

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia de Energia

**Sobre o Rompimento de Barragens e seus efeitos:
Um estudo numérico e de Gestão Ambiental**

Autor: Ludmilla Oliveira Soares

Orientador: Prof. Luciano Gonçalves Noletto

Brasília, DF

2022



Ludmilla Oliveira Soares

**Sobre o Rompimento de Barragens e seus efeitos: Um
estudo numérico e de Gestão Ambiental**

Monografia submetida ao curso de graduação
em Engenharia de Energia da Universidade de
Brasília, como requisito para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof. Luciano Gonçalves Noleto

Brasília, DF

2022

Ludmilla Oliveira Soares

Sobre o Rompimento de Barragens e seus efeitos: Um estudo numérico e de Gestão Ambiental/ Ludmilla Oliveira Soares. – Brasília, DF, 2022-
57 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Luciano Gonçalves Noletto

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA , 2022.

1. Rompimento de barragem. 2. Simulação. I. Prof. Luciano Gonçalves Noletto.
II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Sobre o Rompimento de Barragens e seus efeitos: Um estudo numérico e de Gestão Ambiental

CDU

Ludmilla Oliveira Soares

Sobre o Rompimento de Barragens e seus efeitos: Um estudo numérico e de Gestão Ambiental

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Prof. Luciano Gonçalves Noletto
Orientador

Prof. Fabio Alfaia da Cunha
Convidado 1

Prof. Maria Vitória Duarte Ferrari
Convidado 2

Brasília, DF
2022

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus e a Nossa Senhora, que me guiaram e deram forças pra chegar até o fim desse trabalho. Aos meus pais e irmã, que me aguentaram falando sobre isso por meses e vendo coisas que pra eles não faziam nenhum sentido.

A Mai, que segurou minha mão quando tudo parecia não fazer sentido e eu quase desisti.

Ao Rapha, que me ajudou dando apoio moral quando eu tava duvidando de mim.

Ao Thi, meu primo perdido que eu achei por ai, mas que foi me ajudando mesmo que ele nem mesmo tenha percebido isso.

A Helena, que mesmo não estando tão perto esse semestre, aguentou poucas e boas comigo durante toda essa jornada.

A Bia, que me incentivou até o último segundo sempre me apoiando e me dando forças quando nem ela tinha direito.

A Nessa, que mesmo depois de formada eu lembro da voz dela falando "Mulher, tu consegue sim!".

A Maysa, que me acompanhou desde quando eu escolhi engenharias e me incentivou quando eu não via a luz no fim do túnel.

A Mell, por mais que você seja menor que eu, me deu um apoio tremendo quando eu tomei minha decisão e tem orgulho de mim a cada passo que eu dou nessa jornada.

Ao LG, que me aguenta com esse assunto desde que eu decidi meu tema em 2020.

Ao Penido, que é meu melhor amigo desde os primeiros dias de aula.

Ao meu chefe, Daniel, que é uma pessoa incrível, e ficou super animado com o meu TCC.

Ao meu outro chefe, Felipe, que tem me incentivado nessa caminhada e me ensinado muitas coisas.

Ao meu orientador, Noleto, por ter paciência comigo em toda essa jornada e por ter me auxiliado tão bem até aqui.

Por último, mas não menos importante, Matheus Henrique, obrigada por ter sido um porto seguro ao longo dessa jornada acreditando e confiando em mim, quando nem eu era capaz disso.

*"Nada temas, porque eu estou contigo,
não lance olhares desesperados, pois
eu sou teu Deus;
eu te fortaleço e venho em teu socorro,
eu te amparo com minha destra vitoriosa."
(Isaías 43,10)*

Resumo

Os desastres de Mariana e Brumadinho no estado de Minas Gerais expuseram a fragilidade das barragens de mineração construídas pelo método de alteamento a montante, o mais comum e de menor custo, que além de colocarem em risco o meio ambiente que cercam esses empreendimentos também comprometem a vida dos funcionários e de todas as pessoas que estão no curso do escoamento dos rejeitos em caso de rompimento. Este trabalho tem como objetivos a análise numérica do evento do rompimento de uma barragem de mineração por meio de simulação numérica no ambiente do ANSYS, utilizando da Equação de Bernoulli para a fundamentação matemática. No que diz respeito a gestão ambiental, o objetivo é o levantamento das leis, documentos e órgãos responsáveis. Foram obtidos resultados dos campos de pressão e volume de controle para o escoamento, também os vetores de velocidade. Além disso foram obtidos gráficos de pressão e velocidade dentro e fora da barragem durante o evento do rompimento, mostrando como se deram os desastres. Na esfera de gestão ambiental foram levantados os órgãos competentes aos quais se devem prestar contas a respeito das barragens, as leis que regem esses empreendimentos e os documentos que devem ser usados pelo empreendedor de modo a atestar a segurança das barragens. Com base nos resultados numéricos obtidos e nas ferramentas de gestão ambiental levantadas, os primeiros indícios de comprometimento estrutural devem ser percebidos pelas inspeções e relatados nos documentos entregues aos órgãos competentes. Dessa forma, desastres como os de Brumadinho e Mariana, podem ser evitados com o auxílio das ferramentas determinadas por lei e apresentadas neste trabalho.

Palavras-chave: barragem, rejeitos, rompimento, simulação, gestão ambiental.

Abstract

The disasters of Mariana and Brumadinho in the state of Minas Gerais exposed the fragility of mining dams built by the method of raising upstream, the most common and least expensive, which in addition to endangering the environment surrounding these enterprises also compromise the lives of employees and all persons who are in the course of the flow of the tailings in case of rupture. This work aims at the numerical analysis of the event of a mining dam breach by means of numerical simulation in the ANSYS environment, using Bernoulli's Equation for the mathematical foundation. Regarding environmental management, the objective is the survey of laws, documents, and responsible agencies. Results were obtained for the pressure and control volume fields for the flow, also the velocity vectors. In addition, pressure and velocity graphs were obtained inside and outside the dam during the rupture event, showing how the disasters happened. In the sphere of environmental management, the competent bodies to which the dams must be accountable were surveyed, as well as the laws that govern these enterprises and the documents that must be used by the entrepreneur in order to certify the safety of the dams. Based on the numerical results obtained and on the environmental management tools surveyed, the first signs of structural damage should be noticed by the inspections and reported in the documents delivered to the competent bodies. In this way, disasters like those of Brumadinho and Mariana can be avoided with the help of the tools determined by law and presented in this paper.

Key words: breakdown, dam, simulation, waste, environmental management.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Classificação de risco das barragens cadastradas no SNISB	14
Figura 2 – Classificação de danos potenciais das barragens cadastradas no SNISB.	15
Figura 3 – Barragem de rejeitos a montante.	22
Figura 4 – Barragem de rejeitos a jusante.	22
Figura 5 – Fluxo de trabalho usando CFD.	27
Figura 6 – Menu inicial do ANSYS	27
Figura 7 – Geometria do problema de rompimento de barragens	28
Figura 8 – Tela inicial do ambiente <i>Fluent</i> no <i>Setup</i>	28
Figura 9 – Configuração do modelo multifásico	29
Figura 10 – Condições de operação da simulação	30
Figura 11 – Definição do modo da pressão na saída	30
Figura 12 – Configurações dos controles de solução	31
Figura 13 – Métodos de solução	31
Figura 14 – Configuração do <i>Patch</i>	32
Figura 15 – Ação dos atores pertinentes a gestão ambiental de barragens de mineração	38
Figura 16 – Instante inicial do volume de controle.	42
Figura 17 – Volume de controle na iteração 20	43
Figura 18 – Volume de controle na iteração 50	43
Figura 19 – Volume de controle na iteração 80.	44
Figura 20 – Volume de controle na iteração 100	44
Figura 21 – Contorno de pressão na iteração 20	45
Figura 22 – Contorno de pressão na iteração 50	45
Figura 23 – Contorno de pressão na iteração 80	46
Figura 24 – Contorno de pressão na iteração 100	46
Figura 25 – Vetores de velocidade na iteração 20	47
Figura 26 – Vetores de velocidade na iteração 50	47
Figura 27 – Vetores de velocidade na iteração 80	48
Figura 28 – Vetores de velocidade na iteração 100	48
Figura 29 – Variação de pressão com relação ao tempo	49
Figura 30 – Variação da velocidade com relação ao tempo	50
Figura 31 – Variação de pressão a jusante da barragem.	51
Figura 32 – Classificação das barragens cadastradas no SIGBM segundo o método de construção.	53

Lista de tabelas

Tabela 1 – Descrição das Barragens de diversas finalidades no Brasil.	13
Tabela 2 – Classificação das barragens de mineração no estado de Minas Gerais.	16

Lista de abreviaturas e siglas

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANM	Agência Nacional de Mineração
CNBM	Cadastro Nacional de Barragens de Mineração
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
DCE	Declaração de Estabilidade de Barragens
DPA	Dano Potencial associado
PAE	Plano de Ações Emergênciais
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragens
RSB	Revisão Periódica de Segurança de Barragens
SIGBM	Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração
SNISB	Sistema Nacional de Informações de Segurança de Barragens
VOF	<i>Volume of Fluid</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contexto	13
1.2	Objetivo Geral	16
1.2.1	Objetivos Específicos	16
1.3	Metodologia	17
1.4	Organização do Trabalho	18
2	BARRAGEM DE MINERAÇÃO	19
2.1	Histórico do incidente de Mariana e Brumadinho	19
2.2	Formulação básica de dinâmica dos fluidos	20
2.3	Física do rompimento de barragens	21
2.3.1	Descrição matemática	22
2.4	Método volume de fluido (VOF)	24
3	MODELAGEM DO ROMPIMENTO DE UMA BARRAGEM DE MINERAÇÃO	26
4	GESTÃO AMBIENTAL DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO	33
4.1	Legislação pertinente à barragens de mineração	33
4.1.1	Lei nº 12.334/2010	33
4.1.2	Resolução CNRH nº 143/2012	34
4.1.3	Resolução ANM nº 4/2019	34
4.1.4	Resolução ANM nº 95/2022	35
4.2	Órgãos responsáveis pelas barragens de mineração	36
4.2.1	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico	36
4.2.2	Agência Nacional de Mineração	36
4.2.3	Conselho Nacional de Recursos Hídricos	36
4.3	Documentos e ferramentas obrigatórios da gestão de barragens de mineração	37
4.3.1	Plano de Segurança de Barragens (PSB)	38
4.3.2	Revisão periódica de Segurança de Barragens (RSB)	39
4.3.3	Plano de ações emergenciais (PAE)	39
4.3.4	Declaração de Estabilidade de Barragens (DCE)	40
4.3.5	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragem (SNISB)	41
4.3.6	Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM)	41

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1	Volume de controle	42
5.2	Pressão	45
5.3	Velocidade	47
5.4	Resultados numéricos	49
5.4.1	No interior da barragem	49
5.4.2	Na imediata saída da barragem	51
5.5	Gestão ambiental de barragens de mineração	52
6	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	55

1 Introdução

1.1 Contexto

Barragens são meios de acumular líquidos ou líquidos e sólidos, com diversas finalidades, podendo ser geração de energia, reservatório de água para consumo ou retendo rejeitos de minério. No Brasil, existem 22.307 barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informações de Segurança de Barragens (SNISB), os principais usos são para a geração de energia elétrica, seja em pequenas ou grandes centrais hidrelétricas, irrigação e agropecuária, abastecimento humano, entre outros usos, conforme a Tabela 1. (ANA, 2021)

Tabela 1 – Descrição das Barragens de diversas finalidades no Brasil.

Finalidade da barragem	Quantidade de barragem
Irrigação	8.725
Dessedentação animal	4.684
Regularização de vazão	2.234
Abastecimento humano	1.784
Aquicultura	1.384
Hidrelétrica	1.303
Contenção de rejeitos de mineração	856
Industrial	529
Outros	844
Total	22.307

Fonte: ANA, 2021

As barragens apresentadas na Tabela 1, são enquadradas na Lei 12.334/2010, (BRASIL, 2010), desde que atenda pelo menos um dos parâmetros abaixo:

- Altura da barragem maior ou igual a 15 metros;
- Capacidade total da barragem maior ou igual a 3.000.000 m^3 ;
- Armazene resíduos perigosos;
- Dano potencial associado médio ou alto;

- Categoria de risco alto.

Estas barragens são classificadas quanto a dois aspectos associados: por categorias de risco e pelo dano potencial associado. A categorização do risco é relacionada as características técnicas, de conservação bem como suas estruturas associadas, ou seja, das características físicas da barragem que podem influenciar em um acidente.(BRASIL, 2012). Na Figura 1, são apresentados os riscos associados as barragens cadastradas no SNISB, dentre todas as categorias apresentadas na Tabela 1. (ANA, 2021)

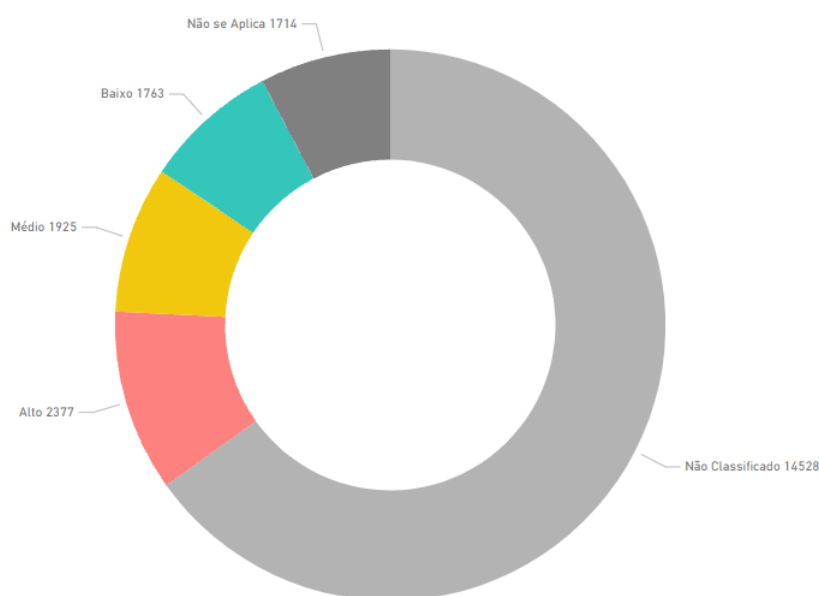


Figura 1 – Classificação de risco das barragens cadastradas no SNISB

Fonte: ANA,2021

Com relação a categorização de danos potenciais, esta categoria diz respeito aos danos que podem ser causados em caso de acidente para o ambiente e para a comunidade ao redor. (BRASIL, 2012). Na Figura 2, são apresentados os danos potenciais associados a barragens existentes no Brasil cadastradas no SNISB, quando aplicados. (ANA, 2021).

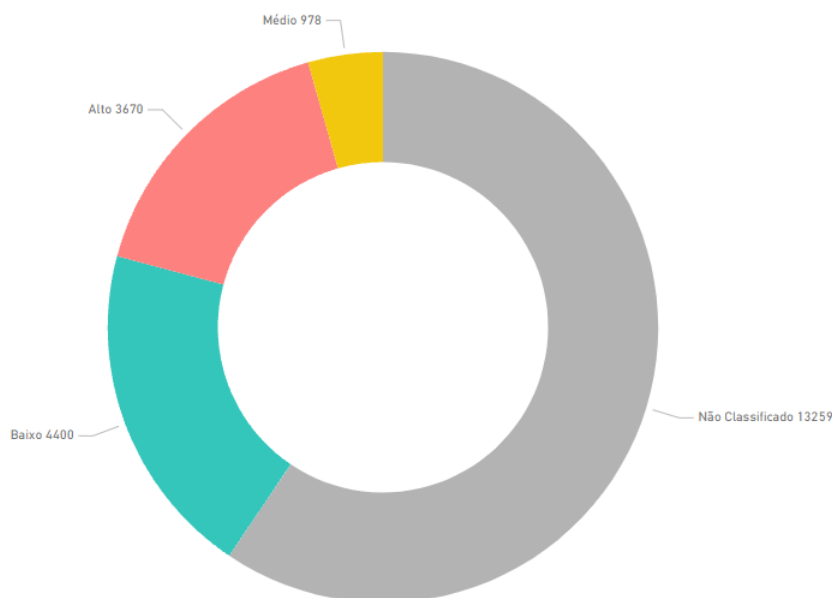


Figura 2 – Classificação de danos potenciais das barragens cadastradas no SNISB.

Fonte: ANA,2021

A principal Lei que regula as barragens de qualquer gênero é a Lei 12.334/2010, que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a qual fornece os parâmetros para sua classificação tanto de danos quanto de riscos, institui o SNISB e atribui a responsabilidade da gestão das barragens a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Atualmente no Brasil, segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM), existem 447 barragens de mineração enquadradas na PNSB, a qual regulamenta as ações e os padrões de segurança relacionados as barragens de todos os tipos. (MINERAÇÃO, 2021)

Essas barragens estão concentradas no estado de Minas Gerais onde se encontram 209 barragens ativas em diferentes categorias de risco, baixo, médio e alto, como apresentado na Tabela 2 (MINERAÇÃO, 2021), dentre as quais 102 estão sob responsabilidade da Vale (VALE, 2020).

Tabela 2 – Classificação das barragens de mineração no estado de Minas Gerais.

Categorias de risco	Quantidades
Baixa	163
Média	7
Alta	39

Fonte: (MINERAÇÃO, 2021)

Os rompimentos de barragem são tão devastadores pela velocidade com que acontecem, por mais que apontem que vão acontecer, uma vez iniciados não há a possibilidade de contingência, somente a mitigação dos danos causados pelo desastre.

A motivação para este trabalho está relacionada aos impactos socioambientais dos desastres de Brumadinho e Mariana, os quais precisam ser entendidos em suas causas e para isso são necessárias duas etapas, a identificação de como, fisicamente, o rompimento ocorre e na sequência serão vistos os diplomas legais e os documentos pertinentes a gestão ambiental das barragens de mineração.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar o fenômeno físico do rompimento de uma barragem, por meio de simulação no software *ANSYS*, analisando a hidrodinâmica do evento. Além da física do evento, é também abordada a gestão ambiental de barragens de mineração com suas leis e documentos associados.

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos, referentes ao Trabalho de Conclusão de Curso 2, deste trabalho são:

- Analisar da velocidade do escoamento do fluido;
- Analisar da pressão na dinâmica do rompimento da barragem;
- Relacionar a formulação matemática da física do rompimento e os resultados obtidos na simulação;
- Relacionar as hipóteses adotadas e os resultados obtidos;
- Levantar a legislação pertinente a gestão de barragens;

- Levantar os documentos necessários para assegurar a estabilidade e segurança da barragem;
- Levantar os órgãos envolvidos na elaboração e fiscalização de barragens de mineração.

1.3 Metodologia

Neste trabalho foi feita a análise do rompimento de barragem, por meio de modelagem matemática e simulação, com o intuito de avaliar o comportamento do rompimento por meio da pressão, velocidade e volume. Também foram levantadas as leis e os documentos pertinentes a gestão ambiental de barragens de mineração.

As etapas seguidas para a realização deste trabalho são:

- Levantamento do histórico dos incidentes de Brumadinho e Mariana;
- Modelagem matemática da física do rompimento de barragens;
- Simulação do rompimento no *software* ANSYS;
- Análise dos resultados dos campos de pressão e volume e dos vetores de velocidade;
- Análise dos gráficos de variação da velocidade e da pressão dentro e fora da barragem;
- Levantamento de leis, instrumentos e órgãos responsáveis e associados a manter a segurança de barragens de mineração.

1.4 Organização do Trabalho

No primeiro capítulo, foi feita a introdução do tema com a problemática apresentada e o objeto de estudo apresentado.

No segundo capítulo, são apresentados os conceitos fundamentais para a compreensão do trabalho, sendo eles a base teórica por trás da análise feita e o histórico dos incidentes de Brumadinho e Mariana.

No terceiro capítulo, são mostradas as considerações feitas para a realização da simulação, bem como a mesma foi feita e os efeitos que as hipóteses assumidas tem na simulação realizada.

No quarto capítulo, é apresentado o tópico de gestão ambiental para barragens de mineração, onde são expostos as leis e resoluções relevantes ao trabalho, bem como os órgãos competentes e os instrumentos de gestão ambiental desses empreendimentos.

No quinto capítulo, são apresentados os resultados com relação a pressão e a velocidade, a pressão antes do rompimento e logo após o rompimento e a velocidade de escoamento do fluido. Também é discutida a gestão ambiental das barragens de mineração.

No sexto e último capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 Barragem de mineração

2.1 Histórico do incidente de Mariana e Brumadinho

As barragens de rejeitos em Brumadinho e Mariana eram do tipo a montante e recebiam rejeitos de mineração de minério de Ferro. Ambas eram localizadas no Estado de Minas Gerais

A Barragem de Fundão em Mariana estava sob tutela da Samarco e rompeu em 2015. As consequências diretas do acidente, segundo G1 (G1, 2016), foram:

- 19 mortos e 2 desaparecidos;
- 329 famílias desabrigadas (1.265 pessoas);
- Liberação de 35 milhões de m^3 de rejeitos liberados na Bacia do Rio Doce;
- 11 milhões de toneladas de peixes mortos;
- 1.249 pescadores que trabalhavam na área atingida.

Segundo Carneiro (CARNEIRO, 2018), as principais causas para o rompimento da barragem de Mariana foram:

- Defeito no sistema de drenagem;
- Base instável para o alteamento;
- Abalos sísmicos.

As causas não são isoladas, o defeito no sistema de drenagem acarreta a liquefação, o que deixa a barragem mais instável e suscetível a acidentes. O sistema de drenagem é o responsável por manter as camadas secas e estáveis, tendo em vista que no momento da disposição dos rejeitos a lama de mineração ainda possui água. A presença de água em níveis além do recomendado produz um efeito de liquefação, ou seja, as camadas que antes estavam secas passam a se comportar como fluidos o que compromete a integridade, tornando a base instável para futuros alteamentos. Por último, no dia do acidente foram registrados abalos sísmicos, de magnitude 2.55 na Escala Richter, que varia de 1 a 10, o que pode ter contribuído para ocorrência do desastre. (SOUZA, 2018).

A barragem do córrego do Feijão, em Brumadinho, estava sob a responsabilidade da Vale. As principais consequências do acidente, segundo Pereira (PEREIRA; CRUZ; GUIMARÃES, 2019) e a Vale (VALE, 2021), foram:

- 270 mortos e 9 desaparecidos;
- 12 milhões de m^3 de rejeitos despejados no Rio Paraopeba;
- Cobertura de 297,28 hectares de terra pelos rejeitos de mineração.

De acordo com o Relatório Final da CPI de Brumadinho (BRUMADINHO, 2019), o rompimento da barragem de Brumadinho pode ter se dado por problemas estruturais e construtivos, os quais seriam:

- Liquefação;
- Efeito *piping*.

Ambos podem ser relacionados a drenagem dos líquidos presentes nos rejeitos depositados o que diminui a segurança da barragem, aumentando os riscos de rompimento. A liquefação é relacionada ao comportamento como fluido de o que antes era sólido, como já dito anteriormente. O efeito *piping* é composto por dois eventos uma erosão no sentido da parede externa para o interior da barragem e o fluxo de água excessivo forma orifícios que compromete a integridade da estrutura. (EVANGELISTA; SANTOS,).

Em ambos os casos é importante ressaltar que esses eventos são observáveis e que se não forem mitigados podem ocasionar no rompimento da barragem.

Outra consideração importante e que após os desastres de Brumadinho e Mariana, por intermédio da Resolução 4/2019 da ANM, passou a ser proibida a construção de novas barragens pelo método a montante e as existentes precisam ser desativadas.(BRASIL, 2019).

2.2 Formulação básica de dinâmica dos fluidos

A Equação de Cauchy é a descrição matemática da conservação da quantidade de movimento que é apresentada na Equação 2.1.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \nabla \sigma + \rho g \quad (2.1)$$

Onde o primeiro termo representa a variação da quantidade de movimento, o segundo as forças de superfície e o último as forças de campo.

A Equação de Navier Stokes é usada para caracterizar o movimento de fluidos, no caso deste trabalho a lama de rejeito de mineração. Ela pode ser tida como uma interpretação da segunda Lei de Newton, o lado esquerdo apresenta a variação da quantidade de movimento e o direito fala sobre as forças resultantes. A Equação 2.2 é uma equação já simplificada, considerando um escoamento incompressível com viscosidade constante. (ÇENGEL; CIMBALA, 2015)

$$\rho + \frac{D\vec{V}}{Dt} = \vec{\nabla}P + \rho g + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.2)$$

2.3 Física do rompimento de barragens

Para o entendimento do funcionamento das barragens se faz necessário a definição de alguns termos importantes, os quais são:

- **Alteamento:** tornar algo mais alto, para o caso das barragens de mineração é adicionar uma nova camada à barragem;
- **Curva cota-volume:** relaciona o volume armazenado com a elevação, é utilizado para obtenção da capacidade de armazenamento do reservatório;
- **Tempo de enchimento:** é o tempo necessário para encher a barragem;
- **Tempo de regularização:** é o tempo necessário para que a vazão seja regularizada;
- **Volume de espera:** é o volume utilizado para atenuação de cheias e fica acima do volume útil;
- **Volume útil:** é o volume de utilização do reservatório.

Com relação as barragens de rejeito é importante pontuar duas coisas. A primeira é que o volume útil dessas barragens vai sempre aumentando, ou seja, cada vez que são depositados rejeitos, esse volume é atualizado. Segundo, para essas barragens, o conceito de volume de espera não se aplica, tendo em vista que o volume útil não é fixo.

As barragens de Brumadinho e Mariana são do tipo aterramento, também conhecidas como taludes, onde as paredes de contenção são feitas de terra compactada. Elas podem ser de 3 tipos: montante, jusante e linha de centro, porém serão abordados 2 neste texto.

As barragens a montante são aquelas onde a parede de contenção é construídas de forma a ser contrária ao fluxo, como apresentado na Figura 3, sendo que, os alteamentos são construídos antes do eixo. Ela possui um formato semelhante a uma escada e é o tipo menos seguro e de menor custo dos 3 tipos.

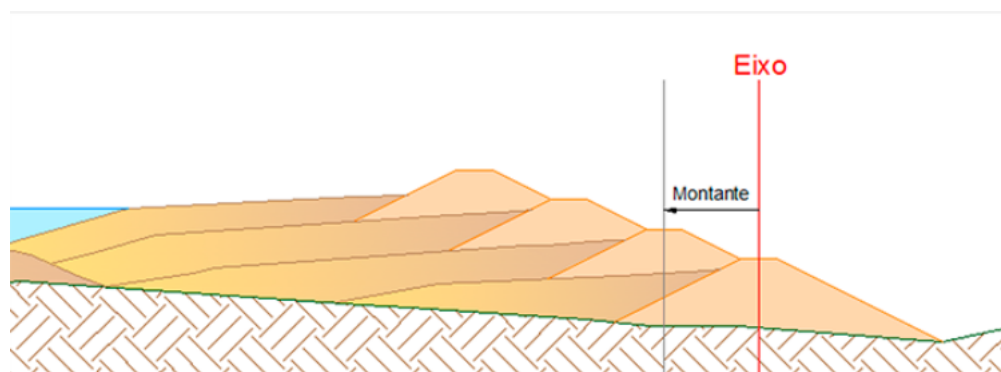


Figura 3 – Barragem de rejeitos a montante.

Fonte:(VALE, 2020).

Já as que são a jusante as paredes são construídas a favor do fluxo do fluido, como retratado na Figura 4, ou seja, os alteamentos vão sendo construídos depois do eixo. Possui um formato similar ao de uma pirâmide, é o método de alteamento mais seguro e o mais caro.

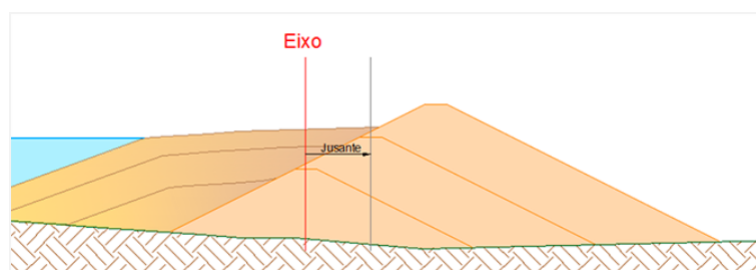


Figura 4 – Barragem de rejeitos a jusante.

Fonte:(VALE, 2020).

2.3.1 Descrição matemática

A dinâmica do rompimento de uma barragem pode ser modelada por meio de duas equações: A Equação de Bernoulli e a Equação de estática dos fluidos, que podem ser modeladas de modo a expressarem o comportamento das forças atuantes quando a barragem está comprometida.

Na ocasião em que a barragem está íntegra, a força atuante é a força hidrostática, que é relacionada a pressão devido a coluna de fluido presente na barragem. Nesse estado o fluido está estático, com velocidade igual a 0 como apresentado na Equação 2.3.

$$u_1 = 0 \quad (2.3)$$

A força hidrostática é descrita pela relação entre pressão e área, Equação 2.4, essa pressão é relacionada a pressão atmosférica e ao peso específico, Equação 2.5, e por fim os valores da pressão atmosférica e o peso específico da água, chegando na Equação 2.6.

$$F_h = P * A_b \quad (2.4)$$

$$F_h = (P_{atm} + \gamma \Delta h) * A_b \quad (2.5)$$

$$F_h = (101.325 + 9.810 * \Delta h) * A_b \quad (2.6)$$

No entanto quando há o comprometimento, além da força hidrostática, há também a força do escoamento, que é relacionada a velocidade com que o fluido se move. A velocidade inicial do fluido passa a ser diferente de 0 e foi considerado que a velocidade final do fluido é o dobro da velocidade inicial (Equação 2.7).

$$u_2 = 2 * u_1 \quad (2.7)$$

A Equação de Bernoulli (Equação 2.8) é utilizada para determinar o gradiente de pressão que gera a força relacionada ao fluido que escoar, infiltrando na barragem. O gradiente de pressão é dado pela Equação 2.9, com o rearranjo dos termos da Equação 2.8.

$$P_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} \quad (2.8)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} * (u_2^2 - u_1^2) \quad (2.9)$$

Substituindo os valores da massa específica da água e da velocidade final, chega-se que o gradiente de pressão é representado pela Equação 2.10. E a força relacionada ao fluido em movimento presente na barragem é dada pela Equação 2.11.

$$P_1 - P_2 = 1500 * u_1^2 \quad (2.10)$$

$$F = 1500 * u_1^2 * A_b \quad (2.11)$$

A atuação das duas forças em conjunto, Equações 2.6 e 2.11, na barreira da barragem compromete sua integridade, o que se não detectado à tempo, pode ocasionar no rompimento da barragem.

Os rompimentos de barragem são tão devastadores por causa das forças que atuam e colapsam as paredes das barragens, esses eventos geralmente não acontecem de forma imediata, o que quando observados podem ser evitados.

2.4 Método volume de fluido (VOF)

O método VOF é utilizado para problemas multifásicos com fluidos imiscíveis onde a posição da fronteira entre os fluídos é importante para o problema. É caracterizado pela presença de uma malha seja ela estacionária ou não estacionária.

É um método que permite modelar o escoamento de fluidos imiscíveis que possuam superfícies livres e fronteiras móveis, por meio de equações de momento e o acompanhamento das frações volumétricas relativas ao escoamento. Ele foi adaptado de escoamentos em condutos abertos e canais, por permitir que a simulação aconteça com superfícies livres. Isso é possível por meio da definição de água e ar em diferentes condições para que a imiscibilidade seja garantida.

Esse método é baseado na solução de Euler e na equação de Navier Stokes. Sua solução passa pelo conceito da fração volumétrica, que segundo Oliveira, quando se há várias fases que se deseja ser representadas dentro de um mesmo volume de controle os valores de f_i variam entre 0 e 1. (OLIVEIRA et al., 2011)

A formulação em VOF, pode ser em regime permanente ou transitório, para a modelagem do rompimento foi escolhido o modelo transiente, dada a importância das condições iniciais selecionadas para a modelagem efetiva do problema. As frações volumétricas (f_i), além de indicarem a presença ou ausência de um fluido, elas determinam as propriedades e a qual fluido associado são em cada volume de controle ao longo do domínio. (ANSYS, 2009d)

Como já mencionado, as frações volumétricas indicam a presença, ausência ou mistura de fluidos dentro de uma célula. Considerando um fluido q^{th} com a fração volumétrica f_i associada, são possíveis condições apresentadas pelas equações abaixo. Na Equação 2.12, a célula está vazia do fluido q^{th} , enquanto a Equação 2.13 representa que a célula está cheia do fluido q^{th} e por último na Equação 2.14 há a presença de dois ou mais fluidos presentes na célula. É importante ressaltar que o somatório das f_i em cada célula vai ser igual a 1. (ANSYS, 2009d)

$$f_i = 0 \quad (2.12)$$

$$f_i = 1 \quad (2.13)$$

$$0 < f_i < 1 \quad (2.14)$$

Uma das aplicações para essa modelagem é a avaliação do movimento do líquido depois do rompimento de uma barragem, que se aplica ao caso estudado.

Apesar do caso a ser estudado ser uma das aplicações do método, existem duas limitações importantes para utilização dele, a primeira é a utilização da solução baseada em pressão, por não poder utilizar a solução baseada na massa específica, a segunda é que não devem haver regiões vazias no volume de controle utilizado, sempre deve ser ocupada, seja com ar, com fluido ou uma mistura de ambos (ANSYS, 2009d).

A aplicação do método no ANSYS é feita por meio da fração volumétrica, que é dizer *software* onde há água, ar ou uma mistura dos dois. Essa definição é feita no *Fluent* de acordo com as condições de entrada estabelecidas na modelagem do problema. É importante ressaltar que na malha desenvolvida para o problema, a célula sempre estará preenchida, não podendo haver espaços vazios dentro do volume de controle definido.

Na definição das condições de contorno do problema, a grandeza escolhida para especificar é a pressão ao invés da velocidade. Essa escolha se dá pela pressão ser uma grandeza escalar, enquanto a velocidade é uma grandeza vetorial, o que demandaria a especificação da direção e sentido do vetor que a representa, aumentando a complexidade da análise e a demanda computacional (ANSYS, 2009c).

3 Modelagem do rompimento de uma barragem de mineração

A modelagem de problemas de escoamento de fluidos em ferramentas computacionais é feita por meio da Fluidodinâmica Computacional (CFD), que permite a visualização de escoamento complexos e a obtenção de resultados de pressão, velocidade, fases de fluidos entre outras possibilidades. A CFD é utilizado como uma experimentação numérica, ou seja, a modelagem e simulação de modelos reais, deve ser utilizado de modo a complementar e validar os resultados obtidos na experimentação física.

O fluxo de trabalho de CFD é apresentado na Figura 5. Na etapa de Modelagem, são determinados quais são os resultados desejados, o que a minha simulação pode entregar e qual o escopo da minha simulação. No Pré processamento, são definidas a geometria e gerada a malha que atuará no problema, juntamente com os parâmetros físicos e numéricos, que atuarão no sentido de implementar a pressão, velocidade e características do fluido, de acordo com o método de solução determinado. O Processamento é a etapa em que tudo o que foi definido nas etapas anteriores seja aplicado de modo a gerar os resultados desejados para que no Pós processamento sejam analisados, de modo a averiguar a coerência com o que era desejado. Se os resultados obtidos não forem os desejados é retornado a etapa de Pré processamento, para que sejam ajustados os parâmetros e repetido o processo até que se chegue nos resultados desejados.

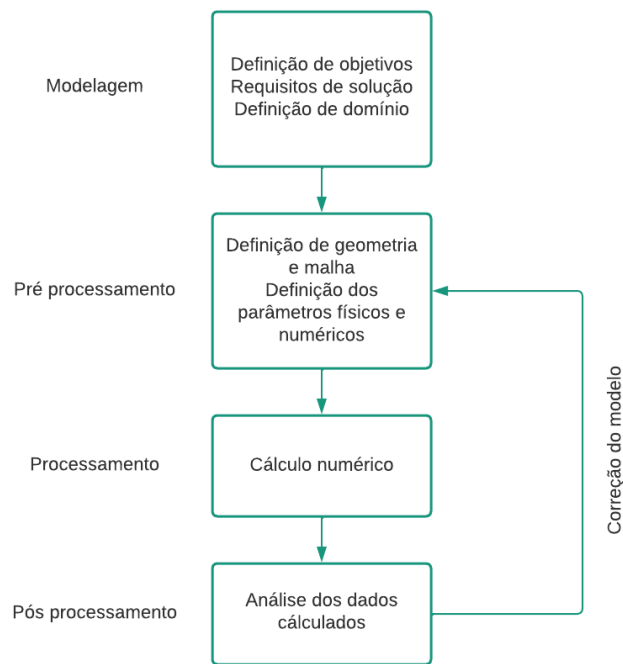


Figura 5 – Fluxo de trabalho usando CFD.

O rompimento de barragem foi modelado no software ANSYS na aba do Fluent, que permite a simulação do rompimento de barragens, usando uma combinação de fluidos, água líquida e ar, para simular o escoamento do fluido quando a barreira é removido.

Na Figura 6 , é apresentado o menu utilizado para a simulação do problema, onde nas configurações são definidos os parâmetros e métodos de execução da simulação, na solução e resultados são apresentados os gráficos de pressão e velocidade e são gerados as animações representando a simulação.

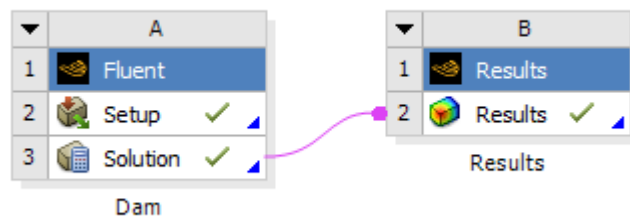


Figura 6 – Menu inicial do ANSYS

A geometria adotada no problema é apresentada na Figura 7, em verde o fluido presente é a água e em azul é o ar. Para a simulação são definidos dois parâmetros, pressão e velocidade.

A pressão atua no sentido negativo do eixo y, ou seja, de cima pra baixo, enquanto a velocidade atua no sentido positivo do eixo x, da esquerda pra direita.

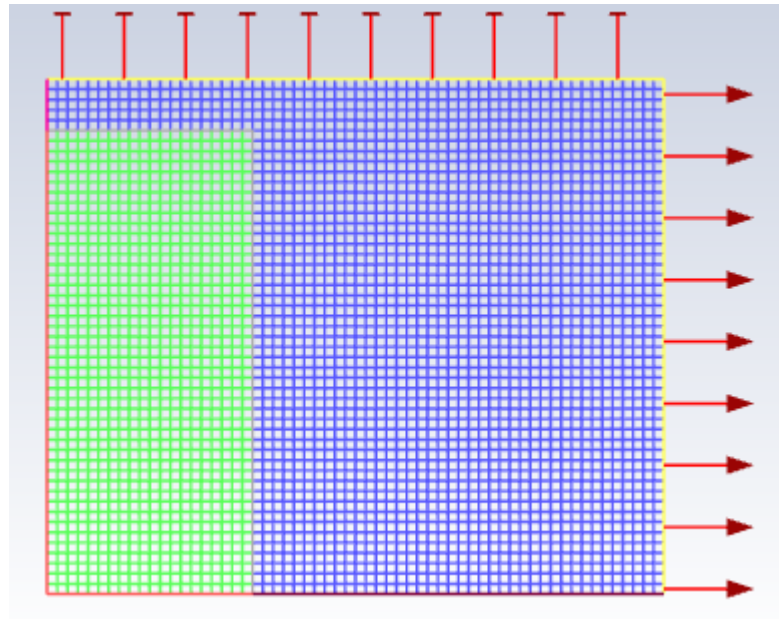


Figura 7 – Geometria do problema de rompimento de barragens

Na primeira tela da configuração, apresentada na Figura 8, são feitas as primeiras definições com relação ao que será resolvido na simulação. Na parte da solução são selecionados que a resolução será baseada na pressão, por ser uma grandeza escalar e em regime transiente para que seja possível visualizar a dinâmica do rompimento. Outra consideração importante é a presença da gravidade com valor negativo, para que quando as paredes sejam removidas a gravidade atue e faça com que o fluido escoe.

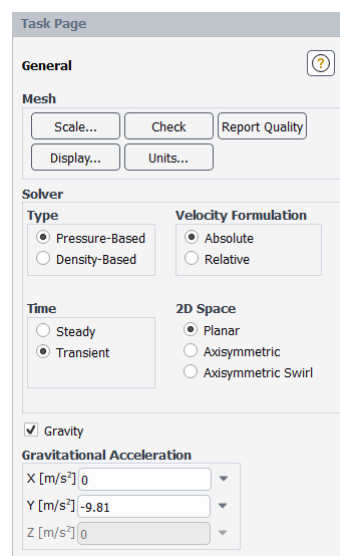


Figura 8 – Tela inicial do ambiente *Fluent* no *Setup*

Nos modelos, é preciso configurar o modelo multifásico, selecionando o método volume de fluido, são selecionadas 2 fases eulerianas, que serão definidas como água líquida e ar. Ainda nesse menu, é selecionada o modo força corporal implícita que auxilia na convergência da solução por contabilizar o equilíbrio parcial das forças no corpo e do gradiente de pressão na equação de momento, como mostrado na Figura 9 (ANSYS, 2009b). Em seguida foi definidos que o ar seria a fase primária e a água líquida seria a fase secundária.

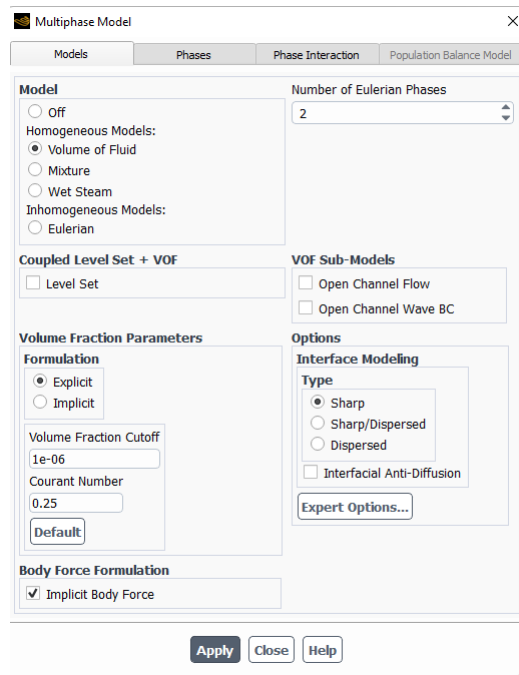


Figura 9 – Configuração do modelo multifásico

Nas condições de operação, Figura 10, são definidas as condições do ambiente nas quais haverá a simulação, a pressão foi definida como 1 atm e a gravidade como $-9,81m/s^2$, o sinal negativo indica que a gravidade atuará para baixo e por último é definido o método de operação da densidade, que foi escolhido o fluido com a menor densidade, o ar.

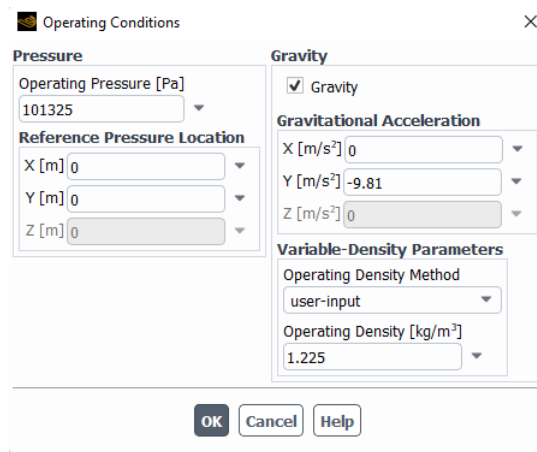


Figura 10 – Condições de operação da simulação

Em seguida é definida a pressão na saída, Figura 11, onde o parâmetro é definido para a fase da água, em que é selecionada a opção fração de volume de refluxo, que imita as condições de escoamento do rompimento da barragem permitindo que haja um fluxo no sentido contrário.

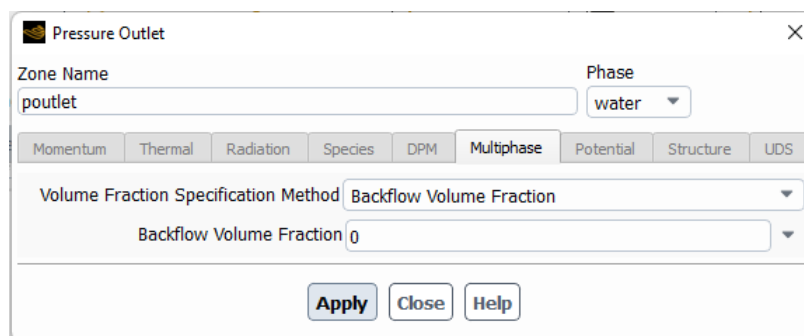


Figura 11 – Definição do modo da pressão na saída

Os controles de solução, Figura 12, são configurados de maneira que a simulação convirja.

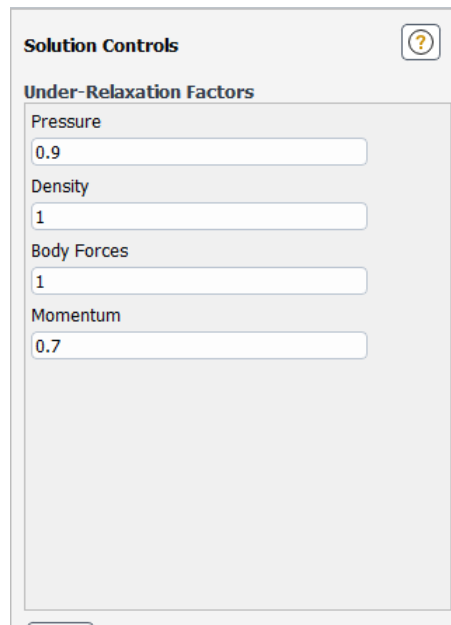


Figura 12 – Configurações dos controles de solução

Os métodos de solução possuem duas categorias, Figura 13, na categoria acoplamento pressão-velocidade o esquema solucionado foi o PISO que fornece condições adicionais de pressão no sentido de aproximar as relações de correção entre pressão e velocidade para manter a conservação de massa e determinar o campo de pressão (ANSYS, 2009e), e na discretização espacial a pressão foi classificada como PRESTO! o que é utilizada para uma pressão instável (ANSYS, 2009a).

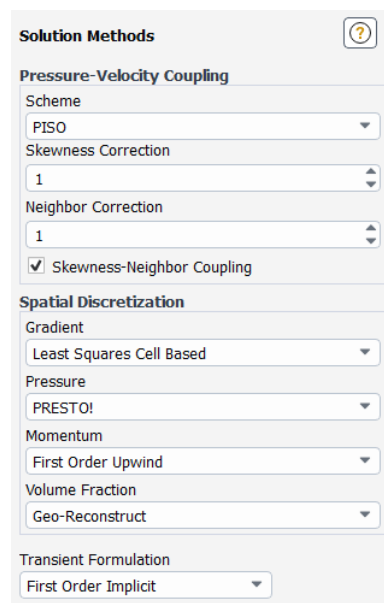


Figura 13 – Métodos de solução

O *Patch*, Figure 14, vai definir onde está a água, por meio do método Fração Volumétrica, onde foi definido que onde houver água, o valor da fração será igual a 1 enquanto onde houver ar será 0.

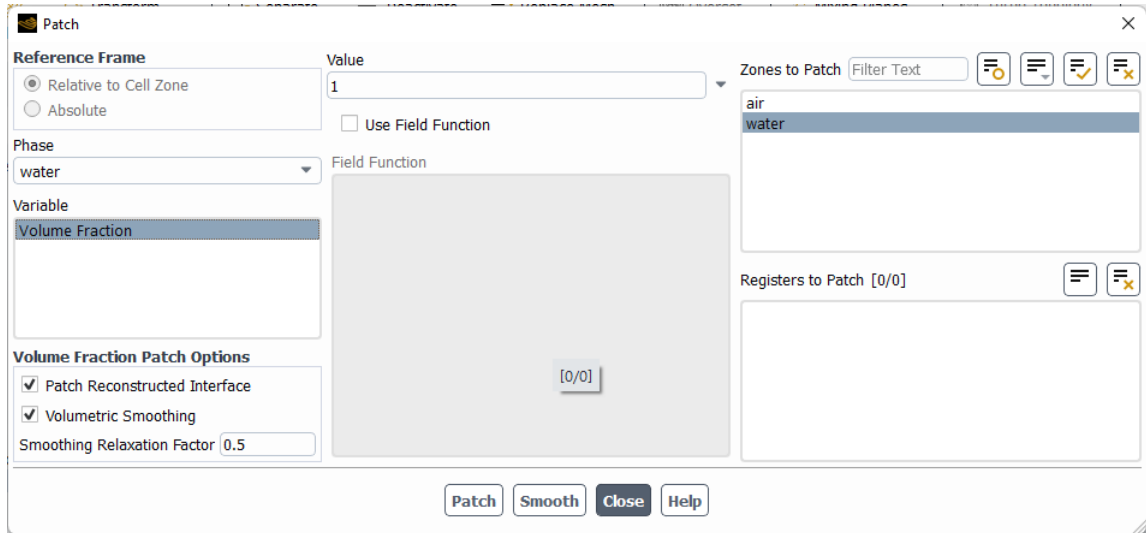


Figura 14 – Configuração do *Patch*

Para a realização da simulação foi utilizado o computador Lenovo Idealpad i3 com processador Intel(R) Core(TM) i5-10210U CPU @ 1.60GHz 2.11 GHz e RAM de 8GB. Para que todos os resultados fossem obtidos foram necessários 35 minutos.

4 Gestão Ambiental de barragens de mineração

4.1 Legislação pertinente à barragens de mineração

Para a regulação de barragens de mineração no território brasileiro existem leis e resoluções de órgãos competentes que delimitam e informam as condições de operação e os documentos necessários que asseguram a integridade da barragem. Neste trabalho são ressaltadas as leis e normas pertinentes as condições de estabilidade e rompimento de barragens.

4.1.1 Lei nº 12.334/2010

A Lei 12.334/2010 ([BRASIL, 2010](#)) institui a Política Nacional de Segurança de Barragem e o Sistema Nacional de Informações de Segurança de Barragens. Ela foi alterada pela Lei 14.066/2020 que incluiu artigos e editou outros já existentes.

No seu primeiro capítulo são apresentados as principais definições para que a lei seja compreendida e cumprida como o que é barragem, dano potencial associado, categoria de risco, mapa de inundação, desastre, dentre outros. Além disso são apresentados em quais casos a lei deve ser aplicada.

Nos capítulos dois e três estão dispostos os objetivos da legislação e os fundamentos da fiscalização, respectivamente. No capítulo dois Artigo 3º os itens I, II e VII abordam a segurança das barragens enquanto no capítulo três Artigo 4º os itens I, III e V tratam do mesmo tema. O Artigo 5º trata sob a fiscalização de barragens de diversos tipos, em seu item III versa sob barragens de acumulo de rejeitos de mineração.

Em seu quarto capítulo são abordados os documentos pertinentes a barragem como o plano de segurança de barragem e o plano de ações emergenciais, que são apresentados na Seção 4.3, além de outros documentos que precisam estar presentes e serem submetidos aos órgãos reguladores e que devem ser de acesso público, seja por meio do SNISB seja pelo site da instituição empreendedora.

O capítulo 5 trata das competências, tanto do órgão fiscalizador quanto do empreendedor, das quais é importante ressaltar no Artigo 16º os itens I, III e V das competências do fiscalizador. No Artigo 17º, tratando das competências do empreendedor, os itens I, III, IV, VII, X, XIV, XVIII e XIX tratam diretamente da manutenção da segurança das barragens e da população

que pode ser afetada em caso de um desastre. Ainda nesse capítulo são tratadas das infrações e sanções em caso de incidente, acidente ou desastre para qualquer tipo de barragem.

Em seu sexto e último capítulo, tratando das disposições finais, o Artigo 18º é relevante pois trata também sobre a segurança das barragens e das pessoas que podem ser afetadas por sua causa.

4.1.2 Resolução CNRH n° 143/2012

A Resolução 143/2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) (BRASIL, 2012) atua em conjunto a Lei 12.334/2010 (BRASIL, 2010) na classificação de barragens de rejeitos e acumulo de água, onde sua classificação pode ser dada por três características:

- Categoria de risco;
- Dano potencial associado;
- Volume do reservatório.

Em seu capítulo único são apresentadas definições bem como a Lei 12.334/2010, onde os pertinentes são os de barragem, dano potencial e área afetada. Em sua primeira seção são apresentados os critérios para a classificação das barragens segundo a sua categoria de risco onde são vistas as características técnicas da barragem, o seu Plano de Segurança e o estado de conservação que ela se encontra. Na seção dois são vistos os critérios relacionados ao Dano potencial associado onde eles dizem respeito a existência de população, equipamentos e habitações, além de áreas de proteção ambiental. Em sua terceira e última seção as barragens são classificadas quanto ao volume do seu reservatório, para as barragens de mineração vão de muito pequeno a muito grande. No Anexo I são apresentados os quadros e critérios numéricos para a classificação das barragens.

4.1.3 Resolução ANM n° 4/2019

A Resolução n° 4/2019 da Agência Nacional de Mineração (ANM)(BRASIL, 2019) foi escrita após os desastres de Mariana e Brumadinho, ambas barragens construídas pelo método a montante. Nessa resolução são proibidas a construção de novas barragens pelo método a montante (Artigo 2º) e que as barragens existentes devem ser descomissionadas e descaracterizadas até 15 de agosto de 2021 (Artigo 8º).

4.1.4 Resolução ANM n° 95/2022

A Resolução n° 95/2022 da Agência Nacional de Mineração (ANM) (BRASIL, 2022) vem em conjunto a Lei 12.334/2010 e a Resolução n° 143/2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) de modo a consolidar as medidas regulatórias aplicáveis a barragens de mineração.

No seu primeiro capítulo trata a respeito do cadastro das barragens no Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM) e no Cadastro Nacional de Barragens de Mineração (CNBM). Sua primeira seção trata do cadastramento das barragens, atribuindo a competência desse cadastramento ao empreendedor. Na segunda seção é tratada da periodicidade do cadastramento de novas barragens. Já em sua terceira seção é tratado da classificação das barragens, em conformidade a Lei 12.334/2010 e a Resolução 143/2012. Em sua quarta e última seção são expostos os assuntos referentes ao sistema de monitoramento de barragens de mineração.

No capítulo dois é abordado o Plano de Segurança de Barragens. Onde em sua primeira seção fala sobre os conteúdos mínimos a estarem presentes no PSB e também da estrutura que deve ser utilizada. Em sua segunda seção, a elaboração e atualização dos dados do PSB são discutidas.

Nos capítulos três a cinco são tratados de instrumentos participantes do PSB, a Revisão Periódica de Segurança de Barragem, Inspeções de segurança Regulares e Inspeções de Segurança Especiais, em cada um dos instrumentos são apresentados os conteúdos mínimos, a estrutura do documento a ser submetido e sobre a sua periodicidade. Todos esses eventos estão previstos no PSB, de modo a integrarem e serem revisados e executados de acordo com a determinação da legislação e dos órgãos reguladores competentes.

O capítulo seis discorre sobre o Plano de Ações Emergenciais de Segurança de Barragem, onde são apresentados a sua estrutura, conteúdos mínimos, sua atualização e revisão, suas responsabilidades, as situações e níveis de alerta e emergência e a avaliação de conformidade e operacionalidade. No capítulo sete é apresentado o Processo de Gestão de Risco, onde são descritos seu conteúdo mínimo e estrutura, além da periodicidade de revisão.

Do capítulo oito ao doze são apresentadas informações pertinentes ao empreendedor e ao órgão regulador, como as medidas regulatórias, qualificação técnica mínima, responsabilidades e penalidades, além das disposições finais e transitórias.

4.2 Órgãos responsáveis pelas barragens de mineração

Para a fiscalização, elaboração e implementação das regras pertinentes a barragens de mineração, segundo Silva (SILVA, 2019), existem três órgãos diretamente responsáveis: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, Agência Nacional de Mineração e Conselho Nacional de Recursos Hídricos, que serão abordados abaixo.

4.2.1 Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

Apesar de ser o órgão responsável por se fazer cumprir a Lei de águas (Lei 9.433/1997) e o marco legal do Saneamento Básico (Lei 14.026/2020), ela também está associada a barragens de mineração. Segundo Silva (SILVA, 2019) é o órgão responsável por gerir, organizar e implementar o Sistema Nacional de Informações de Segurança de Barragens. Além da atuação no SNISB, também participa da Revisão periódica de Segurança de Barragens, agindo na sua coordenação e elaboração.

4.2.2 Agência Nacional de Mineração

Foi criada pela Lei 13.575/2017 como uma autarquia federal do Ministério de Minas e Energia, substituindo o Departamento Nacional de Produção Mineral que havia sido fundado em 1934 durante o Governo de Getúlio Vargas. Segundo a Lei que a criou (BRASIL, 2017a), em seu segundo artigo item XI, a ANM é o órgão responsável pela fiscalização da atividade de mineração.

4.2.3 Conselho Nacional de Recursos Hídricos

A principal participação do CNRH na gestão de barragens de mineração é por meio da sua Resolução nº 143/2012, onde classifica as barragens de três formas conforme apresentado na Subseção 4.1.2 deste trabalho.

4.3 Documentos e ferramentas obrigatórios da gestão de barragens de mineração

Os documentos apresentados abaixo são exigidos pela Lei 12.334/2010 (BRASIL, 2010) alterada pela Lei 14.066/2020, onde mostram o que eles devem conter para que seja assegurada a estabilidade e segurança da barragem a qual os documentos se referem.

Os documentos apresentados nas Subseções 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4, são constituintes do Plano de Segurança de Barragens apresentado na Subseção 4.3.1. Na Figura 15, são apresentadas as ações tomadas por cada um dos atores dentro da gestão de barragens de mineração. Com relação ao empreendedor cabe a elaboração e submissão dos documentos. Quanto aos órgãos de proteção e a defesa civil cabe o armazenamento do PAE. Já a ANA e ANM devem divulgar as informações contidas no PSB, RSB e DCE.

Quanto aos sistemas apresentados nas Subseções 4.3.5 e 4.3.6, eles são utilizados pelos órgãos reguladores para o controle e exposição dos dados submetidos nos documentos apresentados para o público.

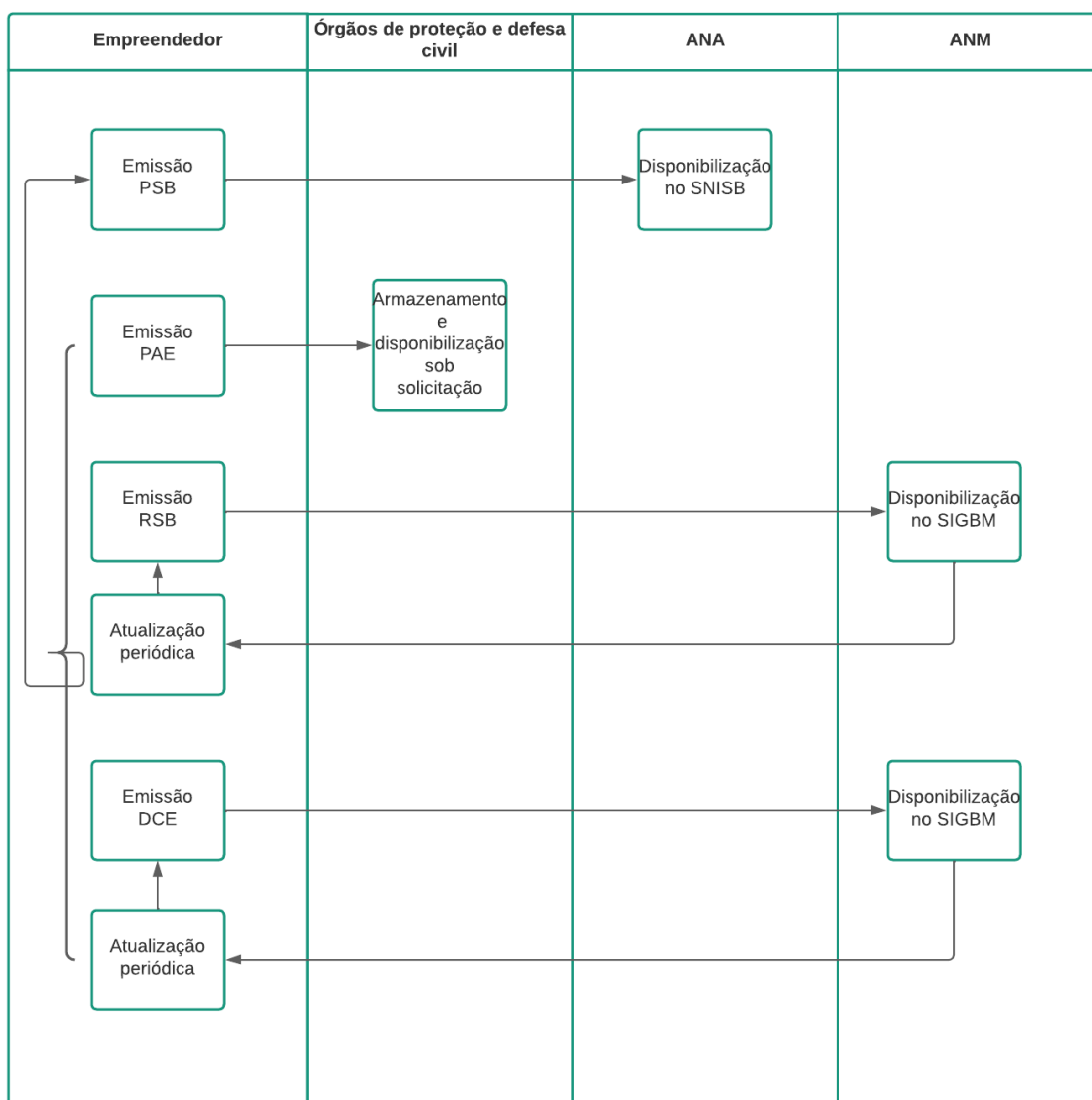


Figura 15 – Ação dos atores pertinentes a gestão ambiental de barragens de mineração

4.3.1 Plano de Segurança de Barragens (PSB)

É o documento apresentado na Seção II da Lei 12.334/2010 (BRASIL, 2010), submetido à ANM onde suas informações mais relevantes ao trabalho que devem estar presentes são:

- Mapa de inundação em caso de rompimento considerando o pior cenário possível;
- Identificação e avaliação dos riscos associados ao empreendimento;
- Dados técnicos das estruturas, das instalações e dos equipamentos de monitoramento.

Esse documento é elaborado pelo empreendedor e sua atualização é realizada de acordo com as instruções do órgão fiscalizador, que usa como critério para o estabelecimento das atualizações são o dano potencial associado a essa barreira e a categoria de risco atribuída à ela.

4.3.2 Revisão periódica de Segurança de Barragens (RSB)

Também presente da Seção II da Lei 12.334/2010 (BRASIL, 2010), a Revisão Periódica de segurança de Barragens (RSB) é parte integrante do PSB e tem como objetivo verificar o estado geral da barragem. A periodicidade da revisão do documento é dado pelo órgão fiscalizador usando os mesmos critérios do PSB.

Nesse documento são apresentadas as ações a serem tomadas pelo empreendedor para manter a barragem segura, essas ações são apresentadas com base no:

- Exame da documentação;
- Exame dos procedimentos
- Análise comparativa com os relatórios anteriores.

Os resultados são apresentados ao órgão fiscalizador, que dá ao empreendedor um prazo para que as medidas necessárias sejam tomadas para que a segurança da barragem seja mantida.

A frequência de atualização do documento, segundo a Resolução n° 95/2022 da ANM, (BRASIL, 2022), é:

- DPA alto: 3 anos;
- DPA médio: 5 anos;
- DPA baixo: 10 anos;
- Sempre que ocorrerem modificações estruturais;
- Para as barragens alteadas continuamente: a cada dois anos ou a cada 10 metros alteados.

4.3.3 Plano de ações emergenciais (PAE)

Outro documento integrante do PSB é o Plano de Ações Emergenciais (PAE), onde estão presentes as instruções tanto para o empreendedor quanto para os civis e governo em como agir em caso de emergências.

Após o desastre de Brumadinho passou a ser obrigatório para todas as barragens de mineração. Dentre as informações relevantes presentes na Lei 12.334/2010 estão:

- Descrição das informações da barragem;
- Modo de identificação de mal funcionamento de equipamentos e das condições potenciais de ruptura da barragem;
- Atribuição e responsabilidade dos envolvidos, junto com o fluxograma de acionamento dos responsáveis em caso de acidente;
- Delimitação das Zonas de Autossalvamento e de Segurança Secundária;
- Sistema de monitoramento e controle integrado;
- Planejamento de rota de fugas.

Esse documento deve estar presente e disponível de forma pública no site do empreendedor. Além disso, durante a sua elaboração a população deve ser consultada e devem ser feitas simulações da sua execução junto a população e aos órgãos públicos.

Sua alteração, segundo a Lei 12.334/2010, deve ser feita quando:

- Recomendado na inspeção ou programado no RSB;
- Houverem alterações na instalação da barragem;
- A execução indicar necessidade;
- O órgão fiscalizador exigir.

4.3.4 Declaração de Estabilidade de Barragens (DCE)

A Declaração de Estabilidade de Barragem (DCE) é dada pelo empreendedor de modo a assegurar a segurança da barragem. Ela faz parte dos documentos presentes nas Inspeções de Segurança Regulares (ISR). Na Resolução nº 95/2022 da ANM (BRASIL, 2022), em seu artigo 19 e inciso 3º afirma que a não apresentação desse documento implica no embargo da barragem. O documento deve ser submetido à ANM por meio do Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM). Onde no Anexo V da mesma resolução é apresentado o modelo a ser seguido para a elaboração da DCE. A sua atualização é feita de forma semestral e é enviada a ANM.

4.3.5 Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragem (SNISB)

Apresentado na Seção III da Lei 12.334/2010 (BRASIL, 2010), o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens é um registro informatizado e integrado das condições da segurança de barragens. Apresenta informações sobre as barragens que estão em construção, operação e as desativadas.

No sistema devem ser mantidas as informações sobre incidentes, acidentes e desastres, além das informações das barragens até a sua completa descaracterização.

Os seus princípios de funcionamento, segundo a Lei 12.334/2010 (BRASIL, 2010), são:

- Descentralização e produção de dados;
- Coordenação unificada dos sistema;
- Acesso de dados de forma livre.

4.3.6 Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM)

Criado por meio da Portaria 70.389/2017 (BRASIL, 2017b) do então Departamento Nacional de Produção Mineral, que se tornaria ANM, é o sistema integrado de gerenciamento das barragens de mineração em território nacional. O empreendedor é obrigado a cadastrar suas barragens no sistema estando elas em construção, operantes ou descaracterizadas, desde que esteja sob sua responsabilidade, como informa o Artigo 3 da portaria.

5 Resultados e Discussão

Os resultados foram obtidos a partir das iterações realizadas dentro do ANSYS, ao total foram 100 iterações, que vão da barragem íntegra até o escoamento do fluido que acontece após o rompimento da barragem.

As iterações foram divididas em blocos de modo que ao final somassem 100, a divisão foi feita de modo que fosse possível apresentar a mudança no estado da barragem. Foram feitos blocos de 20-30-30-20 e os resultados obtidos são apresentados abaixo.

Para a análise dos resultados foram procuradas modelagens semelhantes para que fossem corroborados os resultados obtidos. Porém para os parâmetros analisados não foram encontradas bibliografias que pudessem auxiliar, mostrando assim uma escassez no que diz respeito a artigos e teses a respeito do tema estudado.

5.1 Volume de controle

No início da simulação, na iteração 0, a barragem era íntegra, ou seja, não havia escoamento e o fluido estava contido, como apresentado na Figura 16. Em vermelho está a água e em azul o ar. Que são os fluidos que representam esse escoamento multifásico.

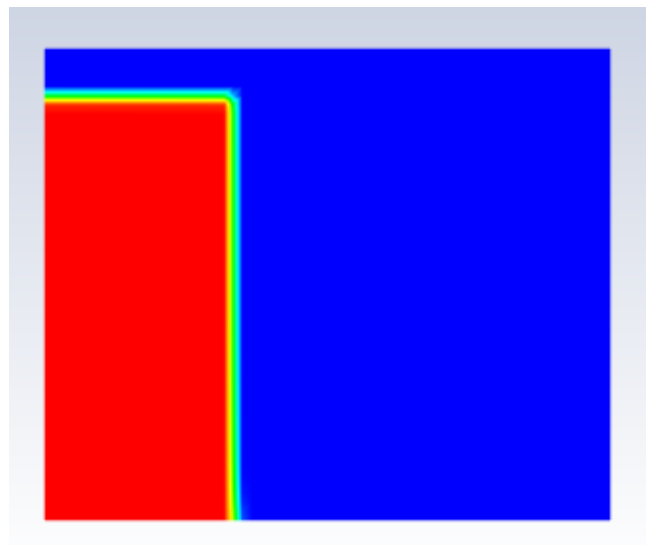


Figura 16 – Instante inicial do volume de controle.

Após a vigésima iteração, o rompimento já estava no seus momentos iniciais, Figura 17, onde as paredes já não eram mais capazes de conter o fluido em seu estado inicial.

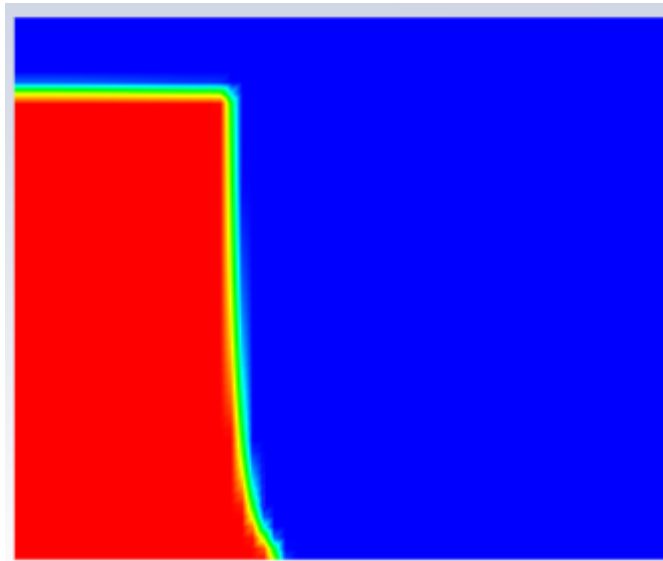


Figura 17 – Volume de controle na iteração 20

Nas Figura 18, o rompimento está se desenvolvendo, porém a forma inicial da barragem ainda está parcialmente mantida, apesar do processo de rompimento.

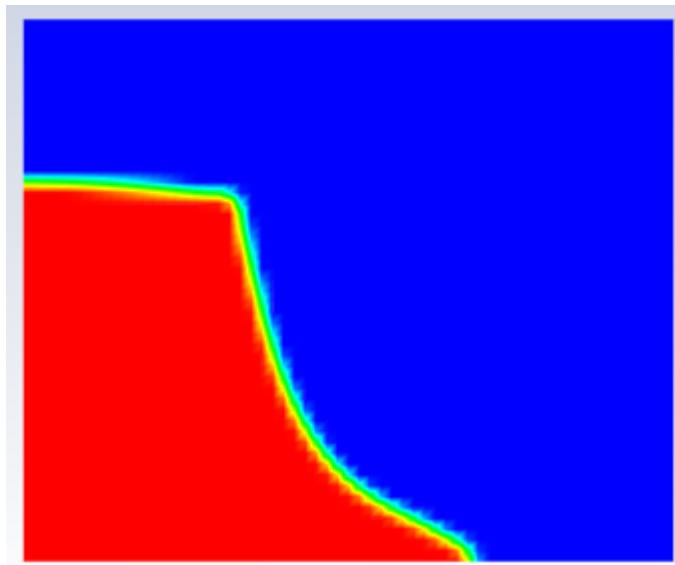


Figura 18 – Volume de controle na iteração 50

Nas Figuras 19 e 20, é mostrado o desenvolvimento do escoamento, onde a forma da barragem já não mais existe. E o volume de líquido que estava contido se dissipa tendendo a se nivelar quando se espalhar por toda a superfície disponível.

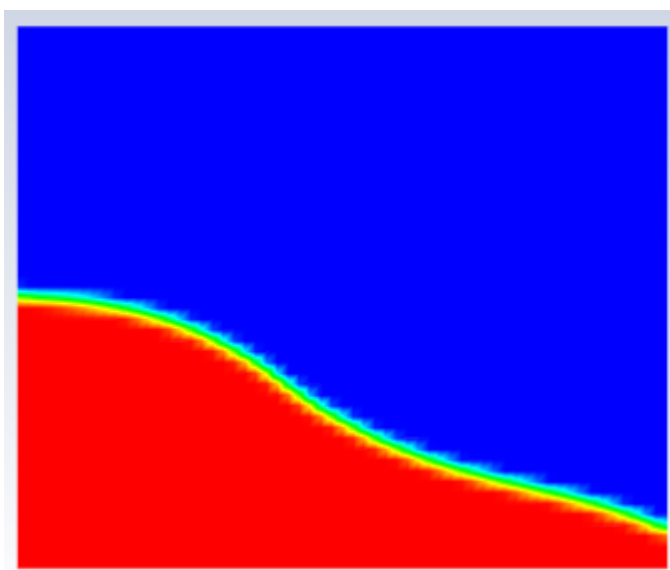


Figura 19 – Volume de controle na iteração 80.

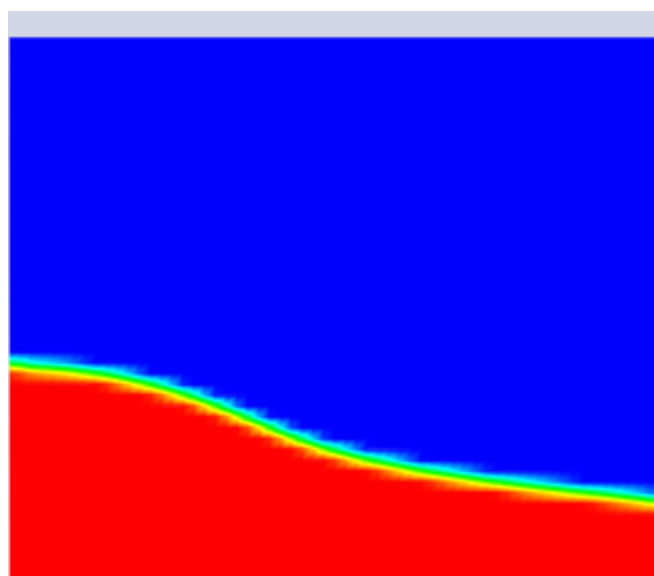


Figura 20 – Volume de controle na iteração 100

5.2 Pressão

No estado inicial, antes do rompimento, a condição normal da pressão é relacionada a pressão da coluna de água, pressão hidrostática. Após a vigésima iteração, Figura 21, a pressão aumenta ao longo da coluna e começa a forçar o escoamento na base do fluido.

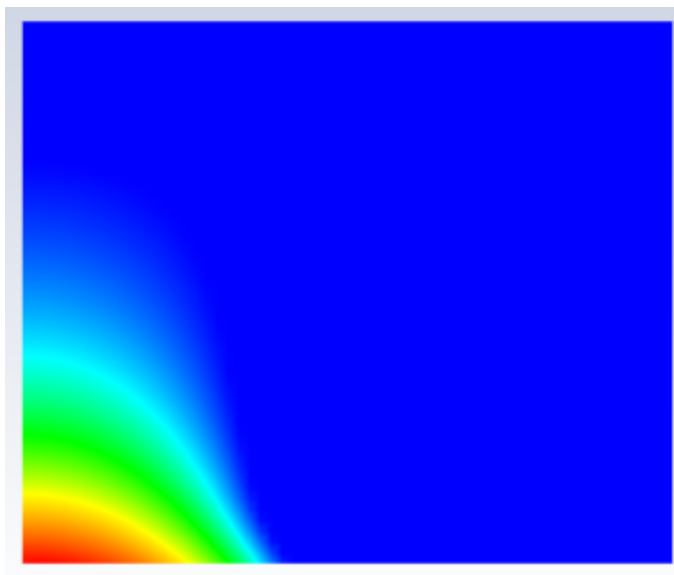


Figura 21 – Contorno de pressão na iteração 20

Na Figura 22, o escoamento está no seu estado inicial e a pressão se propaga ainda mais ao longo do volume de controle, dada a atuação das forças e aumento da velocidade do fluido, o que caracteriza um pico de pressão, o momento em que ela se encontra mais concentrada e força o rompimento da barragem.

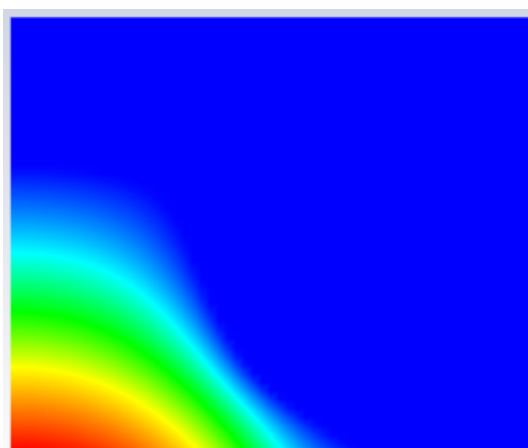


Figura 22 – Contorno de pressão na iteração 50

Nas Figuras 23 e 24 o escoamento do fluido já está consolidado o que apresenta uma dispersão da pressão que antes estava concentrada e com a continuidade do escoamento tende a diminuir ainda mais, de forma a existir somente a pressão relacionada a coluna de fluidos.

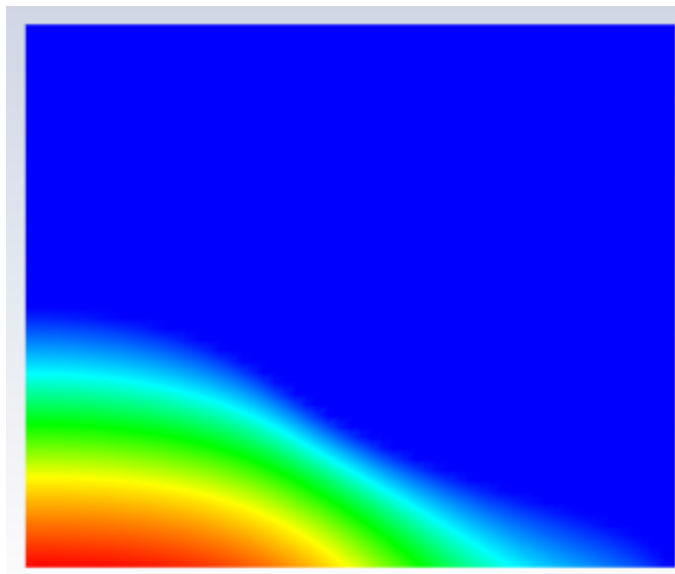


Figura 23 – Contorno de pressão na iteração 80

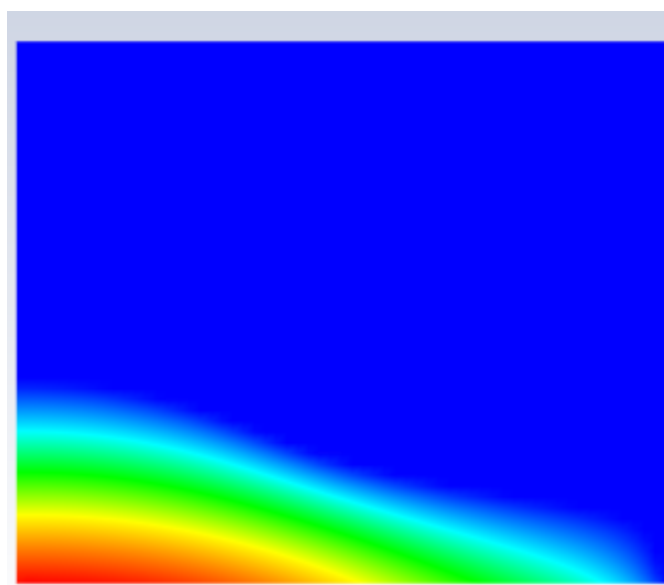


Figura 24 – Contorno de pressão na iteração 100

5.3 Velocidade

Os vetores de velocidade indicam a magnitude da velocidade alcançada em cada momento do escoamento do fluido. Na Figura 25 é apresentado os momentos iniciais do rompimento, o escoamento ainda não se desenvolveu, mas já é perceptível o aumento da velocidade na base da figura.

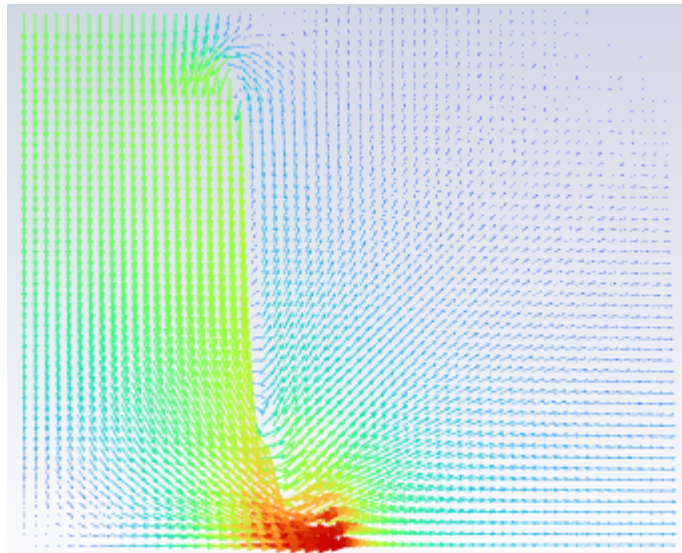


Figura 25 – Vetores de velocidade na iteração 20

Na iteração 50, Figura 26, o escoamento já começa a se desenvolver e o fluido ganha velocidade ao longo do seu volume de forma rápida.

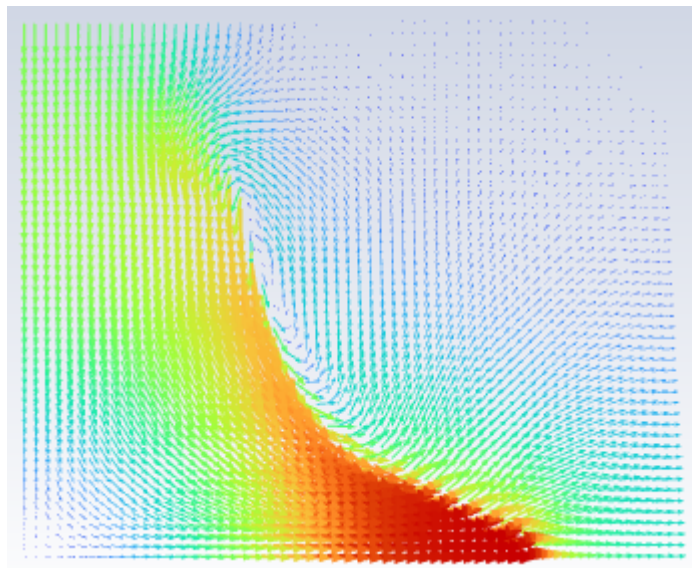


Figura 26 – Vetores de velocidade na iteração 50

Nas Figuras 27 e 28, o escoamento já está desenvolvido e o fluido já atinge sua velocidade máxima de modo que todo o volume que estava contido está escoando à altas velocidades e em grandes volumes.

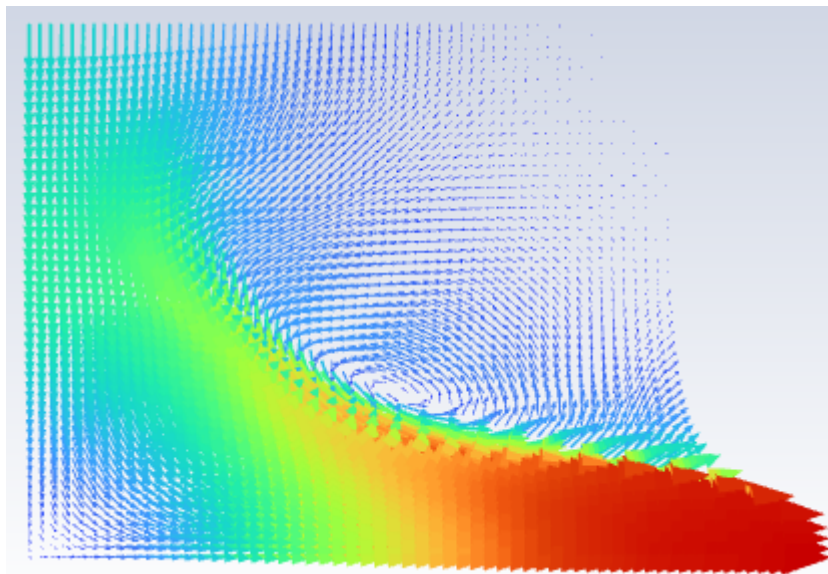


Figura 27 – Vetores de velocidade na iteração 80

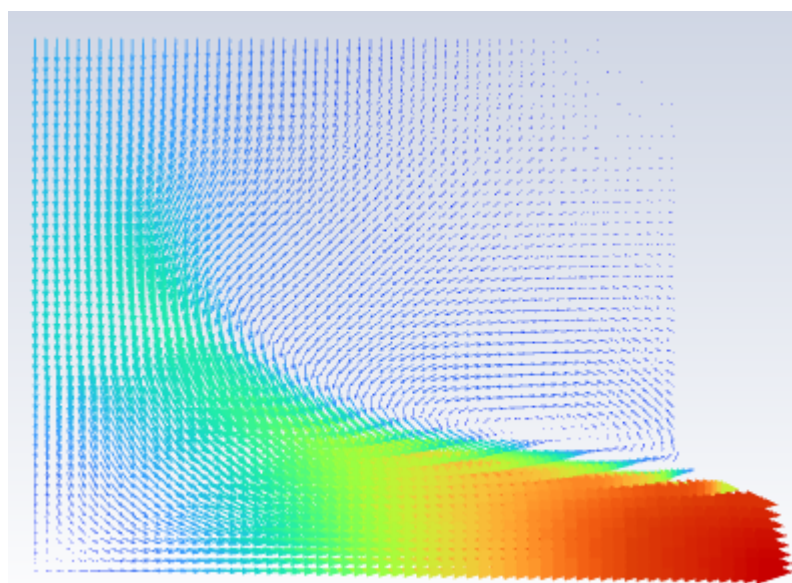


Figura 28 – Vetores de velocidade na iteração 100

5.4 Resultados numéricos

Com base na simulação realizada foram obtidos gráficos de pressão e velocidade no interior da barragem variando no tempo, ou seja, passando por todo o evento do rompimento da barragem, desde quando ela estava íntegra até após o rompimento. Com relação a imediata saída da barragem é vista a variação de pressão antes e depois do rompimento.

5.4.1 No interior da barragem

Para a variação da pressão no tempo, Figura 29, no instante anterior ao rompimento da barragem ela permanece em um valor constante nulo, de modo a indicar a estabilidade da barragem.

A partir de 0,35 segundos, há o aumento da pressão de modo a indicar o evento do rompimento. Entre os instantes 0,35 e 0,7 segundos a pressão aumenta até atingir 13,5 kPa, que é o seu valor máximo atingido dentro da barragem. Nesse intervalo de tempo a integridade da barragem vai se deteriorando até o momento em que a estrutura já não é mais capaz de suportar a pressão e acontece o evento do rompimento.

Após o pico há o decréscimo do valor da pressão, que vai tender a 0, com o escoamento do fluido que estava contido na barragem após o rompimento.

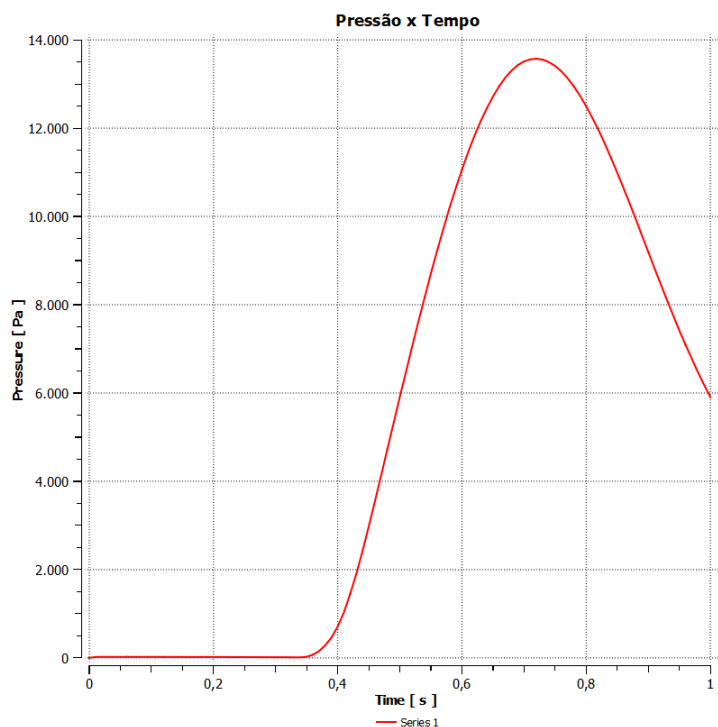


Figura 29 – Variação de pressão com relação ao tempo

Na variação da velocidade o cenário é diferente, Figura 30, a velocidade ela começa a aumentar antes mesmo do rompimento, devido ao *piping*, que faz com que o fluido esteja em movimento com uma velocidade associada mesmo quando a barragem esteja íntegra. Isso vai acontecendo entre os instantes 0 e 0,3 segundos, onde a velocidade do fluido dentro da barragem chega perto de 2 m/s.

Entre os instantes 0,3 e 0,6 a velocidade vai aumentando até atingir seu pico, aproximadamente 5,4 m/s. O pico da velocidade acontece antes do pico da pressão. A Equação 2.10 relaciona a pressão e a velocidade do fluido dentro da barragem. A pressão aumenta por mais tempo devido a presença das forças hidrostáticas presentes por causa da coluna de fluido, como mostrado na Equação 2.6.

A velocidade começa a decair após atingir seu pico, porém o seu valor vai diminuindo mais lentamente quando comparado a pressão, já que o fluido vai continuar em movimento por um longo período, até que todo fluido que estivesse contido fosse escoado.

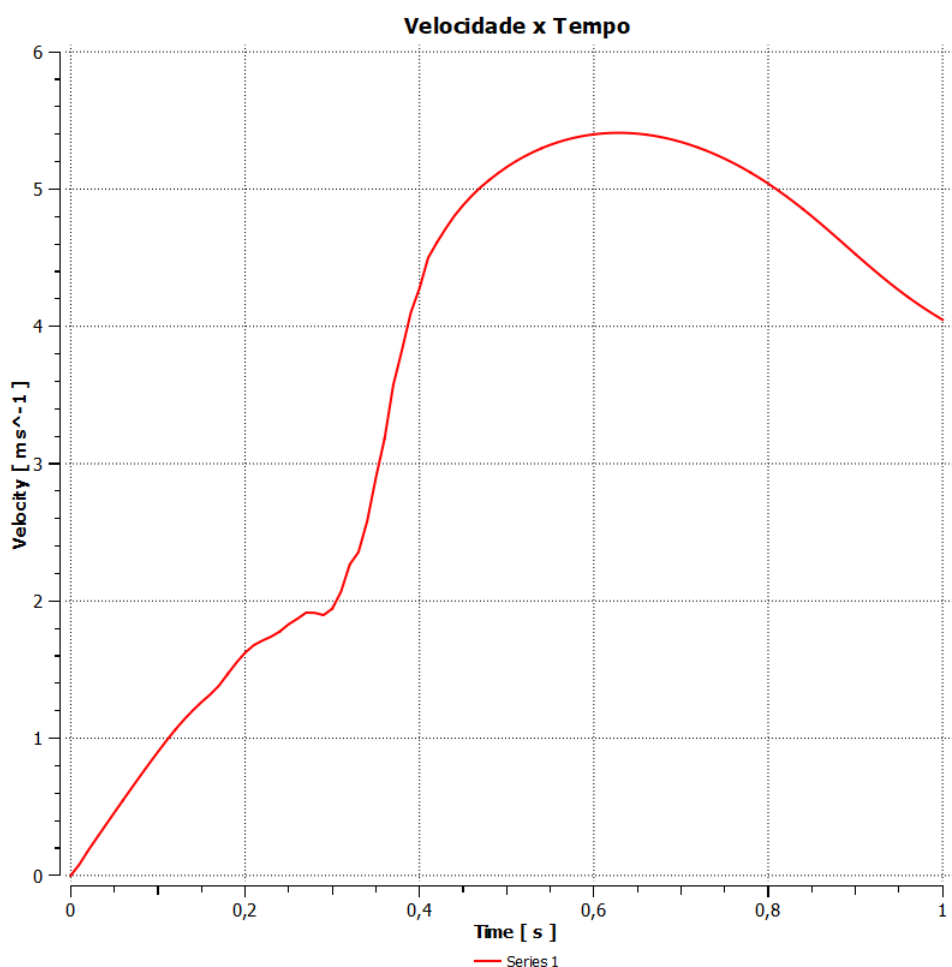


Figura 30 – Variação da velocidade com relação ao tempo

5.4.2 Na imediata saída da barragem

Logo à jusante da barragem, Figura 31 foi medida a pressão exercida pela barragem no ambiente, no instante inicial do gráfico, a pressão não é 0, porque mesmo a barragem íntegra há uma pressão natural exercida pela estrutura, que é por volta de 5 kPa.

Entre os instantes 0 e 0,65 segundos, a pressão aumenta em 20 kPa. O instante do pico da pressão a jusante da barragem coincide com o pico da pressão dentro da barragem, o que era esperado, já que a condição de equilíbrio era dentro e fora da barragem o que marcava a estabilidade, quando quebra ambos os ambientes vão sofrer as consequências do rompimento.

Após o evento do rompimento a pressão tende a diminuir, a medida que o escoamento desenvolve e a pressão do fluido que estava contido começa a se dissipar.

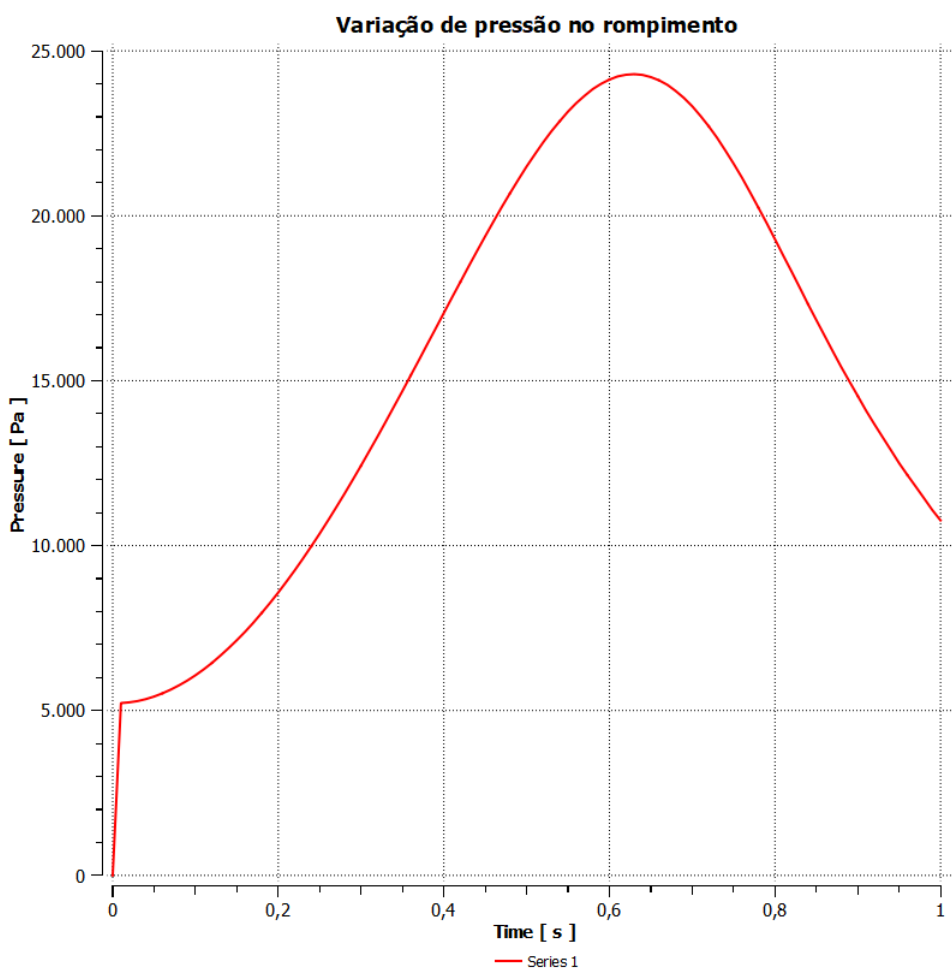


Figura 31 – Variação de pressão a jusante da barragem.

Com base nos resultados obtidos por meio da simulação realizada para os parâmetros de pressão e velocidade, é observado que há um aumento abrupto em seus valores, tanto dentro da barragem quanto na imediata saída da estrutura. Tais aumentos indicam o escoamento do

fluido, que possui uma força com alta intensidade associada, que foi descrita pela Equação 2.11. Ela é a principal responsável pelas efeitos destrutivos oriundos do escoamento do fluido que estava contido na barragem após o seu rompimento. Dada a magnitude da força não é possível adotar medidas de mitigação ou controle, uma vez que o evento foi iniciado, mas sim planos de prevenção. A seguir são apresentados as normativas e práticas associadas a evitar rompimentos e a ocorrência de escoamentos desta natureza.

5.5 Gestão ambiental de barragens de mineração

Se faz necessária a discussão de dois tópicos dentro da gestão ambiental das barragens de mineração: A Evolução da Legislação e as modificações nos instrumentos utilizados para a gestão de barragens.

A principal lei que rege as barragens, sejam elas de mineração ou de acúmulo de água para qualquer fim, é a Lei 12.334/2010. Ela foi elaborada antes dos dois maiores desastres de barragens de rejeitos de mineração, Mariana e Brumadinho, por isso ela foi editada pela Lei 14.066/2020. As principais alterações vieram nos seus fundamentos no sentido de proteger a população e das responsabilidades legais dos empreendedores; a elaboração obrigatória do Plano de Ações Emergenciais para todas as barragens que tem como objetivo o acúmulo de rejeitos de mineração; as competências tanto para o empreendedor quanto para os órgãos fiscalizadores sofreram também alterações, após os desastres.

Outras duas alterações importantes vieram por meio de Resoluções da ANM: a n° 4/2019 e a n° 95/2022. Na resolução n° 4/2019, após os desastres e ser provado a instabilidade associado ao método de elevação a montante, este ficou proibido para novos empreendimentos e quanto aos que tivessem esse método já estabelecidos antes as barragens devem ser descomissionadas e descaracterizadas, o que tinha um prazo máximo de Agosto de 2021. Segundo os dados obtidos via SIGBM, existem 66 barragens cadastradas como método a montante ou desconhecido, Figura 32, dentre as quais 43 estão localizadas no estado de Minas Gerais. A partir dos dados apresentados na Figura 32 não é possível afirmar que todas as barragens a montante estão ativas, tendo em vista que a legislação obriga as barragens mesmo que desativadas estejam cadastradas no SIGBM. (ANM, 2022)

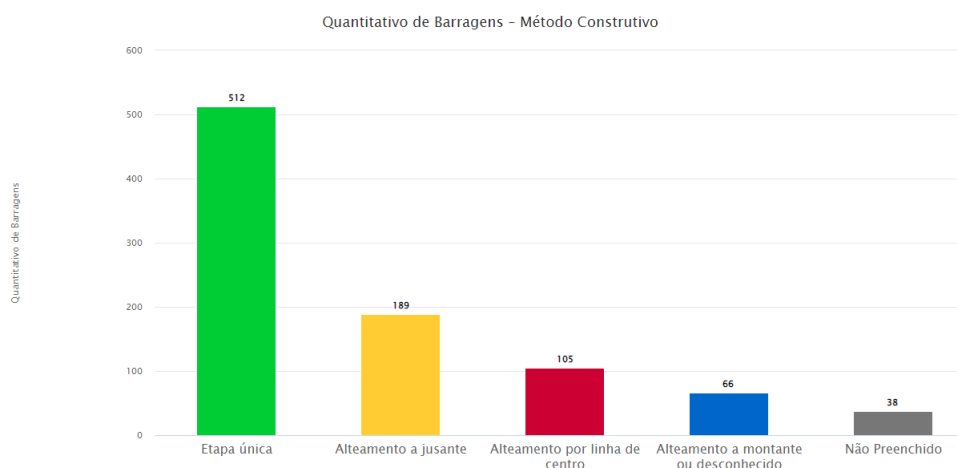


Figura 32 – Classificação das barragens cadastradas no SIGBM segundo o método de construção.

ANM,2022

A Resolução da ANM nº 95/2022 veio no sentido de consolidar os atos normativos que falavam sobre segurança de barragens. A principal modificação com relação a Lei 12.334/2012, veio no instrumento do Plano de Ações Emergenciais, onde foi dedicado o Capítulo VI, para dispor do tema, complementando e ampliando os detalhes do documento que havia sido exposto no Capítulo IV da Lei 12.334/2010. O Anexo II Volume 5 da resolução é dedicado ao tema, onde são apresentados 20 tópicos que devem ser abordados no documento, que vão desde a identificação do empreendimento até as ações que devem ser tomadas de acordo com o nível de classificação das situações de alerta.

As inspeções sejam elas regulares ou extraordinárias, eram apresentadas na Lei 12.334/2010, porém não havia um documento padronizando o que deveria ser avaliado. Na Resolução ANM nº 95/2022, em seu terceiro anexo, fornece quadros que devem ser preenchidos quando há a realização das inspeções por parte do empreendedor.

Nos desastres de Brumadinho e Mariana, os quais tiveram suas causas relacionadas a liquefação e a defeitos no sistema de drenagem, os resultados numéricos obtidos para a velocidade dentro da barragem mostram que o escoamento do fluido dentro da barragem por causa da liquefação e do efeito *piping*, acarretam no aumento da pressão o que causa a instabilidade na barragem e seu posterior rompimento, como apresentado nas Figuras 29 e 30. Dessa forma o rompimento de barragens de mineração não é imediato, ele vai se desenvolvendo ao longo do tempo, o que apresenta sinais como a liquefação de camadas do alteamento que antes estavam secas, os quais devem ser identificados por meio das inspeções e dos documentos submetidos aos órgãos competentes.

6 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo a descrição física do rompimento de barragens por meio de simulações e descrição matemática e o levantamento de leis e órgãos responsáveis pertinentes a gestão ambiental de barragens de mineração. Nessa análise são avaliados três parâmetros importantes: pressão, volume de controle e velocidade. Os objetivos propostos foram alcançados de modo a obter imagens sobre os parâmetros com as considerações feitas, onde foi possível observar a dinâmica do rompimento da barragem. No quesito ambiental os objetivos também foram alcançados, foram levantadas as leis pertinentes, os órgãos responsáveis e os documentos relevantes e obrigatórios a gestão das barragens.

Os resultados obtidos mostram que com a atuação das forças hidrostática e a decorrente do gradiente de pressão associada ao efeito *piping* há o aumento da pressão na barreira de contenção de rejeitos, o que provoca o rompimento, e com o decorrer do tempo há o aumento da velocidade do fluido, a diminuição da pressão e a dispersão do volume de fluídos. Os gráficos obtidos mostraram que o pico da velocidade é antes do pico da pressão no interior da barragem, isso acontece porque a pressão que existe dentro da barragem não acontece somente pela velocidade do fluido. A jusante da barragem, a pressão vai atingir o pico no mesmo momento que no interior da barragem, apresentando um comportamento similar.

No quesito da legislação que rege as barragens de mineração, foi observada uma evolução no sentido da proteção da população e das obrigações dos empreendedores, isso aconteceu por meio da alteração da Lei 12.334/2010 pela lei 14.066/2020 e pelas resoluções ANM n° 4/2019 e a resolução n° 95/2022. Essas modificações se deram depois dos desastres de Brumadinho e Mariana, que mostraram as falhas na legislação e nos instrumentos existentes, o que forçou as modificações feitas.

Dessa forma, com os gráficos obtidos e os desastres de Brumadinho e Mariana, dadas as suas causas associadas ao escoamento do fluido dentro da barragem, foi observado que o evento do rompimento de uma barragem de mineração não é instantâneo, ele vai se dando ao longo de um período de tempo, apresentando sinais antes do evento acontecer. Sendo assim, a RSB e a DCE, com o auxílio das inspeções realizadas pelo empreendedor, devem ser capazes de detectar os primeiros sinais de problemas que comprometam a integridade da barragem, devendo relatar o observado aos órgãos competentes por meio da submissão dos relatórios, os quais devem tomar as medidas cabíveis, sejam elas as advertências ou multas podendo chegar até mesmo ao embargo do empreendimento para garantir a segurança dos funcionários e da população que pode ser afetada em caso de um desastre.

Referências

ANA. *Painel de informações do SNISB*. 2021. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiYjk1NjE3ZjQtNmIzNi00YzIxLWE5Y2UtMTZlZDM4ZDc0MTJlIiwidCI6ImUwYmI0MDEyLTgxMGItNDY5YS04YjRkLTY2N2ZjZDFiYWY4OCJ9%20>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 14.

ANM. *Relatório quantitativo*. 2022. Disponível em: <<https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica>>. Citado na página 52.

ANSYS. *Discretization of the Momentum Equation*. 2009. Disponível em: <<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node371.htm#sec-solve-pinterp-theory>>. Citado na página 31.

ANSYS. *Including Body Forces*. 2009. Disponível em: <<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node725.htm>>. Citado na página 29.

ANSYS. *Open Channel Flow*. 2009. Disponível em: <<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node306.htm>>. Citado na página 25.

ANSYS. *Overview and Limitations of the VOF Model*. 2009. Disponível em: <<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node298.htm>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

ANSYS. *Pressure-Velocity Coupling*. 2009. Disponível em: <<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node373.htm>>. Citado na página 31.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm>. Citado 7 vezes nas páginas 13, 33, 34, 37, 38, 39 e 41.

BRASIL. Resolução no 143, de 10 de julho de 2012. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2012. Disponível em: <<https://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes/1922-resolucao-n-143-de-10-de-julho-de-2012/file>>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 34.

BRASIL. Lei nº 13.575, de 26 de dezembro de 2017. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2017. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13575.htm>. Citado na página 36.

BRASIL. Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2017. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/20222904/do1-2017-05-19-portaria-n-70-389-de-17-de-maio-de-2017-20222835>. Citado na página 41.

BRASIL. Resolução nº 4, de 15 de fevereiro de 2019. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2019. Disponível em:

https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/63799094/do1-2019-02-18-resolucao-n-4-de-15-de-fevereiro-de-2019-63799056. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 34.

BRASIL. Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-95-de-7-de-fevereiro-de-2022-380760962>. Citado 3 vezes nas páginas 35, 39 e 40.

BRUMADINHO, C. P. D. I. R. D. B. D. *Relatório final da CPI*. Brasil, 2019. Citado na página 20.

CARNEIRO, G. S. G. *Estudo das causas, impactos e medidas corretivas do rompimento de uma barragem de rejeitos, usando o caso da barragem de Mariana – MG*. Monografia (Bacharel em engenharia civil) — Universidade Federal da Uberlândia, 2018. Citado na página 19.

EVANGELISTA, T. M. dos S.; SANTOS, I. C. de P. Segurança de barragens: Uma revisão sistemática acerca das possíveis causas de rupturas em barragens e suas consequências. Citado na página 20.

G1. *Rompimento de barragem da Samarco, em Mariana, completa um mês*. 2016. Disponível em: <http://especiais.g1.globo.com/minas-gerais/2015/desastre-ambiental-em-mariana/1-mes-em-numeros/>. Citado na página 19.

MINERAÇÃO, A. N. de. Report mensal barragens de mineração. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

OLIVEIRA, C. P. et al. Comparação dos métodos vof e fe/cv aplicados a solução de problemas de rtm. *Vetor*, v. 21, p. 22–33, 2011. Citado na página 24.

PEREIRA, L. F.; CRUZ, G. de B.; GUIMARÃES, R. M. F. Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de brumadinho, brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 04, p. 122–129, 2019. Citado na página 20.

SILVA, I. M. Análise da atuação do estado na fiscalização das barragens de mineração: O caso samarco. *Revista de Iniciação Científica e Extensão da Faculdade de Direito de Franca*, v. 4, n. 1, p. 439–458, 2019. Citado na página 36.

SOUZA, T. C. de. *Metodologia de avaliação de liquefação em barragens de rejeito: uma abordagem probabilística*. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte, 2018. Citado na página 19.

VALE. *O que são barragens?* 2020. Disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Documents/PT/entenda-as-barragens-da-vale-pt.html. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 22.

VALE. *Brumadinho*. 2021. Disponível em: <http://www.vale.com/esg/pt/Paginas/Brumadinho.aspx>. Citado na página 20.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações*. [S.l.]: AMGH, 2015. ISBN 978-85-805-5490-8. Citado na página [21](#).