, while for the distance of 1000 m, it behaved well in its stability during the impact time analyzed.

SUMÁRIO

CAPÍTULO	PÁGINA
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.2 METODOLOGIA DA PESQUISA	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA	4
2. BARRAGENS DE REJEITO	6
2.1 ORIGEM DO REJEITO	6
2.2 DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS	7
2.3 MÉTODOS DE ALTEAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITO	10
2.3.1 MÉTODO DE MONTANTE	11
2.3.2 MÉTODO DE JUSANTE	12
2.3.3 MÉTODO DE LINHA DE CENTRO	12
2.4 COMPARAÇÕES ENTRE OS MÉTODOS DE ALTEAMENTO	13
3. BARRAGENS DE REJEITO ALTEADAS PARA MONTANTE	15
3.1 SEGURANÇA DO MÉTODO E HISTÓRICO DE ACIDENTES	16
3.2 LEGISLAÇÃO	21
3.3 DESCARACTERIZAÇÃO E DESCOMISSIONAMENTO	23
3.3.1 GESTÃO DOS RISCOS DE UMA POSSÍVEL RUPTURA	25
4. MODOS DE RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITOS	27
4.1 RUPTURA POR INSTABILIDADE DE TALUDES	27
4.1.1 ESTABILIDADE DE TALUDES NO GEOSTUDIO®	31
4.2 RUPTURA POR GALGAMENTO OU “OVERTOPPING”	32
4.3 RUPTURA POR EROSIÃO INTERNA OU PIPING	34
4.4 RUPTURA POR LIQUEFAÇÃO	37
5. MÉTODO DO PONTO MATERIAL (MPM)	44
5.1 METODOLOGIA DO MPM	49
5.1.1 FUNÇÕES DE FORMA	49
5.1.2 ATUALIZAÇÃO DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES	50
5.2 SOFTWARE ANURA 3D®	51
5.2.1 EQUAÇÕES DE GOVERNO	53
5.2.1.2 CONSERVAÇÃO DE MASSA	53
5.2.1.3 CONSERVAÇÃO DO MOMENTO	54
5.2.2 MODELOS CONSTITUTIVOS	55
5.2.2.1 MODELO CONSTITUTIVO ELÁSTICO-LINEAR	55
5.2.2.2 MODELO ELASTOPLÁSTICO COM CRITÉRIO DE RUPTURA DE MOHR- COULOMB	56
5.2.3 DAMPING	58

6	ANÁLISE PARAMÉTRICA	59
6.1	INFLUÊNCIA DA COESÃO	59
6.2	INFLUÊNCIA DO MÓDULO DE YOUNG	63
6.3	INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ATRITO	66
7	ANÁLISE DO IMPACTO	69
7.1	GEOMETRIA E CONDIÇÕES DE CONTORNO DO PROBLEMA	69
7.2	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DOS MATERIAIS	72
7.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	73
7.3.1	DISTÂNCIA COLUNA-BARRAGEM DE 500 m	73
7.3.2	DISTÂNCIA COLUNA-BARRAGEM DE 1000 m	76
8	ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA BARRAGEM	79
8.1	SEÇÃO ANALISADA, CONDIÇÕES DE CONTORNO E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	79
8.2	CONDIÇÕES DO CARREGAMENTO	80
8.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	81
9	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	86
9.1	CONCLUSÕES	86
9.2	RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da metodologia da pesquisa.....	3
Figura 2 – Esquema geral do processo de formação dos rejeitos.	7
Figura 3 - Descarga de polpa periférica por um único ponto	8
Figura 4 - Descarga periférica de polpa por espigotes	9
Figura 5 - Mecanismo clássico da variação da permeabilidade na disposição de rejeitos	9
Figura 6 - Sistemas de disposição de rejeitos – a) Hidrociclone, b) Spray bars	10
Figura 7 - Alçamento para montante	11
Figura 8 - Alçamento para jusante	12
Figura 9 - Alçamento pela linha de centro.....	13
Figura 10 - Causas de ruptura de barragens de rejeito	17
Figura 11 - Tragédia de Brumadinho	22
Figura 12 - Descaracterização de uma Barragem de Rejeitos	24
Figura 13 - Etapas de Descomissionamento de uma Barragem de Rejeitos.....	24
Figura 14 - Tensões e Resistências mobilizadas na superfície de ruptura.....	28
Figura 15 - Fatores de segurança em função de λ	32
Figura 16 - Imagem de uma barragem de aterro galgada, situada no rio Missouri, Kansas, EUA. Fonte: (Farmland, 2011)	34
Figura 17 - Processo de rompimento por piping.....	35
Figura 18 - Incidente de Piping, Barragem de Fundão-MG	36
Figura 19 - Índice de Vazios Crítico de areias fofa e compacta submetidas à esforços cisalhantes	38
Figura 20 - Linha de Vazios Crítico	38
Figura 21 - Posição da linha freática em diferentes elementos de configuração	40
Figura 22 - Resistências de escoamento (antes do acidente) e crítica não drenadas (após o acidente) para dados agregados de CPT em Fundão – 2015	41
Figura 23 – Etapas de deformação da ruptura de um muro de contenção.	45
Figura 24 - Geometria e discretização do modelo com 7438 elementos e 18251 pontos materiais. Fonte: (Gabrieli & Ceccato, 2016)	46
Figura 25 - Velocidade do fluxo granular em 8,8 m/s e tensão desviadora na barragem. Fonte: (Ceccato & Simonini, 2017)	47
Figura 26 - Velocidade do fluxo granular em 32 m/s e tensão desviadora na barragem.....	47
Figura 27 - Curva tensão-deformação para soluções analítica e numérica.....	48
Figura 28 - Ciclo computacional do MPM: (a) Um conjunto de pontos materiais representando o material, sobre a malha de fundo. (b) As equações de movimento são resolvidas na malha de fundo, utilizando o MEF langrangeano atualizado. (c) O estado dos pontos materiais é atualizado, e a malha de fundo é resetada.....	51
Figura 29 - Procedimento para executar uma simulação numérica com o Anura3D, incluindo pré e pós-processamento.	52
Figura 30 - Fase de propagação e impacto de um fluxo granular seco com a utilização do software Anura3D	53
Figura 31 - Critério de escoamento de Mohr-Coulomb: a) no plano (σ , τ); b) em plano octaédrico Fonte: (PUC-Rio, 2002).....	57
Figura 32 - Relação tensão-deformação para o modelo Mohr-Coulomb	58
Figura 33 - Análise Paramétrica.....	59
Figura 34 - Geometria da coluna de rejeito	60
Figura 35 - Restrição dos deslocamentos (condições de contorno)	61

Figura 36 - Detalhe da malha utilizada na simulação.....	61
Figura 37 - Desenvolvimento da velocidade no Ponto A para diferentes valores de coesão ...	62
Figura 38 - Desenvolvimento do deslocamento no Ponto A para diferentes valores de coesão	62
Figura 39 - Desenvolvimento final dos movimentos para as coesões indicadas	63
Figura 40 - Deslocamentos e velocidades (Ponto A): $20.000 \text{ kPa} \leq E_u \leq 60.000 \text{ kPa}$; $0 \text{ kPa} \leq c \leq 2 \text{ kPa}$	64
Figura 41 - Desenvolvimento final dos movimentos para as coesões e módulos indicados	65
Figura 42 - Desenvolvimento da velocidade no Ponto A para diferentes valores de ângulo de atrito.....	67
Figura 43 - Desenvolvimento do deslocamento no Ponto A para diferentes valores de ângulo de atrito	67
Figura 44 - Desenvolvimento final dos movimentos para os ângulos de atrito indicados	68
Figura 45 - Geometria do problema para distância de 500 m.....	70
Figura 46 - Geometria do problema para distância de 1000 m.....	70
Figura 47 - Detalhe da malha para distância Coluna-Barragem de 500 metros	71
Figura 48 - Condições de contorno (restrições)	72
Figura 49 - Impacto para distância coluna-barragem de 500m.....	75
Figura 50 - Pontos onde foram obtidos os carregamentos na barragem para distância coluna-barragem de 500 m.	75
Figura 51 - Carregamentos na barragem para distância coluna-barragem de 500 m.	76
Figura 52 - Impacto para a distância coluna-barragem de 1000 m.	77
Figura 53 - Ponto onde foi obtido o carregamento para a distância coluna-barragem de 1000 m.....	77
Figura 54 - Carregamento na barragem para distância coluna-barragem de 1000 metros	78
Figura 55 - Seção Analisada	80
Figura 56 - Disposição do carregamento para a distância coluna-barragem de 500 metros	81
Figura 57 - Disposição do carregamento para a distância coluna-barragem de 1000 metros ..	81
Figura 58 - Deslocamentos horizontais no primeiro segundo de impacto para a distância coluna-barragem de 500 m.....	82
Figura 59 - Zonas de plastificação formadas no primeiro segundo de impacto para a distância coluna-barragem de 500 m.....	82
Figura 60 - Deslocamentos horizontais durante o impacto para a distância coluna-barragem de 1000 m	83
Figura 61 - Zonas de plastificação formadas pelas tensões in situ.....	84
Figura 62 - Zonas de plastificação formadas no primeiro segundo de impacto para a distância coluna-barragem de 1000 m.....	84
Figura 63 - Fator de Segurança no primeiro segundo de impacto	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de segurança para Barragens de Rejeito.	30
Tabela 2 - Casos de ruptura por liquefação de barragens de resíduos de mineração.	43
Tabela 3 - Propriedades dos materiais.....	60
Tabela 4 - Seções Tipos e Inclinações de Taludes de Barragens Homogêneas.....	70
Tabela 5 - Propriedades dos materiais para análise do impacto	73
Tabela 6 - Dados de entrada dos materiais (Modelo Mohr-Coulomb).....	80
Tabela 7 - Variação do Fator de Segurança durante o impacto	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre as barragens de rejeitos de acordo com os métodos de alteamento Fonte: (Vick, 1983, modificado)	14
Quadro 2 - Vantagens e Desvantagens dos tipos de barragens de rejeitos.....	14
Quadro 3 - Alteamento para montante: Vantagens e Desvantagens	16
Quadro 4 - Casos de Incidentes e Acidentes em Barragens,	19
Quadro 5 - Incertezas e possíveis tratamentos.	26
Quadro 6 - Mecanismos que contribuem com os movimentos de massa.....	28
Quadro 7 - Fatores que influenciam na probabilidade de falha por piping	37

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANM: Agência Nacional de Mineração

b: vetor de força corporal

CEFEM: Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais

COPAM: Conselho Estadual de Política Ambiental

c': coesão efetiva

c_u: coesão não-drenada

DNPM: Departamento Nacional de Produção Mineral

E_f: força normal entre as fatias (Morgenstern-Price)

E: Módulo de Young

E_u: Módulo de Young não-drenado

FEAM: Fundação Estadual do Meio Ambiente

F_f: Fator de Segurança para o equilíbrio de forças (Morgenstern-Price)

F_m: Fator de Segurança para o equilíbrio de momentos (Morgenstern-Price)

FS: Fator de Segurança

FS_{adm} – Fator de Segurança admissível

FS_{mín} – Fator de Segurança mínimo

G_{ip}: Gradiente de Forma

ICOLD: *International Commission on Large Dams*

MEF: Método dos Elementos Finitos

MEL: Método do Equilíbrio Limite

MPM: Método do Ponto Material

NBR: norma brasileira

$N_i(x)$: função de forma da malha para o nó i .

PAEBM: Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração

PNSB: Plano Nacional de Segurança de Barragens

S: tensor de tensão de Cauchy

S_{ip} : Função de Forma

S_{liq}/σ'_{v0} : razão de resistência liquefeita

W: peso da fatia (Morgenstern-Price)

$X_{\tau,l}$: força de cisalhamento da fatia da esquerda (Morgenstern-Price)

$X_{\tau,r}$: força de cisalhamento da fatia da direita (Morgenstern-Price)

α_f : inclinação da base da fatia (Morgenstern-Price)

β : comprimento da base da fatia (Morgenstern-Price)

γ : peso específico

ρ : densidade

ϕ' : ângulo de atrito efetivo

ϕ_u : ângulo de atrito não-drenado

ν : coeficiente de Poisson

ε : deformação

τ : resistência ao cisalhamento

Ω_p : domínio da partícula p ;

$\chi_p(x)$: função característica da partícula para a partícula p ;

1. INTRODUÇÃO

No contexto da história brasileira contemporânea, a mineração sempre representou uma das principais atividades econômicas do país, sendo responsável pela ocupação do nosso território e pelo crescimento econômico.

Porém, se por um lado os bônus da mineração marcam nosso desenvolvimento econômico, pelo outro não podem ser esquecidos os impactos negativos e danos decorrentes da exploração mineral. A mineração tem como características intrínsecas a rigidez locacional, a modificação do meio ambiente e a geração de riscos socioambientais. Trata-se de uma atividade extrativista que produz interferências diversas no meio social, econômico e ambiental (Ribeiro & Mendes, 2013).

Devido à crescente geração de resíduos por parte da atividade mineradora, estruturas para o armazenamento desses resíduos, as chamadas barragens de rejeito, tornam-se cada vez mais necessárias. Diferentemente de barragens convencionais, que na maioria das situações barram água, as barragens de rejeito armazenam rejeitos dos processos minerais que podem variar de materiais arenosos não plásticos (rejeitos granulares) até solos de granulometria fina e alta plasticidade (lamas) (Araújo, 2006).

Nos últimos anos, após diversos acidentes causados por rupturas de barragens e pilhas de rejeito, desde instabilizações localizadas até a ruptura global de estruturas de grande porte, o processo de disposição de resíduos de mineração tem sido objeto de novas legislações e intensas fiscalizações dos órgãos ambientais, exigindo das empresas mineradoras a adoção de políticas concretas de controle dos impactos da atividade mineradora sobre o meio ambiente.

Devido aos últimos acontecimentos envolvendo a ruptura de barragens de rejeito alteadas para montante (Mariana e Brumadinho, ambas em Minas Gerais), a Agência Nacional de Mineração proibiu a construção de barragens utilizando este método de alteamento e determinou que as barragens desse tipo hoje existentes sejam descomissionadas ou descaracterizadas, isto é, cessem suas operações e sejam desativadas de forma segura. Para garantir a segurança durante a desativação dessas barragens, deve-se levar em consideração a possibilidade de uma eventual ruptura, para que assim, seja possível adotar medidas para minimizar o impacto ambiental, social e econômico. Uma dessas medidas envolve a construção de uma nova barragem que seja

capaz de resistir ao impacto de todo esse volume de rejeitos, evitando maiores problemas à jusante.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste projeto consiste na realização de simulações numéricas envolvendo o Método do Ponto Material (MPM), para que seja possível avaliar o impacto de um fluxo granular de rejeitos em uma barragem de seção homogênea. Com o estudo do impacto, uma análise de estabilidade foi realizada para verificar o comportamento da estrutura durante o carregamento dinâmico.

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre as barragens de rejeitos, incluindo o processo de construção dessas barragens, os métodos de alteamento (em especial o de montante), modos de ruptura, histórico de acidentes e a segurança das estruturas;
- Retratar a questão da desativação das barragens de rejeitos alteadas para montante;
- Fazer uma breve revisão bibliográfica acerca do método do ponto material;
- Avaliar a capacidade do método do ponto material para análise de desenvolvimento de movimentos de massa;
- Avaliar as propriedades geotécnicas que afetam o desenvolvimento dos movimentos de massa com o modelo constitutivo escolhido;
- Efetuar uma análise de estabilidade da barragem para verificar o comportamento da mesma perante o impacto estudado.

1.2 METODOLOGIA DA PESQUISA

Visando manter uma organização durante a elaboração da presente pesquisa, este trabalho foi estruturado em etapas. A sequência dos processos encontra-se registrada no fluxograma da Figura 1.

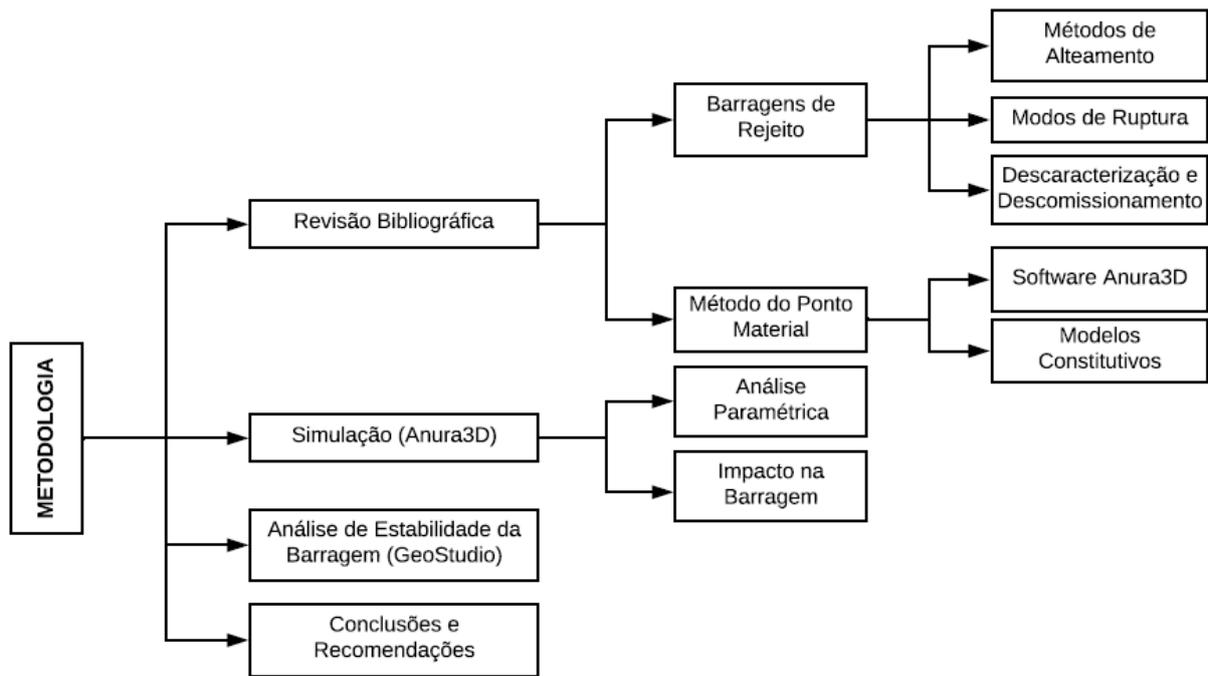


Figura 1 – Fluxograma da metodologia da pesquisa

As etapas utilizadas para a realização da pesquisa foram definidas da seguinte maneira:

1ª Etapa: Revisão bibliográfica com a finalidade de se obter informações relevantes sobre os temas abordados ao longo do trabalho, tais como:

- Barragens de contenção de rejeito da mineração: propriedades dos rejeitos, métodos de alçamento, histórico de acidentes, modos de ruptura e desativação das barragens;
- Método do Ponto Material (MPM): características intrínsecas ao método, aplicações, metodologia e, por fim, uma abordagem sobre o software utilizado nas simulações (Anura 3D®) e os modelos constitutivos adotados.

2ª Etapa: Simulações numéricas por meio do método do ponto material. Primeiramente, simulou-se o colapso de uma coluna de rejeito, fazendo-se uma análise paramétrica por meio da variação de alguns parâmetros geotécnicos do material. Por fim, realizou-se a simulação do impacto de todo esse material instável em uma barragem homogênea compactada.

3ª Etapa: Com o carregamento obtido, por meio da simulação do impacto realizado na 2ª Etapa, fez-se uma análise de estabilidade da barragem através do software GeoStudio, onde obteve-se a variação do Fator de Segurança da barragem durante o impacto.

4ª Etapa: Análise dos resultados obtidos, com as devidas conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

O projeto está dividido em nove capítulos. O primeiro capítulo consiste em uma introdução do trabalho, no qual é apresentado brevemente o tema, a metodologia, bem como os objetivos a serem cumpridos no restante do projeto.

O segundo capítulo trata da questão das barragens de rejeitos. Apresenta-se uma revisão bibliográfica acerca das propriedades dos rejeitos que compõem as barragens, os métodos de alteamento, apresentando as diferentes configurações cada uma com suas características, especificações, vantagens e desvantagens.

O terceiro capítulo trata do estudo das barragens de rejeitos alteadas para montante. Nessa parte é apresentado o conceito por trás do método, suas vantagens e desvantagens, aspectos importantes com relação à segurança e histórico de acidentes envolvendo o método de alteamento. Além disso, é visto também as diferenças entre descaracterização e descomissionamento, no processo de desativação das barragens.

O quarto capítulo apresenta a descrição dos modos de ruptura que podem vir acontecer em uma barragem de rejeitos. Assim, são abordados os mecanismos de causa e consequência dos diferentes modos de ruptura e as formas de prevenção para se evitar uma possível ruptura futura.

O quinto capítulo mostra um levantamento bibliográfico acerca do método do ponto material, onde, dentre outras coisas, são descritas as vantagens do método e suas aplicações. Aborda-se também a teoria que envolve o software que será utilizado nas simulações (Anura 3D®) e os modelos constitutivos considerados.

No Capítulo 6 é feita uma análise de alguns parâmetros de resistência do rejeito, por meio do colapso de uma coluna constituída por este material.

No Capítulo 7, tem-se os resultados encontrados para análise do impacto do fluxo de rejeitos na barragem adotada, onde duas distâncias entre a coluna de rejeitos e a barragem foram consideradas: 500 e 1000 m. É mostrado também a geometria, condições de contorno e os parâmetros geotécnicos empregados nas simulações com o software Anura 3D®.

O Capítulo 8 aborda a análise de estabilidade da barragem submetida ao carregamento do impacto, para as duas distâncias.

Por fim, no Capítulo 9 são apresentadas as conclusões e recomendações para pesquisas futuras.

2. BARRAGENS DE REJEITO

Segundo a Deliberação Normativa COPAM nº. 62, de 17 de dezembro de 2002, barragem é definida como qualquer estrutura que forme uma parede de contenção de rejeitos, de resíduos e de formação do reservatório de água. Rejeito é o material descartado, resultante do processo de beneficiamento do minério (lavagem, moagem, britagem, tratamento químico, etc.). Assim, uma barragem para armazenar rejeitos é uma obra com a finalidade de reter sólidos e líquidos gerados pela operação de usinas de tratamento de minério e outras indústrias. As características e o tipo de barragem dependem do tipo de rejeitos.

Observa-se que devido às diferenças que ocorrem nos diversos processos de beneficiamento dos minérios ou mesmo devido a variabilidade das frentes de lavra, os rejeitos gerados apresentam uma grande heterogeneidade. Assim, os projetos de disposição destes rejeitos normalmente estão associados a um baixo controle geotécnico e refletem as deficiências nas especificações técnicas que praticamente inexistem na fase de concepção e/ou durante a construção.

2.1 ORIGEM DO REJEITO

O principal objetivo da mineração é a obtenção de substâncias úteis que são encontradas em seu estado natural, para que sejam processadas e adequadas à sua destinação final. Segundo Araújo (2006) um depósito mineral é um volume rochoso no qual substâncias minerais estão concentradas em uma quantidade que foge da distribuição média presente na crosta terrestre.

Para que o minério possa ser aproveitado é imprescindível realizar a lavra de rocha ou solo sem valor econômico que ocorre dentro do corpo do minério, ou recobrimo-o. Na lavra são produzidos os estéreis do decape da mina e nos processos são produzidos os minérios, os rejeitos e seus efluentes cujo esquema geral é representado na Figura 2.

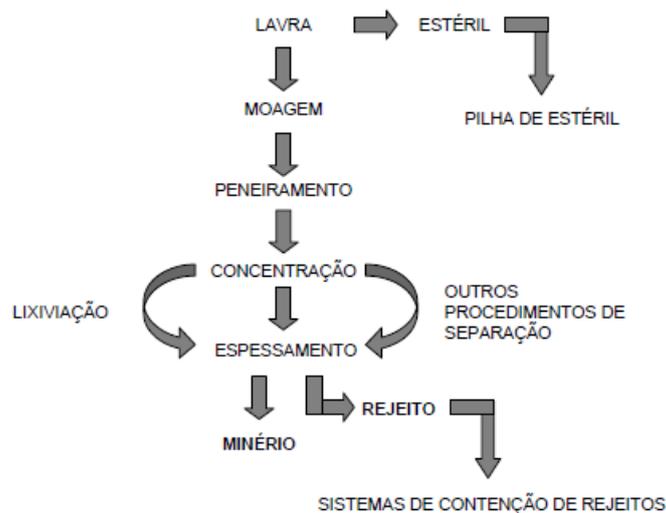


Figura 2 – Esquema geral do processo de formação dos rejeitos.

Fonte: (Presotti, 2002)

Após a lavra, o minério bruto é submetido ao beneficiamento, ou seja, tratamento para preparar granulometricamente, concentrar ou purificar os minérios, visando extrair o mineral de interesse econômico separando-o do que agora é o rejeito. A polpa (forma líquida) resultante desse processo é disposta como rejeito no sistema de armazenamento, sendo contida geralmente por diques ou barragens. Assim, a mineração é uma atividade que gera um grande volume de rejeitos, já que há apenas uma pequena quantidade do metal de interesse no mineral bruto.

2.2 DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS

Os rejeitos produzidos cada vez em maior quantidade afetam continuamente qualitativa e quantitativamente o meio ambiente, fato que gera preocupação cada vez maior nas empresas mineradoras, que por sua vez, tentam minimizar os impactos ambientais e também os custos associados à contenção dos rejeitos, buscando então novas formas de armazenamento/disposição, para maior economia e segurança (Sobrinho, 2014).

A disposição dos rejeitos pode ser feita a céu aberto, de forma subterrânea, ou subaquática. A disposição subaquática não é muito utilizada pelos problemas ambientais que gera, pois os impactos aos ecossistemas aquáticos são negativos e muitas vezes irreversíveis. Na disposição subterrânea os rejeitos são bombeados e depositados em câmaras que restam depois da extração

do minério. A disposição mais comum é, portanto, a céu aberto, e pode ser feita em pilhas controladas ou em estruturas de contenção (barragens) localizadas em bacias ou vales. A opção largamente utilizada até os dias de hoje é a deposição em sistemas de barragens (Lozano, 2006).

Existem quatro métodos de disposição de rejeitos mais comuns utilizados nos barramentos: descarga por um único ponto; descarga em vários pontos (espigotes); descarga com barras aspersoras (spray-bars) e descarga com hidrociclones.

A descarga de polpa por um único ponto (Figura 3) é bastante empregada quando o lançamento do rejeito não é feito a partir da crista da barragem, mas sim de uma posição a montante dela. Esse método não é apropriado quando há intenção de manter a linha freática e/ou a fração fina do rejeito longe do dique. Vale ressaltar que a descarga também pode ser realizada a partir da crista desde que se tome cuidado em mover periodicamente o ponto de saída da polpa de forma a evitar a elevação desigual do nível da barragem (EPA, 1994).

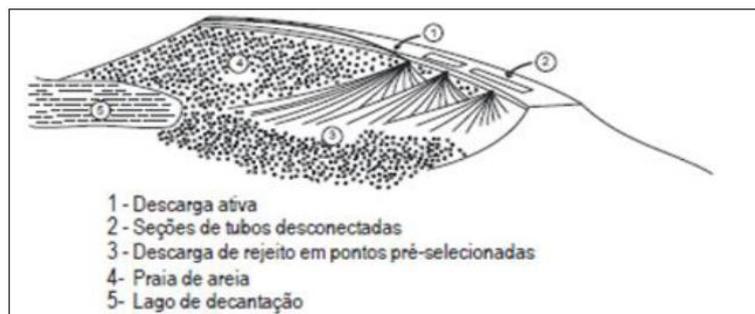


Figura 3 - Descarga de polpa periférica por um único ponto

Fonte: (Soares, 2010)

Na descarga em vários pontos por plugues ou espigotes (*spigots*) são utilizados tubos de menor diâmetro conectados à tubulação principal de rejeitos e posicionados em intervalos regulares de distância (Figura 4). Esse método cria um fluxo mais uniforme de rejeitos com a intenção de formar praias que apresentam declive suave, em que a fração mais grosseira se instala perto do ponto de descarga e a fração fina é depositado progressivamente mais longe. Como resultado dessa gradação de tamanho, a densidade, resistência ao cisalhamento, e a permeabilidade dos sólidos sedimentados diminuem com o aumento da distância a partir do ponto de descarga (Figura 5).

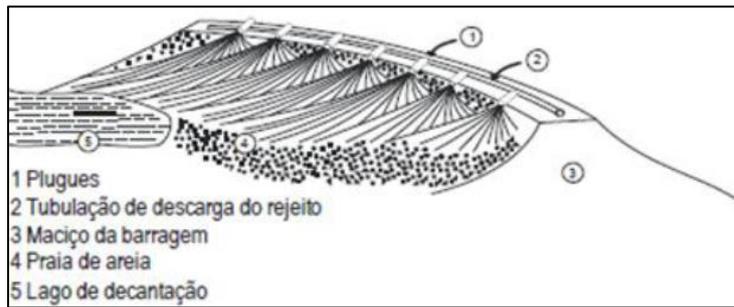


Figura 4 - Descarga periférica de polpa por espigotes

Fonte: (Soares, 2010)

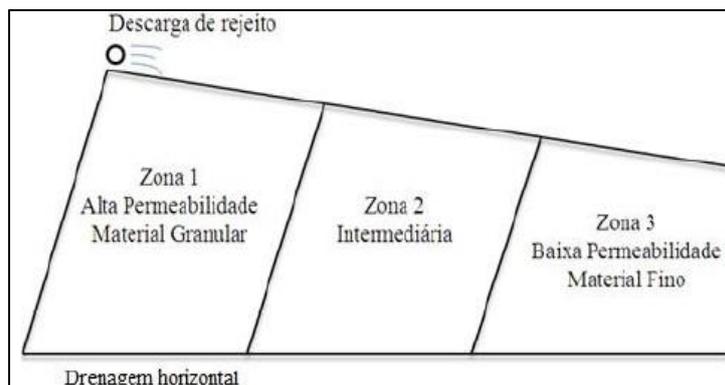


Figura 5 - Mecanismo clássico da variação da permeabilidade na disposição de rejeitos

Fonte: (adaptado de Kealy e Busch, 1971)

Esta forma de segregação do material disposto faz com que a permeabilidade junto ao maciço diminua, uma vez que a fração mais fina irá compor o barramento. Este comportamento poderá elevar a linha freática no maciço, reduzindo a estabilidade do barramento (Fonseca, 2018). Segundo Lima (2006), as lamas podem permanecer saturadas por anos, caso não haja evaporação e/ou drenagem da água resultante do processo de sedimentação e de adensamento.

A descarga feita com barras aspersoras tipo *spray bars* (Figura 6b) objetiva reduzir a pressão de lançamento do rejeito na barragem e, desta forma, diminuir o arraste de partículas e melhorar a segregação hidráulica dos rejeitos (Valerius, 2014). Neste método, tubulações com pequenos furos distribuídos por sua extensão são dispostas longitudinalmente ao longo da praia para captar o rejeito da tubulação principal e redistribuí-lo.

Por fim, tem-se a disposição de rejeitos feita por ciclonação que utiliza hidrociclones (Figura 6a). Hidrociclones são dispositivos mecânicos simples que, através da força centrífuga, são capazes de separar as partículas grosseiras das finas, presentes na polpa. Esse método apresenta duas grandes vantagens, quais sejam: diminuição do volume de rejeitos despejado nas barragens

e economia de material de construção. A fração de sólidos mais grossa poderá ser utilizada na construção dos sucessivos alteamentos da barragem.

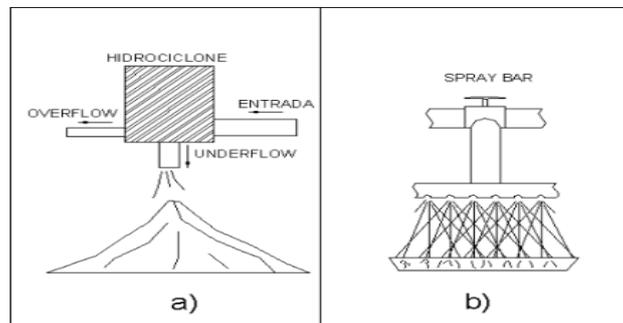


Figura 6 - Sistemas de disposição de rejeitos – a) Hidrociclone, b) Spray bars

Fonte: (Silva, 2010)

A seleção de um método ou outro para a disposição dos rejeitos dependerá:

- Da natureza do processo de mineração;
- As condições geológicas e topográficas da região;
- Das propriedades mecânicas dos materiais;
- Do poder do impacto ambiental de contaminantes dos rejeitos, e
- Das condições climáticas da região.

2.3 MÉTODOS DE ALTEAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITO

Os alteamentos podem assumir diferentes configurações, cada uma com suas características, especificações, vantagens e desvantagens. Os métodos de alteamento mais comuns são classificados em três classes: método de montante, método da jusante e método da linha de centro. Os nomes referem-se à direção em que os sucessivos alteamentos são feitos em relação ao dique inicial. A criação desse dique inicial geralmente é capaz de suportar entre dois e três anos de produção (Zardari, 2010). Após esse período, caso se julgue necessário, o volume disponível para a disposição dos rejeitos pode ser incrementado por meio dos alteamentos. A execução da obra em diferentes estágios possui motivos econômicos, pois o custo inicial de construção da barragem é diminuído, amortizando o investimento ao longo dos anos de exploração.

Destacam-se os métodos de alteamento por montante e pela linha de centro como os mais econômicos, pois apresentam redução do custo de implantação e têm o custo de construção e o

custo operacional distribuídos no tempo. Entretanto, tem na água dos poros do rejeito e do reservatório o principal elemento instabilizador. Os principais métodos de alteamento serão analisados a seguir.

2.3.1 MÉTODO DE MONTANTE

O método de montante é o mais simples, econômico e antigo método de construção de barragens. A etapa inicial na execução deste tipo de barragem consiste na construção de um dique de partida, geralmente de material argiloso ou enrocamento compactado. Depois, o rejeito é lançado em direção a montante da linha de simetria do dique (Figura 7), formando assim a praia de deposição, que se tornará a fundação e eventualmente fornecerá o material de construção para os próximos alteamentos. Este processo continua sucessivamente até que seja atingida a cota final prevista em projeto (Araújo, 2006). Esse método é caracterizado pelo menor custo de construção, maior velocidade de alteamento e pouca utilização de equipamentos de terraplenagem.

Em contrapartida, as desvantagens do método para montante se devem à menor segurança, sobretudo devido à capacidade de liquefação da massa de rejeitos saturada e em virtude da proximidade da linha freática ao talude de jusante, o que pode ocasionar o fenômeno de entubamento (*piping*). O *piping* pode ocorrer pela migração de partículas de solo devido às forças de percolação, desenvolvendo na fundação ou no maciço da barragem canais ou tubos que se interligam com o reservatório, fazendo com que a água seja capaz de atravessar determinadas regiões do talude e aparecer a montante da estrutura, enfraquecendo-a (Assis et al., 2003).



Figura 7 - Alteamento para montante

Fonte: (Acervo IBRAM, 2016)

2.3.2 MÉTODO DE JUSANTE

Na Figura 8 é apresentado o método de jusante; é chamado assim porque nos alteamentos o eixo da barragem se desloca para jusante. Para este caso, o dique deve ser dotado de drenagem interna (filtro vertical e tapete drenante) e o talude a montante é impermeabilizado com argila ou materiais sintéticos.

Segundo Klohn (1981), as vantagens inerentes ao processo de alteamento para jusante consistem no controle de lançamento e da compactação, de acordo com técnicas convencionais de construção. Assim, nenhum alteamento ou parte da barragem é construído sobre o rejeito previamente depositado. Além disso, os sistemas de drenagem interna podem ser instalados durante a construção da barragem e prolongados durante seu alteamento, permitindo o controle da linha de saturação na estrutura da barragem e aumentando sua estabilidade. A barragem também pode ser projetada e construída apresentando a resistência necessária ou requerida, inclusive resistir a qualquer tipo de forças sísmicas, desde que projetadas para tal, já que há a possibilidade de atendimento integral das especificações de projeto.

Porém, neste método maiores volumes de material para construção são requisitados, apresentando maiores custos associados ao processo de ciclonagem ou ao empréstimo de material. A área ocupada pelo sistema de contenção de rejeito é muito maior, devido ao progresso da estrutura para jusante em função do acréscimo da altura (Araujo, 2006).

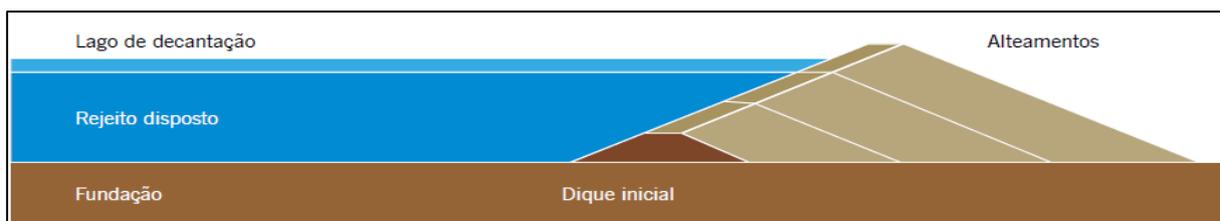


Figura 8 - Alteamento para jusante

Fonte: (Acervo IBRAM, 2016)

2.3.3 MÉTODO DE LINHA DE CENTRO

No método da linha de centro (Figura 9) é utilizada uma técnica intermediária, que associa a segurança do método para jusante com o custo e velocidade do método para montante. As construções são executadas em parte sobre a praia formada pela deposição de rejeitos, em parte

sobre o talude de jusante do alteamento anterior. Mantém-se, dessa forma, o alinhamento do eixo em relação ao dique inicial.

Segundo Assis & Espósito (1995), o comportamento geotécnico do método da linha de centro se assemelha a barragens alteadas para jusante. É válido afirmar que neste método é possível a utilização de zonas de drenagem internas em todas as fases de alteamento, possibilitando, dessa forma, o controle da linha de saturação e promovendo uma dissipação das poropressões, tornando o método apropriado inclusive em áreas de alta sismicidade.

Como grande vantagem deste método em relação ao de jusante, pode-se destacar a necessidade de um menor volume de material compactado para construção do corpo da barragem, no entanto esse tipo de estrutura pode apresentar ângulos muito inclinados na face de montante. Se a parte superior do talude perde eventualmente o confinamento, podem aparecer fissuras, causando problemas de erosão, e aumentos de poropressão (Trancoso, 1997 apud Araujo, 2006).

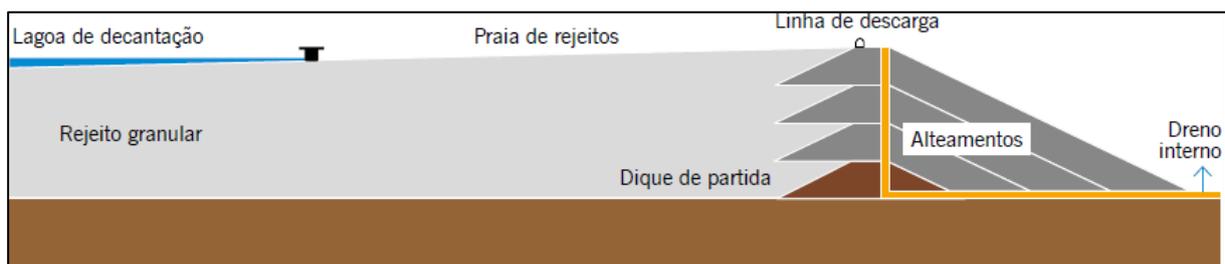


Figura 9 - Alteamento pela linha de centro

Fonte: (Acervo IBRAM, 2016)

2.4 COMPARAÇÕES ENTRE OS MÉTODOS DE ALTEAMENTO

De acordo com Araújo (2006), a escolha de um ou outro método de execução dependerá de uma série de fatores, entre eles: tipo de processo industrial, características geotécnicas e nível de produção de rejeitos, necessidade de reservar água, necessidade de controle de água percolada, sismicidade, topografia, hidrologia, hidrogeologia e custos envolvidos. Porém, como sabe-se, as barragens alteadas para montante têm sido as mais preferidas pelas empresas mineradoras, pela maior facilidade de execução e mais economicamente viáveis.

No Quadro 1 tem-se as características principais, aspectos de segurança e custos em função do volume da barragem de alteamento para montante; além disso, comparações são feitas com as barragens de terra convencionais para armazenamento de água. Já no Quadro 2 estão

sintetizados os métodos construtivos dos três tipos de barragens descritos anteriormente, além de algumas vantagens e desvantagens.

Quadro 1 - Comparação entre as barragens de rejeitos de acordo com os métodos de alteamento

Fonte: (Vick, 1983, modificado)

	Convencional	Montante	Jusante	Linha de centro
Tipo de rejeito recomendado	•Qualquer tipo	•Mais de 40% de areia •Baixa densidade de polpa para promover segregação	•Qualquer tipo	• Areias ou lamas de baixa plasticidade
Requerimentos de descarga dos rejeitos	•Qualquer procedimento de descarga	•Descarga periférica, e bom controle de água livre acumulada	•De acordo com o projeto	•Descarga periférica, conservando o eixo da barragem
Armazenamento d'água	•Boa	•Não recomendado para grandes volumes	•Boa	•Não recomendado para armazenamento permanente
Resistência sísmica	•Boa	•Fraca em áreas de alta sismicidade	•Boa	•Aceitável
Restrições de alteamento	•De uma só vez, ou em poucas etapas	•Recomendável menos de 5 a 10 m/ano, perigoso mais alto que 15 m/ano	•Nenhuma	•Pouca
Requisitos de alteamento	•Materiais naturais e/ou estéril	•Solo natural •Rejeitos ou estéril	•Rejeitos ou estéril	•Rejeitos ou estéril
Custo relativo do corpo do aterro	•Alto (3 V_m *)	•Baixo V_m	•Alto (3 V_m)	•Moderado (2 V_m)

Quadro 2 - Vantagens e Desvantagens dos tipos de barragens de rejeitos

Fonte: (Soares, 2010, modificado)

	Método de montante	Método de jusante	Método da linha de centro
Método construtivo	•Método mais antigo, e o mais empregado. •Construção de dique inicial e os diques do alteamento periféricos com material de empréstimo, estéreis da lavra ou com "underflow" de cicloneagem. •Lançamento a partir da crista por cicloneagem ou "spigots".	•Construção de dique inicial impermeável e barragem de pé. •Separação dos rejeitos na crista do dique por meio de hidrociclones. •Dreno interno e impermeabilização a montante.	•Variação do método de jusante.
Vantagens	•Menor custo. •Maior velocidade de alteamento. •Utilizado em lugares onde há limitante de área.	•Maior segurança. • Compactação de todo o corpo da barragem. •Pode-se misturar os estéreis da lavra.	•Variação do volume de "underflow" necessário com relação ao método da jusante.
Desvantagens	•Baixa segurança devido à linha freática próxima ao talude de jusante, susceptibilidade de liquefação, possibilidade de "piping".	•Necessidade de grandes quantidades de "underflow" (problemas nas 1 ^{as} etapas). •Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da construção).	• Necessidade de sistemas de drenagem eficientes e sistemas de contenção a jusante

3. BARRAGENS DE REJEITO ALTEADAS PARA MONTANTE

Como já informado, as barragens de contenção de rejeitos são estruturas construídas ao longo do tempo visando a diluição dos custos no processo de extração mineral, por meio de alteamento sucessivos.

O método de alteamento para montante consiste na construção de diques sobre as praias formadas pela decantação do próprio rejeito, deslocando o eixo da obra em direção a montante. Esse método é caracterizado pelo menor custo de construção, maior velocidade de alteamento e pouca utilização de equipamentos de terraplenagem (Thomé & Passini, 2018).

Os rejeitos são descarregados hidráulicamente, por meio de canhões ou hidrociclones, desde a crista (parte mais alta) do dique de partida, formando uma praia de rejeito que, com o tempo, será adensada e servirá como fundação e fornecerá material para futuros diques de alteamento, que serão construídos com o próprio material do rejeito. O processo é repetido até que seja atingida a cota de ampliação prevista no projeto (Rafael, 2012).

As desvantagens do método para montante (Quadro 3) se devem à menor segurança, sobretudo devido à capacidade de liquefação da massa de rejeitos saturada e em virtude da proximidade da linha freática ao talude de jusante, o que pode ocasionar o fenômeno de entubamento, quando a água é capaz de atravessar determinadas regiões do talude e aparecer a montante da estrutura, enfraquecendo-a (Thomé & Passini, 2018).

Medidas para mitigar os riscos inerentes a esse método são elencadas por Soares (2010). Dentre elas, está o controle do nível da água do reservatório mediante adoção de sistemas de drenagem que consideram não somente a vazão do rejeito, mas também a decorrente do regime pluviométrico; descarte sumário do método em regiões sujeitas a vibrações, de origem tectônica ou antrópica, como as decorrentes do uso de explosivos e intensa movimentação de equipamentos pesados, pois os tremores são gatilhos reconhecidos do processo de liquefação da massa de rejeito; evitar-se a erosão do talude de jusante, provocada pela ação da chuva, através da condução das águas por canaletas e caixas de passagem, além do uso de cobertura vegetal.

Quadro 3 - Alçamento para montante: Vantagens e Desvantagens

Fonte: (adaptado de Campos, 1986)

Método	Vantagens	Desvantagens	Observações
Montante	<ul style="list-style-type: none">- Menor custo;- Maior velocidade de construção;- Melhor aproveitamento da areia;- Menor razão V_{areia} / V_{lama};- Não existe erosão eólica e hidráulica nos taludes.	<ul style="list-style-type: none">- Superfície freática elevada;- Maior risco de ruptura por <i>piping</i>;- Superfície provável de ruptura passando pelo material de baixa resistência ao cisalhamento;- Dificuldade de implementação de sistema de drenagem eficiente.	<ul style="list-style-type: none">- Aterro hidráulico com próprio rejeito bombeado;- Diques geralmente construídos com o rejeito escavado na periferia do lago.

Tratando-se de método menos seguro em relação aos demais, o Decreto n. 46.993, de 2 de maio de 2016, do Estado de Minas Gerais, instituiu a Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragem para todos os empreendimentos que fazem a disposição final ou temporária de rejeitos de mineração em barragens que utilizem ou que tenham utilizado o método de alçamento para montante. Além disso, o decreto suspendeu a emissão de orientação básica e a formalização de processos de licenciamento ambiental de novas barragens de contenção de rejeitos nas quais se pretenda utilizar o método para montante até que o Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM defina critérios e procedimentos adicionais a serem adotados pelo empreendedor (Minas Gerais, 2016)

3.1 SEGURANÇA DO MÉTODO E HISTÓRICO DE ACIDENTES

Embora a ruptura de uma barragem de contenção de rejeitos seja um evento de baixa probabilidade, as preocupações são enormes. Quando esse evento acontece, geralmente dois são os principais fatores que podem ser indicados como causa primária, sendo eles: o advento de um fenômeno natural intenso responsável por abalar a estrutura da barragem, como eventos sísmicos; ou o mal planejamento da estrutura. Assim, as barragens requerem cuidados especiais

na elaboração dos projetos de engenharia, operação, manutenção das estruturas, bem como o descomissionamento (Duarte, 2008).

Em 2001, a Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) publicou um Boletim 121 intitulado: *Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnt from Practical Experiences* (Risco de Ocorrências de Perigo em Barragens de Rejeito, Lições Aprendidas a Partir de Experiências Práticas), em que mostra 221 registros de casos de falhas em barragens de rejeitos espalhadas pelo mundo. As principais causas de rompimento das barragens, de acordo com o histórico, são problemas de fundação, capacidade inadequada dos vertedouros, instabilidade dos taludes, falta de controle de erosão, deficiências no controle e inspeção pós-operação (Figura 10). Vale destacar que todas as causas citadas possuem relação direta com a falta de controle durante a operação das barragens de rejeito e estão associadas a problemas operacionais que envolvem a presença de água

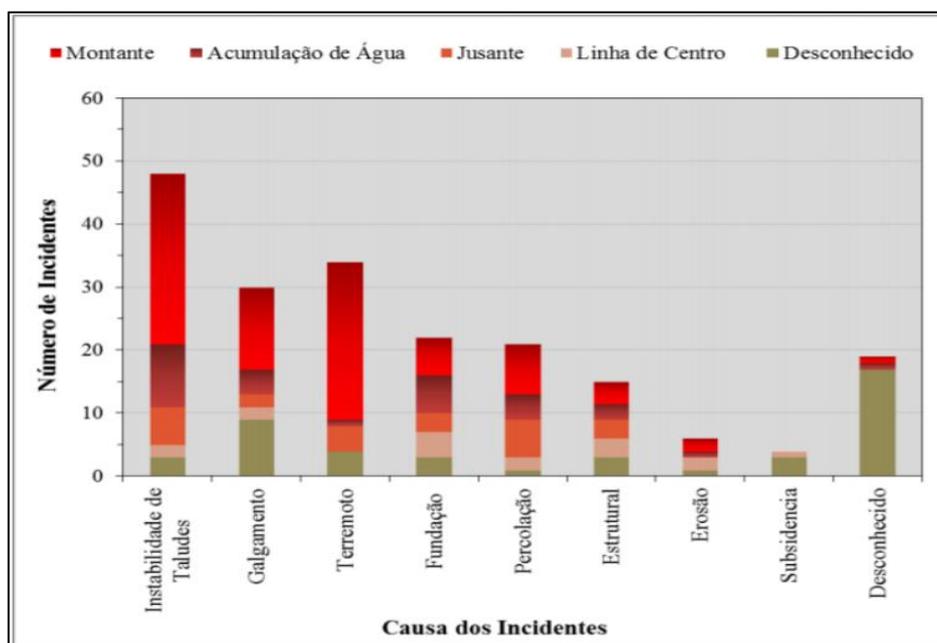


Figura 10 - Causas de ruptura de barragens de rejeito

Fonte: (ICOLD, 2001)

Como pode-se ver, os dados acima mostram, em números absolutos, que as barragens alteadas para montante detêm uma quantidade significativa dos incidentes listados pelo ICOLD. No entanto, não se pode perder de perspectiva que essa constatação era esperada, já que se trata do método mais antigo e mais utilizados pelos empreendedores.

Os especialistas apresentam o método de alteamento para montante como o mais suscetível à acidentes. Peixoto (2002) afirma que: “As barragens de rejeitos baseadas na técnica de aterro

têm proporcionado uma crescente reação dos órgãos ambientais e das comunidades afetadas, em função dos elevados riscos ambientais inerentes ao processo e as catastróficas consequências de uma ruptura. Particularmente as barragens alteadas para montante tendem a ser potencialmente críticas e a liberação descontrolada das massas retidas, em eventual ruptura, implica graves consequências não apenas nas vizinhanças do empreendimento, mas também em áreas distantes a jusante. No contexto dos casos históricos de rupturas de barragens de contenção de rejeitos constituídas pela técnica de aterro hidráulico, a liquefação estática tem sido um fator determinante”.

Países que sofrem com sismos, como é o caso de Chile e Peru, que se localizam em região do planeta marcada pelo limite de convergente das placas tectônicas Nazca e Sul Americana, não admitem essa técnica, pois o método para montante não é recomendado em zonas tectonicamente ativas.

“Embora seja o mais utilizado pela maioria das mineradoras, o método de montante apresenta um baixo controle construtivo, tornando-se crítico principalmente em relação à segurança. O agravante neste caso está ligado ao fato de os alteamentos serem realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados. Assim, sob condição saturada e estado de compacidade fofo, estes rejeitos (granulares) tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação por carregamentos dinâmicos e estáticos. Neste método construtivo ainda existe uma dificuldade na implantação de um sistema interno de drenagem eficiente para controlar o nível d’água dentro da barragem, constituindo um problema adicional com reflexos na estabilidade da estrutura.” (Araujo, 2006).

De acordo com Troncoso (1997), o método de montante para alteamento de barragens de rejeito é o mais econômico em curto prazo, pois permite obter a menor relação entre volumes de areia/lama. Ainda segundo Troncoso, rupturas por percolação e *piping* também são possíveis devido a pequena distância entre a lagoa de decantação e o talude de jusante. Esse problema pode ser evitado através de ângulos suaves na praia de deposição, segregação e sedimentação de partículas mais grossas junto à face de montante.

No Brasil o rompimento de barragens rejeitos de minérios é o mais recorrente e o número é bastante alarmante, principalmente no Estado de Minas Gerais, onde 7 barragens se romperam nos últimos 15 anos. O Quadro 4 mostra os casos de acidentes de algumas barragens no Brasil.

Quadro 4 - Casos de Incidentes e Acidentes em Barragens,

Fonte: (Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade, 2018, modificado)

Nome/Local/Data (Minério / Tipo de rejeitos)	Danos Causados
Fernandinho/rodovia Ouro Preto, 40 km de Belo Horizonte, Brasil /1984 (Ferro)	Um dique central foi construído para dividir o barramento. Rejeitos foram colocados em um, enquanto o outro foi drenado e seco. Resíduos secos então foram escavados e colocados em outro lugar. Um caminhão estava na crista e ficou preso na lama. Dois outros foram enviados para ajudar e enquanto isso acontecia, a falha do deslizamento começou. Os movimentos de rotação logo permitiram o overtopping. (ICOLD, 2001).
-----/Itabirito (MG)/05-1986 (Ferro)	Barragem de construção de alvenaria usando tijolos feitos de barro e rejeitos de minério de ferro estouraram, é dito, devido à saturação da alvenaria. (ICOLD, 2001).
Forquilha (Ferro)	O menor reservatório desse esquema de disposição estava em construção, em um vale adjacente ao topo ativo. Uma sela entre os dois vales tinha uma pequena represa para evitar transbordamento. Em um momento de nível máximo de água no reservatório superior, ocorreu uma falha de tubulação na extremidade esquerda da barragem, liberando água no reservatório inferior, provocando a perfuração da barragem de rejeitos em construção, eliminando uma quantidade considerável de aterro (ICOLD, 2001).
Rio Verde/ NOVA LIMA (MG)/2001 (Ferro)	Relatado pelos grupos formados pela SEMAD, o acidente ocorreu após obras de alteamento, elevando o nível da barragem, houve excesso de água pelo descuido com a drenagem, com isso a estrutura liquefez, ocorrendo o rompimento.

Nome/Local/Data (Minério / Tipo de rejeitos)	Danos Causados
Cataguases (MG)-03-2003 (Lixívia negra)	O Laudo 1.362/2003, do Instituto Nacional de Criminalística (INC), identificou como causas do acidente problemas como a falta de manutenção, de fiscalização e o excessivo prolongamento da vida útil da barragem, o que resultou em um processo erosivo da obra (EBC, 2018).
Mirai (MG)/2006 (Bauxita)	Após ter sido executado um alteamento da barragem, ocorreu um incidente devido a abertura de uma brecha entre as placas de concreto já submersas e o maciço, situadas na base da torre inclinada (Rocha, 2015).
Mirai (MG)/01-2007 (Bauxita)	Depois e algumas horas de chuva o nível do reservatório foi elevando-se até tingir a soleira do vertedouro (G1, 2007 apud CETEM, 2018).
B1/Itabirito (MG)/09-2014 (Ferro)	Canais subterrâneos originários de um fenômeno geológico raro, conhecido como “inversão de relevo”, podem ter levado ao rompimento da barragem B1. Foi descrito no Auto de Fiscalização nº 54.928 lavrado no dia 10/09/2014 que o rompimento da Barragem B1 provocou comprometimento do talude de jusante da Barragem B2 e todo o material das duas barragens causaram o assoreamento da Barragem B3. Ambas as estruturas se encontravam à jusante da Barragem B1 (FEAM, 2018).
Fundão/ Mariana (MG)/ 11-2015 (ferro) e Mina do Córrego do Feijão/Brumadinho (MG)/ 01-2019	As causas ainda estão sendo apuradas.

3.2 LEGISLAÇÃO

Hoje o Brasil conta com uma legislação específica que trata das barragens, a Lei 12.334/10, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Existem também outros dispositivos, como: a Portaria nº 416/12 que cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração; a Resolução nº 143, que estabelece os critérios gerais de classificação de barragens; e, por fim, a Portaria nº 526/13, que cuida dos detalhes do Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM). De acordo com a Política Nacional de Segurança de Barragens, a responsabilidade pela fiscalização dos barramentos de rejeitos de mineração passou a ser do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). A DNPM foi extinta em 2017 pela Medida Provisória nº 791 que criou a Agência Nacional de Mineração (ANM).

O rompimento da barragem de Fundão, no Complexo de Germano, situado no município de Mariana-MG, alterou profundamente a percepção do DNPM (atual ANM) quanto ao processo de trabalho de fiscalização da segurança de barragens de rejeitos da mineração. De imediato, o DNPM começou a traçar objetivos estratégicos, táticos e operacionais dado a situação enfrentada. Em resumo, foram adotadas as seguintes medidas, sendo algumas de caráter estruturante:

- Aumento das inspeções in loco nas demais 220 barragens inseridas na PNSB no Estado de Minas Gerais e aquelas outras no restante do Brasil, objetivando a verificação do estado de conservação das estruturas por diferentes parâmetros técnicos, bem como a classificação de tais barragens segundo as normas vigentes;
- Atualização do cadastro nacional de barragens de mineração e de sua classificação quanto ao risco e dano potencial associado;
- Criação de setor específico para fiscalização de barragens de rejeito, no âmbito da estrutura da nova Agência Nacional de Mineração;
- Promoção de reuniões técnicas e eventos com especialistas, com empresas de tecnologia de monitoramento das estruturas, com auditores e com empresas mineradoras.

Atualmente há 84 barragens alteadas para montante em todo o País, das quais 43 são classificadas como de alto dano potencial – quando o rompimento ou mal funcionamento acarreta perdas de vidas humanas e danos sociais, econômicos e ambientais. Segundo a ANM, este método (montante) não pode ser mais tolerado na atualidade, uma vez que crescem os registros de acidentes relacionados a este método construtivo, bem como se observa que várias

destas estruturas já ultrapassam algumas dezenas de anos de vida útil, além de terem sido alteadas ao longo dos anos, o que aumentou paulatinamente a carga de rejeitos em suas bacias.

Recentemente a ANM divulgou uma proposta de resolução que prevê que as mineradoras façam o descomissionamento (“eliminação”) ou descaracterização de suas barragens a montante até 15 de agosto de 2021. Até lá, as barragens desse tipo que estiverem ativas deverão ter monitoramento constante, até que sejam extintas ou adaptadas para modelos a jusante ou de linha de centro. Após a tragédia de Brumadinho (Figura 11), a Vale (empresa mineradora responsável pela barragem) anunciou um plano para acelerar o descomissionamento de suas barragens a montante – na companhia ainda existem 10 desse modelo, e nove já foram desmontadas.



Figura 11 - Tragédia de Brumadinho

Fonte: (André Penner/AP, 2019)

Dessa forma, o risco imposto por toda a barragem de contenção de rejeitos dependerá de uma série de fatores, dentre eles pode-se citar: o local, o projeto da construção e manutenção da barragem, as características da rocha subjacente, as condições de precipitação e atividade sísmica na área, etc. Assim, deve-se dar uma atenção para cada situação citada, de forma que falhas e acidentes sejam evitados.

A análise das características técnicas de construção e alteamento das barragens de rejeito são imprescindíveis no processo de elaboração e adoção de medidas jurídicas preventivas, para que assim, sejam evitadas ocorrências de novos colapsos. Tudo isso tem de estar atrelado aos moldes de segurança internacionais, promovendo o bem-estar social a médio e longo prazos.

3.3 DESCARACTERIZAÇÃO E DESCOMISSIONAMENTO

Como já dito, diante do recente histórico de rompimentos de barragens de mineração que envolveram o método construtivo de alteamento para montante em que sua eficiência e segurança são controversas e, considerando que, de acordo com o banco de dados da ANM, existem 84 barragens de mineração construídas ou alteadas pelo método “a montante” ou por método declarado como desconhecido na Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB e, além disso, no total tem-se 218 barragens de mineração classificadas como de alto dano potencial associado, ou seja, dano que pode ocorrer devido ao rompimento ou mau funcionamento de uma barragem, a ANM, pela Resolução Nº 4, de 15 de fevereiro de 2019, decide por:

- Proibir a utilização do método de construção ou alteamento de barragens de mineração denominado “a montante” em todo o território nacional;
- Com vistas a reduzir ou eliminar o risco de rompimento, em especial por liquefação, o empreendedor deverá, nos prazos fixados abaixo:
 - Até 15 de agosto de 2019, concluir a elaboração de projeto técnico de descomissionamento ou descaracterização da estrutura, que deverá contemplar, no mínimo, obras de reforço da barragem à jusante ou a construção de nova estrutura de contenção à jusante;
 - Até 15 de fevereiro de 2020, concluir as obras de reforço da barragem à jusante ou a construção da nova estrutura de contenção;
 - Até 15 de agosto de 2021, concluir o descomissionamento ou a descaracterização da barragem;

Até a publicação desta resolução, entendia-se como desativação de uma barragem de rejeitos a descaracterização da estrutura. O processo consiste na drenagem da barragem e o plantio de vegetação no local. A grosso modo a estrutura deixa de ser uma barragem e se torna uma “montanha de rejeitos”. E como deixam de ser barragens, as estruturas saem da lista de monitoramento de segurança, apesar de não haver certeza sobre sua estabilidade.

Já o descomissionamento, que nunca foi realizado em nenhuma barragem do país, consiste no desmanche total da estrutura. No processo é realizada a drenagem da estrutura e os rejeitos são retirados do local. Portanto, a barragem deixa de existir por completo.

Assim, de forma resumida, pode-se afirmar que:

- Descaracterização (Figura 12): drenagem da barragem, manutenção dos rejeitos, aterramento e plantio sobre a estrutura;
- Descomissionamento (Figura 13): drenagem da barragem, retirada dos rejeitos, desmanche total da estrutura, plantio sobre o local.

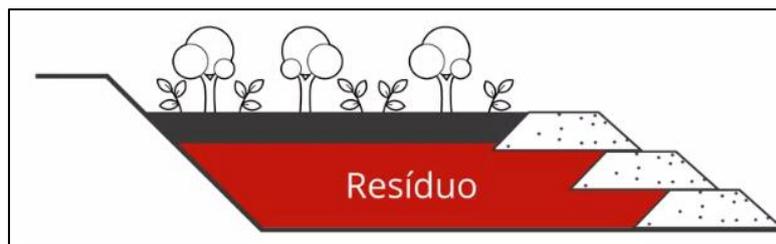
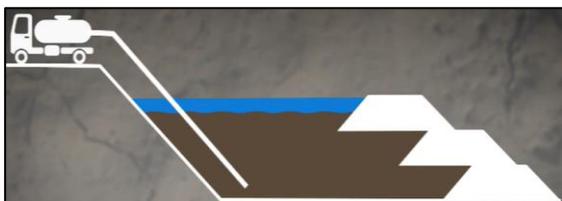


Figura 12 - Descaracterização de uma Barragem de Rejeitos

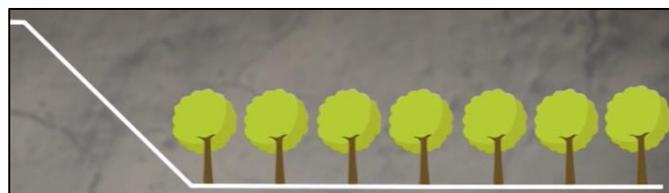
Fonte: www.g1.globo.com



Etapa 1: Drenagem dos resíduos minerários



Etapa 2: Retirada dos diques



Etapa 3: Reflorestamento

Figura 13 - Etapas de Descomissionamento de uma Barragem de Rejeitos

Na descaracterização da barragem, a vegetação tem papel importante para evitar o acúmulo de água devido as infiltrações, porém o risco de deslizamentos pela pressão dos rejeitos continua existindo. No descomissionamento, apesar de ser mais benéfico para o meio ambiente, todo o processo depende de uma série de fatores, como a composição dos rejeitos e do solo, assim, a escolha da melhor possibilidade técnica não é algo simples.

Portanto, qualquer que seja a escolha, descaracterização ou descomissionamento, não existe risco zero, dessa forma, o monitoramento da estrutura é imprescindível. Antes de toda a aplicação do processo, torna-se necessária a realização de uma extensa gama de estudos essenciais para um melhor conhecimento das condições geotécnicas que poderão condicionar a alternativas viáveis ou inviáveis, tanto do ponto de vista técnico como financeiro.

3.3.1 GESTÃO DOS RISCOS DE UMA POSSÍVEL RUPTURA

Durante as etapas de descomissionamento ou descaracterização de barragens de rejeito, o gerenciamento dos riscos também está sujeito a incertezas. Vários são os fatores responsáveis por essas incertezas, como por exemplo, os parâmetros de projeto (geotécnicos e hidráulicos), medidas de monitoramento (medições de piezômetros e demais instrumentações), identificação dos modos de falha, condições da provável ruptura (horário e condições de tempo) e parâmetros socioambientais, como o número de pessoas em risco no momento do incidente (MENDES, 2016).

Segundo Bowles em 1977, citado por Perini (2009), apesar da metodologia tradicional considerar os riscos e as incertezas, é apenas na gestão de riscos, que eles são tratados de forma mais explícita, permitindo ao gerenciador uma melhor compreensão dos riscos a serem avaliados. No Quadro 5, encontram-se as possíveis fontes de incertezas e os possíveis tratamentos:

Quadro 5 - Incertezas e possíveis tratamentos.

Fonte: (Menescal, 2015)

Fonte/tipo	Possíveis origens	Tratamento analítico
Física	Conhecimento inadequado dos eventos naturais e do comportamento estrutural	Simulação de Monte-Carlo
Estatística	Erro de amostragem	Desvio padrão, limites de confiança.
Epistêmica	Simplificação de modelos matemáticos	Simulação de Monte-Carlo, Árvore de eventos.
Decisória	Subjetividade	Árvore de eventos
Predição	Eventos futuros incertos	Árvore de eventos
Reação pública	Falta de confiabilidade e de transparência	Comunicação
Erro humano	Ignorância, negligência, falta de experiência e de treinamento, etc.	Teoria do erro grosseiro

Como já dito, seja qual for a solução escolhida para a desativação da barragem, os riscos de uma possível ruptura devem ser levados em consideração. O rompimento da barragem por si só constitui um risco para os ecossistemas locais, o aproveitamento hídrico a jusante e para as comunidades próximas.

4 MODOS DE RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITOS

A seguir serão apresentados os modos de ruptura mais comuns para barragens de rejeitos: instabilidade de taludes, galgamento, *piping* e liquefação.

4.1 RUPTURA POR INSTABILIDADE DE TALUDES

Escorregamento, de acordo com Guidicini e Nieble (1984), nada mais é do que toda e qualquer movimentação, de curta duração, de massas de terreno geralmente bem definidas quanto ao volume, independentemente do processo, causa, velocidade, forma e outras características. Podem ocorrer com ou sem uma causa imediata, mas, em geral, estão associados a escavações, acréscimos de cargas sobre taludes existentes, liquefações do solo provocadas por esforços dinâmicos, entre outros.

A análise da instabilidade de um talude consiste na determinação das tensões de cisalhamento desenvolvidas ao longo de superfícies de ruptura cineticamente possíveis e a comparação dessas com a resistência do solo ao cisalhamento (Figura 14), sendo a superfície de ruptura mais provável ou crítica, aquela que apresentar o fator de segurança mínimo (DAS, 2007).

No caso das barragens de rejeitos os taludes são, em geral, compostos de materiais estéreis provenientes da extração do minério, do solo, ou dos rejeitos gerados. Os parâmetros geotécnicos retratados nos estudos de estabilidade são os condicionantes principais da segurança dessas estruturas. Entre esses parâmetros, podemos citar: peso específico, coesão efetiva ou S_u (coesão não drenada), ângulo de atrito, permeabilidade, piezometria (influenciada pelo regime de chuvas, evaporação e geração de resíduos), possibilidade de abalos sísmicos e possíveis sobrecargas no corpo da barragem, etc.

A falta de conhecimento ou de controle dos aspectos geotécnicos dos materiais presentes no corpo e na fundação da barragem tende a ser um fator crucial nos processos de instabilização destes. Dessa forma, é de fundamental importância que seja dada uma atenção especial nos projetos geotécnicos de barragens ou qualquer outra estrutura, para o conhecimento dos parâmetros geotécnicos já citados anteriormente, por meio de ensaios de laboratório e de campo de todos os materiais que sejam relevantes na questão da estabilidade do dique.

A tendência natural de qualquer talude, seja ele natural ou construído, é o seu deslizamento, que pode ser contido se as tensões cisalhantes mobilizadas foram iguais ou menores que a resistência ao cisalhamento do material interceptado pela superfície de ruptura.

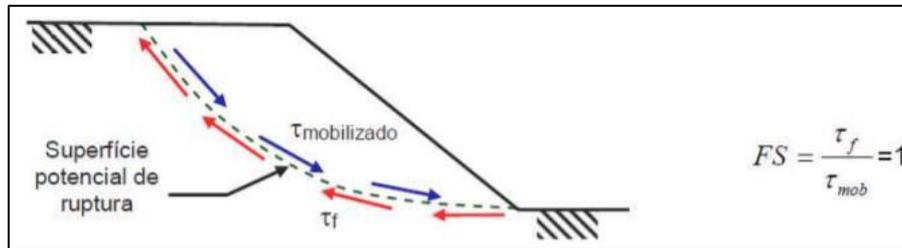


Figura 14 - Tensões e Resistências mobilizadas na superfície de ruptura

Fonte: (Gerscovich, 2008)

Os principais mecanismos que podem contribuir com a ocorrência dos movimentos de massa, majorando os esforços atuantes ou minorando as resistências dos materiais presentes no maciço do talude, são descritos por Varnes (1978) apud Gerscovich (2008) no Quadro 6.

Quadro 6 - Mecanismos que contribuem com os movimentos de massa

Fonte: (Varnes apud Gerscovich, 2008)

AÇÃO	FATORES	FENÔMENOS
Aumento da sollicitação	Remoção de massa (lateral ou base)	Erosão, escorregamentos e cortes
	Sobrecarga	Peso de água da chuva, neve, granizo. Acúmulo natural de material (depósitos). Peso da vegetação. Construção de aterros.
	Sollicitação dinâmica	Terremotos, ondas, vulcões. Explosões, tráfego, sismos induzidos.
	Pressões laterais	Água em trincas, congelamento, materiais expansivos
Redução da Resistência	Características do Material	Características geomecânicas do material, tensões.
	Mudanças ou fatores variáveis	Intemperismo: redução na coesão, ângulo de atrito, variação nas poropressões.

De acordo com Dyminski (1996), os objetivos para análise da estabilidade de taludes são os seguintes:

- Averiguar a estabilidade de taludes em diferentes tipos de obras geotécnicas, sob diferentes condições de solicitação, de modo a permitir a execução de projetos econômicos e seguros;
- Averiguar a possibilidade de escorregamento de taludes naturais ou construídos pelo homem, analisando a influência de modificações propostas através de análise de sensibilidade e estudo da influência relativa de parâmetros;
- Analisar escorregamentos já ocorridos, obtendo-se subsídios para o entendimento de mecanismos de ruptura e da influência de fatores ambientais, através de retroanálise da estabilidade;
- Executar projetos de estabilização de taludes já rompidos, investigando-se as alternativas de medidas preventivas e corretivas que possam ser necessárias;
- Estudar o efeito de carregamentos extremos naturais ou decorrentes da ação do homem, tais como, terremotos, maremotos, explosões, altos gradientes de temperaturas, execução de obras, etc.
- Entender o desenvolvimento e forma de taludes naturais e os processos responsáveis por diferenças em características naturais regionais por retrabalhamento da crosta terrestre.

No tocante aos métodos de análise de estabilidade de taludes, eles podem ser classificados em métodos determinísticos e métodos probabilísticos. Segundo Sayão *et al.* (2012), os métodos determinísticos levam em consideração a atribuição de um valor médio para cada uma das variáveis consideradas para o cálculo do fator de segurança. No entanto, cada variável tem uma distribuição de valores prováveis, a partir de um valor médio e um desvio padrão que podem ser definidos. Assim, para obtenção do fator de segurança, os métodos probabilísticos consideram os parâmetros de entrada como variáveis aleatórias em que cada parâmetro pode assumir qualquer valor dentro de um intervalo admitido, com uma dada probabilidade de ocorrência deduzida a partir dos dados disponíveis e da distribuição de frequência adotada.

Os métodos determinísticos (obtenção de um fator de segurança) são os mais utilizados nas análises de estabilidade de taludes. Em geral, existem dois tipos de análises determinísticas: tensão-deformação e equilíbrio limite, sendo este último o principal. Dentre os métodos baseados no equilíbrio limite podemos citar: o de Taylor, do talude infinito e das fatias, sendo que este último compreende uma variedade de métodos de estabilidade, com diferentes graus de rebuscamento, tendo se tornado a ferramenta de cálculo mais empregada no meio geotécnico.

A necessidade de se determinar um fator de segurança (FS) é fundamental para que se tenha uma noção quantificada do risco de uma possível ruptura. Essa quantificação é realizada nas seguintes condições:

$$FS > 1,0 \Rightarrow \text{teoricamente estável}$$

$$FS = 1,0 \Rightarrow \text{equilíbrio instável, ruptura por escorregamento a qualquer momento}$$

$$FS < 1,0 \Rightarrow \text{sem significado físico}$$

No caso das barragens de rejeito, a norma brasileira NBR 13.028/2017 estabelece os principais requisitos para o projeto dessas estruturas. O item 5 da norma aborda as análises de estabilidade necessárias, bem como os fatores de segurança a serem respeitados. Tais análises devem ser executadas a cada alteamento e devem envolver, isoladamente e em conjunto, o dique de partida e sua fundação, os alteamentos e suas fundações, e o rejeito. A Tabela 1 destaca os fatores de segurança requeridos para cada etapa de operação.

Tabela 1 - Fatores de segurança para Barragens de Rejeito.

Fonte: (ABNT, 2017)

Fase	Tipo de ruptura	Talude	FS mínimo
Final de construção	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,3
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,5
Operação com rede de fluxo em condição extrema, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,3
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório	Maciço	Montante	1,1
Operação com rede de fluxo em condição normal	Maciço	Jusante	1,5
		Entre bermas	1,3
Solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório.	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,1

Passos (2009) afirma que para barragens de rejeito, caso seja classificada com relação a perdas materiais e ambientais, o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens salienta que deve existir um elevado grau de segurança. Portanto, é recomendado um $FS_{\min} = 1,5$ para as análises de estabilidade interna e externa do corpo da barragem.

4.1.1 ESTABILIDADE DE TALUDES NO GEOSTUDIO®

Como nesta monografia será realizada uma análise de estabilidade através do pacote de softwares da Geostudio®, torna-se válido descrever como funciona esta análise no programa.

A análise de estabilidade no Geostudio®, executada no módulo Slope/W, é baseada na Formulação Geral de Equilíbrio Limite, formulada por D. Fredlund na Universidade de Saskatchewan, Canadá. Essa formulação assume dois fatores de segurança, um para o equilíbrio de forças horizontais (F_f) e outro para equilíbrio de momentos (F_m). Além disso, a força de cisalhamento entre as fatias (X_τ) é dada pela fórmula (Morgenstern & Price, 1965, citados por Geoslope, 2017):

$$X_\tau = E_f \cdot \lambda \cdot f(x) \quad (4.10)$$

Na Equação 4.10, E_f é a força normal entre as fatias, $f(x)$ é uma função arbitrária e λ é a porcentagem (na forma decimal) da função utilizada. Para o cálculo dos Fatores de Segurança é necessário calcular a força normal que atua na base de cada fatia (N), cuja fórmula é:

$$N = \frac{W + (X_{\tau,r} - X_{\tau,l}) - \frac{c' \cdot \beta \cdot \sin \alpha_f + u \cdot \beta \cdot \sin \alpha_f \cdot \tan \phi'}{F}}{\cos \alpha_f + \frac{\sin \alpha_f \cdot \tan \phi'}{F}} \quad (4.11)$$

Na Equação 4.11, c' é a coesão efetiva, ϕ' é o ângulo de atrito efetivo, u é a poropressão, α_f é a inclinação da base da fatia, W é o peso da fatia, β é o comprimento da base da fatia, $X_{\tau,r}$ é a força de cisalhamento da fatia da direita, $X_{\tau,l}$ é a força de cisalhamento da fatia da esquerda e F é o Fator de Segurança (F_f para o equilíbrio de forças horizontais ou F_m para o equilíbrio de

momentos). Nota-se que a formulação de Fredlund é iterativa, pela presença do Fator de Segurança no cálculo de N, e que a força N é dependente das forças entre as fatias, que por sua vez são funções de λ (Mendes, 2019). Consequentemente, a força N e o Fator de Segurança também são dependentes de λ . Desta forma, o Geostudio® plota o gráfico dos fatores de segurança em função de λ , tal como mostrado na Figura 15.

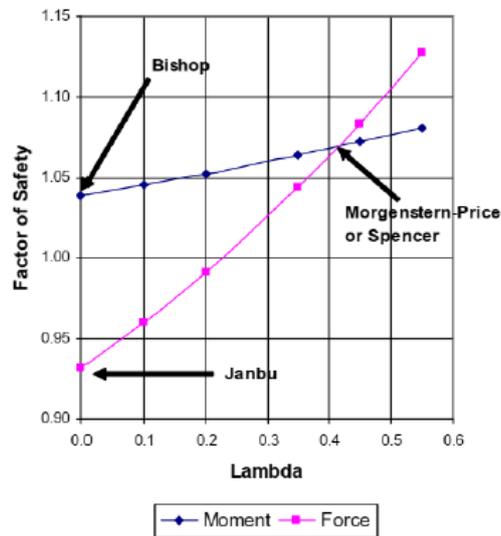


Figura 15 - Fatores de segurança em função de λ .

Fonte: (Geoslope, 2017)

O método de análise utilizado no presente projeto foi o de Morgenstern-Price, em que o Fator de Segurança global está no ponto de cruzamento das curvas F_m e F_f , de forma a satisfazer os equilíbrios de momentos e de forças, considerando as forças de cisalhamento entre as fatias.

4.2 RUPTURA POR GALGAMENTO OU “OVERTOPPING”

A ruptura por galgamento ocorre quando o nível d’água no reservatório se eleva além da cota da crista da barragem. No caso das barragens de terra, o galgamento produz um arraste de materiais e a posterior ruptura.

Normalmente, as rupturas por galgamento devem-se a chuvas muito intensas, que produzem cheias nos cursos fluviais superiores a capacidade do vertedouro.

Outra possível causa de uma ruptura por galgamento pode ser a ruptura a montante de outra barragem, de forma que a barragem de jusante é incapaz de laminar e verter todo volume advindo da barragem de montante, fazendo elevar o nível acima da cota da crista e provocando uma ruptura em cascata. No caso específico da ruptura por galgamento ocasionada por chuvas intensas, as chuvas e, conseqüentemente as vazões resultantes, podem ser muito diferentes, mas associação das vazões geradas contribui para elevar o nível acima da crista da barragem.

Nas barragens de rejeito, os motivos das falhas que podem ocasionar o galgamento basicamente são os mesmos que acontecem nas barragens convencionais, porém as circunstâncias que levam a esse tipo de falha são distintas. Nas barragens de rejeito, os materiais armazenados apresentam características que prejudicam o meio ambiente, assim essas barragens são projetadas para que a água armazenada não possa ser vertida. Caso o depósito seja na forma de diques fechados, as águas que devem entrar em contato com o depósito são somente as de origem pluvial. Com isso, a operação da barragem é um fator crucial para evitar falhas por galgamento, pois uma operação inadequada pode diminuir os níveis de segurança do reservatório e torná-los perigosos (Valerius, 2014). Contudo, se o depósito for construído em vale, junto com o armazenamento de água, torna-se imprescindível que as previsões hidrológicas considerem o nível do reservatório no momento do evento, a área de influência da bacia hidrográfica e a intensidade das precipitações. Para essas barragens é bastante comum a construção de estruturas de desvio, como canais e túneis, para evitar que a água pluvial afete o depósito. De forma geral, os problemas ocorridos nesses tipos de barragens estão relacionados com a obstrução ou mal funcionamento das estruturas de deságue (Oldecop & Rodríguez, 2006).

Com o vertimento da água sobre a crista da barragem inicia-se a erosão do talude de jusante que pode resultar na formação da brecha de ruptura de forma regressiva e ruptura global do barramento. Portanto, diante do que foi exposto, é possível apresentar as principais causas associadas a ruptura por galgamento de barragens:

- Má operação do reservatório e do vertedouro durante a ocorrência de uma cheia de projeto;
- Conformação da praia de rejeitos fora dos limites especificados em projeto ou lançamento inadequado de rejeitos no reservatório (redução do volume livre para laminação de cheias)
- Ocasão de uma cheia extraordinária, para o qual o vertedouro não tenha capacidade hidráulica;
- Deformação excessiva do maciço, com recalque da crista;
- Formação de uma onda induzida dentro do reservatório.

Assim, como se vê, os riscos hidrológicos apresentam grande relevância, especialmente para barragens que são incapazes de suportar galgamento (Figura 16). Tomando como base as estatísticas do ICOLD sobre ruptura de barragens, Ramos e Melo, 2006 *apud* Colle, 2008, conclui que a insuficiente capacidade de vazão ou o mau funcionamento dos dispositivos de descarga de cheias representam cerca de 42% das causas de rupturas de barragens. Para barragens de aterro com altura inferior a 15 m esta proporção sobe para 77%.



Figura 16 - Imagem de uma barragem de aterro galgada, situada no rio Missouri, Kansas, EUA.

Fonte: (Farmland, 2011)

4.3 RUPTURA POR EROSÃO INTERNA OU *PIPING*

Esse tipo de ruptura produz-se por uma falha estrutural da barragem. No caso de barragens de terra ou enrocamento, essa falha ocorre quando existem infiltrações através do corpo da barragem, de tal modo que se produz uma erosão e arraste dos materiais, que acabam causando a ruptura. A ruptura pode ser causada por algum problema na compactação do maciço da barragem, criando-se um caminho para o fluxo de água, que acaba arrastando partículas de solo, progressivamente, resultando no fenômeno de *Piping* (Figura 17).

O piping também é definido como uma erosão regressiva, ou seja, diferente da erosão superficial onde se consegue observar o carreamento do solo. É denominada como erosão regressiva porque seu avanço é no sentido contrário ao fluxo, tanto que é necessário que os vazios nas partículas que compõem os filtros sejam pequenos para que o solo não migre através dos filtros.

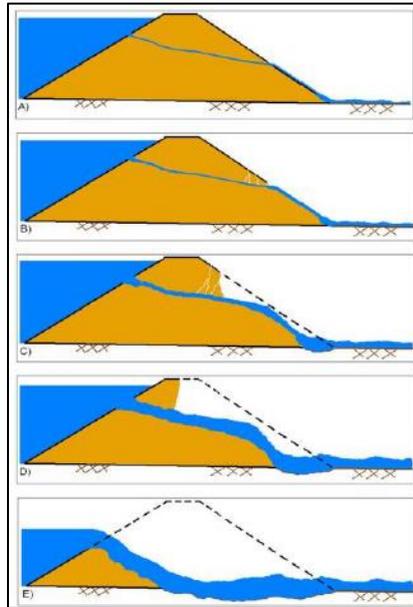


Figura 17 - Processo de rompimento por piping

Fonte: (USACE, 2014)

Para o USBR (United States Bureau of Reclamation), o processo de erosão interna pode ocorrer devido as cargas aplicadas na barragem e/ou na fundação, as origens desse carregamento são:

- Estática: causado durante a operação normal da barragem;
- Hidrológica: quando o nível do reservatório está acima da sua operação normal em níveis emergenciais;
- Sísmica: terremotos, vibrações e sismos induzidos provocam deformações e/ou fissuras que dão início ao processo de erosão interna.

Quanto aos modos de falhas, eles podem ser classificados quanto à localização física da erosão interna, conforme define o USBR (2012):

- Erosão interna na barragem;
- Erosão interna na fundação;
- Erosão interna na barragem passando pela fundação.

É conhecido que esses modos de falhas se aplicam mais a barragens convencionais, porém podem ser aproveitadas algumas conclusões com relação as barragens de rejeito. Os principais componentes que tornam uma barragem suscetível à erosão interna é, obviamente, a resistência a erosão (plasticidade), a dispersibilidade do solo em questão e a carga hidráulica crítica, ou seja, energia hidráulica necessária para iniciar um mecanismo de erosão (USBR, 2012). Os

gradientes de infiltração e as velocidades presentes no aterro e/ou fundação são fundamentais para indicar se esses mecanismos são suficientes para provocar *piping*.

A Figura 18 ilustra uma condição sintomática do processo de *piping* ocorrido na Barragem de Fundão em Minas Gerais. A construção do dique de partida, juntamente com seus drenos e galerias, foi concluída em 2008. Seis meses depois, logo após o lançamento em larga escala dos rejeitos arenosos, grandes vazões de surgências contendo material fino surgiram no talude de jusante acima do dreno de fundo principal. As investigações mostraram que houve falhas gravíssimas na construção do dreno de fundo e em seus filtros, inclusive um trecho de saída do dreno nunca foi concluído. Todos esses fatores influenciaram no aumento de pressão de água até causar erosão e deslizamento do talude.



Figura 18 - Incidente de Piping, Barragem de Fundão-MG

Fonte: (Morgenstern et al., 2016)

As rupturas por percolação e erosão também são possíveis quando a distância entre o lago de decantação e o talude de jusante da barragem não for suficientemente grande, propiciando a ocorrência de gradientes hidráulicos elevados.

A melhor forma de diminuir este risco é ter uma vasta praia entre a crista da barragem e o reservatório, além de contar com um sistema de drenagem interno eficiente para abatimento da superfície freática (Icold & Unep, 2001; Gomes, 2010). Excessos na velocidade do alteamento pode também induzir o mecanismo de liquefação estática.

Outros fatores condicionantes ao *piping* e que podem ocasionar o surgimento de fendas ou aberturas no maciço em maciços de seção homogênea são descritos por Massad (2003):

- Ausência de filtros horizontais tipo sanduíche, construídos com matérias fracamente permeáveis;
- Ausência de transições adequadas entre os materiais granulares;
- Presença de fundações arenosas.

Quadro 7 - Fatores que influenciam na probabilidade de falha por piping

Fonte: (Foster et al., 2000)

Fator	Fatores que influenciam na probabilidade de falha por piping				
	Muito mais provável	Mais provável	Neutro	Menos provável	Muito menos provável
Tipo de fundação	Fundação de solo	-	Rocha com fraturas preenchidas de argila ou rocha erodível	Rocha de melhor qualidade	Rocha não erodível e com fraturas fechadas
Geologia do solo de fundação	Solos dispersivos; cinzas vulcânicas	Solos residuais	Solos aluvionares: eólicos, coluvionares, lacustres ou marinhos.	Solos aluviais	Solos glaciais
Geologia da rocha de fundação	Calcário; dolomito; gipsita; basalto.	Tufo; riolito; mármore; quartzito.	-	Arenito; folhelho; siltito; argilito; lamito	Conglomerado; andesito; gabro; granito; gnaiss; xisto; ardósia; filito
Aspecto da água infiltrada	Vazamento lamacento e com aumentos súbitos	Vazamento aumentando gradualmente, limpo, sink-holes, areia movediça	Vazamento estável, limpo, ou não observado	Pequeno vazamento	Nenhum vazamento ou muito pequeno.
Poropressão	Aumento repentino nas pressões	Aumento gradual das pressões na fundação	Altas pressões na fundação	-	Baixa poropressão na fundação

4.4 RUPTURA POR LIQUEFAÇÃO

O objetivo principal do estudo da liquefação de solos é a melhor compreensão dos mecanismos que induziram esse tipo de ruptura em diversas estruturas ao redor do mundo. Nas condições não-drenadas, a poropressão decorrente dos carregamentos cíclicos ou monotônicos (liquefação

estática) podem chegar a reduzir à zero a tensão efetiva, fazendo com que as partículas sólidas percam contato entre si, em estado de suspensão no solo, se comportando como líquido viscoso. Este estado de fluidez é denominado de liquefação (Ishihara, 1977).

Os esforços cisalhantes regem os princípios gerais do comportamento de solos granulares quando submetidos à liquefação. Casagrande foi o primeiro a afirmar que durante uma deformação cisalhante ao longo de ensaios triaxiais drenados, a redução do volume de uma areia em estado fofo e o aumento de volume em estado compacto resultariam, no final, em uma mesma densidade, correspondente a um mesmo índice de vazios (Figura 19). A esse índice de vazios, Casagrande chamou de “índice de vazios crítico”.

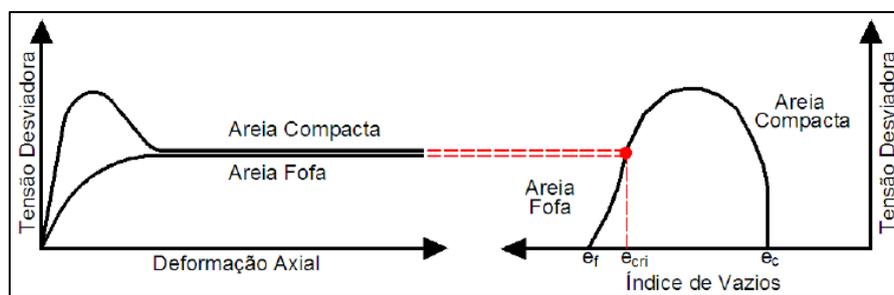


Figura 19 - Índice de Vazios Crítico de areias fofo e compacta submetidas à esforços cisalhantes

Fonte: (soil liquefaction web site, 2002)

Através de mais ensaios com diferentes tensões de confinamento, Casagrande conseguiu relacionar o índice de vazios com as tensões já ditas, formando a linha de índice de vazios crítico (Figura 20). Através dessa linha é possível analisar a susceptibilidade do solo à liquefação.

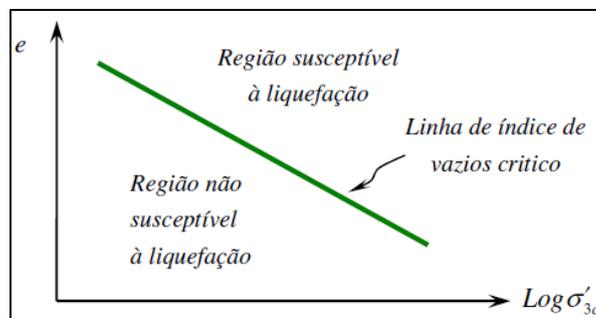


Figura 20 - Linha de Vazios Crítico

Fonte: (Casagrande, 1975)

A liquefação é mais comum em solos saturados fofos, quando o cisalhamento induz uma contração de volume que em situações não drenadas promove uma elevação de pressão da água no interior dos vazios. Segundo Jefferies & Been (2006), o tempo para ocorrência da liquefação é curto, variando de alguns minutos a dezenas de minutos, à exceção dos casos de estruturas offshore onde o carregamento imposto pelas ondas do mar pode demorar horas para provocar tensões de cisalhamento cíclicas na fundação das estruturas.

É válido ressaltar que a liquefação pode ocorrer mesmo em condições de solos não saturados, mas que apresentem um grau de saturação suficiente para que a contração resulte em expulsão de água ao invés de ar (Aubertin *et al.*, 2003). Ensaio de laboratório têm confirmado a possibilidade de ocorrência da liquefação em materiais com grau de saturação da ordem de 80% (Martin, 1999). Outra condição bastante crítica se deve à presença de barreiras praticamente impermeáveis no domínio de depósitos de solos susceptíveis à liquefação.

Em mineração, a análise potencial de liquefação é importante devido às características geotécnicas apresentadas pelos rejeitos granulares, quando estes materiais são depositados hidraulicamente em barragens de rejeito, apresentando-se saturados e com baixa densidade relativa. Estas condições, somadas à ocorrência de um carregamento não drenado, possibilitam a ativação do mecanismo (gatilho) que provocará a liquefação estática dos materiais (PUC-Rio). Assim, faz-se necessário o estabelecimento de procedimentos criteriosos de gestão e manejo da disposição dos rejeitos em barragens de contenção.

Uma maneira de minimizar os riscos de liquefação é o controle do deplecionamento da linha freática e a manutenção de uma grande extensão da praia de rejeitos. A correta análise e definição das trajetórias de fluxo ao longo do maciço de rejeitos é fundamental para determinar, da forma mais aproximada possível, a segurança e o desempenho operacional da estrutura, principalmente no que diz respeito a localização do reservatório e a extensão da praia de rejeitos, dois fatores responsáveis pelas condições das poropressões geradas em maciços de barragens de rejeitos alteadas para montante.

Na Figura 21 mostra-se a posição da linha freática em diferentes configurações propostas por Santos (2004). Para o primeiro caso (Figura 21a) a posição da linha freática é condicionada a maior ou menor proximidade do lago em relação à crista da barragem, sendo que, nas condições mais severas, tem-se maiores valores de poropressões na região do talude de jusante. No segundo caso (Figura 21b), a segregação do rejeito também direciona o caminho da linha

freática, já que esse gradiente de permeabilidade dos rejeitos é função do lançamento e da disposição dos mesmos. Por fim, na Figura 21c, outra condição de contorno é mostrada, a permeabilidade da fundação. Uma fundação relativamente permeável permite uma posição da linha freática, em relação ao talude de jusante, favorável a segurança.

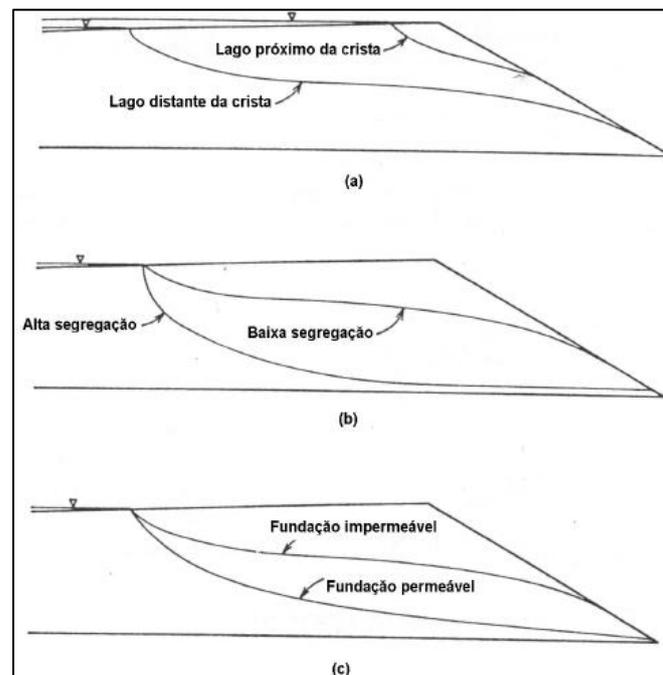


Figura 21 - Posição da linha freática em diferentes elementos de configuração

Fonte: (Santos, 2004)

A velocidade de construção, chuvas intensas causando mudanças na poropressão, alto nível do reservatório e galgamento dos resíduos, são também fatores responsáveis por ativar o “gatilho” da liquefação. Nos métodos de alteamento para montante, é importante limitar a velocidade de construção para permitir a dissipação da poropressão de forma adequada. Vick (1990) e Mittal & Morgenstern (1976) sugerem uma taxa de alteamento entre 4.6 m/ano a 9.1 m/ano.

No caso envolvendo a Barragem de Fundão em Minas Gerais, que entrou em colapso no dia 05 de novembro de 2015 através de um deslizamento fluido provocado pela liquefação que iniciou-se na ombreira esquerda da barragem, uma investigação foi realizada por um Comitê de Especialistas formado por Norbert R. Morgenstern (Presidente), Steven G. Vick, Cássio B. Viotti e Bryan D. Watts, em que não encontrou-se nenhuma análise confiável realizada antes

da ruptura da barragem em nenhum dos vários documentos avaliados e, por esse motivo, o Comitê baseou-se em suas próprias análises para determinar as causas da ruptura.

Na investigação, constatou-se que a deposição dos rejeitos foi influenciada por uma série de ocorrências não previstas durante a operação e construção da barragem que permitiram as condições para que a ruptura acontecesse. Entre esses incidentes, pode-se citar:

- Dano ao dique de partida que resultou no aumento da saturação;
- Deposição de lama em áreas onde isso não estava previsto; e
- Problemas estruturais com uma galeria de concreto que fez com que a barragem fosse alteada sobre lama

Além disso, outras condições foram necessárias para que o deslizamento fluido ocorresse. Os rejeitos arenosos eram contráteis, estavam saturados, e eram suscetíveis à grave perda de resistência durante a rápida ruptura que se desenvolveu.

A Figura 22 revela que a relação da resistência não drenada média caiu de 0,21, antes do deslizamento fluido por liquefação, para 0,07 durante o mesmo, demonstrando que os rejeitos arenosos de Fundão estavam sujeitos a perda significativa de resistência.

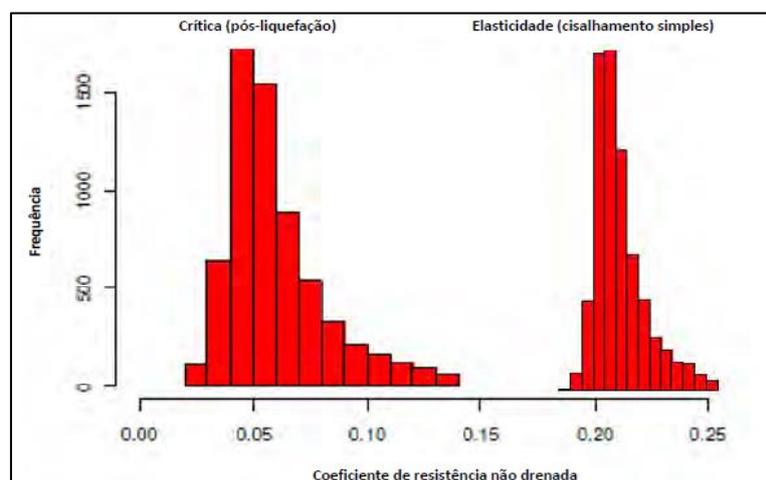


Figura 22 - Resistências de escoamento (antes do acidente) e crítica não drenadas (após o acidente) para dados agregados de CPT em Fundão – 2015

Fonte: (Morgenstern et al., 2016)

Assim, pode-se concluir que o principal mecanismo de ruptura em barragens de rejeitos alteadas para montante é a liquefação, que pode ser induzida por carregamentos estáticos e transientes e que está diretamente relacionada às baixas densidades dos rejeitos dispostos de forma hidráulica na barragem e à gestão inadequada de operação das barragens.

Algumas diretrizes podem ser levadas em consideração para que se possa aumentar a segurança de barragens de rejeito alteadas para montante, como propõe P. S. Washington (2001):

- Verificação do método de disposição hidráulica em operação (espigotes, *spray bars* ou rejeito ciclonado), buscando uma segregação hidráulica homogênea dos rejeitos ao longo do maciço de forma a preparar uma base adequada para a implantação dos próximos diques de alteamento;
- Redução dos espaçamentos entre os pontos de disposição, visando não formar camadas de finos com características de elevada compressibilidade e baixas resistência e drenabilidade;
- Utilização da barragem alteada para montante prioritariamente para contenção de rejeitos e não para contenção de rejeitos e água (reservatório de água mínimo necessário para recirculação);
- Manutenção de uma praia extensa de rejeitos, afastando o reservatório do maciço e, conseqüentemente, promovendo o deplecionamento da linha freática da estrutura e aumentando as tensões efetivas nas camadas suscetíveis;
- Implantação de estrutura hidráulica que permita controlar o nível de água do reservatório em função da formação e extensão da praia de rejeitos;
- Operação alternada dos pontos de disposição dos rejeitos ao longo da crista, devendo operar por trechos ao longo do maciço, sempre buscando uma formação de praia homogênea. A operação alternada em trechos favorece o adensamento e o ressecamento dos rejeitos, com ganhos de resistência e melhoria da capacidade de suporte dos futuros diques.

A Tabela 2 expõe o histórico de ruptura de barragens por liquefação com o respectivo impacto socioambiental:

Tabela 2 - Casos de ruptura por liquefação de barragens de resíduos de mineração.

Fonte: (www.wise-uranium.org/mdaf.html)

Data	Localização	Tipo de Minério	Liberação de rejeitos	Impacto
08/2009	Karamken, Magadan, Rússia.	Ouro	-	Onze casas foram destruídas pela lama, pelo menos uma pessoa morreu
09/2008	Taoshi, Linfen, Shanxi, China.	Ferro	-	Várias casas e um prédio de três andares destruídos. Pelo menos 254 pessoas ficaram feridas e 35 morreram.
11/2006	Nchanga, Chingola, Zâmbia.	Cobre	-	Lançamento de resíduos altamente ácidos em rios, com elevadas concentrações de cobre, manganês e cobalto, prejudicando o abastecimento de água potável de comunidades.
04/2006	Miliang, China	Ouro	-	A lama enterrou aproximadamente 40 casas, com morte de 17 residentes. Mais de 130 residências foram evacuadas. A lama tóxica foi liberada no rio de Huashui, contaminando extensão de 5 quilômetros
04/2005	Bangs Lake, Jackson, Mississippi, USA.	Fosfato	2.272.498,80 m ³	Resíduos derramados no pântano adjacente, com morte da vegetação.
11/2004	Pinchi Lake, British Columbia, Canadá	Mercúrio	6.000 a 8;000 m ³	Contaminação de 5.500 ha em Pinchi Lake.
09/2004	Riverview, Florida, USA	Fosfato	227.000 m ³	Resíduos atingiram baías de Hillsborough.
10/1997	Pinto Valley, Arizona, USA	Cobre	230.000 m ³	A lama inundou área de 12 hectares.
03/1985	Veta de Agua, Chile	Cobre	280.000 m ³	O rejeito fluiu 5 km rio abaixo.
03/1985	Cerro Negro, Chile	Cobre	500.000 m ³	O rejeito fluiu 8 km rio abaixo.
10/1980	Tyrone, New Mexico, USA	Cobre	2 milhões m ³	8 km rio abaixo com inundações de terras.
1970	Mufulira, Zâmbia	Cobre	1 milhão de toneladas	89 pessoas mortas.
1969	Bilbao, Espanha	?	115.000 m ³	Grande contaminação de rios.
1968	Hokkaido, Japão	?	90.000 m ³	Resíduos percorreram 150 metros rio abaixo.
1966	Leste do Texas, USA	Gipsita	76.000 – 130.000 m ³	Resíduos percorreram 300m.
03/1965	El Cobre Old, Chile	Cobre	1.9 milhão m ³	

5 MÉTODO DO PONTO MATERIAL (MPM)

Os solos são materiais granulares complexos que apresentam propriedades de fluidos e de sólidos. Isso acontece por três motivos: (i) os geomateriais, têm três fases: a sólida, a líquida e a gasosa; (ii) os materiais granulares não são corpos contínuos na escala microscópica, mas são compostos de partículas discretas com interações complexas; (iii) o solo é um material heterogêneo. Apesar desta complexidade, a engenharia geotécnica precisa de metodologias práticas para a simulação de obras reais e para isso existem várias ferramentas numéricas, entre as quais se destaca o método dos elementos finitos (MEF). Este método obteve grande aceitação e durante os últimos 30 anos tem sido amplamente utilizado na indústria da engenharia para a abordagem de uma grande variedade de problemas (Coetzee, 2004).

As variáveis de estado de um meio contínuo em movimento podem ser descritas por duas abordagens, a lagrangeana e a euleriana. Na abordagem lagrangeana, as variáveis de estado são expressas a partir das coordenadas da partícula, adotando-se um referencial espacial fixo (x,y,z) e o tempo t , seguindo-se então a partícula em sua trajetória. Esta descrição é comumente utilizada em mecânica dos sólidos. Já na abordagem euleriana, define-se uma posição fixa e , a partir dela, observam-se as modificações sofridas pelas variáveis de estado ao longo do tempo. Tal descrição é utilizada em mecânica dos fluidos (Llano Serna, 2012).

Sabe-se que o método dos elementos finitos é muito usado na prática da engenharia, porém ele tem limitações quando o problema envolve grandes deformações do material, uma vez que isto gera distorções na malha quando é implementada a abordagem Lagrangeana. Esta deformação da malha pode gerar imprecisões numéricas e inclusive tornar os cálculos impossíveis (Beuth et al., 2011). Por isso, as investigações no campo da modelagem numérica têm se direcionado a conseguir melhores simulações de problemas complexos que envolvem grandes deformações, tais como: problemas de impacto/contato, propagação de fissuras, penetração, perfuração, fragmentação e interações entre diferentes materiais (Chen & Brannon, 2002).

Novas abordagens numéricas estão sendo utilizadas, entre elas pode-se destacar o MPM (*Material Point Method* ou Método do Ponto Material) que utiliza uma descrição mista entre Lagrangeana e Euleriana (Sulsky, et al. 1994; Sulsky & Schreyerb, 1996). Foi desenvolvido a partir de um método conhecido como *Fluid Implicit Particle* (FLIP) que foi aplicado em problemas de fluidos (Harlow, 1964), sendo o MPM uma extensão deste para o caso da mecânica dos sólidos (Coetzee et al., 2005). A expressão matemática Lagrangeana tem por

finalidade representar o meio contínuo (pontos materiais) enquanto que a Euleriana se encarrega de solucionar as equações de campo (malha fixa no fundo).

No Método do Ponto Material, desenvolvido por Sulsky *et al.* (1994, 1995), a discretização dos copos materiais se dá por meio de uma coleção de partículas não conectadas entre elas, que transportam uma massa cujo valor se mantém fixo para garantir a conservação de massa. A cada intervalo de tempo, os dados contidos nos pontos materiais são projetados para a malha de fundo, que serve como uma ferramenta para calcular a interação entre os pontos. Com a resolução das equações de movimento na malha, assim como feito no MEF, a solução passa a fazer parte do grupo de informações incluídas nos pontos. Com a atualização das velocidades e posições dos pontos materiais a cada incremento de tempo, este se desloca em todo o domínio definido. Quanto mais refinada a discretização, mais precisos os resultados do modelo, possibilitando a modelagem de comportamentos locais como a separação do material e rupturas locais (Andersen & Andersen, 2009).

Llano-Serna (2012) afirma que é possível listar algumas principais aplicações em Geotecnia, onde o MPM tem bom desempenho como método numérico, por exemplo: simulação de empuxos ativos e passivos, estabilidade de taludes, encostas e barragens, problemas de endentação, arrancamento de ancoragens, aterros reforçados com geossintético, propagação de fissuras e estudos de impacto.

Wickowski (2004) desenvolveu um estudo que envolve a simulação de um muro de contenção de concreto que perde sua estabilidade ao tombamento e gira entorno à base, onde o problema de contato entre o muro e o solo nas proximidades da estrutura de contenção, no instante da queda, é solucionado sem dificuldades (Figura 23).

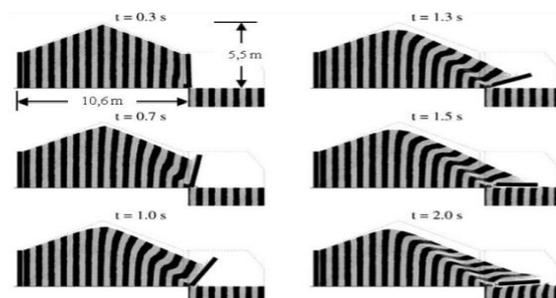


Figura 23 – Etapas de deformação da ruptura de um muro de contenção.

Fonte: (modificado de Wickowski, 2004)

Karuppiah (2004) é o responsável por desenvolver um modelo em 2D com malha irregular que permitisse a geração de fraturas em qualquer direção, sem a utilização da discretização tradicional de células quadradas. Já Zhou *et al.* (1999) aplicaram um modelo que buscava simular a resposta de um aterro reforçado com geomembrana submetido a carregamentos quase-estáticos. No tocante aos problemas envolvendo deslizamentos de taludes e encostas, destacam-se Numada *et al.* (2003) que investigaram o efeito de uma barreira rígida a jusante do deslizamento e sua influência na distância que a massa de solo mobilizada escorrega após atingir o obstáculo.

Já nas simulações numéricas envolvendo impactos de fluxos granulares em estruturas, a complexidade existe em função das grandes deformações envolvidas e interações com as estruturas. Além disso, a resposta do material é governada por interações entre os grãos, levando a uma reologia complexa. Os métodos discretos (DEM), que possuem uma abordagem micromecânica, parecem muito adequados a esse objetivo, mas dificilmente conseguem lidar com problemas de larga escala. Em contraste, os métodos contínuos podem lidar com grandes volumes granulares porque usam uma abordagem macroscópica na qual o comportamento do material é descrito por um modelo constitutivo. Gabrieli & Ceccato (2016) desenvolveram um estudo com o objetivo de comparar os resultados obtidos por uma abordagem discreta (código DEM) e contínua (software baseado no método do ponto material) na simulação do impacto de um fluxo granular seco em uma parede rígida. A geometria e discretização do problema são mostradas na Figura 24.

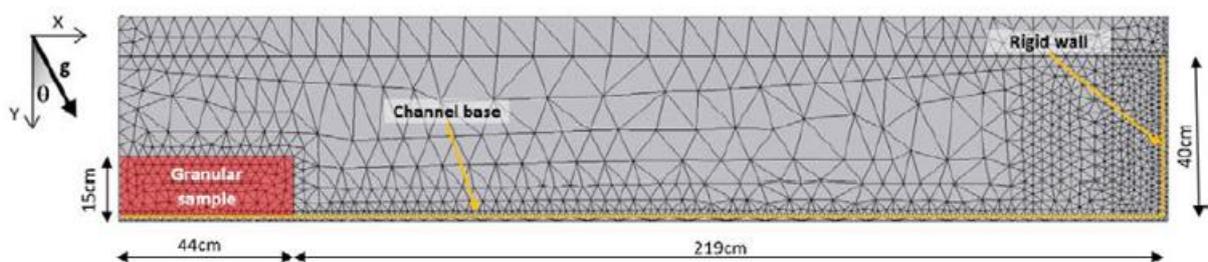


Figura 24 - Geometria e discretização do modelo com 7438 elementos e 18251 pontos materiais.

Fonte: (Gabrieli & Ceccato, 2016)

Ceccato & Simonini (2017) avaliaram a capacidade do método do ponto material de simular o impacto de um fluxo granular em uma barragem em que seu comportamento constitutivo é modelado com o critério de Mohr-Coulomb. Como ilustra a Figura 25, considerando uma velocidade de 8,8 m/s na hora do impacto, o fluxo granular induz um aumento da tensão

desviadora no pé de montante da barragem. Aumentando a velocidade do impacto para 32 m/s (Figura 26), a tensão desviadora na estrutura aumenta significativamente, excedendo a resistência do material. A barragem sofre grandes deformações e fluxo passa sobre a estrutura.

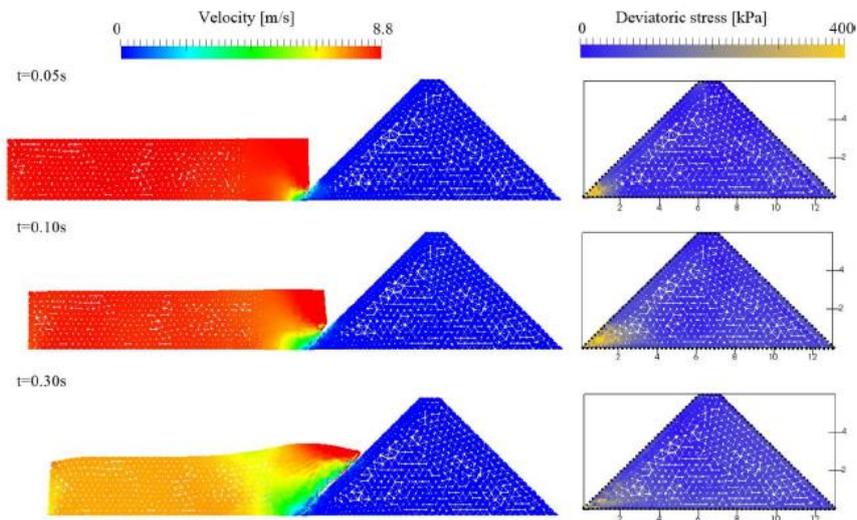


Figura 25 - Velocidade do fluxo granular em 8,8 m/s e tensão desviadora na barragem. Fonte: (Ceccato & Simonini, 2017)

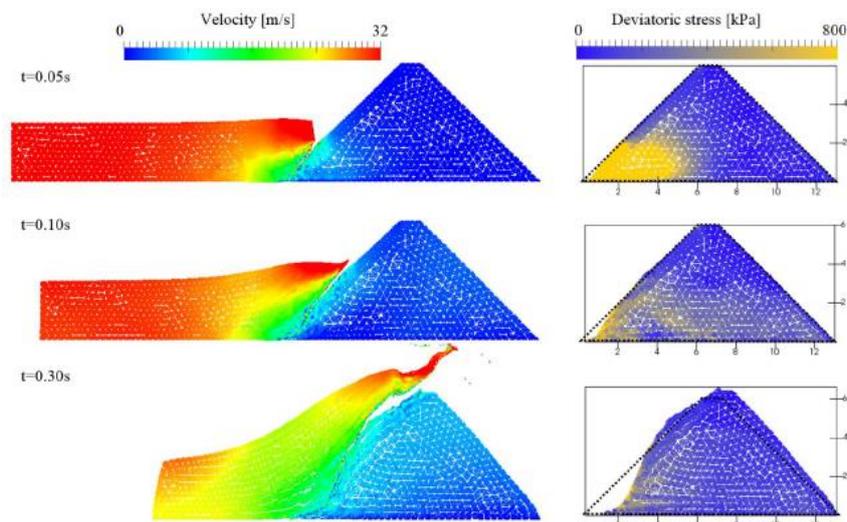


Figura 26 - Velocidade do fluxo granular em 32 m/s e tensão desviadora na barragem. Fonte: (Ceccato & Simonini, 2017)

Ainda na temática das análises dinâmicas, Zhang *et al* (2019) aplicaram simulações de compactação dinâmica de aterros pelo método do ponto material, onde os fatores que influenciam a eficiência da compactação são investigados. Gaume *et al* (2019) com base em um novo modelo elastoplástico para materiais porosos coesivos e no método do ponto material, investigaram por meio de simulações bidimensionais e tridimensionais o fluxo de avalanches de placas de neve, onde a dinâmica do fluxo é descrita através de uma topografia realista e da velocidade de propagação. Liu *et al* (2019) investigaram a ocorrência e evolução de vários modos de falha de declive em grandes deformações de solos espacialmente variáveis, usando simulação de Monte Carlo combinada com o Método do Equilíbrio Limite (MEL) e o Método do Ponto Material (MPM), aproveitando-se a eficiência computacional do MEL e a capacidade do MPM de modelar todo o processo de um deslizamento de terra.

Beuth *et al.* (2008) também apresentaram estudos para análises quase-estáticas com grandes deformações utilizando o MPM, porém, para modelos com integração implícita. Os autores simularam duas situações da geotecnia: o ensaio edométrico para estudo do adensamento do solo e uma análise de estabilidade de taludes.

O ensaio edométrico testou a acurácia do método já que foi possível compará-lo à solução analítica com facilidade. Beuth *et al.* (2008) apresentaram a curva tensão deformação de um ponto no centro da amostra, conforme apresenta a Figura 27, demonstrando que a solução analítica é coincidente à numérica.

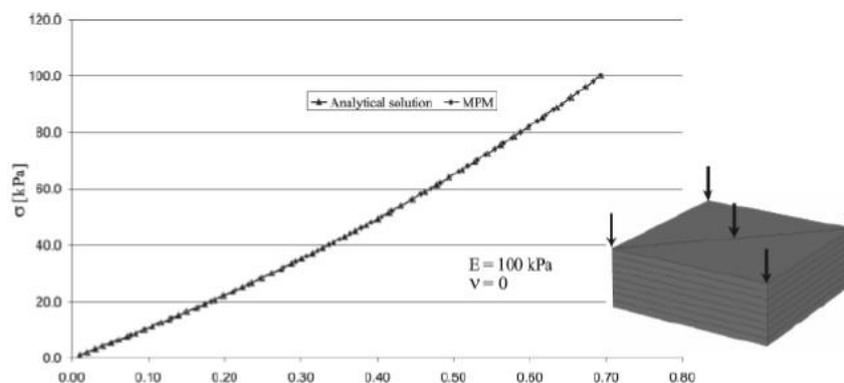


Figura 27 - Curva tensão-deformação para soluções analítica e numérica.

Fonte: (Beuth *et al.*, 2008)

Comprovada a eficácia do método, Beuth *et al.* (2008) realizaram análises de grandes deformações através da simulação de análise de estabilidade de taludes com diferentes módulos

de Young e Poisson, chegando-se a conclusão que o MPM é um excelente método para modelar problemas de grandes deformações. Concluíram também, que um maior refinamento da malha produz resultados de deslocamento mais confiáveis. Ademais, os autores propuseram que esse método pode ser usado para diversos problemas de geotecnia.

5.1 METODOLOGIA DO MPM

A seguir, é descrita a metodologia de análise do Método do Ponto Material.

5.1.1 FUNÇÕES DE FORMA

Durante a modelagem com o método do ponto material, muitas etapas envolvem a extrapolação de informações das partículas para a malha, e da malha para as partículas. Tais extrapolações são controladas através de equações conhecidas como Funções de Forma. Nos últimos anos foi desenvolvida uma formulação generalizada do MPM conhecida como *Generalized Interpolation Material Point* (GIMP), no qual são modificadas as funções de interpolação utilizadas no método convencional (Lorenzo *et al.*, 2013). No GIMP a massa das partículas é assumida distribuída e não concentrada em um ponto, permitindo a continuidade dos gradientes das funções de interpolação e uma transição suave das forças internas das células quando uma partícula passa de uma célula para outra (Zabala, 2010). No entanto, é válido salientar que o GIMP possui como principal limitação em relação a outros métodos tradicionais como elementos finitos (MEF) o maior tempo de processamento. Nos casos que envolvem grandes deformações e domínios extensos, deve-se buscar um nível de comprometimento entre a acurácia possível e o tempo de processamento. Em problemas tridimensionais com malhas muito refinadas o tempo de processamento acaba por inviabilizando a análise em microcomputadores convencionais, sendo necessária a utilização de grandes processadores ou processamento paralelo.

Os diferentes métodos de MPM avaliam de várias maneiras as Funções de Forma. No GIMP para interpolação geral de pontos materiais, a Função de Forma (Sip) e o Gradiente da Função de Forma (Gip) para o nó (i) e a partícula (p) são dadas por:

$$S_{ip} = \frac{\int \Omega_p \chi_p(\vec{x}) N_i(\vec{x}) dV}{\int \Omega_p \chi_p(\vec{x}) dV} \quad (5.10)$$

$$G_{ip} = \frac{\int \Omega_p \chi_p(\vec{x}) \nabla N_i(\vec{x}) dV}{\int \Omega_p \chi_p(\vec{x}) dV} \quad (5.11)$$

Onde, Ω_p é o domínio da partícula p ; $\chi_p(x)$ é a função característica da partícula para a partícula p ; e $N_i(x)$ é a função de forma da malha para o nó i .

5.1.2 ATUALIZAÇÃO DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES

Basicamente são quatro as tarefas básicas a cada intervalo de tempo no cálculo de MPM:

1. Extrapolação dos parâmetros de massa e momento da partícula para a malha;
2. Cálculo dos esforços internos e externos;
3. Atualização dos parâmetros de momento na malha utilizando os valores dos esforços;
4. Atualização dos parâmetros de posição e velocidade da partícula utilizando as informações atualizadas na malha.

Para modelar corretamente os esforços internos, esta sequência precisa rastrear as tensões e deformações nas partículas. Este rastreio é feito a partir do cálculo das velocidades na malha, possibilitando obter os gradientes de velocidade na partícula, o que é suficiente para atualizar os valores de tensões e deformações das partículas através de leis constitutivas. Propriedades dos materiais, modelos constitutivos e outras informações de estudo estão armazenados somente nos pontos materiais. A informação é transferida para os nós da malha de fundo, para os cálculos computacionais (Figura 28).

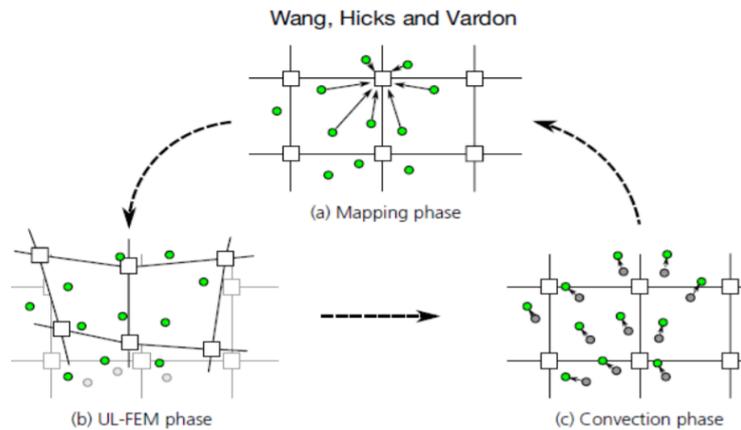


Figura 28 - Ciclo computacional do MPM: (a) Um conjunto de pontos materiais representando o material, sobre a malha de fundo. (b) As equações de movimento são resolvidas na malha de fundo, utilizando o MEF langrangeano atualizado. (c) O estado dos pontos materiais é atualizado, e a malha de fundo é resetada.

Fonte: (Wang, Hicks and Vardon, 2016)

5.2 SOFTWARE ANURA 3D®

O Anura 3D®, de acordo com o próprio manual do software, é uma ferramenta para análises de problemas geotécnicos. Trata-se de uma implementação 3D do método do ponto material que simula a fenomenologia envolvida na interação solo-água-estrutura e em grandes deformações. O software foi desenvolvido pela Anura 3D Research Community (Grupo de pesquisa de mecânica de solos e rochas da escola de engenharia civil da Universidade Politécnica de Catalunha, grupo GeoSystems do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Berkeley de Califórnia, grupo de pesquisa de geotecnia e ambiente do Departamento de Engenharia da Universidade de Cambridge, Faculdade de Engenharia Civil e Geociências da Universidade de tecnologia de Delft, unidade de geoengenharia e centro de Software Deltares, instituto de engenharia geotécnica e construção da universidade de Hamburgo, e grupo de pesquisa de geotecnia do departamento de engenharia civil, ambiental e engenharia de arquitetura da universidade Degli Studi di Padova).

Basicamente o processo para executar a simulação numérica consiste em três etapas, descritas a seguir:

1. Criação dos dados de entrada (pré-processamento com o software GiD);

2. Execução dos cálculos com o software Anura3D;
3. Visualização dos resultados (pós-processamento com o software ParaView).

Uma descrição esquemática deste procedimento é apresentada na Figura 29.

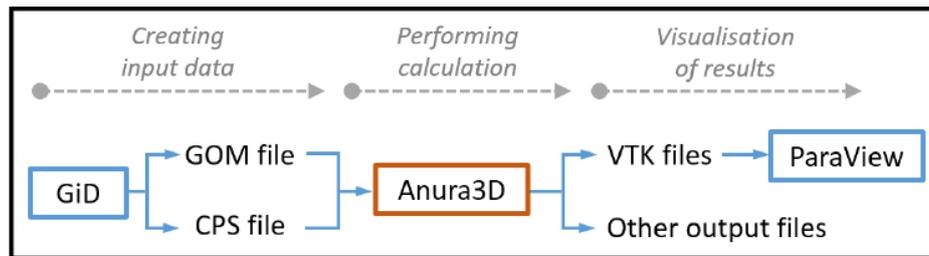


Figura 29 - Procedimento para executar uma simulação numérica com o Anura3D, incluindo pré e pós-processamento.

Fonte: (Manual Anura 3D®, 2017)

É importante destacar que o Anura 3D® permite que seja possível escolher dentre quatro tipos de modelos constitutivos para as simulações numéricas: elástico-linear, Cam-Clay modificado, Mohr-Coulomb e Mohr-Coulomb suavizado. Com relação ao tipo de material a ser utilizado, o software oferece seis possibilidades: material seco, material saturado drenado, material saturado não-drenado sob tensões efetivas, material saturado não-drenado sob tensões totais, material saturado para análises acopladas e líquido. A escolha do tipo de material influencia diretamente nos valores dos parâmetros (coesão, ângulo de atrito etc.) que serão colocados na fase de pré-processamento da simulação.

Como já dito, o Anura 3D®, por meio da utilização do método do ponto material, consegue modelar grandes deformações e também lidar com problemas avançados de interação solo-água-estrutura, assim, a aplicabilidade do software se estende à situações envolvendo, por exemplo: colapso de colunas, escavações, fundações, impactos de fluxos granulares (Figura 30) etc.

Apesar do software permitir a modelagem em três dimensões, todas as análises realizadas nesta monografia foram bidimensionais, no intuito de reduzir o custo computacional.

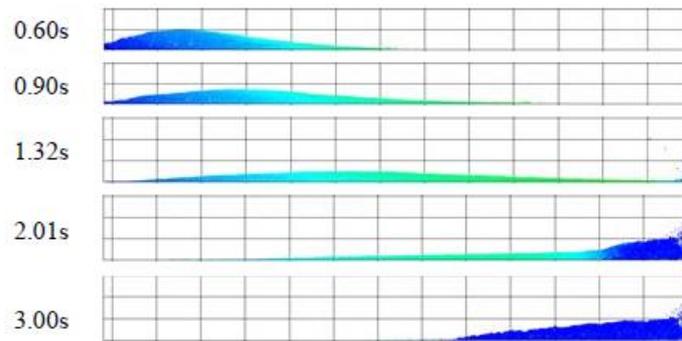


Figura 30 - Fase de propagação e impacto de um fluxo granular seco com a utilização do software

Anura3D

Fonte: (Ceccato & Gabrieli, 2016)

Ceccato & Simonini (2017) em suas modelações com o Anura 3D® envolvendo deslizamentos de terra rápidos e sua interação com estruturas rígidas e flexíveis, concluíram que possibilidade de se implementar as três dimensões no Anura 3D® permite considerar diferentes configurações do problema, fazendo uma análise mais completa.

5.2.1 EQUAÇÕES DE GOVERNO

Do ponto de vista matemático, o contínuo pode ser descrito por um conjunto de equações de governo diferenciais. Isso inclui conservação de massa, conservação de momento, balanço de energia e as condições de contorno correspondentes. Além disso, são necessárias equações constitutivas, como a relação tensão-deformação, característica do material que forma o contínuo.

5.2.1.2 CONSERVAÇÃO DE MASSA

A conservação de massa da fase sólida na forma lagrangiana é escrita conforme mostra a seguinte equação:

$$\frac{d}{dt}\rho + \rho \nabla \cdot \mathbf{v}_S = 0 \quad (5.20)$$

Em que \mathbf{v} é o vetor de velocidade da fase sólida. Uma das características da formulação do MPM para um material monofásico é que a massa de cada ponto do material permanece constante durante todo o cálculo. Este fato implica que a conservação da massa é satisfeita.

5.2.1.3 CONSERVAÇÃO DO MOMENTO

Por ser uma formulação dinâmica, o termo da aceleração é levado em consideração, sendo a conservação do momento do contínuo dada por:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}_S}{dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_S + \rho \mathbf{b} \quad (5.21)$$

A densidade é representada por ρ , $\frac{d\mathbf{v}_S}{dt}$ é a aceleração, S é o tensor de tensão de Cauchy e \mathbf{b} é o vetor de força corporal.

Dois tipos de condições de contorno são definidos: tração prescrita e deslocamentos prescritos. Cada um é aplicado no domínio correspondente, $\partial\Omega^\sigma$ e $\partial\Omega^u$ respectivamente,

$$\boldsymbol{\sigma}_S(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n} = \hat{\mathbf{t}}_S(t) \quad (\text{tração prescrita}) \quad (5.22)$$

$$\mathbf{u}_S(\mathbf{x}, t) = \hat{\mathbf{u}}_S(t) \quad (\text{deslocamentos prescritos}) \quad (5.23)$$

Onde $\boldsymbol{\sigma}_S(\mathbf{x}, t)$ é o tensor de tensão, \mathbf{n} é o vetor normal da unidade externa da superfície livre, e $\hat{\mathbf{t}}_S(t)$ é o vetor de tração da superfície. \mathbf{x} é o vetor de posição, $\hat{\mathbf{u}}_S(t)$ é o vetor de deslocamento e t é o tempo.

5.2.2 MODELOS CONSTITUTIVOS

A análise de qualquer problema surge de situações não controversas envolvendo o equilíbrio, a cinemática e a compatibilidade, sendo o elo entre eles fornecido pela relação entre mudança de tensão e mudança de deformação, ou seja, a resposta constitutiva.

Na mecânica dos meios contínuos, um conjunto infinito de partículas é estudado macroscopicamente sem considerar as possíveis descontinuidades no nível microscópico. Sem essas descontinuidades entre as partículas a descrição matemática do meio e de suas propriedades pode ser feita com funções contínuas (Olivella & Saracíbar, 2000).

A escolha do modelo constitutivo a ser usado para análise sempre estará nas mãos do modelador. O modelador deve possuir conhecimento das características particulares do solo, seja pelo seu histórico ou pela sua resposta, que provavelmente são importantes em uma aplicação específica e garantir que o modelo constitutivo adotado seja realmente capaz de reproduzir essas características. Como em toda modelagem, deve-se buscar uma complexidade razoável e adequada.

Nas simulações presentes nesta monografia, se fez uso dos modelos elástico-linear e elastoplástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Os dois modelos serão abordados a seguir.

5.2.2.1 MODELO CONSTITUTIVO ELÁSTICO-LINEAR

Um modelo elástico ou hiperelástico é definido como um modelo que não gera ou dissipa energia em *loops* de carga fechados, ou seja, independentemente da variação deformacional que ocorre dentro desse ciclo, o trabalho é nulo, e conseqüentemente a variação deformacional também é nula:

$$W = \oint \sigma \varepsilon = 0 \quad (5.24)$$

O modelo mais simples é o elástico linear isotrópico, também chamado de lei de Hooke, no qual a relação tensão-deformação pode ser totalmente descrita usando duas constantes. Na notação matricial, pode ser escrito conforme a equação abaixo:

$$d\sigma = Dd\varepsilon \quad (5.25)$$

Em que:

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\nu \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

Onde E corresponde ao módulo de Young e ν ao coeficiente de Poisson.

Apesar do solo exibir comportamento inelástico durante o carregamento, a engenharia geotécnica fez bom uso da teoria da elasticidade por várias décadas. Descrições elásticas do comportamento do solo são úteis para a ampla gama de soluções analíticas rápidas às quais eles dão acesso. Além disso, o uso do modelo linear-elástico se torna interessante para simular o comportamento de estruturas que possuem propriedades de resistência bem maiores que as do solo.

5.2.2.2 MODELO ELASTOPLÁSTICO COM CRITÉRIO DE RUPTURA DE MOHR-COULOMB

O princípio básico de elasto-plasticidade é que as deformações e razões de deformação são decompostas em duas frações, uma elástica (reversível) ε_{ij}^e e outra plástica (irreversível) ε_{ij}^p . No comportamento elástico o corpo recupera todas as deformações, enquanto que a plasticidade está associada com o desenvolvimento de deformações irreversíveis.

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \quad (5.27)$$

O modelo Mohr-Coulomb é um modelo elástico perfeitamente plástico amplamente utilizado para a análise geotécnica, graficamente representado na Figura 31, na qual a resistência ao cisalhamento τ na iminência da ruptura, no plano de ruptura, é determinada por:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (5.28)$$

Onde c é a coesão e ϕ é o ângulo de atrito.

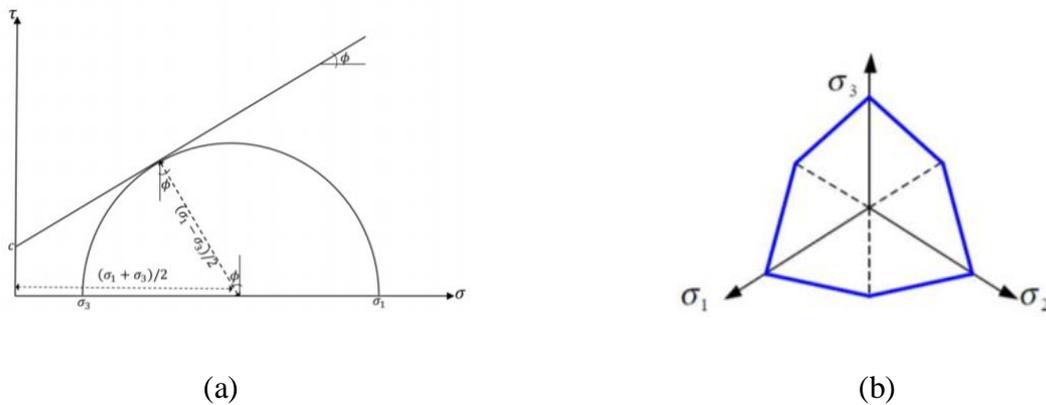


Figura 31 - Critério de escoamento de Mohr-Coulomb: a) no plano (σ, τ) ; b) em plano octaédrico

Fonte: (PUC-Rio, 2002)

O conceito do círculo de Mohr pode ser utilizado para expressar a função de resistência em termos das tensões principais σ_1 e σ_3 , sendo a tensão principal maior e a tensão principal menor, respectivamente. Assim, temos que:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \text{sen } \phi + c \text{cos } \phi \quad (5.29)$$

Este modelo é empregado para representar ruptura por cisalhamento de solos e rochas. O modelo Mohr-Coulomb é assim denominado porque é assumido que o material se comporta

como linear elástico até atingir a ruptura, não havendo a ocorrência de endurecimento devido ao fluxo plástico, ou seja, a superfície de plastificação é fixa (Perez, 2017).

A Figura 32 representa a relação tensão-deformação para o modelo Mohr-Coulomb, onde o material apresenta um comportamento linear elástico (recuperável) até atingir uma determinada tensão de escoamento, que se mantém constante para acréscimo de deformações plásticas (irrecuperáveis).

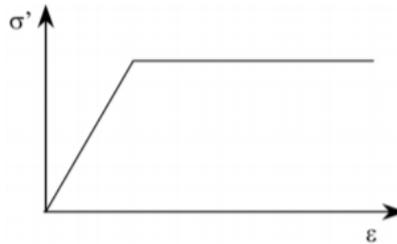


Figura 32 - Relação tensão-deformação para o modelo Mohr-Coulomb

5.2.3 DAMPING

O amortecimento, em inglês *damping*, é uma das propriedades que podem ter uma forte influência nos resultados do MPM, e por isso é uma das mais avaliada e estudada, uma vez que seu valor pode determinar o comportamento de uma simulação numérica feita com este método e, conseqüentemente, com o software Anura3D®. Para valores altos (0,7-0,9), o problema é considerado e simulado como quase-estático impedindo analisar corretamente o comportamento dinâmico total do movimento de massa. Por outro lado, com valores mais baixos (0,01-0,15), é possível simular a dissipação da energia do material, o que, por sua vez, permite uma melhor avaliação do movimento (Toro, 2019).

A inclusão de amortecimento no cálculo reduz a energia do sistema e a solução é amortecida. Apenas pequenos coeficientes de amortecimento locais, de até 5%, são recomendados para problemas dinâmicos, pois valores mais altos levam à perda de energia do sistema (Manual Anura3D®, 2017).

Sendo assim, conforme recomendação do manual do software, selecionou-se um *damping* de **5%** para todas as simulações presentes nesta monografia, por ser esse valor baixo o suficiente para representar o problema dinâmico.

6 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros de resistência na formação dos mecanismos de ruptura de uma coluna de rejeito e o posterior desenvolvimento do movimento do material utilizando o MPM (Método do Ponto Material), variou-se os parâmetros correspondentes à coesão, ângulo de atrito e módulo de Young (Figura 33) para analisar como se comporta o fluxo de rejeito em termos de velocidade e deslocamento.

Sabendo-se que o MPM utiliza modelos constitutivos baseados na mecânica dos contínuos, para as análises paramétricas utilizou-se o modelo elastoplástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb na coluna e o modelo elástico-linear na fundação onde irá se desenvolver o movimento. Para a fundação, adotou-se uma superfície perfeitamente lisa, ou seja, não foi introduzido algoritmo de contato para simular o atrito, de modo a simplificar o problema e reduzir o custo computacional. Além disso, empregou-se quatro pontos materiais por célula da malha para a coluna de rejeitos e a fundação. São esses pontos materiais que irão levar consigo as propriedades geotécnicas dos materiais. As simulações foram realizadas no software ANURA3D®.



Figura 33 - Análise Paramétrica

6.1 INFLUÊNCIA DA COESÃO

A análise da influência da coesão foi realizada pela ruptura de uma coluna de rejeito com geometria e propriedades descritos na Figura 34 e Tabela 3.

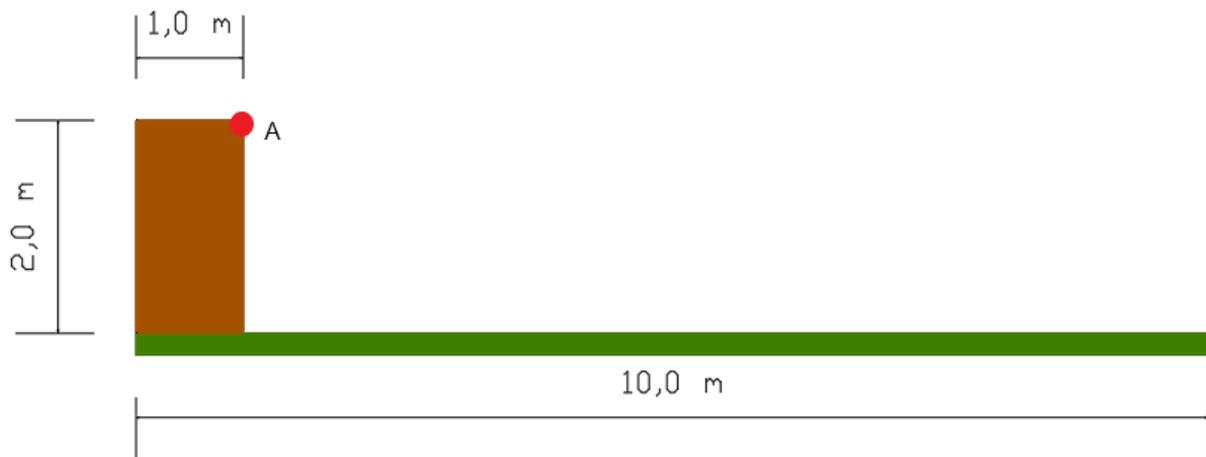


Figura 34 - Geometria da coluna de rejeito

Tabela 3 - Propriedades dos materiais

Material	Modelo Constitutivo	Parâmetros	Valor
Rejeito	Mohr-Coulomb	Porosidade	0,8
		Densidade	2600 kg/m ³
		Poisson	0,3
		Módulo de Young não-drenado (Eu)	22000 kPa
		Coesão (c)	0 kPa
			1 kPa
2 kPa			
Ângulo de atrito não-drenado	30°		
Fundação	Elástico-linear	Porosidade	0,4
		Densidade	2650 kg/m ³
		Poisson	0,3
		Módulo de Young	10000 kPa

Para simular o colapso, algumas condições de contorno foram consideradas. Os deslocamentos totais na base da fundação foram restringidos, assim como os verticais no topo do problema, os horizontais na lateral da coluna e os de profundidade em todo o domínio do problema, como mostra a Figura 35.

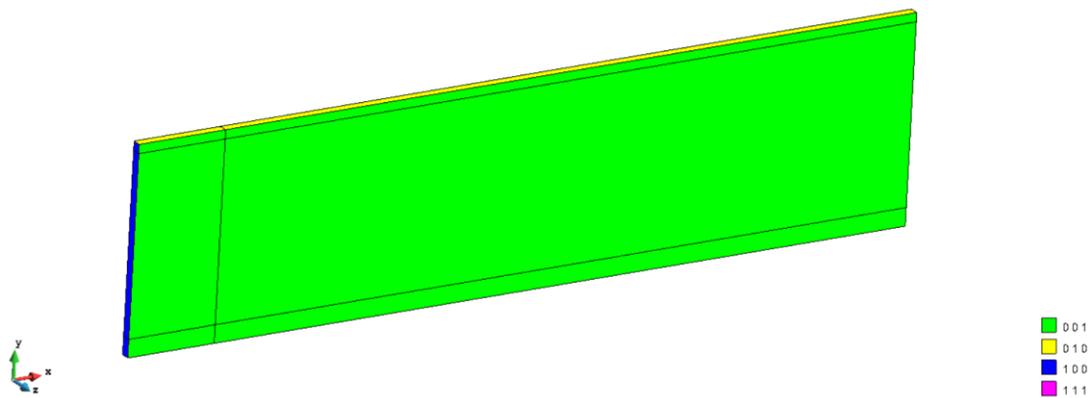


Figura 35 - Restrição dos deslocamentos (condições de contorno)

Para discretizar o domínio do problema, utilizou-se uma malha formada por elementos com tamanho de 0,1m x 0,1m (Figura 36), correspondendo a um total de 12420 elementos e 25521 nós. É importante destacar que quanto maior o número de elementos, ou seja, quanto menor o tamanho desses elementos, maior será o custo computacional para realizar as simulações, aumentando de forma significativa o tempo de análise. Porém, o resultado visual obtido de uma malha refinada é bem mais detalhado do que aquele obtido de uma malha grosseira. Toro (2019) destaca que à medida que o tamanho da célula aumenta, a distância percorrida pela massa instável sob a fundação diminui independentemente do número de pontos materiais.

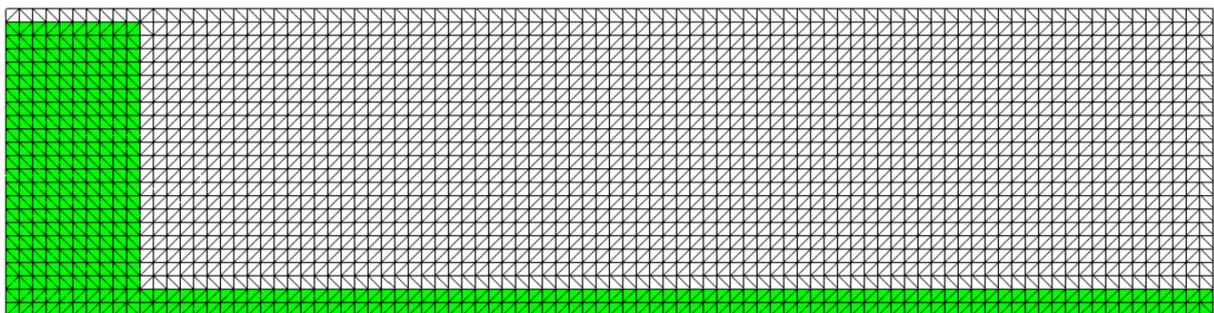


Figura 36 - Detalhe da malha utilizada na simulação

Para avaliar a influência da coesão no movimento do material após o colapso da coluna de rejeito, considerou-se as velocidades e os deslocamentos do Ponto A. A seguir tem-se os resultados obtidos para valores de 0 kPa, 1 kPa e 2 kPa de coesão.

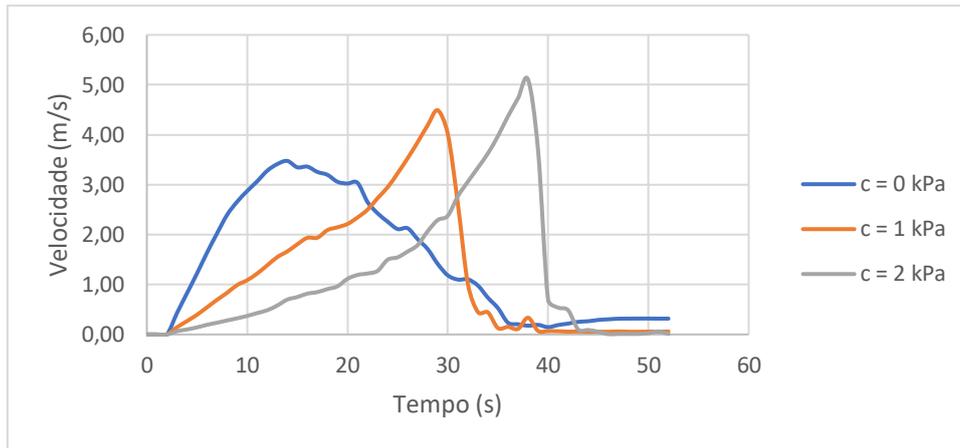


Figura 37 - Desenvolvimento da velocidade no Ponto A para diferentes valores de coesão

Percebe-se pela Figura 37 que, quanto maior a coesão, mais lento será o aumento da velocidade ao longo do tempo, porém maiores serão as magnitudes das velocidades de pico obtidas durante o desenvolvimento do fluxo. Além disso, quanto menor a coesão, mais rápido será atingido o pico de velocidade máxima.

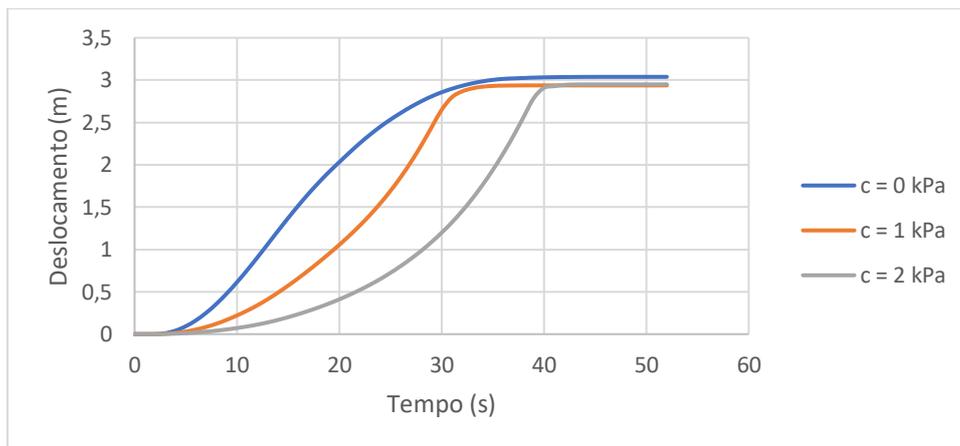


Figura 38 - Desenvolvimento do deslocamento no Ponto A para diferentes valores de coesão

Com relação aos deslocamentos, a Figura 38 mostra, como já esperado, que o aumento da coesão do rejeito provoca movimentos mais tardios, ou seja, o material com coesão de 0 kPa desenvolve deslocamentos mais rápidos em relação aos outros valores de coesão. Como a diferença entre os valores de coesão utilizados nas simulações foram pequenas, o material atingiu deslocamentos máximos próximos.

A Figura 39 expõe o desenvolvimento final dos movimentos para as coesões consideradas. No caso da coluna de rejeito com coesão de 0 kPa o desenvolvimento acontece como o esperado,

ou seja, de forma suave até se estabilizar. Para as coesões de 1 kPa e 2 kPa o movimento passa a apresentar características de um tombamento. Um dos prováveis motivos desse comportamento observado é a não permissão do modelo constitutivo, utilizado na simulação, de diminuir o valor da coesão até se atingir uma coesão residual, conforme acontece as deformações plásticas.

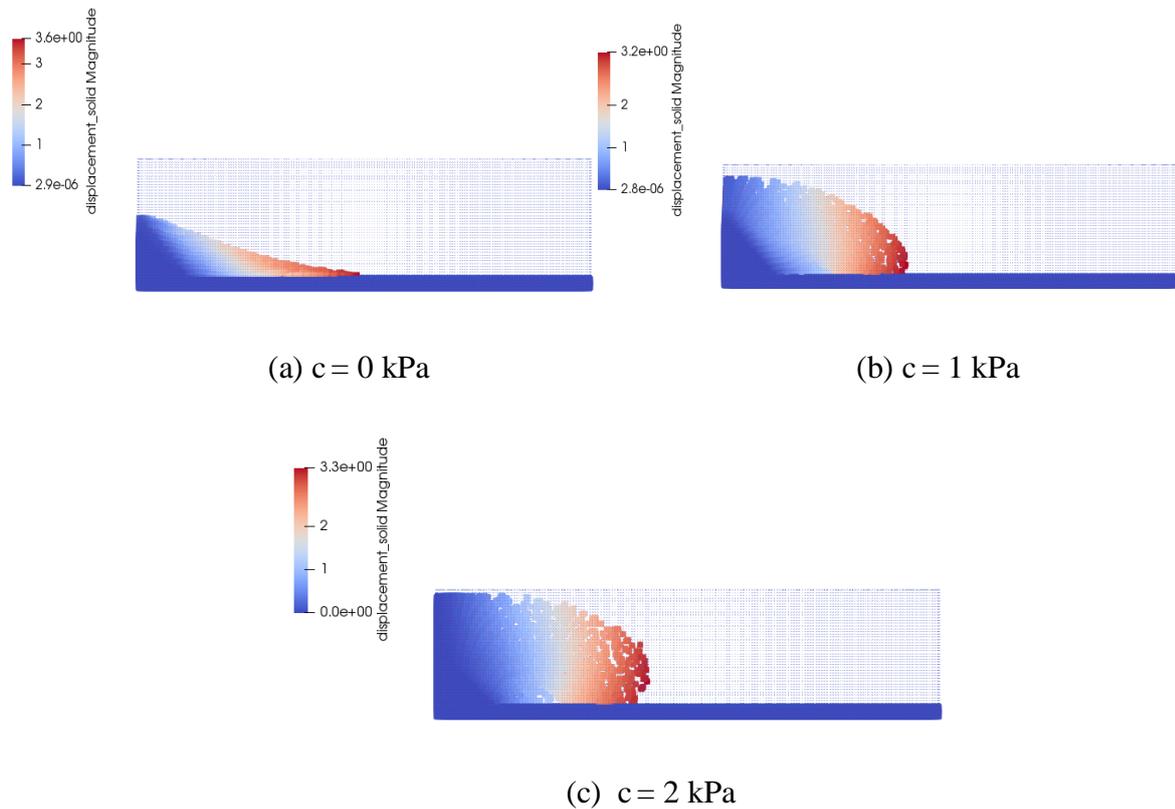


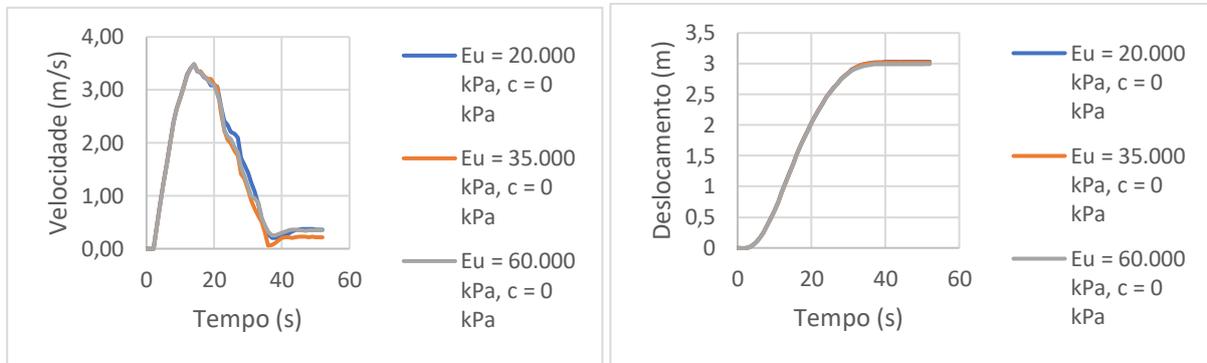
Figura 39 - Desenvolvimento final dos movimentos para as coesões indicadas

6.2 INFLUÊNCIA DO MÓDULO DE YOUNG

Sabe-se que os rejeitos mudam suas características geotécnicas conforme vão se adensando e um dos parâmetros que se altera com esse adensamento é o módulo de Young, podendo atingir, por exemplo, valores de 20.000 kPa para o material recém-lançado e 60.000 kPa quando já adensado (Rezende, 2013). Pensando nisso, verificou-se a influência do Módulo de Young no movimento do fluxo de rejeito após o colapso, analisando as velocidades e deslocamentos atingidos pelo Ponto A da coluna. Os valores considerados para o módulo de elasticidade foram: 20.000 kPa, 35.000 kPa e 60.000 kPa. Variou-se a coesão no intervalo $0 \text{ kPa} \leq c \leq 2 \text{ kPa}$.

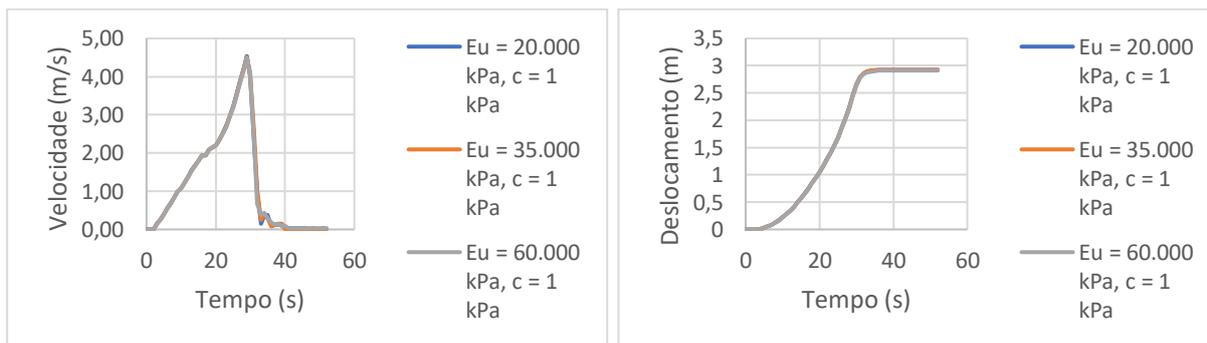
A geometria do problema, condições de contorno e as demais propriedades dos materiais foram as mesmas adotadas na análise de influência da coesão descrita anteriormente.

A Figura 40 mostra os resultados encontrados.



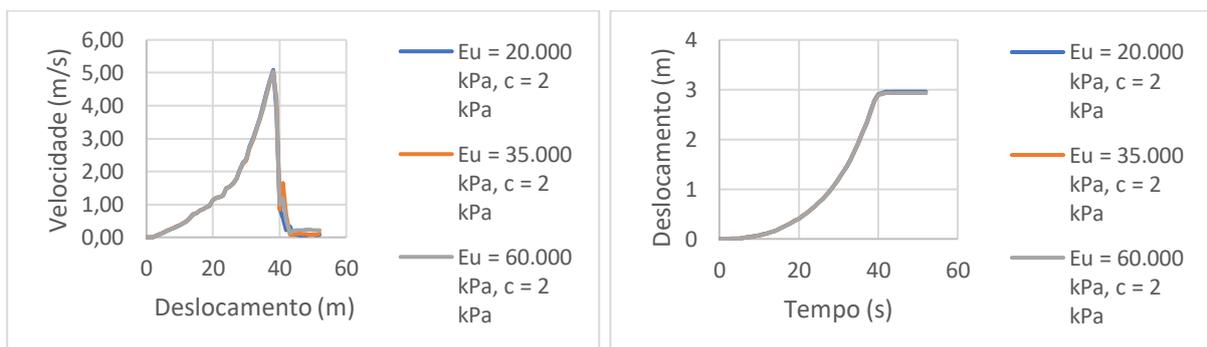
(a) Velocidade no Ponto A

(b) Deslocamento no Ponto A



(a) Velocidade no Ponto A

(b) Deslocamento no Ponto A



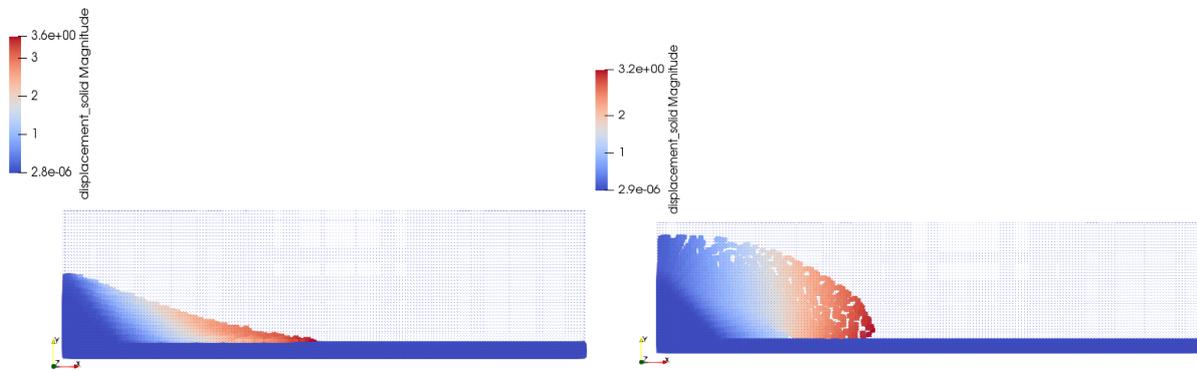
(a) Velocidade no Ponto A

(b) Deslocamento no Ponto A

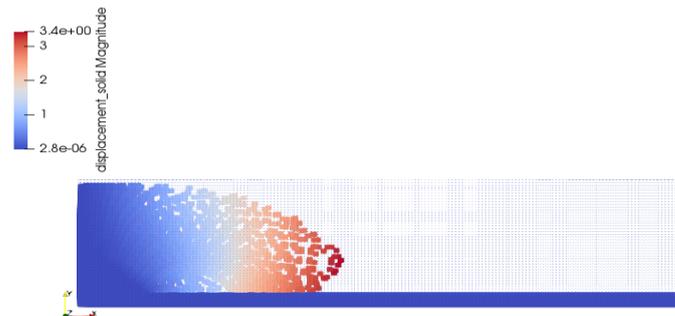
Figura 40 - Deslocamentos e velocidades (Ponto A): $20.000 \text{ kPa} \leq E_u \leq 60.000 \text{ kPa}$; $0 \text{ kPa} \leq c \leq 2 \text{ kPa}$

A variação do módulo para o intervalo considerado não provocou mudanças significativas nas magnitudes da velocidade e do deslocamento, mesmo com a variação da coesão as discrepâncias foram muito pequenas. Como já esperado, com a diminuição da coesão, as velocidades máximas de pico são atingidas mais rapidamente, conforme já descrito no Item 6.1.

No que diz respeito ao desenvolvimento do movimento da massa instável, os resultados indicaram que a variação da coesão possui bem mais influência na evolução dos deslocamentos do material do que o próprio módulo em si, apresentando, inclusive, grandes semelhanças com os resultados encontrados na análise de variação da coesão.



(a) $20.000 \text{ kPa} \leq E_u \leq 60.000 \text{ kPa}$; $c = 0 \text{ kPa}$ (b) $20.000 \text{ kPa} \leq E_u \leq 60.000 \text{ kPa}$; $c = 1 \text{ kPa}$



(c) $20.000 \text{ kPa} \leq E_u \leq 60.000 \text{ kPa}$; $c = 2 \text{ kPa}$

Figura 41 - Desenvolvimento final dos movimentos para as coesões e módulos indicados

6.3 INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ATRITO

Sabe-se que a utilização da técnica do aterro hidráulico em sistemas de disposição de rejeitos tem sido o método mais atraente para as mineradoras, pois proporciona uma redução de custos de construção pela facilidade na execução de barragens e por viabilizar a utilização do rejeito nestas estruturas de contenção. Entretanto problemas construtivos e de segurança podem ocorrer, principalmente devido à falta de controle das variáveis de descarga durante o lançamento e das características do rejeito. Normalmente, este lançamento é realizado com a utilização de hidrociclones ou canhões. No caso de lançamento com canhões, algumas variáveis como vazão e concentração da mistura lançada conduzem para um alto grau de heterogeneidade do material depositado. Esse tipo de seleção é função do processo de segregação ocorrido na praia e conduz à formação de zonas com propriedades geotécnicas distintas. Devido à essa heterogeneidade, alguns parâmetros de resistência podem apresentar uma certa variabilidade em seus valores, como por exemplo o ângulo de atrito do material.

Os estudos realizados em laboratório para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos rejeitos granulares de minério de ferro têm normalmente indicado uma faixa de variação compreendida entre 25° e 35° para o ângulo de atrito e coesão muita baixa ou nula (Presotti, 2002). Pensando nisso, realizou-se simulações de colapso da coluna de rejeito variando-se o ângulo de atrito do material com objetivo de avaliar a influência deste parâmetro no desenvolvimento das velocidades e deslocamentos do rejeito.

A geometria do problema, condições de contorno e propriedades dos materiais foram as mesmas consideradas na análise de influência da coesão. Para o ângulo de atrito (não-drenado) considerou-se os seguintes valores: 30° , 33° e 36° . Nas três situações manteve-se a coesão do material em 0 kPa.

A seguir, nas Figuras 42 e 43, estão os resultados encontrados em termos de velocidades e deslocamentos do Ponto A da coluna:

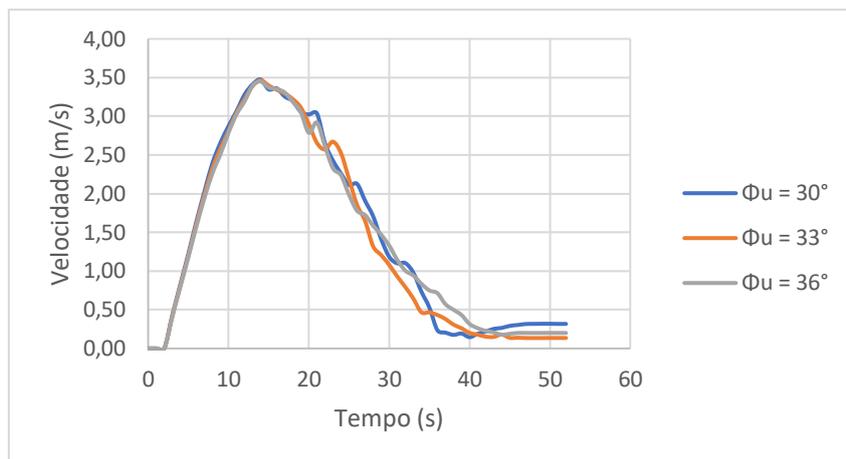


Figura 42 - Desenvolvimento da velocidade no Ponto A para diferentes valores de ângulo de atrito

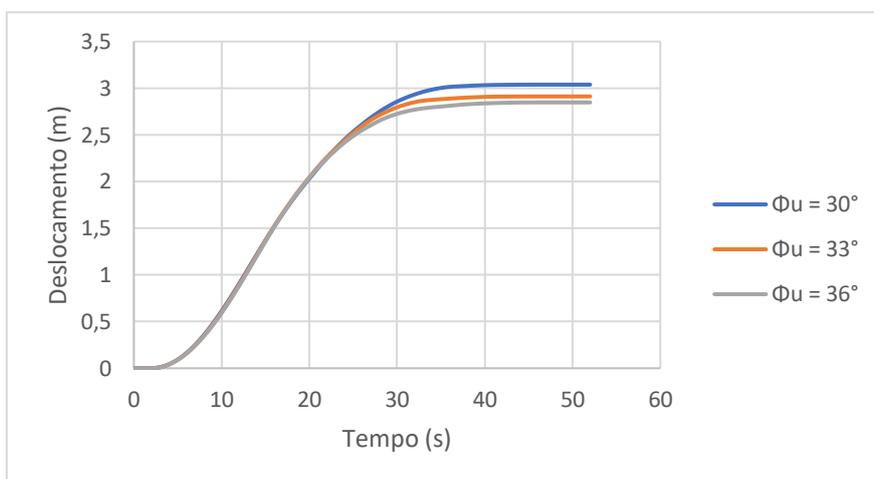


Figura 43 - Desenvolvimento do deslocamento no Ponto A para diferentes valores de ângulo de atrito

Como mostra a Figura 42, a velocidade não apresenta grandes diferenças nas magnitudes alcançadas ao longo do tempo com a variação do ângulo de atrito, no entanto é possível notar oscilações quando sua magnitude diminui. Essas oscilações são devidas ao efeito próprio do atrito.

Já na Figura 43, dá pra ver que os deslocamentos máximos tendem a diminuir com o aumento do ângulo de atrito, o que é compreensível, já que quando o atrito aumenta a resistência ao movimento também aumenta e assim, as distâncias percorridas diminuem.

Na Figura 44 tem-se o desenvolvimento do movimento da massa instável para os ângulos de atrito considerados, onde é possível perceber a diminuição da distância percorrida com o aumento do atrito.

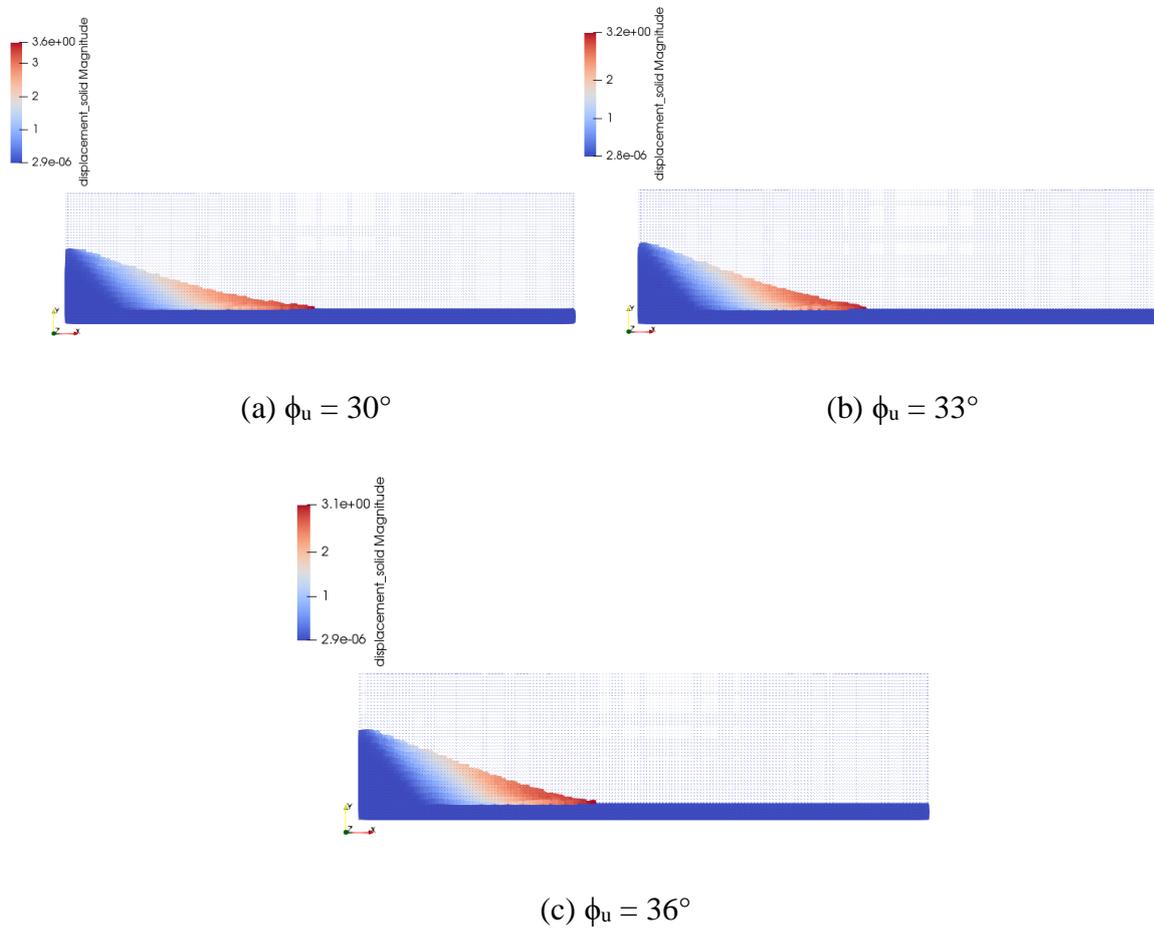


Figura 44 - Desenvolvimento final dos movimentos para os ângulos de atrito indicados

7 ANÁLISE DO IMPACTO

Com relação ao projeto técnico de descomissionamento, uma das alternativas é a construção de uma nova estrutura de contenção a jusante da barragem que está sendo descomissionada. Essa nova estrutura a ser dimensionada, dependerá de uma série de parâmetros geotécnicos e hidráulicos associados aos riscos provenientes do processo de descomissionamento. Diante de uma eventual ruptura da barragem que está sendo descomissionada, a nova estrutura de barramento a jusante deverá ser capaz de suportar o impacto de todo esse volume de material, de forma a evitar maiores desastres ambientais, sociais e econômicos.

Este capítulo tratará da análise do impacto de uma coluna de rejeitos em uma barragem de terra com seção homogênea situada a jusante da coluna. Foram consideradas duas distâncias relativas entre a coluna e a barragem: 500 m e 1000 m, para que assim seja possível avaliar a diferença de comportamento do impacto na barragem. Através do carregamento obtido com os estudos do impacto, realizou-se também uma análise de estabilidade da barragem que será abordada no Capítulo 8.

Assim como na análise paramétrica, todas as simulações abordadas neste capítulo foram bidimensionais para reduzir o custo computacional, já que se utilizou de escalas reais em todo o domínio do problema.

7.1 GEOMETRIA E CONDIÇÕES DE CONTORNO DO PROBLEMA

A Figuras 45 e 46 detalham a geometria adotada para as situações envolvendo as duas distâncias consideradas. A coluna de rejeitos possui uma altura de 100 m e comprimento de 500 m, dimensões aproximadas da barragem de Brumadinho-MG que rompeu no dia 25 de janeiro de 2019.

Para a geometria da barragem, tomou-se como referência a Tabela 4 onde estão indicados os valores que são recomendados para as inclinações dos taludes de barragens homogêneas. Para o material que constituirá a barragem escolheu-se argila compactada, assim, as inclinações dos taludes de montante e jusante serão 3:1 e 2,5:1, respectivamente. A altura da barragem será metade da altura da coluna de rejeitos, ou seja, 50 m, e a largura da crista terá 9 m.

Tabela 4 - Seções Tipos e Inclinações de Taludes de Barragens Homogêneas

(Fonte: Hradileck, 2002)

Tipo	Sujeita a esvaziamento rápido	Classificação do solo	Inclinação de montante	Inclinação de jusante
Homogênea ou Homogênea Modificada	NÃO	GC, GM, SC	2,5:1	2,0:1
		SM, CL, ML	3,0:1	2,5:1
		CH, MH	3,5:1	2,5:1
Homogênea Modificada	SIM	GC, GM, SC	3,0:1	2,0:1
		SM, CL, ML	3,5:1	2,5:1
		CH, MH	4,0:1	2,5:1

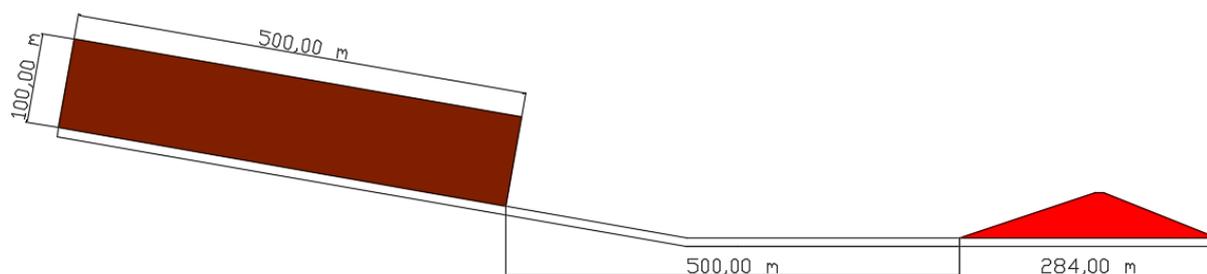


Figura 45 - Geometria do problema para distância de 500 m

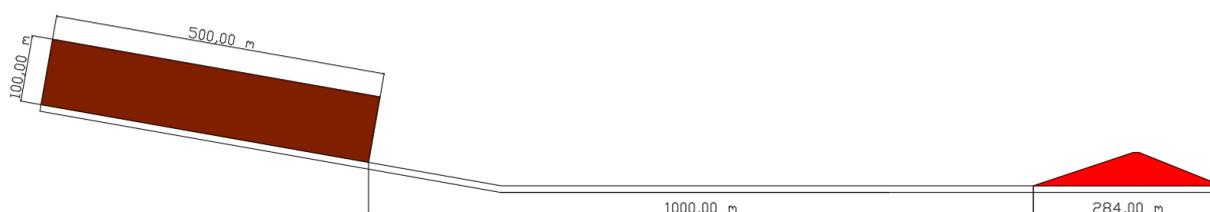


Figura 46 - Geometria do problema para distância de 1000 m

Pelas geometrias mostradas nas Figuras 45 e 46, é possível perceber que as distâncias foram consideradas em projeção horizontal. Além disso, uma rampa com inclinação de 10° foi adotada no trecho inicial de 200 m, também em projeção. A admissão da rampa tem por finalidade permitir um maior ganho de energia na movimentação do rejeito após o colapso, de forma a

compensar a utilização de uma malha grosseira para discretizar o domínio do problema. Como sabe-se, quanto menor o número de elementos da malha, ou seja, quanto maior for o tamanho dos elementos, a distância percorrida pelo material sob a fundação diminui.

A malha utilizada nos dois casos é formada por elementos com tamanho 10 m x 10 m, perfazendo um total de 9954 elementos e 20754 nós para o caso em que a distância coluna-barragem é de 500 m, e 16320 elementos e 34269 nós para a distância de 1000 m. Na Figura 47 tem-se em detalhe a malha empregada nas simulações. Como a geometria do problema nos dois casos são parecidas, mudando-se apenas a distância, será mostrada apenas a malha para o caso de 500 m. Para as duas distâncias empregou-se quatro pontos materiais por célula da malha para a coluna, a fundação e a barragem. São esses pontos que armazenam consigo as propriedades geotécnicas dos materiais e o modelo constitutivo adotado.

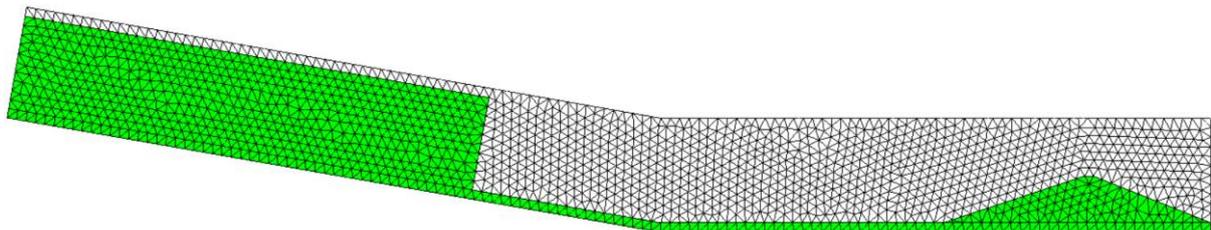


Figura 47 - Detalhe da malha para distância Coluna-Barragem de 500 metros

Como condições de contorno restringiu-se os deslocamentos totais na base da fundação, os verticais no topo do problema, os horizontais na lateral da coluna e os de profundidade nas faces da geometria (Figura 48). Além disso, para a base, não se aplicou algoritmo de contato para simular o efeito do atrito, ou seja, toda a superfície da fundação comportou-se como perfeitamente lisa.

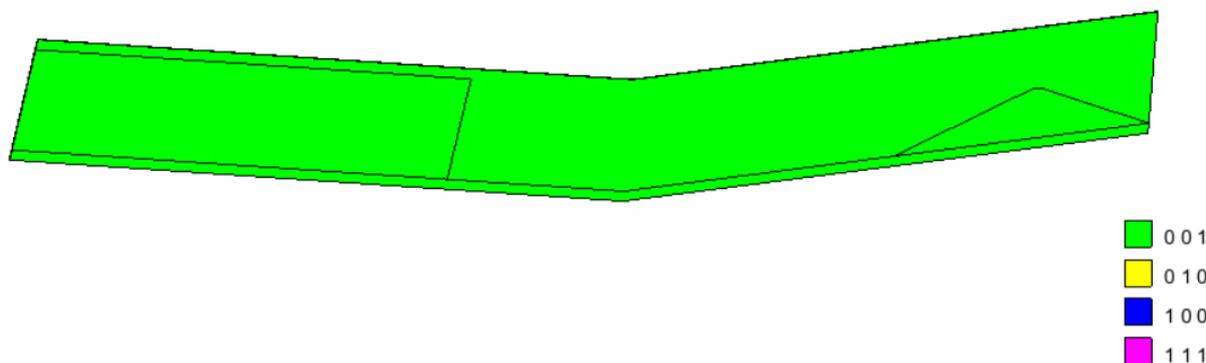


Figura 48 - Condições de contorno (restrições)

As simulações envolvendo as duas distâncias ocorreram em duas etapas. A primeira etapa consistiu na geração de um estado inicial de tensão com restrição de deslocamento horizontal na face da coluna de rejeito, enquanto que na segunda e última etapa, a ruptura da coluna foi simulada pelo efeito da gravidade depois de remover a restrição de deslocamento.

Com relação aos modelos constitutivos, para a fundação considerou-se o modelo elástico-linear, enquanto que para a coluna e a barragem, o modelo elastoplástico com critério de Mohr-Coulomb.

7.2 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DOS MATERIAIS

Para acionar o gatilho de liquefação em barragens de rejeitos, a resistência de pico deve ser ultrapassada, devido a um carregamento não-drenado (Byrne, 2008). Este somente é alcançado se a velocidade do carregamento for suficientemente alta, de acordo com o coeficiente de permeabilidade do solo, não permitindo a dissipação das poropressões. Portanto, nas simulações, a coluna de rejeito se comportará como um material saturado não-drenado sob tensões totais.

Como já dito no Capítulo 6, os modelos constitutivos presentes no software Anura3D® não permitem a diminuição do valor da coesão do material conforme as deformações plásticas acontecem, ou seja, esse valor permanece constante com o comportamento dinâmico ao longo de todo o domínio do problema. Portanto, para a coesão não-drenada do rejeito, optou-se por escolher um valor compatível com a resistência do material após a ruptura por liquefação, ou

seja, após o colapso da coluna. A Razão de Resistência Liquefeita (S_u/σ'_{vo}), que representa a condição de tensão pós-gatilho, geralmente apresenta valores que podem variar entre 0,05 e 0,12) (Mendes, 2019). Sendo assim, escolheu-se o valor de 40 kPa para representar a coesão não-drenada média de toda a coluna de rejeitos. Os valores dos demais parâmetros encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades dos materiais para análise do impacto

Material	Modelo Constitutivo	Parâmetros	Valor
Rejeito	Mohr-Coulomb	Porosidade	0,8
		Densidade	2600 kg/m ³
		Poisson	0,3
		Módulo de Young não-drenado (E_u)	22000 kPa
		Coesão não-drenada (c_u)	40 kPa
		Ângulo de atrito não-drenado (ϕ_u)	35°
Barragem Homogênea	Mohr-Coulomb	Porosidade	0,3
		Densidade	1900 kg/m ³
		Poisson	0,3
		Módulo de Young	40000 kPa
		Coesão efetiva (c')	31 kPa
		Ângulo de atrito efetivo (ϕ')	27°
Fundação	Elástico-Linear	Porosidade	0,4
		Densidade	2650 kg/m ³
		Poisson	0,3
		Módulo de Young	10000 kPa

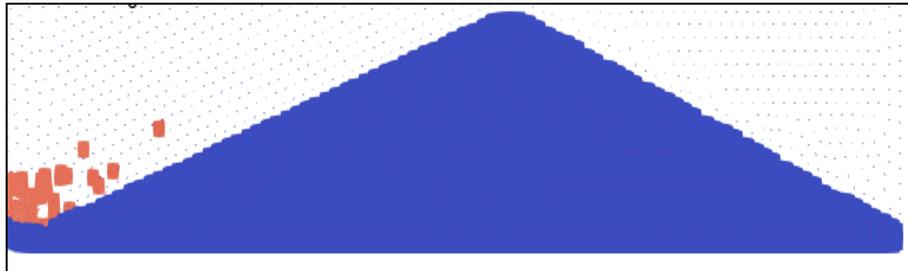
7.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir, são mostrados os resultados encontrados para as simulações de impacto envolvendo as duas distâncias adotadas: 500 m e 1000 m.

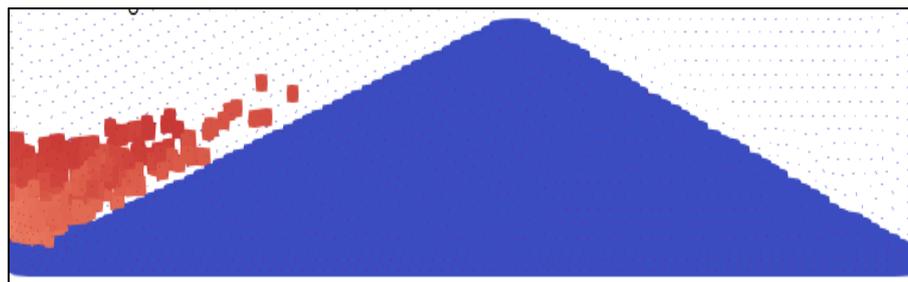
7.3.1 DISTÂNCIA COLUNA-BARRAGEM DE 500 m

O desenvolvimento do movimento, para diferentes tempos durante o impacto, para a distância coluna-barragem de 500 m é mostrado na Figura 49. Verifica-se que o primeiro impacto acontece na região próxima ao pé da barragem, onde a magnitude da velocidade do rejeito é maior e, conseqüentemente, o carregamento também é maior. À medida que o tempo passa, o

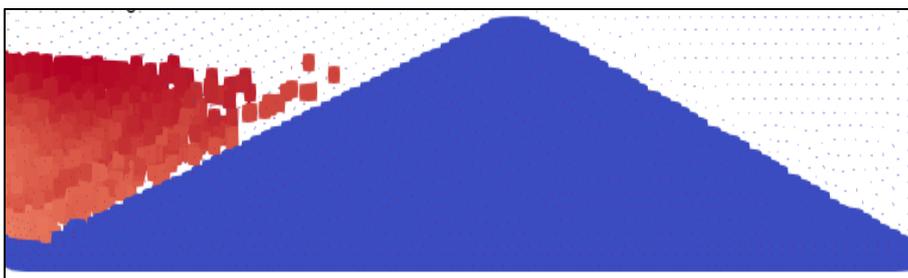
material vai se acumulando ao longo do talude da barragem e, com isso, as velocidades vão diminuindo junto com o carregamento.



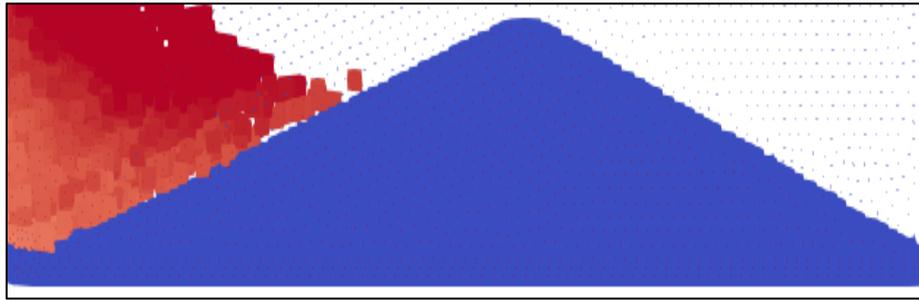
(a) Tempo 0 s (início do impacto)



(b) Tempo 2 s



(c) Tempo 6 s



(d) Tempo 16 s

Figura 49 - Impacto para distância coluna-barragem de 500m

Quando o fluxo atinge a barragem, ele é projetado para cima, aumentando assim a altura da massa que tensiona o talude. Quando o material desacelera, forma-se uma zona morta, que atua como um amortecedor diminuindo o efeito do impacto dinâmico na barragem. A altura da barragem foi suficiente para evitar o galgamento do fluxo.

Para obter o carregamento da massa instável sobre a barragem, foram escolhidos três pontos materiais situados ao longo do talude de montante, conforme mostra a Figura 50. Os três pontos fazem parte da malha fixa que discretiza o domínio do problema e que é responsável pelos cálculos das equações de movimento, obtendo-se, desta forma, a carga.

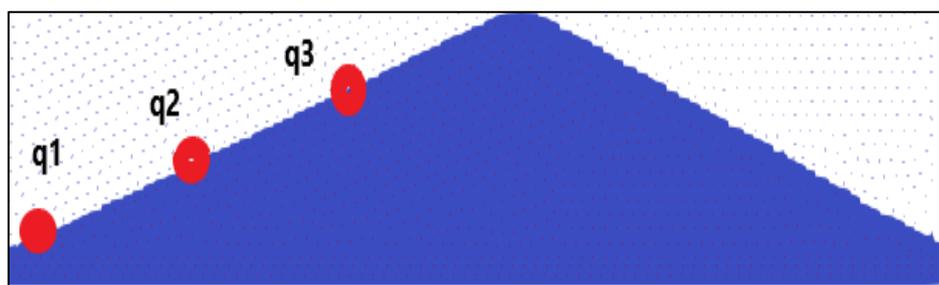


Figura 50 - Pontos onde foram obtidos os carregamentos na barragem para distância coluna-barragem de 500 m.

É importante salientar que as três cargas (q_1 , q_2 e q_3) atuam apenas na direção horizontal, a componente vertical das tensões não foi considerada na análise. O resultado para os três

carregamentos encontra-se na Figura 51. Observa-se que o primeiro e maior pico de tensão é atingido por q1, justamente o carregamento que atua no pé da barragem onde as velocidades são maiores. Conforme o tempo passa, o rejeito vai se acumulando ao longo do talude e a zona morta vai amortecendo o impacto. Isto explica a defasagem entre os picos de carregamento e a consequente diminuição de suas magnitudes.

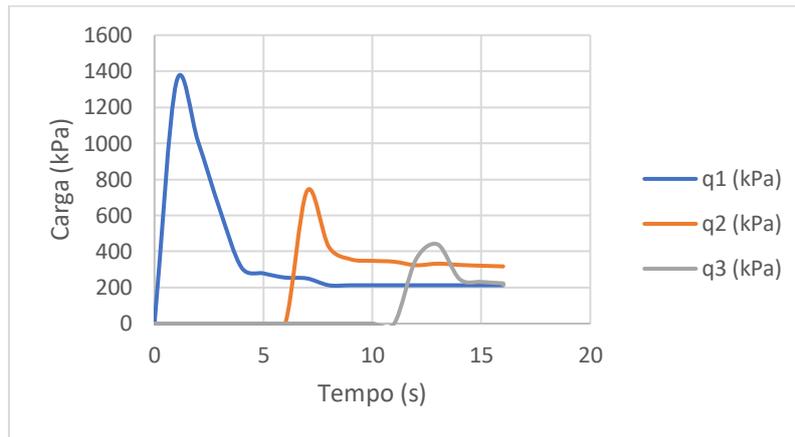
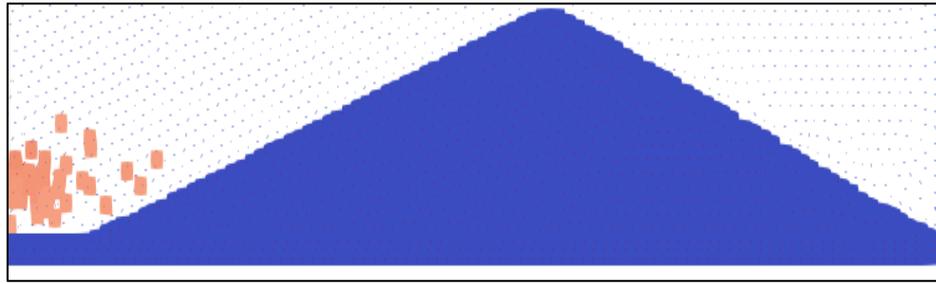


Figura 51 - Carregamentos na barragem para distância coluna-barragem de 500 m.

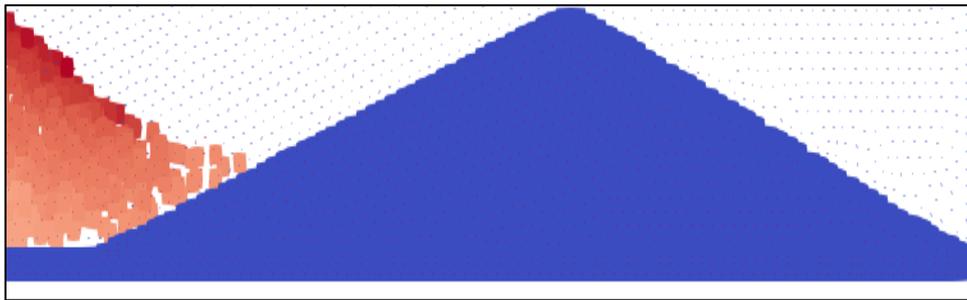
Pelo desenvolvimento dos carregamentos, verifica-se que nenhum deles chega a zerar. Após o pico as cargas diminuem até atingir um valor residual constante. Este valor residual é devido ao carregamento quase estático provocado pela zona morta formada pelo acúmulo de rejeito na barragem.

7.3.2 DISTÂNCIA COLUNA-BARRAGEM DE 1000 m

Para a distância coluna-barragem de 1000 m, o desenvolvimento do movimento durante o impacto é mostrado na Figura 52.



(a) Tempo 0 s (início do impacto)



(b) Tempo 16 s

Figura 52 - Impacto para a distância coluna-barragem de 1000 m.

Em comparação com os resultados obtidos para a distância de 500 m, é perceptível que o fluxo chega com bem menos energia, já que após 16 s de impacto, o acúmulo de material ao longo do talude da barragem atinge uma altura também menor. Para este caso, optou-se por pegar a carga em apenas um ponto do talude (Figura 53). Este ponto representará o carregamento até um terço da altura total da barragem, conforme se verá na análise de estabilidade descrita no capítulo seguinte.

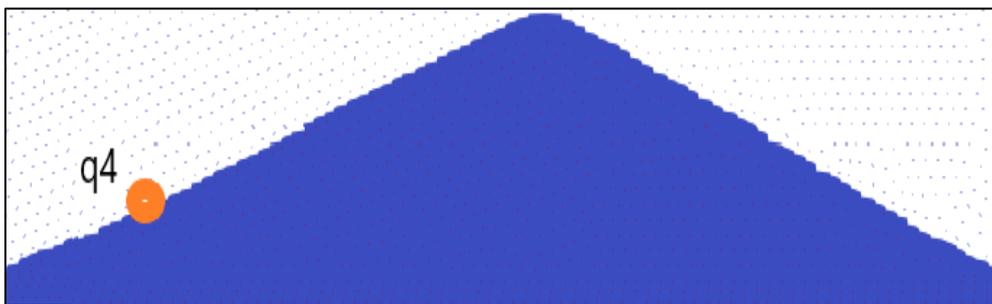


Figura 53 - Ponto onde foi obtido o carregamento para a distância coluna-barragem de 1000 m.

O resultado para o carregamento q4 encontra-se na Figura 54. As mesmas observações feitas para a análise da primeira distância valem para esta também. Como as velocidades de impacto são menores, a diferença de magnitude entre a carga de pico e a carga residual é bem menor que aquelas encontradas para a distância de 500 m.

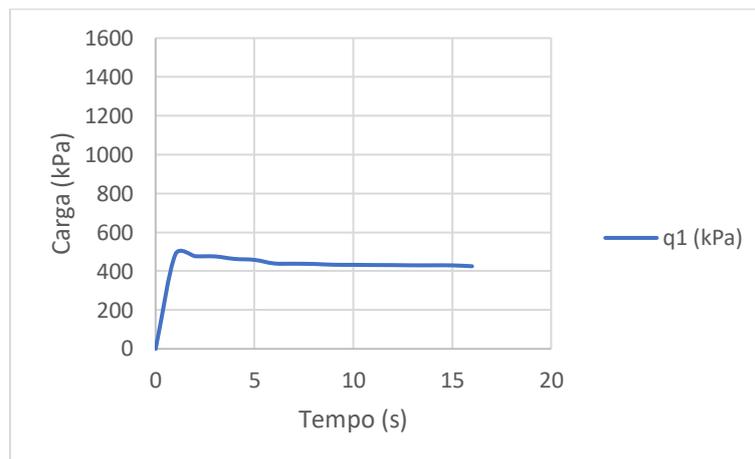


Figura 54 - Carregamento na barragem para distância coluna-barragem de 1000 metros

8 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA BARRAGEM

Neste capítulo será feita uma avaliação da estabilidade da barragem submetida aos carregamentos descritos no capítulo anterior. Para isso, optou-se por utilizar o software SLOPE/W do pacote de softwares da Geostudio® 2012. O módulo SLOPE/W é um dos softwares mais modernos, reconhecidos e utilizados no mercado de aplicações voltadas para a análise da estabilidade de taludes, fundamentando-se em análises de Equilíbrio Limite e suas formulações, que se baseiam, principalmente, no método das lamelas. Os dados de entrada dos materiais para as análises no SLOPE/W seguem o modelo de Mohr-Coulomb.

Primeiramente a seção em estudo foi submetida a uma análise das tensões *in situ* pelo módulo SIGMA/W também da Geostudio® 2012. Na 2ª etapa, o carregamento foi imposto na barragem, onde a análise, desta vez, foi do tipo *Load/Deformation*. O SIGMA/W realiza desde as análises de deformação elástica simples aumentando sua sofisticação até as análises de deformação de solo e estruturas cisalhantes (plástica). Os dados de entrada dos materiais para as análises no SIGMA/W seguem o modelo elastoplástico (total).

Por fim, as tensões e deformações do SIGMA/W foram usadas diretamente no SLOPE/W para realizar a análise de estabilidade da barragem.

A duração do carregamento decorrente do impacto, assim como no capítulo anterior, para as análises realizadas nesta seção foi de 16 s.

8.1 SEÇÃO ANALISADA, CONDIÇÕES DE CONTORNO E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Na Figura 55 é apresentada a seção analisada. Como condições de contorno, restringiu-se os deslocamentos horizontais nas laterais da fundação e os deslocamentos totais na base.

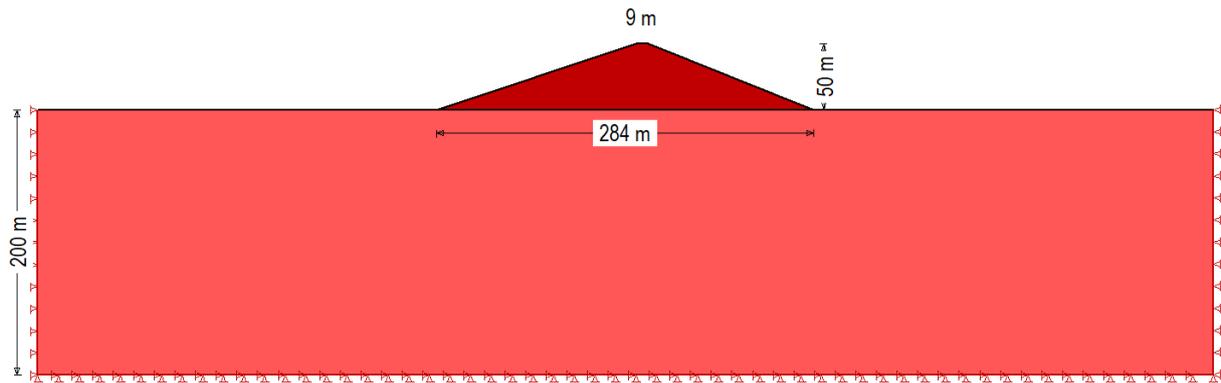


Figura 55 - Seção Analisada

As propriedades dos materiais encontram-se na Tabela 6, com os respectivos valores dos parâmetros geotécnicos.

Tabela 6 - Dados de entrada dos materiais (Modelo Mohr-Coulomb)

Material	Parâmetros	Valor
Barragem Homogênea	c'	31 kPa
	E	40000 kPa
	γ	21 kN/m ³
	ϕ	27°
	ν	0,3
Fundação	c'	20 kPa
	E	30000 kPa
	γ	19 kN/m ³
	ϕ	20°
	ν	0,3

8.2 CONDIÇÕES DO CARREGAMENTO

Para o caso em que a distância coluna-rejeito é de 500 m, como sabe-se, obteve-se o carregamento em três pontos (q_1 , q_2 e q_3) ao longo do talude de montante da barragem. Para a análise de estabilidade, o carregamento foi disposto em três regiões de iguais comprimentos, até atingir a altura máxima da barragem, conforme apresenta a Figura 56.

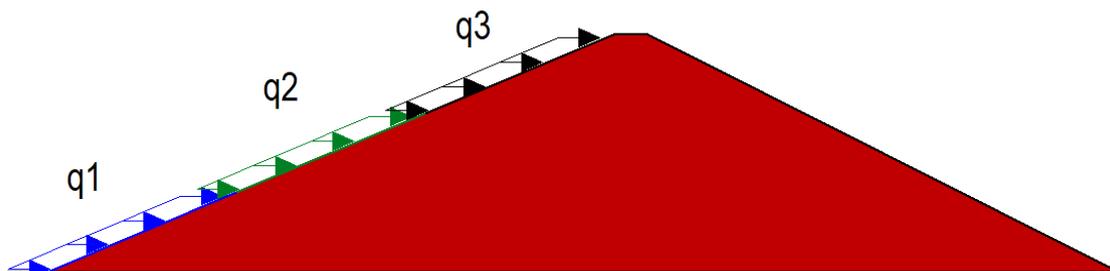


Figura 56 - Disposição do carregamento para a distância coluna-barragem de 500 metros

Além disso, como já dito no capítulo anterior, considerou-se apenas as cargas horizontais, desprezando-se a componente vertical do carregamento. Todos os três carregamentos foram colocados para atuar de forma simultânea, seguindo as funções mostradas nas Figura 51.

Para a distância coluna-barragem de 1000 m, como a magnitude das cargas foi consideravelmente menor, juntamente com a altura atingida pelo rejeito sobre a barragem, foi imposto no talude apenas um carregamento (q4) iniciando no pé da barragem e terminando até aproximadamente um terço altura máxima da barragem (Figura 57), ou seja, 17 m. Também para este caso, apenas a componente horizontal do carregamento foi considerada.

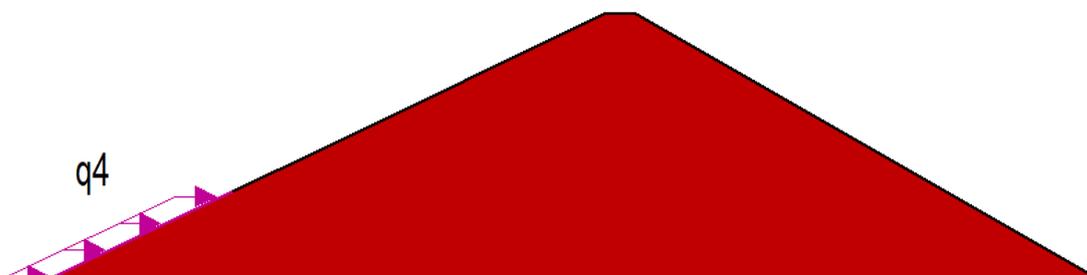


Figura 57 - Disposição do carregamento para a distância coluna-barragem de 1000 metros

8.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise tensão-deformação realizada no SIGMA/W, para a distância coluna-barragem de 500 m, indicou que barragem sofreu um deslocamento horizontal de aproximadamente 22 m (Figura 58) na região próxima ao pé da barragem, justamente onde a magnitude do carregamento, logo no primeiro segundo do impacto.

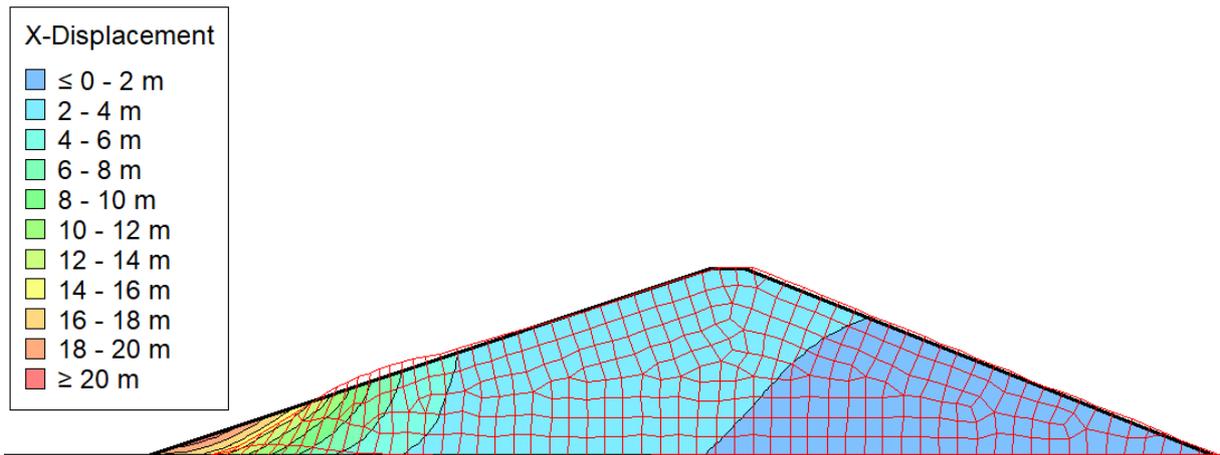


Figura 58 - Deslocamentos horizontais no primeiro segundo de impacto para a distância coluna-barragem de 500 m

Na Figura 59 tem-se em detalhe as zonas de plastificação formadas após 1 s de impacto. Dá pra ver claramente a formação de superfícies de ruptura global nos dois taludes.

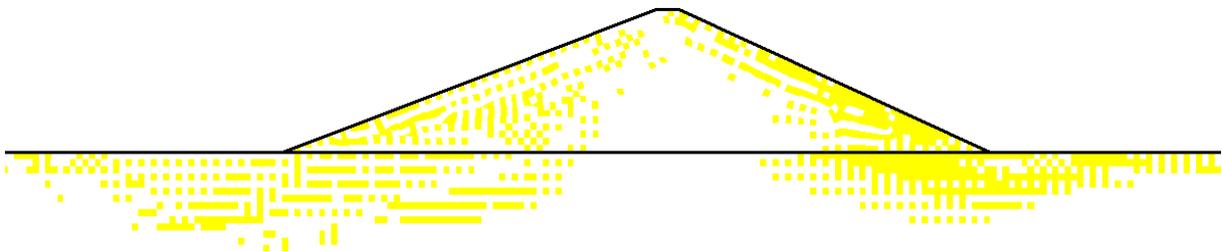


Figura 59 - Zonas de plastificação formadas no primeiro segundo de impacto para a distância coluna-barragem de 500 m

Com deslocamentos desta proporção e, com as zonas de plastificação formadas, é possível concluir que barragem não suportou o impacto, não fazendo sentido realizar uma análise de sua estabilidade. Além do mais, o pacote de softwares da Geostudio® se baseia no Método dos Elementos Finitos (MEF) para o cálculo de tensões, deformações e pressões. O MEF é uma ferramenta muito utilizada no cálculo de deformações em problemas de Geotecnia, porém, não é possível obter resultados confiáveis em problemas de grandes deformações usando esta

metodologia com sua formulação tradicional, devido as excessivas distorções da malha (Nazem & Sheng, 2005).

Para a distância coluna-barragem de 1000 m, os deslocamentos horizontais atingidos estão indicados na Figura 60. Percebe-se mais uma vez que o deslocamento máximo se encontra no pé da barragem, como era de se esperar, só que desta vez numa magnitude bem menor que aquela encontrada para a distância de 500 m. O deslocamento máximo se estabilizou em aproximadamente 1,26 m, durante os 16 s de impacto.

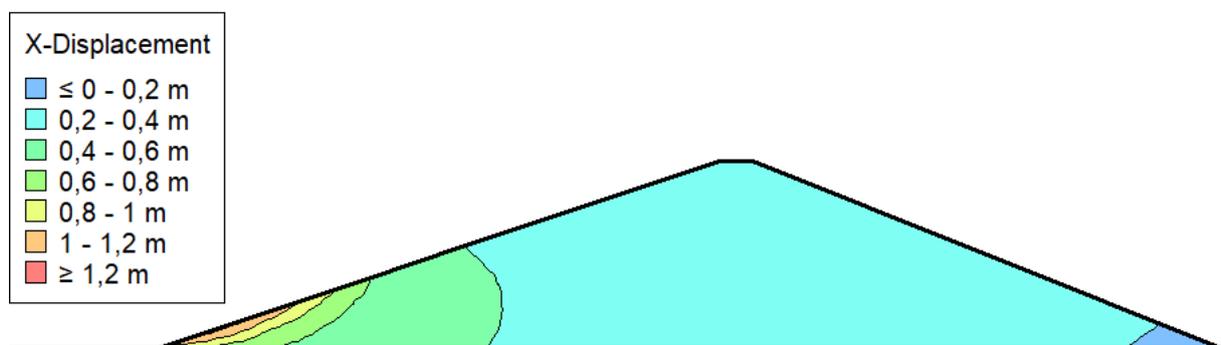


Figura 60 - Deslocamentos horizontais durante o impacto para a distância coluna-barragem de 1000 m

Para efeito de comparação, nas Figuras 61 e 62, encontram-se as zonas de plastificação formadas pelas tensões *in situ* e após 1 s de impacto (quando o pico do carregamento é atingido), respectivamente. Percebe-se uma pequena diferença nos dois casos, principalmente na região próxima ao pé da barragem, justamente onde os deslocamentos foram máximos. Porém, não se identificou a possível formação de superfícies de ruptura nítidas durante os 16 s de análise.

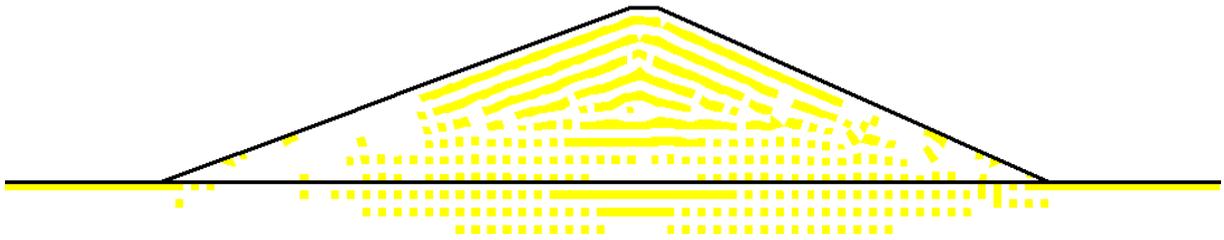


Figura 61 - Zonas de plastificação formadas pelas tensões in situ

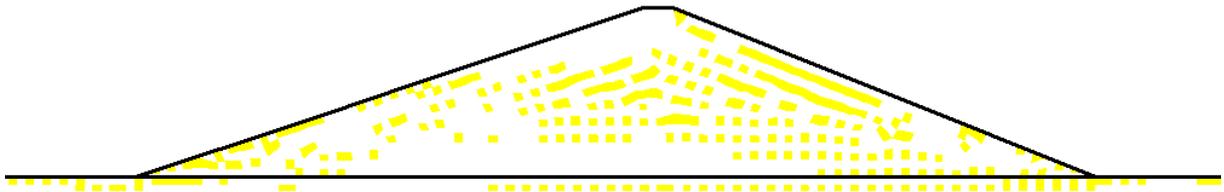


Figura 62 - Zonas de plastificação formadas no primeiro segundo de impacto para a distância coluna-barragem de 1000 m

Com relação à estabilidade da estrutura, a Figura 63 destaca o Fator de Segurança para o talude de jusante, encontrado após 1 s de impacto.

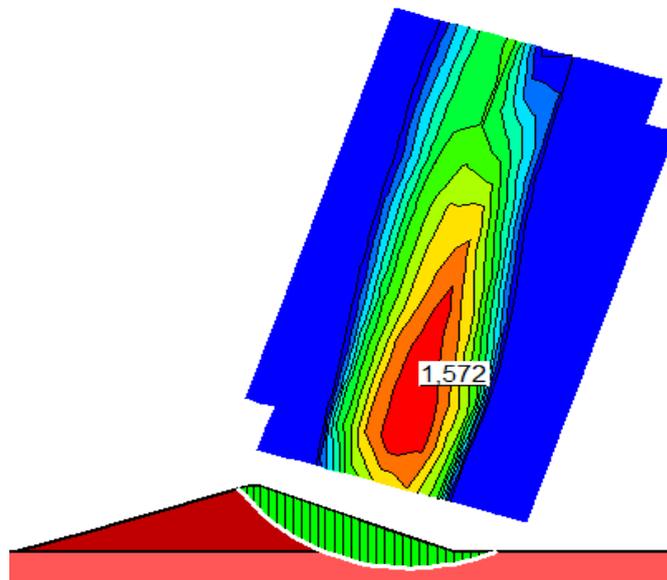


Figura 63 - Fator de Segurança no primeiro segundo de impacto

Na Tabela 7 é possível ver a variação do Fator de Segurança durante os 16 s de impacto. Constata-se que a variação é mínima, tendo a barragem se comportado bem durante o tempo de análise.

Tabela 7 - Variação do Fator de Segurança durante o impacto

Tempo (s)	FS	Tempo (s)	FS
1	1,572	9	1,570
2	1,571	10	1,570
3	1,571	11	1,570
4	1,571	12	1,570
5	1,571	13	1,570
6	1,570	14	1,570
7	1,570	15	1,570
8	1,570	16	1,570

Apesar do bom comportamento quanto à estabilidade, recomenda-se uma análise mais detalhada em relação às deformações encontradas principalmente no pé do talude de montante, ou seja, se os deslocamentos foram suficientes, ou não, para comprometer a estrutura.

9 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões da dissertação de acordo aos objetivos da pesquisa. As sugestões de possíveis trabalhos futuros para dar continuidade ao tema proposto também são incluídas.

9.1 CONCLUSÕES

Fluxos granulares são classificados como extremamente perigosos devido às suas altas velocidades e forças de impacto, e à pouca previsibilidade. Simulações numéricas envolvendo o deslocamento desses materiais são complexas porque precisam levar em conta grandes taxas de deformação, interações com estruturas e interações colisionais entre os grãos, o que leva a um comportamento constitutivo complexo do material. Alguns métodos bastante conhecidos, como o Método dos Elementos Finitos ou o Método do Equilíbrio Limite, não possuem ferramentas capazes de avaliar o movimento do início até o final.

O Método do Ponto do Material (MPM) foi desenvolvido especificamente para grandes deformações de materiais. Ele consegue simular grandes deslocamentos por pontos lagrangeanos que se deslocam por uma malha euleriana. Para análises realizadas nesta monografia, o método mostrou-se capaz de simular um comportamento semelhante ao esperado para um fluxo de rejeitos, principalmente no que diz respeito ao impacto deste material em uma barragem de seção homogênea. Além disso, o custo computacional, com a utilização de uma malha relativamente “grosseira”, se mostrou aceitável, de forma que foi possível alcançar os objetivos pretendidos.

A análise de estabilidade da barragem indicou que, para a distância de 500 m entre a coluna de rejeitos e a barragem, a mesma não suportou o impacto, e isto fica evidente pelas zonas de plastificação, do maciço e da fundação, formadas durante o carregamento dinâmico e, pelos deslocamentos horizontais máximos atingidos. Já para a distância de 1000 m, a barragem, quanto ao Fator de Segurança do talude de jusante, se comportou bem durante os 16 s de impacto analisados. Porém, é importante que seja feita uma análise mais profunda em relação aos deslocamentos atingidos, principalmente na região do pé da barragem, onde a magnitude do carregamento foi maior, junto com os deslocamentos. A simplificação adotada para o carregamento, dividindo-o em três regiões, para a distância coluna-barragem de 500 m, e uma

região, para a distância coluna-barragem de 1000 m, pode não ser suficiente para representar o fenômeno, sendo importante um estudo mais detalhado acerca disto.

As distâncias de 500 e 1000 m, entre a coluna de rejeitos e a barragem, foram escolhidas para viabilizar a realização das simulações utilizando escalas reais no domínio do problema. Para distâncias maiores, o custo computacional aumentaria consideravelmente, inviabilizando a pesquisa. Segundo a Resolução 04/2019 da Agência Nacional de Mineração, foi proibida a construção de qualquer tipo de barragem nas chamadas Zonas de Autossalvamento (ZAS), ou seja, regiões a jusante da barragem que está sendo descomissionada em que se considera não haver tempo suficiente para uma intervenção das autoridades competentes em caso de acidente. Portanto, a localização da barragem que sofrerá o impacto deverá levar em consideração a ZAS, que pode ter uma extensão de até 10 km.

Vale lembrar também que, entre a coluna de rejeito e a barragem homogênea, não foi considerado nenhum obstáculo topográfico que pudesse dificultar o desenvolvimento do movimento da massa instável. Além disso, todas as simulações foram bidimensionais, ou seja, o espriamento do fluxo na direção transversal não foi considerado nas análises.

9.2 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com base nas conclusões desta dissertação, são feitas as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- Emprego de uma malha mais refinada, com maior número de elementos, melhorando o resultado visual da análise e aumentando a distância percorrida pela massa instável, fazendo com que ela se comporte de uma forma mais natural;
- Emprego de um algoritmo de contato para simular o efeito do atrito da fundação com o fluxo de rejeitos;
- Utilização de outros modelos constitutivos, como o Cam-Clay Modificado, para avaliar o desenvolvimento do movimento da massa instável e posterior impacto na barragem;
- Adotar outros valores do *damping* (amortecimento), para analisar o problema dinâmico como um todo;
- Estudar o conceito de coesão residual e implementá-lo em um modelo para simular o desenvolvimento do movimento da massa, variando seus valores.

- Adotar outros tipos de barragens, como as de enrocamento por exemplo, para avaliar o comportamento da estrutura perante o impacto;
- Realizar simulações que tomem como base o estudo de *dam break* da barragem que está sendo descomissionada, utilizando como dados de entrada as velocidades prescritas e a altura da onda de rejeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSEN, S., & ANDERSEN, L. (2009). Material-point-method analysis of collapsing slopes. *Computational Geomechanics: COMGEO I: Proceedings of the 1st International Symposium on Computational Geomechanics (COMGEO I)* (pp. 817–828). Juan -les- Pins, France.

Anura 3D® (2017). Anura3D MPM Software – Tutorial Manual. Anura3D MPM Research Community.

ARAÚJO, C. B. V. (2006). Contribuição ao estudo de barragens de rejeito de mineração de ferro. Tese de Mestrado. COPPE/RJ, RJ, 133 p.

ASSIS, A; ESPÓSITO, T. (1995). Construção de barragens de rejeitos sob uma visão geotécnica. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS - REGEO, Ouro Preto, Anais. Ouro Preto: ABMS/ABGE/CBGB.

ASSIS; A. P; HERNANDEZ, H. M; COLMANETTI, J. P. (2003). Apostila, Publicação G.AP-AA006/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 170 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682 (2009). Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro.

AUBERTIN, M.; MBONIMPA, M.; BUSSIÈRE, B. & CHAPUIS, R.P. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), 1104–1102.

BEUTH, L., BENZ, T., & VERMEER, P. A. (2008). Large deformation analysis using a quasi-static material point method. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 38(1-2), 45–60.

BEUTH, L., WIECKOWSKI, Z., & VERMEER, P. A. (2011). Solution of quasi-static large-strain problems by the material point method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35, 1451–1465.

BRASIL (2010). Lei nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do Art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do Art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm (Acessado em 1 de Outubro de 2018).

BRASIL (2019). Resolução ANM nº 4, de 15 de Fevereiro de 2019. Estabelece Medidas Regulatórias Cautelares Objetivando Assegurar a Estabilidade de Barragens de Mineração, Notadamente Aquelas Construídas ou Alteadas pelo Método Denominado “a Montante” ou por Método Declarado Como Desconhecido. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 fevereiro 2019.

- BYRNE, P.M. (2008). Parecer Técnico, Consultoria Internacional, Mina do Cauê, Alçamento do Cordão Nova Vista, Complexo Minerador de Itabira, VALE, Junho, 2008, 10p.
- CAMPOS, T. M. P. (1986). Geotecnia e Meio Ambiente: Relato do Estado da Arte. In VIII COBRAMSEF. Porto Alegre, p. 123 – 157.
- CASAGRANDE, A. (1975). Liquefaction and cyclic deformation of sands - a critical review. Proc. 5th Pan-American Conference, Argentina, 81-133.
- CECCATO, F. & SIMONINI, P. (2017). Desenho numérico de sistemas de proteção contra deslizamentos de terra (em Inglês). Conference on Numerical Methods in Geotechnics. TUHH, Hamburg, Germany.
- CECCATO, F., CHMELNIZKIJ, A., FERN, J., PINYOL, N., ROHE, A. & YERRO., A. (2017). Anura3D MPM Research Community. Anura3D MPM Software Tutorial Manual. Versão 2017.2.
- CHEN, Z., & BRANNON, R. (2002). An evaluation of the material point method. Online (p. 46). Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550.
- COETZEE, C. J. (2004). The modelling of granular flow using the particle-in-cell method. Stellenbosch: University of Stellenbosch.
- COETZEE, C. J., VERMEER, P. A., & BASSON, A. H. (2005). The modelling of anchors using the material point method. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, (April), 879–895.
- COLLE, G.A. (2008). Metodologias de Análise de Risco para Classificação de Barragens segundo a Segurança. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná.
- CNRH (2012). Resolução nº 143/2012. Seção 1 do D.O.U de 4 de setembro de 2012.
- DYMINSKI, A.S. (1996). Notas de Aula- Estabilidade de Taludes, UFPR, Curitiba, PR, Brasil.
- DNPM (2012). Portaria do Diretor Geral do DNPM nº 416/2012. Seção 1 do D.O.U de 5 de setembro de 2012.
- DNPM (2013). Portaria do Diretor Geral do DNPM nº 526/2013. Seção 1 do D.O.U de 11 de dezembro de 2013.
- 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. Programa de Pós - graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte, MG. 114 p.
- EPA (1994). Design and evaluation of tailings dams: technical report. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington, USA, 59 p.
- Farmland, Missouri River Floods a Million Acres of. Big Picture Agriculture. U.S. Army Corps of Engineers photo by Carlos J. Lazo. 19 de Junho de 2011. <http://bigpictureagriculture.blogspot.pt/2011/06/missouri-river-floods-million-acres-of.html> (acedido em 1 de Abril de 2012).

- FONSECA, M. N. E. (2018). Análise dos modos de falha e efeitos (FMEA) para avaliação de um acidente em barragem de rejeitos: um evento de mineração no Brasil. Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 80 p.
- FOSTER, M., FELL, R., SPANNAGLE, M. (2000). A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. Canadian geotechnical journal, Canada, pp. 1025-1061.
- GABRIELLI, F. & CECCATO F. (2016). Impacto de fluxos granulares secos em uma parede rígida: abordagem discreta e contínua (em Inglês). Procedia Engineering. 158, pp 152-157.
- Gaume, J., van Herwijnen, A., Gast, T., Teran, J., & Jiang, C. (2019). Investigating the release and flow of snow avalanches at the slope-scale using a unified model based on the material point method. Cold Regions Science and Technology, 102847.
- GEOSLOPE (2017). Stability Modeling with GeoStudio. GEOSLOPE International, Calgary, Canadá, 242 p.
- GERSCOVICH, D.M.S, (2008). Notas de Aula- Estabilidade de Taludes, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração (2016). 1 ed.- Brasília, 128 p.
- GUIDICINI, G., e NIEBLE, C. M. (1984). Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. São Paulo: Editora da USP, p. 216.
- HARLOW, F. H. (1964). The particle-in-cell computing method for fluid dynamics. Methods in Computational Physics, 3, 319–343.
- HRADILEK, P. (2002). Avaliação de pequenas barragens. Brasília: Bureau of Reclamation, United States Department of Interior, 74 p. il. [Manual de Irrigação, v.6}.
- ICOLD (2008). Tailings dams. Risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121. 144 p.
- ISHIHARA K (1977). Undrained Deformation and Liquefaction of Sand under Cyclic Stress. Soil and Foundation.
- KARUPPIAH, V. (2004). Implementation of irregular mesh in material point method (MPM) for simulation of mixed mode crack opening in tension. Oklahoma State University.
- KLOHN, E. J. (1981). The development of current tailing dam design and construction methods. In: WILSON, D. (Ed.) Design and construction of tailing dams. Golden: Colorado School of Mines.
- LIMA, L.M.K. (2006). Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 125 p.

LLANO-SERNA, M. A. (2012). Aplicação do Método do Ponto Material (MPM) a problemas geotécnicos. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-218/12, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145 p.

LORENZO, R., CORDÃO, M. & PINTO, R. (2013). Método de ponto material para problemas geotécnicos envolvendo grandes deformações (em Inglês). III International Conference on Particle based Method, Stuttgart, Germany.

LOZANO, F. A. E. (2006). Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica), Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, USP, São Paulo, SP.

MARTIN, T.E. (1999). Characterization of pore pressure conditions in upstream tailings dams, Proceedings, Tailings & Mine Waste '99, Fort Collins, Colorado, pp. 303-313.

MASSAD, F. (2010). Obras de terra – Curso básico de geotecnia . São Paulo, SP. Oficina de textos, 215p.

MENESCAL, R. A; MIRANDA, A. N.; PITOMBEIRA, E. S.; PERINI, D. S. (2005). Prevenção de acidentes envolvendo barragens: Projeto de diagnóstico da segurança de barragens no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005. João Pessoa. Anais... João Pessoa-PG.

MENDES, L.O. (2019). Análise Probabilística do Potencial de Falha por Liquefação Estática e Dinâmica de Barragens. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-325/2019, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 147 p.

MENDES, L.O. (2016). Avaliação dos Danos Potenciais em Comunidades Afetadas por Rompimento de Barragens. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-AA-003/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 93 p.

MINAS GERAIS. Decreto n. 46.993, de 2 de maio de 2016. Institui a Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragem e dá outras providências. Minas Gerais: Diário do Executivo de 2/5/2016.

MITTAL, H.K. & N.R. MORGENSTERN (1976). Seepage control in tailings dams. Canadian Geotech. Journ., Vol. 13(3), August, pp. 277-293.

MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. (2016). Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão.

NAZEM, M. & SHENG, D. (2005) Método lagrangeano-euleriano arbitrário para problemas de adensamento em geomecânica (em Inglês). VII International Conference on Computational Plasticity. COMPLAS VII, CIMNE, Barcelona.

NUMADA, M., KONAGAI, K., ITO, H., & JOHANSSON, J. (2003). Material point method for run-out analysis of earthquake-induced long-traveling soil flows. JSCE Journal of Earthquake Engineering, 27, 3–6.

OLDECOP, L., RODRÍGUEZ, R. (2006). Estabilidade e segurança de depósitos de resíduos minerais. Em: Os resíduos minerais metalúrgicos no meio ambiente. Rodríguez, R., García-Cortés, A. (Eds.), Instituto Geológico e Mineral de Espanha (IGME), pp. 197-243

OLIVELLA, X. & SARACÍBAR, C. (2000). Mecânica dos meios contínuos para engenheiros (em Espanhol). Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 329 p.

PASSOS, N. C. S. T. (2009). Barragem de Rejeito: Avaliação dos Parâmetros Geotécnicos de Rejeito de Minério de Ferro utilizando Ensaio de Campos—Um Estudo de Caso. Trabalho de Conclusão de Curso Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

PEIXOTO, C. L. P. (2012) Proposta de nova metodologia de desagamento de rejeitos em polpa. Ouro Preto, 93 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas.

PEREZ, C. C., (2017). Avaliação da influência da posição da estaca integrando um radier estaqueado em sua capacidade de carga lateral. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM286/17 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 98 p.

PERINI, D. S. (2009). Estudo dos processos envolvidos na análise de risco de barragens de terra. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Brasília.

Planalto (2010). Lei nº 12.334/2010. Seção 1 do D.O.U de 21 de setembro de 2010.

PRESOTTI, E. S. (2002) Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 153 p.

RAFAEL, Herbert Miguel Angel Maturano (2012). Análise do potencial de liquefação de uma barragem de rejeito. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil.

REZENDE, D. A. (2013). *Análise probabilística de estabilidade de taludes em barragens de rejeitos*. Monografia de Projeto Final, Universidade Federal do Rio de Janeiro. RJ, p. 108.

RIBEIRO, J. C. J; MENDES, S. F. (2013) A participação no fechamento de mina no direito comparado. Revista Veredas do Direito, Belo Horizonte, v. 10, n. 20, p. 23-54, jul./dez.

SANTOS, A.G. (2004). Influência do Teor de Ferro na Condutividade Hidráulica Saturada de um Rejeito de Minério de Ferro, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

SAYÃO, A.S.F.J. (2012) et al. Considerations on the probability of failure of mine slopes. Soils & Rocks, Rio de Janeiro, v. 35, p. 31-37.

SOARES, L. (2010) Barragem de Rejeitos. In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. Cap. 19, p. 829-896.

SOBRINHO, A. R. V. G. (2014) Metodologia para implantação de um sistema de disposição de rejeitos em minério de ferro na região do semiárido: estudo de caso. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, 133 p.

SULSKY, D., ZHOU, S. J., & SCHREYER, H. L. (1995). Application of a particle-in-cell method to solid mechanics. Computer Physics Communications, 87, 236–252.

THOMÉ, ROMEU; PASSINI M. L. (2018). Barragens de Rejeitos em mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais. Ciências Sociais Aplicadas em Revista, UNIOESTE.

TORO, 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, Brasília, DF, 140 p.

TRONCOSO, J.H. (1997). “Geotechnics of Tailings dams and sediments” – International Congress of Environmental Geotechnics – ICEG pp. 1405-1423.

US Army Corps of Engineers - USACE (2014). *Using HEC-HAS for Dam Break Studies*. Davis, CA, USA: US Army Corps of Engineers, 74p.

VALERIUS, M. B. (2014). Cadastro e Análise do Potencial de Risco das Barragens de Rejeitos de Mineração do Estado de Goiás. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM – 245/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105 p.

VICK, S.G. (1990). Planning, design, and analysis of tailings dams. Vancouver, BiTech. ISBN: 0921095120. 2nd Edition. xi, 369.

WANG, B., VARDON, P., HICKS, M. & CHEN, Z. (2016). Desenvolvimento do método do ponto material implícito para aplicações geotécnicas (em Inglês). Computers and Geotechnics. 71, pp 159-167.

WICKOWSKI, Z. (2004). The material point method in large strain engineering problems. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.

ZABALA, F. (2010). Modelagem de problemas geotécnicos hidromecânicos usando o método do material (em Espanhol). Tese Doutoral. Universidad Politécnica de Cataluña. España. 118 p.

ZARDARI, M. A. (2010). Mechanical properties of fine grained, sulphur rich, silty soils. Luleå, Sweden, 88 p. Research report - Luleå University of Technology, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering.

Zhang, R., Sun, Y., & Song, E. (2019). Simulation of dynamic compaction and analysis of its efficiency with the material point method. Computers and Geotechnics, 116, 103218.

ZHOU, S., STORMONT, J., & CHEN, Z. (1999). Simulation of geomembrane response to settlement in landfills by using the material point method. International Journal for Numerical Methods in Geomechanics, 23, 1977–1994.

7º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2018.