



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA EXTRAVASOR DE EMERGÊNCIA EM
BARRAGENS DE REJEITOS DA MINERAÇÃO

LUCAS DOS SANTOS OVANDO

BELO HORIZONTE

2019

LUCAS DOS SANTOS OVANDO

DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA EXTRAVASOR DE EMERGÊNCIA EM
BARRAGENS DE REJEITOS DA MINERAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Orientadora: Prof^a. Dra. Luciana Peixoto Amaral

Co-Orientador: Eng. Especialista Luciano Junqueira de Melo

BELO HORIZONTE

2019

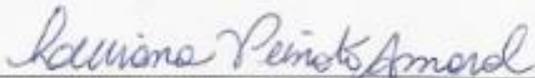
LUCAS DOS SANTOS OVANDO

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA EXTRAVASOR DE EMERGÊNCIA EM
BARRAGENS DE REJEITOS DA MINERAÇÃO**

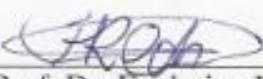
Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Data de aprovação: 06/06/2019

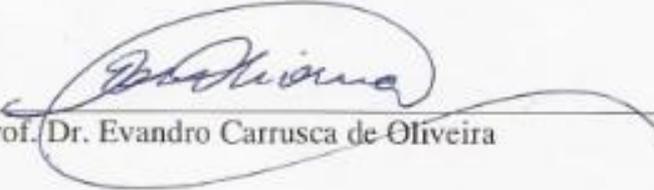
Banca examinadora:



Profa. Orientadora – Dra. Luciana Peixoto Amaral



Prof. Dr. Frederico Keizo Odan



Prof. Dr. Evandro Carrusca de Oliveira

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre iluminar o meu caminho e me fazer mais forte que qualquer dificuldade.

Aos meus pais, Maria Edilene dos Santos e Rubens Riveiros Ovando Júnior e à minha irmã Ingrid dos Santos Dantas, por me darem todo apoio e incentivo em todos os momentos, decisões e contratempos da minha vida, por toda paciência comigo todos os dias, sem vocês nada disso seria possível.

Aos meus orientadores, Professora Luciana Peixoto Amaral e Luciano Junqueira de Melo, que acreditaram no meu potencial e me auxiliaram em todo processo de construção desse trabalho, dando conselhos e direções para a realização do mesmo, sempre bem dispostos e disponíveis para ajudar no que fosse preciso.

Aos meus amigos que nunca me deixaram de lado e sempre me apoiaram mesmo nos momentos em que não fui tão presente.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, que tenho a honra de ter estudado e convivido com profissionais capacitados que contribuíram para minha formação acadêmica.

RESUMO

OVANDO, Lucas dos Santos. *Dimensionamento de sistema extravasor de emergência em barragens de rejeitos da mineração*. 2019. 87 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

O crescente desenvolvimento econômico mundial demanda cada vez mais bens minerais. A mineração é responsável por quase 5% do produto interno bruto brasileiro (PIB), e oferece produtos que englobam todos os tipos de necessidades e atividades. Juntamente à produção de minério, tem-se a geração de um volume relevante de rejeito, proveniente dos processos de beneficiamento do minério, o qual se torna uma problemática quando se trata do seu armazenamento. Os rejeitos são armazenados, em geral, em estruturas de depósito e contenção, sendo mais comum as barragens de rejeito. As técnicas de beneficiamento de minério, em sua maioria, envolvem a adição de água e, desta forma, o rejeito é gerado em forma de polpa que é armazenada nos reservatórios de armazenamento e contenção de rejeitos. Sendo assim, observa-se que o manejo de rejeitos da mineração envolve diretamente o manejo de água. O comportamento do nível d'água em um reservatório dessa natureza é de extrema importância para que se possa garantir a segurança das barragens. Neste contexto, os sistemas extravasores são responsáveis pela retirada da água acumulada nestes reservatórios, sendo o vertedor, um dos principais componentes destes sistemas, e tem a função de conduzir a água excedente de forma segura para fora da barragem. O presente estudo visa o dimensionamento de um vertedor, retangular de parede espessa, para uma barragem de rejeitos hipotética, por meio de simulações hidrológicas, utilizando o software Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). Como dados de entrada, foram utilizadas características da barragem (área de drenagem, tipo de solo), tempo de retardo, distribuição temporal das chuvas, curvas cota x área x volume do reservatório e curvas de descarga do vertedor. Com o uso do HEC-HMS, foram obtidos hidrogramas de entrada e de saída, para um período de retorno de 10.000 anos, para diferentes larguras do vertedor e, através das análises das vazões efluentes, definiu-se o vertedor com largura de 2 metros como o mais tecnicamente viável.

Palavras-Chave: Mineração. Barragem de rejeito. Vertedor. Rejeito.

ABSTRACT

OVANDO, Lucas dos Santos. Dimensioning of extravasor emergency system in mining tailings dams. 2019. 87 s. Monography (Graduate) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center for Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

The increasing global economic development demands more and more mineral goods. Mining accounts for almost 5% of Brazil's gross domestic product (GDP), and offers products that encompass all types of needs and activities. The ore production generates a relevant volume of tailings from the beneficiation processes, which becomes problematic when it comes to the tailing storage. Rejects are generally stored in retention and containment structures, with reject dams being more common. Most ore beneficiation techniques involve the addition of water, and thus the waste is generated in the form of pulp that is accumulated in the storage and retention reservoirs. Thus, it is observed that the management of tailings from mining directly involves water management. The behavior of the water level in a reservoir of this nature is of extreme importance in order to guarantee the maintenance of the safety of the dams. The extravasation systems are responsible for withdrawing the water accumulated in these reservoirs, in which the spillway is a component of these systems and has the function of conducting excess water safely out of the dam. The present study aims at the design of a spillway for a hypothetical tailings dam using Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) in a hypothetical basin. For the design, we used data that compose the water balance as: precipitation, infiltration and the development of hydrograms. The data were entered into the program, indicating the volume flowed by the precipitation event with return period of 10,000 years. The method produced the temporal distribution of the precipitation for different periods and, using the software, simulations were made for different widths of the spout and, through the hydraulic analysis, the spout with a width of 2 meters was defined as the most advantageous.

Keywords: Mining. Dam. Spillway. Tailings.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA – Agência Nacional de Águas
ANM – Agência Nacional de Mineração
AP – Amapá
CAN – Canadá
CHN – China
CN – *Curve Number*
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental
CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais
DN – Deliberação Normativa
ESP – Espanha
EUA – Estados Unidos da América
FRA – França
FIL - Filipinas
HEC – *Hydrology Engineering Center*
HMS – *Hydrology Modeling System*
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração
IDF – Intensidade-Duração-Frequência
ITA – Itália
LA – Licenciamento Ambiental
MG – Minas Gerais
NBR – Norma Brasileira
PB – Paraíba
PI – Piauí
PIB – Produto Interno Bruto
PMB – Produto Mineral Brasileiro
PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragem
RAS – *River Analysis System*
RO – Roraima

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SINIMA – Sistema Nacional de Informações Sobre o Meio Ambiente

SISNAMA – Sistema Nacional de Meio Ambiente

SMM – Secretaria de Minas e Metalurgia

SNISB – Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragem

TR – Tempo de Recorrência

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Barragem Com Alçamento De Etapa Única.....	23
Figura 2 – Alçamento a Montante.....	24
Figura 3 - Alçamento a Jusante.....	25
Figura 4 - Alçamento por Linha de Centro.	26
Figura 5 - Extravasor tipo tulipa interligada à galeria de fundo.	33
Figura 6 - Extravasor tipo galeria de encosta interligado à galeria de fundo.	34
Figura 7 - Vertedor de superfície.	35
Figura 8 - Hidrograma tipo.....	36
Figura 9 - Hietograma definido pelo método de Chicago.....	38
Figura 10 – Relação dos Percentuais Acumulados de Precipitação com o Percentual Acumulado do Tempo para o 1º quartil.	39
Figura 11 – Delimitação da Área de Contribuição da Barragem de Rejeito em Estudo.	46
Figura 12 - Representação da área de estudo no programa HEC-HMS. ...	48
Figura 13 - Curvas Cota x Área x Volume (barragem hipotética).....	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Histórico de Ocorrências de Rompimento de Barragens.....	28
Quadro 2 - Exemplo de Valores de Coeficiente de Runoff	40
Quadro 3 - Valores de CN.....	42
Quadro 4 - Características da Barragem Hipotética.	44
Quadro 5 - Parâmetros Obtidos e Estimados para a Barragem Hipotética	47
Quadro 6 - Chuva de Projeto Utilizada no Estudo (Tr = 10.000 anos)	47
Quadro 7 - Métodos Utilizados nas Simulações	48
Quadro 8 - Distribuição Temporal das Chuvas (mm).....	49
Quadro 9 - Curvas cota x área x volume.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Curvas de Descarga do Vertedor	52
Tabela 2 - Resultados da Simulação para a Largura de 2 metros	52
Tabela 3 - Resultados da Simulação para a Largura de 3 metros	53
Tabela 4 - Resultados da Simulação para a Largura de 4 metros	53
Tabela 5 - Valores da borda livre e do volume amortecido	54

SUMÁRIO

1.	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	14
2.	MOTIVAÇÃO	16
3.	OBJETIVOS	17
3.1.	Objetivo geral.....	17
3.2.	Objetivos específicos.....	17
4.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
4.1.	A Mineração: Histórico, Influência na Economia e Meio Ambiente ...	18
<u>4.1.1.</u>	<u>Histórico</u>	<u>18</u>
<u>4.1.2.</u>	<u>A Mineração e a Economia</u>	<u>19</u>
<u>4.1.3.</u>	<u>A Mineração e o Meio Ambiente.....</u>	<u>20</u>
4.2.	Função e Importância das Barragens de Contenção de Rejeito na Mineração	21
<u>4.2.1.</u>	<u>Construção em Etapa Única</u>	<u>22</u>
<u>4.2.2.</u>	<u>Métodos de Alçamento.....</u>	<u>23</u>
<u>4.2.2.1.</u>	<u>Método de Montante</u>	<u>23</u>
<u>4.2.2.2.</u>	<u>Método de Jusante</u>	<u>25</u>
<u>4.2.2.3.</u>	<u>Método de Linha de Centro</u>	<u>26</u>
4.3.	Procedimentos de Segurança de Uma Barragem de Rejeito	26
<u>4.3.1.</u>	<u>Rompimentos de Barragens no Brasil e no Mundo.....</u>	<u>27</u>
4.4.	Aspecto Legais das Atividades de Mineração	28
<u>4.4.1.</u>	<u>Licenciamento Ambiental</u>	<u>29</u>
<u>4.4.2.</u>	<u>Legislação Federal Para Segurança de Barragens.....</u>	<u>30</u>
<u>4.4.3.</u>	<u>Legislação Estadual de Barragens.....</u>	<u>31</u>
4.5.	Sistemas Extravadores de Barragens de Rejeitos	32
<u>4.5.1.</u>	<u>Tulipa</u>	<u>33</u>
<u>4.5.2.</u>	<u>Galeria de Encosta.....</u>	<u>34</u>

4.5.3. Vertedor de Superfície.....	34
4.6. Estudo Hidrológico em Obras de Mineração	35
<u>4.6.1. Hidrograma</u>	<u>35</u>
4.6.1.1. <i>Tempo de concentração.....</i>	36
4.6.1.2. <i>Tempo de retardo (lag time)</i>	37
<u>4.6.2. Precipitação</u>	<u>37</u>
4.6.2.1. <i>Distribuição Temporal das precipitações (Hietograma de Projeto) 38</i>	
<u>4.6.3. Modelos hidrológicos.....</u>	<u>39</u>
4.6.3.1. <i>Método Racional</i>	40
4.6.3.2. <i>Método SCS</i>	41
<u>4.6.4. Modelos Hidrológicos</u>	<u>42</u>
4.6.4.1. <i>HEC-HMS</i>	43
5. METODOLOGIA.....	44
5.1. Área de estudo: caracterização da barragem de rejeito	44
5.2. Estudo Hidrológico	44
5.3. Simulações e Dimensionamento do Vertedor.....	48
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
6.1. Estudos Hidrológicos	49
<u>6.1.1. Distribuição temporal das chuvas: Método de Huff (50% do 2o quartil)</u>	<u>49</u>
6.2. Curvas cota x área x volume do reservatório	50
6.3. Curva de descarga do vertedor.....	51
6.4. Simulações e dimensionamento do vertedor	52
7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE FUTUROS TRABALHOS.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXO I – BARRAGEM DE REJEITO HIPOTÉTICA	61

ANEXO II – DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DAS CHUVAS DO PROJETO (mm)

62

1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Atualmente, o crescente desenvolvimento econômico e tecnológico mundial acarreta uma demanda progressiva por bens minerais. Segundo Wagner *et al.* (2002), o setor mineral, em 2000, representou 8,5% do PIB, ou seja, US\$ 50,5 bilhões de dólares, gerou 500.000 empregos diretos e um saldo na balança comercial de US\$ 7,7 bilhões de dólares, além de ter tido um crescimento médio anual de 8,2% no período 1995/2000. A mineração é a atividade econômica capaz de oferecer produtos que são amplamente utilizados em indústrias bem diversificadas, tais como metalúrgicas, fertilizantes, siderúrgicas e, principalmente, as petroquímicas.

Atrelado à produção mineral está a geração de um volume relevante de massa do minério que é rejeitada nos processos de beneficiamento de minérios. A disposição desse rejeito, atualmente, constitui um contratempo para a indústria mineral.

Historicamente, as mineradoras têm seu foco de investimento na linha de extração e beneficiamento do minério, pois daí se origina o produto gerador de lucro, tratando rejeitos e estéril de forma secundária. Devido a isso, as antigas construções de estruturas de depósito e contenção eram feitas sem projetos de engenharia e, muitas das vezes, utilizando o próprio rejeito no seu alteamento, sem a realização de estudos prévios. Com isso, ocorreu uma série de acidentes e rupturas. Segundo Bowker e Chambers (2015), nota-se o crescimento da ocorrência de rompimentos de barragens graves e muito graves, identificando mais de 30 rompimentos após a década de 1990 no mundo. Em Minas Gerais, podem ser citados alguns exemplos recentes como o rompimento de uma das barragens de rejeito de minério de ferro da Mineração Herculano, em setembro de 2014, no município de Itabirito, a tragédia da barragem de Fundão, em novembro de 2015, no município de Mariana, e, mais recentemente, o desastre de Brumadinho, que resultou em uma quantidade significativa de vítimas e impactos socioambientais irreversíveis.

A maioria dos processos de beneficiamento envolve a adição de água e, por esse fato, comumente os rejeitos são encontrados na forma de polpa. Estas polpas, na maioria das vezes, são dispostas em reservatórios especialmente concebidos para

a acumulação desses materiais (OLIVEIRA, 2010). Dessa forma, fica evidente que o manejo do rejeito envolve, na maioria dos casos, um grande manejo de águas.

O comportamento do nível d'água, bem como sua avaliação e monitoramento, é um parâmetro indispensável para a segurança estrutural de uma barragem de contenção de rejeitos. As águas chegam ao reservatório por meio de precipitações diretas, contribuição da bacia local e, até mesmo, juntamente ao rejeito vindo do processo. Parte desse volume total que chega percola através da própria barragem ou suas fundações, outra parte é perdida por evaporação e o restante fica acumulado no reservatório. O foco do monitoramento está nesse volume que se acumula no reservatório; situação que pode oferecer riscos à estrutura, pois o acúmulo de água pode ativar o rejeito conformado, fazendo-o voltar ao estado pastoso e, com isso, possibilitar a liquefação. Outro risco associado ao acúmulo de água é a erosão no maciço da barragem, causada geralmente por erosão interna ou galgamento¹, neste último caso, transbordamento da água excedente por cima da crista da barragem, erodindo o maciço.

Para a retirada dessas águas acumuladas utiliza-se um sistema extravasor, considerado um dos principais elementos de segurança da barragem, e o sistema responsável por evitar galgamentos. O vertedor, um dos componentes do sistema extravasor, é uma estrutura de proteção de barragem com a função de conduzir a água excedente de forma segura. Vertedores mal concebidos ou de insuficiente capacidade volumétrica podem levar a falhas de barragens (CARVALHO, 2016). Neste trabalho, serão expostas e avaliadas as etapas e critérios do dimensionamento do vertedor de um sistema extravasor de barragem de rejeito.

¹ Galgamento é a transposição de uma estrutura por uma massa d'água, no caso de barragens de rejeito, seria o transbordamento da água do reservatório pela crista da barragem (CARVALHO, 2016).

2. MOTIVAÇÃO

O correto dimensionamento do sistema extravasor se faz extremamente importante visto que ele é um dos elementos de segurança indispensáveis em uma barragem. Garantir que o excesso de água extravase do reservatório de maneira segura e com técnicas apropriadas, garante segurança estrutural ao longo da vida útil de uma barragem de contenção de rejeitos, uma vez que a água em excesso pode se misturar com o rejeito conformado, fazendo-o chegar a condição de saturação retornar ao estado inicial de polpa e, com isso, comprometer a estabilidade das barragens projetadas e construídas pelo método de alteamento à montante e de linhas de centro. Tal fenômeno citado pode ser uma das causas liquefação dos rejeitos e é um dos motivos de rompimento de barragens, como ocorrido na barragem de Fundão, em Mariana-MG, em 5 de novembro de 2015, atingindo cerca de 1200 pessoas e deixando 19 mortos, bem como causando impactos ambientais significativos.

Na maioria dos casos, utilizam-se vertedores laterais de soleira livre pois estes são mais seguros em relação às obras e à operação, por não ter contato direto com a crista da barragem, bem como por não ser subterrâneo, facilitando também a manutenção e a observação de anomalias, além da simplicidade de operação, não exigindo instrumentação.

As barragens de contenção de rejeitos podem ser vistas como uma das maiores e mais visíveis estruturas resultantes da atividade da mineração e como um dos maiores legados das obras de engenharia; prevê-se que sejam estruturas estáveis em longo prazo e integradas ao meio ambiente após a sua desativação (DITR, 2007).

Desta forma, se faz necessário o gerenciamento da segurança das barragens para minimizar os riscos associados a essas estruturas. Segundo Oliveira (2010), o gerenciamento da segurança das barragens de rejeitos representa uma filosofia que deve ser aplicada a todas as etapas do ciclo de vida útil desse tipo de barragens. Como ferramenta de fiscalização, aplica-se a Política Nacional de Segurança de Barragens, instituída pela Lei Federal nº 12.334, de setembro de 2010.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é dimensionar o vertedor de uma barragem de contenção de rejeito de atividade mineradora, por meio de simulações hidrológicas, utilizando o software HEC-HMS.

3.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos, têm-se:

- Levantar os tipos e o princípio de funcionamento de vertedores mais utilizados nas barragens de rejeitos da atividade mineradora;
- Identificar as variáveis envolvidas no dimensionamento de um vertedor em uma barragem de rejeito; e
- Aplicar estas variáveis no projeto de dimensionamento do dispositivo.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. A Mineração: Histórico, Influência na Economia e Meio Ambiente

4.1.1. Histórico

A mineração no Brasil teve início nos primórdios da sua colonização, no qual eram retiradas pequenas massas de minério, visto que a demanda naquela época era muito pequena. Argilas, areia e cascalhos constituíam a principal demanda, uma vez que eram os principais materiais de construção.

Segundo Germany (2002), era bastante tímido o desenvolvimento tecnológico que ocorria na extração das rochas para os trabalhos de cantaria, a fim de atender aos artífices trazidos pelos colonizadores. Os diversos materiais de construção eram principalmente retirados dos aluviões e, quando de afloramentos rochosos, eram cuidadosamente desagregados com cunhas, acompanhando-se as clivagens e amarrados ou cortados com ponteiros e marretas e, quando necessário, perfurados e detonados com pólvoras caseiras. Ainda se encontram, hoje em dia, em Diamantina, Ouro Preto e outras cidades históricas, construções e calçamentos com lajes de rocha retiradas de pedreiras desta maneira.

Além dos já mencionados, o principal mineral explorado no Brasil a partir da colonização foi o ouro.

A descoberta de ouro no Brasil, de algum ouro, deu-se em 1560 (Brás Cubas), tendo sido encontrada em 1590 a primeira jazida de “ouro de lavagem” (Afonso Sardinha) e encontrados novos depósitos deste tipo em 1598, todos em locais do atual Estado de São Paulo. Em 1567 foi também descoberto algum ouro em Porto Seguro (Martim de Carvalho). Não há porém, registros de produção. [...] (Lins, 2000, p. 28).

As primeiras lavras menos rudimentares que surgiram foram as de ouro, que apareceram, de forma consolidada, inicialmente com a abertura da Mina da Passagem, em Mariana, 1819, pelo Barão de Echevege, seguida por várias outras. A principal foi a Mina Velha em Nova Lima – MG, em 1834, que era considerada na época como exemplo de emprego de tecnologia de lavras subterrâneas.

De acordo com Germany (2002), naquele tempo, tudo era muito rudimentar, sendo a perfuração das rochas sempre feitas com ponteiros e marretas e utilizando-se pólvora caseira até além do último lustro do século XIX. Compare-se as técnicas utilizadas na abertura de galerias com o que se fazia nos Estados Unidos na abertura dos túneis ferroviários, para atravessar as Montanhas Rochosas, nos anos da década de 1860, onde o avanço por uso de pólvora não ultrapassava 30cm.

Durante esse período, teve início a lavra de outros minerais, tais como calcário, aproveitado pela indústria cimenteira e que está presente até hoje em quase todos os estados brasileiros. Iniciaram-se também as lavras de carvão, manganês, entre outros.

Somente no século XX começaram a ocorrer melhorias tecnológicas das técnicas de lavra, bem como o uso de equipamentos mais sofisticados. “A partir dos anos de 1950, as pequenas operações e extração de argilas e areias puderam ser lavradas com mais seletividade, devido ao uso de pequenas retroescavadeiras e pás carregadeiras” (GERMANY, 2002).

A partir da criação do Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM, na década de 1970, a comunicação entre os técnicos especializados da área se tornou mais numerosa e abrangente, possibilitando transferir o conhecimento, por meio de congressos, seminários internos de grandes empresas e cursos de curta duração.

A partir da década de 80, os aspectos ambientais também cresceram em importância. A atenção foi amplamente voltada para estabilidade física e econômica das barragens, considerando o potencial de dano ambiental e os mecanismos de transporte de contaminantes. Aspectos de estabilidade física têm permanecido na vanguarda, por causa de recentes acidentes com barragens de rejeitos que ganharam amplo espaço na mídia, com implicações financeiras severas em muitos casos (CBDB, 2012 *apud* IBRAM, 2016).

4.1.2. A Mineração e a Economia

Segundo Vieira e Rezende (2015), a mineração é considerada um dos setores básicos da economia no Brasil. A atividade minerária fornece matéria-prima para a indústria, sendo que vários produtos, desde os mais simples aos mais complexos, têm origem mineral. Os produtos mais minerados no Brasil, em volume, são a areia e a pedra britada. As atividades de extração de areia são igualmente responsáveis por impactos ambientais negativos, alguns inclusive irreversíveis.

O perfil do setor mineral brasileiro é composto por 95% de pequenas e médias minerações. Estima-se que “existam mais de 8.000 mineradoras em operação no Brasil, que exploram 55 tipologias minerais” (MANCIN, 2012).

Segundo Minérios e Minerales (1999) *apud* Vieira e Rezende (2015), os dados obtidos nas concessões de lavra demonstram que as minas no Brasil estão distribuídas regionalmente com 4% no Norte, 8% no Centro-Oeste, 13% no Nordeste, 21% no Sul e 54% no Sudeste.

A partir do ano 2000 o aumento da demanda por minerais impulsionou o valor da Produção Mineral Brasileira (PMB) que, em 2014, estava estimado em US\$ 43 bilhões. O IBRAM registrou, com base em dados coletados nas mineradoras, aplicação expressiva de US\$ 53,6 bilhões para o período de 2014 a 2018, o que representa um avanço considerável para a indústria da mineração, tendo em vista que os investimentos aplicados estimulam outros setores produtivos, além de gerarem empregos, renda e tributos (IBRAM, 2016).

4.1.3. A Mineração e o Meio Ambiente

A mineração é vista como atividade altamente impactante e não sustentável por ser a extração de recursos naturais não renováveis da crosta terrestre. Por outro lado, a mesma é a base da indústria moderna, pois fornece matéria prima para todos os setores da economia, logo sendo essencial ao desenvolvimento.

A mineração, evidentemente, causa um impacto ambiental considerável. Ela altera intensamente a área minerada e as áreas vizinhas, onde são feitos os depósitos de estéril e de rejeito. Além do mais, quando temos a presença de substâncias químicas nocivas na fase de beneficiamento do minério, isto pode significar um problema sério do ponto de vista ambiental (SILVA, 2007, p.2).

Segundo a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM (2002), os principais problemas oriundos da mineração podem ser englobados em cinco categorias: poluição da água, poluição do ar, poluição sonora, subsidência do terreno, incêndios causados pelo carvão e rejeitos radioativos.

As principais consequências da mineração no meio ambiente podem ser listadas como: degradação da paisagem, ruídos e vibrações, tráfego intenso de veículos pesados, material particulado suspenso no ar e água e produção de rejeitos e estéril.

De acordo com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA (2006), a mineração em áreas urbanas e periurbanas é um dos fatores responsáveis pela degradação do subsolo. Atualmente, junto às grandes metrópoles brasileiras, é comum a existência de enormes áreas degradadas, resultante das atividades de extração de argila, areia, saibro e brita.

Conforme BACCI (2006), os efeitos ambientais estão associados, de modo geral, às diversas fases de exploração dos bens minerais, como à abertura da cava, (retirada da vegetação, escavações, movimentação de terra e modificação da paisagem local), ao uso de explosivos no desmonte de rocha (sobrepessão atmosférica, vibração do terreno, ultralanzamento de fragmentos, fumos, gases, poeira, ruído), ao transporte e beneficiamento do minério (geração de poeira e ruído), afetando os meios como água, solo e ar, além da população local.

De acordo com Farias (2002), várias atividades antrópicas vêm criando problemas ambientais, no uso do solo e subsolo, além das atividades de mineração, entre as quais se destacam: a urbanização desordenada, agricultura, pecuária, construção de barragens visando a geração de hidroeletricidade, uso não controlado de água subterrânea, dentre outras.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2001), a extração mineral é considerada de tal forma estratégica que, no Brasil, como na maioria dos países, os depósitos minerais (jazimentos) são bens públicos, extraídos por concessão do estado. Os efeitos ambientais e socioeconômicos do aproveitamento destes jazimentos dependem, principalmente, como esta atividade será planejada e, principalmente, como será desenvolvida.

4.2. Função e Importância das Barragens de Contenção de Rejeito na Mineração

Barragens de contenção de rejeito são estruturas que tem por finalidade a retenção de resíduos sólidos e líquidos provenientes dos processos de beneficiamento de minério. O projeto de construção de uma barragem de contenção de rejeito leva em consideração todo tipo de variável que direta e indiretamente

influenciam a obra e a vida útil da mesma, tal como características geológicas, hidrologia local, topografia, geotecnia, aspectos ambientais, sociais, avaliação de riscos, dentre outras.

As barragens podem ser construídas de diferentes formas, sendo elas: a) etapa única ou b) por alteamento, sendo a montante, a jusante ou por linha de centro.

Segundo Araújo (2006), a escolha de um ou outro método de execução depende de uma série de fatores, tais como: 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. No entanto, como as barragens alteadas pelo método de montante têm se mostrado de maior facilidade de execução e mais economicamente viáveis, essas têm sido as preferencialmente adotadas pelas empresas mineradoras.

A Agência Nacional de Mineração (ANM) possui o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, onde os empreendedores devem declarar todas as barragens de sua responsabilidade, estejam elas em fase de construção, operação ou desativadas. O cadastro fornece anualmente a relação das barragens cadastradas e nessa relação é possível ver, de forma quantitativa, os métodos de construção/alteamento selecionados.

4.2.1. Construção em Etapa Única

São construídas em etapa única as chamadas barragens convencionais, onde se utiliza apenas terra compactada e se estabelece uma cota única, com ausência de alteamentos posteriores. Este procedimento é, quase sempre, realizado por uma empresa construtora, que segue especificações construtivas rígidas, operando com pessoal e equipamentos próprios (SOARES, 2010).

Na **Figura 1** é apresentada a barragem Taquaras da Mina Mar Azul, da Vale, localizada no município de Nova Lima – MG, como exemplo de construção em etapa única.

Figura 1 - Barragem Com Construção Em Etapa Única.



Fonte: CBH Rio das Velhas

4.2.2. Métodos de Alçamento

Segundo Araújo (2006), barragens de contenção de rejeito são estruturas construídas ao longo do tempo através de alçamentos sucessivos. Inicialmente é construído um dique de partida e, ao longo de sua vida útil, a barragem passa por alçamentos podendo ser constituídos de material compactado provenientes de empréstimos de áreas similares, ou com o próprio rejeito, através de três métodos: montante, jusante ou linha de centro.

4.2.2.1. *Método de Montante*

O método de montante é o mais econômico método de construção de barragens (**Figura 2**). A etapa inicial na execução deste tipo de barragem consiste na construção de um dique de partida, normalmente de material argiloso ou enrocamento² compactado. Após realizada esta etapa, o rejeito é lançado por

² O enrocamento pode ser definido como o material de aterro constituído por material rochoso,

canhões em direção a montante da linha de simetria do dique, formando assim a praia de deposição, que se tornará a fundação e, eventualmente, fornecerá material de construção para o próximo alteamento. Este processo continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida (ARAÚJO, 2006).

Figura 2 – Alteamento a Montante.



Fonte: IBRAM – Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração (2016).

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.

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 compactidade fofo, estes rejeitos (granulares) tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação por carregamentos dinâmicos e estáticos (ARAÚJO, 2006).

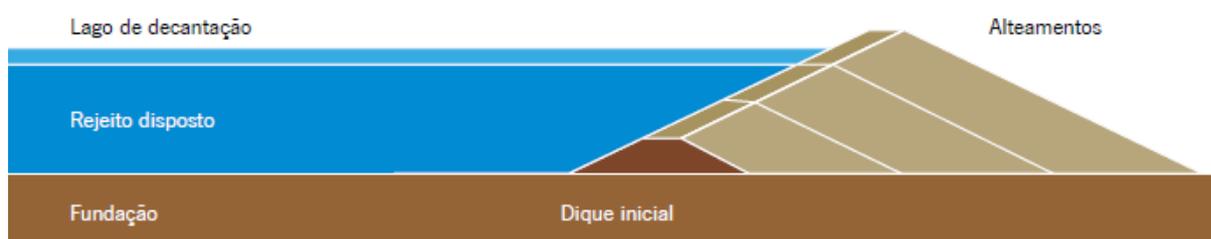
Esse método de alteamento apresenta dificuldade na implantação de um sistema interno de drenagem para controlar o nível d'água dentro da barragem, sendo assim um problema em relação à estabilidade da estrutura.

não coerente e de granulometria com dimensão variada, Stephenson (1979) *apud* Franca (2002).

4.2.2.2. Método de Jusante

No método de jusante (**Figura 3**), primeiramente é construído um dique de partida, normalmente de solo ou enrocamento compactado, e os alteamentos subsequentes são realizados para jusante do dique inicial até que alcance a cota máxima prevista no projeto.

Figura 3 - Alteamento a Jusante.



Fonte: IBRAM – Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração (2016).

De acordo com Klohn (1981), as vantagens envolvidas no processo de alteamento para jusante consistem no controle do lançamento e da compactação, de acordo com técnicas convencionais de construção. Nenhuma parte ou alteamento da barragem é construída 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.

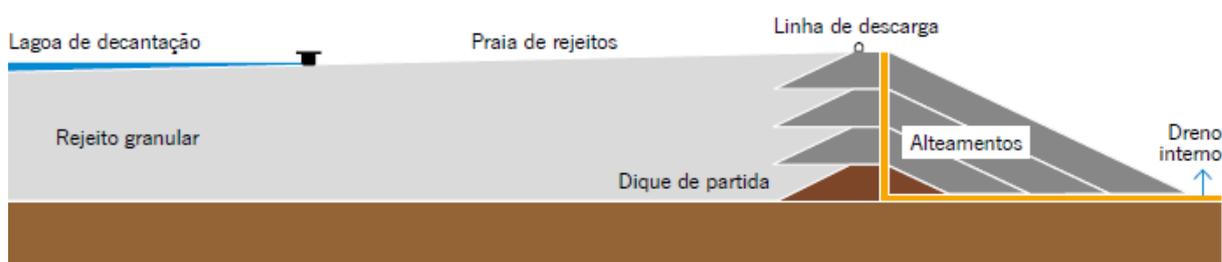
Entretanto, barragens alteadas pelo método de jusante necessitam de maiores volumes de material para construção, apresentando maiores custos associados ao processo de ciclonagem ou ao empréstimo de material. Além disto, com este método, a área ocupada pelo sistema de contenção de rejeitos é muito maior, devido ao progresso da estrutura para jusante em função do acréscimo da altura (ARAÚJO, 2006).

4.2.2.3. Método de Linha de Centro

Segundo Assis e Espósito (1995), o comportamento geotécnico do método de linha de centro (**Figura 4**) se assemelha mais a barragens alteadas para jusante, constituindo uma variação deste método, onde o alteamento da crista é realizado de forma vertical, sendo o eixo vertical dos alteamentos coincidente com o eixo do dique de partida. Neste método, torna-se possível a utilização de zonas de drenagem internas em todas as fases de alteamento, o que possibilita o controle da linha de saturação e promove uma dissipação de poropressões, tornando o método apropriado para utilização 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, mas 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 (TRONCOSO, 1997).

Figura 4 - Alteamento por Linha de Centro.



Fonte: IBRAM – Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração (2016).

4.3. Procedimentos de Segurança de Uma Barragem de Rejeito

O controle de segurança de barragens, feito com base no seu monitoramento e inspeção, incluindo aspectos estruturais, hidráulicos e operacionais e mesmo aspectos ambientais, visa detectar em tempo útil qualquer anomalia que possa

comprometer o desempenho do empreendimento ou ameaçar a sua segurança e implementar as necessárias medidas corretivas (ANA, 2016).

A operação diária de uma barragem de rejeitos deve seguir regras e procedimentos específicos, visando garantir o objetivo principal que é a segurança a longo prazo, resultando no menor impacto possível ao meio ambiente (DME, 1998 *apud* Oliveira, 2010).

O Manual de Operação deve ser elaborado pela empresa que projetou a barragem pois se trata de um documento que acompanha o projeto dessa estrutura, conforme preconiza a norma brasileira NBR-13028 (ABNT, 2017).

As empresas mineradoras podem elaborar os seus próprios manuais de operação, mas recomenda-se que essa função seja atribuída a profissionais devidamente capacitados, com vivência operacional e foco no projeto específico em questão. Ainda, recomenda-se a avaliação e o diagnóstico da estrutura por profissionais que, juntos, venham a interpretar o comportamento da barragem sob a ótica geotécnica, hidrológica, hidráulica, geológica, hidrogeológica e geoquímica (OLIVEIRA, 2010, p.92).

Tal manual deve abordar também a segurança de pessoas que estejam diretamente envolvidas com as diversas tarefas da rotina operacional das barragens de rejeito. É importante que o Manual especifique ações de restrição ao acesso dessas pessoas e estabeleça procedimentos para a utilização de equipamentos e manuseio dos rejeitos, a fim de manter níveis adequados de segurança para todo o pessoal envolvido na rotina (OLIVEIRA, 2010).

4.3.1. Rompimentos de Barragens no Brasil e no Mundo

Uma das modalidades de desastres consideravelmente recorrente na história é o rompimento de barragens. Os fatores principais que podem ser apontados como causa primária disso são dois: a) um fenômeno natural intenso que pode abalar a estrutura da barragem ou b) o mau planejamento e monitoramento da segurança da mesma, independente de fatores externos. O primeiro tipo de desastre mencionado pode ser denominado também como desastre misto, pois quando na ausência do fenômeno natural, considera-se desastre tecnológico (BROWN, 2012).

Um breve histórico de rompimentos, incluindo de barragens de água, é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Histórico de Ocorrências de Rompimento de Barragens.

Local	Ano	Nome da Barragem	Tipo de Barragem
Los Angeles (EUA)	1928	St. Francis	Água
Riviera Francesa (FRA)	1959	Malpasset	Água
Dolomitas (ITA)	1963	Vajont	Água
Virgínia (EUA)	1972	Barragem 3	Rejeito
Província de Henan (CHN)	1975	Banqiao	Água
Idaho (EUA)	1976	Teton	Água
Itabirito (MG)	1986	Fernandinho	Rejeito
Marinduque (FIL)	1996	Mogpog	Rejeito
Quebec (CAN)	1996	Há!Ha!	Água
Andaluzia (ESP)	1998	Boliden	Rejeito
Nova Lima (MG)	2001	Macacos	Rejeito
Cataguases (MG)	2003	Cataguases	Rejeito
Alagoa Nova (PB)	2004	Camará	Água
New Orleans (EUA)	2005	Sistema Federal de Diques	Água
Miraí (MG)	2007	Rio Pomba	Rejeito
Vilhena (RO)	2008	Apertadinho	Água
Cocal e Buriti dos Lopes (PI)	2009	Algodões	Água
Laranjal do Jari (AP)	2014	Santo Antônio	Água
Itabirito (MG)	2014	Herculano	Rejeito
Mariana (MG)	2015	Fundão	Rejeito
Brumadinho (MG)	2019	Córrego do Feijão	Rejeito

Fonte: Modificado de DUARTE (2008).

Dos 11 rompimentos de barragens de rejeitos que ocorreram no Brasil conforme o Quadro 1, 7 deles ocorreram no Brasil, especificamente no Estado de Minas Gerais.

Como forma de mitigar os riscos associados a esses eventos, deve-se dedicar maior atenção e exigência às práticas e procedimentos para a segurança de barragens.

4.4. Aspecto Legais das Atividades de Mineração

No Brasil, a mineração, de um modo geral, está submetida a um conjunto de regulamentações, onde os três níveis de poder (federal, estadual e municipal) possuem atribuições com relação à mineração e ao meio ambiente (FARIAS, 2002).

Como instrumento para a regularização ambiental tem-se o licenciamento das atividades.

4.4.1. Licenciamento Ambiental

De acordo com a Política Nacional do Meio Ambiente (Lei 6.938 de 31 de agosto de 1981) e regulamentado pelo Decreto 99.274, de 06 de junho de 1990, o Sistema Nacional do Meio Ambiente – SISNAMA composto por órgãos de nível federal, entidades da União, dos Estados, do Distrito Federal, dos Municípios e pelas Fundações instituídas pelo Poder Público, tem responsabilidade de definir as diretrizes e regulamentações, além de atuar na concessão, fiscalização e cumprimento da legislação mineral e ambiental. A nível federal são:

- **Ministério do Meio Ambiente:** responsável por formular e coordenar as políticas ambientais, assim como acompanhar e superintender sua execução;
- **Ministério de Minas e Energia:** responsável por formular e coordenar as políticas dos setores mineral, elétrico e de petróleo/gás;
- **Secretaria de Minas e Metalurgia – SMM/MME:** responsável por formular e coordenar a implementação das políticas do setor mineral;
- **Agencia Nacional de Mineração (antigo Departamento Nacional de Produção Mineral):** responsável pelo planejamento e fomento do aproveitamento dos recursos minerais, preservação e estudo do patrimônio paleontológico, assim como superintender as pesquisas geológicas e minerais, conceder, controlar e fiscalizar o exercício das atividades de mineração em todo o território nacional, de acordo o Código de Mineração;
- **Serviço Geológico do Brasil – CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais):** responsável por gerar e difundir conhecimento geológico e hidrológico básico, além de disponibilizar informações e conhecimento sobre o meio físico para a gestão territorial;
- **Agência Nacional de Águas – ANA:** sua principal competência é a de implementar o gerenciamento dos recursos hídricos no país. Responsável também pela outorga de água superficial e subterrânea, inclusive aquelas que são utilizadas na mineração em rios de domínio da União;

- **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA:** responsável por formular as políticas ambientais, cujas Resoluções têm poder normativo, com força de lei, desde que, o Poder Legislativo não tenha aprovada legislação específica;
- **Instituto Brasileiro de Meio Ambiente Recursos Naturais Renováveis – IBAMA:** responsável, em nível federal, pelo licenciamento e fiscalização ambiental.

A aprovação dos Estudos Ambientais é requisito básico para que a empresa de mineração possa pleitear o Licenciamento Ambiental (LA) do seu projeto de mineração. A obtenção do LA é obrigatória para a viabilidade locacional, instalação ou ampliação e operação de qualquer atividade de mineração objeto dos regimes de concessão de lavra e licenciamento (FARIAS, 2002).

Esse licenciamento está regulamentado pelo Decreto no 99.274/90, que dá competência aos órgãos estaduais de meio ambiente para expedição e controle das licenças prévia, de instalação e de operação.

4.4.2. Legislação Federal Para Segurança de Barragens

A Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.

A lei tem como objetivo garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências; regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, desativação e usos futuros da barragem em todo território nacional; promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança empregadas; criar condições que ampliem o universo de controle de barragens pelo poder público, com base nas fiscalizações, orientação e ações de segurança; reunir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelo governo; fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos (BRASIL, 2010).

Os instrumentos da PNSB são o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado; o Plano de Segurança de Barragem e os Planos de Ação Emergencial – PAE para as barragens com médio e alto dano potencial associado; a Revisão do Plano de Segurança de Barragens – RPSB; o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB); o Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (SISNIMA); o Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental; o Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais; o Relatório de Segurança de Barragens (BRASIL, 2010).

A lei estabelece ainda, no Capítulo III, fundamentos e fiscalização em empreendimentos que possuem estruturas classificadas como barragem.

4.4.3. Legislação Estadual de Barragens

Como legislação estadual do Estado de Minas Gerais, tem-se inicialmente a Deliberação Normativa COPAM (Conselho Estadual de Política Ambiental) Nº 62, de 17 de dezembro de 2002, que dispõe sobre os critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais. Posteriormente, a Deliberação Normativa foi alterada e complementada pela DN COPAM Nº 87, de 17 de junho de 2005.

Outra legislação correlata é a Deliberação Normativa COPAM Nº 124, de 09 de outubro de 2008, que define prazos para apresentação da declaração de condição de estabilidade das barragens e dá outras providências.

A publicação do Decreto Estadual n.º 46.993/2016 foi resultado do rompimento da barragem de Fundão de propriedade da empresa Samarco S.A., que dentre outras providencias, proibiu a instalação de novas barragens alteadas pelo método de montante.

Decorrente da tragédia ocorrida em Brumadinho, em janeiro de 2019, foi sancionada no dia 25 fevereiro de 2019 a Lei 23.291/2019, que institui a Política Estadual de Segurança de Barragens, e determina a desativação das barragens

construídas pelo método de alteamento a montante no Estado de Minas Gerais, além de vedar em vários cenários e condições a implantação de novas barragens, independentemente do método construtivo, no Estado de Minas Gerais.

4.5. Sistemas Extravadores de Barragens de Rejeitos

As áreas mais indicadas para construção de barragens de rejeito são aquelas onde se interveem minimamente nas coleções hídricas, como cursos d'água, surgências, drenagens naturais, com intuito de se evitar custos e riscos adicionais à construção dos sistemas extravasores.

O dimensionamento das obras de sistemas extravasores deve não só considerar a hidrologia local e regional, como também garantir a ausência de transbordamento e galgamento. As águas que chegam ao reservatório devem ser drenadas por meio de sistema extravasor. Em seu projeto, é necessário considerar as dimensões da barragem e reservatório, as situações de emergência e os progressivos alteamentos durante a vida útil da barragem. Na etapa de projeto, sugere-se a análise de três sistemas: Tulipa, Galeria de Encosta e Vertedor de Superfície, sendo o último o mais utilizado em barragens de rejeitos.

A parte mais importante do sistema extravasor é o vertedor, estrutura vital para a barragem, com o objetivo de escoar as águas excedentes, com segurança, para jusante da barragem. O correto dimensionamento e operação dos mesmos são de suma importância, pois evita o galgamento, que é a passagem de água sobre a crista da barragem, oferecendo riscos de carreamento do material usado no maciço e conseqüentemente erosão (TURELLA, 2010).

Os vertedores são estruturas construídas para extravasar a vazão afluyente incidente na bacia de drenagem onde a estrutura está inserida. Desta forma, aplicam-se em barragens de rejeito o mesmo tipo de avaliação que para barragens de água, onde o que irá mudar é a vazão amortecida, visto que para uma barragem de água a função é justamente a acumulação.

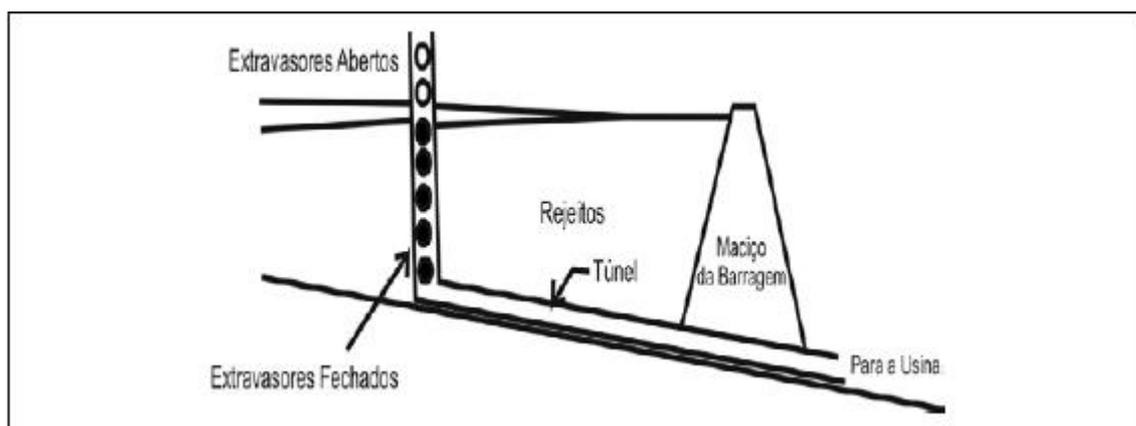
Pinto (1987, p. 6) *apud* Turella (2010) afirma que mesmo para um dado método construtivo da barragem, as dimensões da mesma e, conseqüentemente, do sistema

extravasador, podem variar, sendo então, mais conveniente o estudo dos vertedores superficiais, por serem mais simplificados e de menor interferência direta na estrutura da barragem.

4.5.1. Tulipa

O vertedor tipo Tulipa consiste em uma torre de concreto armado ou tubulação de metal construída dentro do futuro reservatório (**Figura 5**). Possui pequenas comportas que possibilitam controlar a altura do nível d'água dentro da barragem. Esta torre conduz as águas até uma galeria de fundo que atravessa o maciço da barragem, efetuando o descarregamento da água a jusante do maciço. É um dos sistemas mais utilizados devido a sua simples construção e pela ausência de equipamentos mecânicos na operação. Em barragens de grande porte, este método demanda maior investimento que os demais, além de apresentar alguns riscos relacionados à obstrução das galerias e à condição de conservação, por se tratar de estrutura que possuem seções geralmente localizadas sob o maciço das barragens.

Figura 5 - Extravasador tipo tulipa interligada à galeria de fundo.

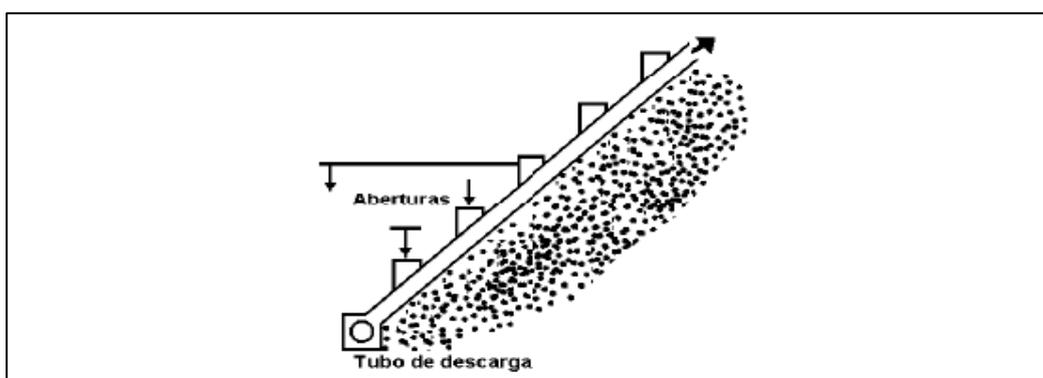


Fonte: CETEM (2010).

4.5.2. Galeria de Encosta

O extravasor tipo galeria de encosta (**Figura 6**) compõe-se de uma galeria de concreto ou tubulações metálicas inclinadas, implantada sobre a encosta que compõe a ombreira da estrutura. Esta galeria se interliga a outra de fundo que conduz a água a jusante por baixo do maciço ou a um túnel escavado na ombreira da barragem.

Figura 6 - Extravasor tipo galeria de encosta interligado à galeria de fundo.



Fonte: CETEM (2010).

4.5.3. Vertedor de Superfície

São extravasores constituídos por vertedores total ou parcialmente independentes da barragem, onde se localizam estruturas, em geral de concreto, como soleiras, canais, etc., cujo bom funcionamento é muito importante para assegurar a estabilidade das estruturas. Assim, durante a fase de operação, se deve dar particular atenção à funcionalidade destes sistemas, controlando-se sua desobstrução.

Estes vertedores podem ser livres (**Figura 7**), ou seja, canais abertos à atmosfera e sem controle de descarga. Quando a água atingir a soleira livre, irá verter naturalmente, ou podem ser com comportas, sendo possível o controle o escoamento. Para estruturas de contenção de rejeito não é interessante o uso de comportas, visto que a acumulação de água na mesma oferece risco, portanto recomenda-se o uso dos vertedores de soleira livre.

Figura 7 - Vertedor de superfície.



Fonte: Google Imagens (2018).

4.6. Estudo Hidrológico em Obras de Mineração

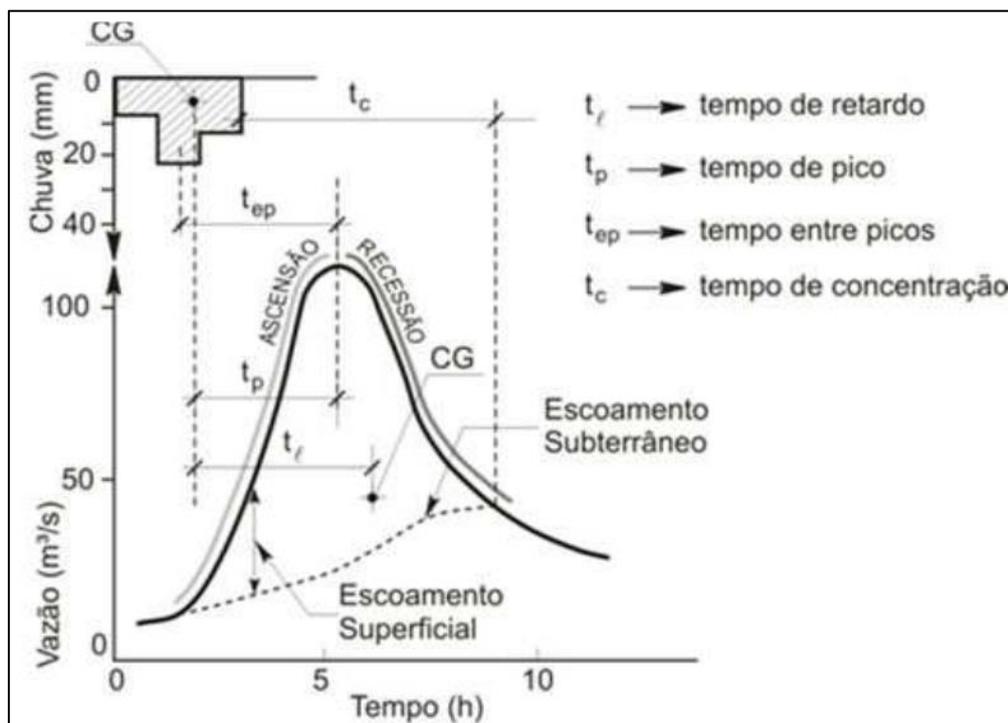
Para estudos hidrológicos em obras de mineração considera-se a contribuição da microbacia local, bem como o balanço hídrico da área de estudo, ou seja, vazão de entrada, escoamento, infiltração e evaporação.

4.6.1. Hidrograma

O hidrograma é a denominação dada ao gráfico que relaciona a vazão no tempo. A distribuição da vazão no tempo é resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico entre a ocorrência da precipitação e a vazão na bacia hidrográfica (TUCCI, 1993).

Na **Figura 8** é representado o comportamento típico de uma bacia após a ocorrência de uma sequência de precipitações. A forma do hidrograma depende de um grande número de fatores, os quais os mais importantes serão abordados a seguir.

Figura 8 - Hidrograma tipo.



Fonte: COLLISCHONN e TASSI (2008).

4.6.1.1. Tempo de concentração

É o tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante na bacia deslocar-se até a seção principal. É definido também como o tempo entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma (TUCCI, 1993).

O tempo de concentração (t_c) pode ser estimado por diversas equações empíricas estabelecidas para diferentes regiões. Uma das fórmulas utilizadas é a equação de Kirpich, que considera a extensão e o desnível do talvegue principal, é dada pela seguinte expressão:

$$t_c = 23,38x \left(\frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0,77} \quad \text{Eq. (01)}$$

Onde:

t_c = tempo de concentração [min];

L = comprimento total, medido ao longo do talvegue principal até o divisor de águas [km]; e

I = declividade média [%].

4.6.1.2. Tempo de retardo (lag time)

Segundo Tucci (1993), é definido como o intervalo de tempo entre o centro de massa da precipitação e o centro de gravidade do hidrograma.

4.6.2. Precipitação

A precipitação é entendida em hidrologia como toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. Existem diversas formas de diferentes de precipitação, mas o que as difere é o estado em que a água se encontra (TUCCI, 1993). As características principais da precipitação são seu total, duração e distribuições temporal e espacial. Cabe ressaltar que o total de precipitação não tem significância se não relacionado a um tempo de duração.

As grandezas que caracterizam uma chuva, segundo Tucci (1993), são as seguintes:

- **Altura pluviométrica (P ou r):** Espessura média da lâmina de água precipitada que recobriria a região atingida pela precipitação, admitindo-se que essa água não se infiltre, evapore e nem escoe para fora dos limites da região. A unidade de medição usual é o milímetro;
- **Duração (t):** Período de tempo durante o qual a chuva cai. As unidades normalmente utilizadas são o minuto ou a hora;
- **Intensidade (i):** Precipitação por unidade de tempo, obtida com a relação $i = \left(\frac{P}{t}\right)$. Expressa usualmente em mm/h ou mm/min;
- **Tempo de recorrência (Tr):** É interpretado como o número médio de anos durante o qual espera-se que a precipitação analisada seja igualada ou superada.

4.6.2.1. Distribuição Temporal das precipitações (Hietograma de Projeto)

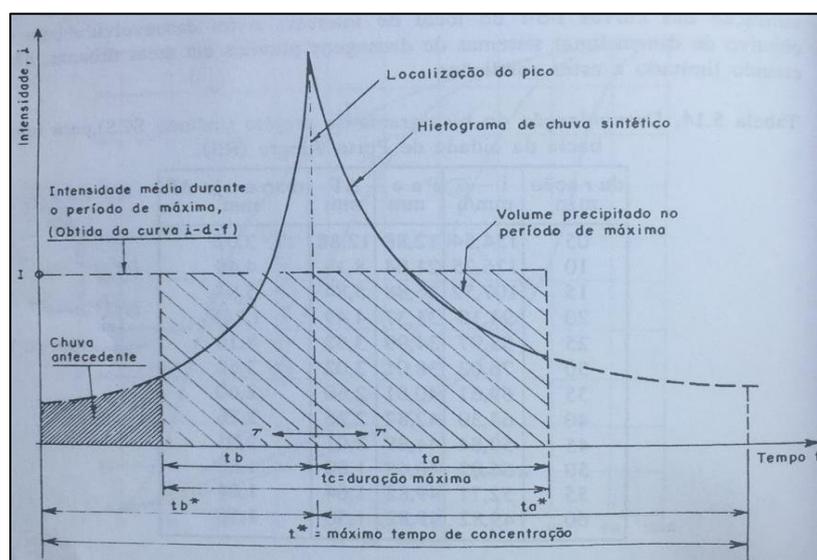
De acordo com Tucci (1993) o hietograma de projeto é uma sequência de precipitações capaz de provocar a cheia de projeto, ou seja, a maior enchente para qual a obra deve estar projetada. Os métodos podem basear-se: a) nas distribuições como a de Huff, b) na maximização das condições desfavoráveis como no método do Bureau of Reclamation e c) no método de Chicago (

Figura 9), que se baseia nos parâmetros da equação intensidade-duração-frequência (IDF).

4.6.2.2. Método de Huff

Segundo Tucci (1993), Huff (1970) desenvolveu uma metodologia para determinar as características de distribuição temporal, utilizando 49 postos com 11 anos de registro no estado de Illinois, nos Estados Unidos. Ele classificou as tempestades em quatro grupos inicialmente. Cada precipitação intensa teve sua duração total dividida em quartis e foram classificadas de acordo com a parte de duração em que a precipitação máxima caiu. Para cada quartil realizou-se uma análise estatística obtendo curvas de distribuição temporal com uma determinada probabilidade de ocorrência para cada um dos quatro tipos (**Figura 10**).

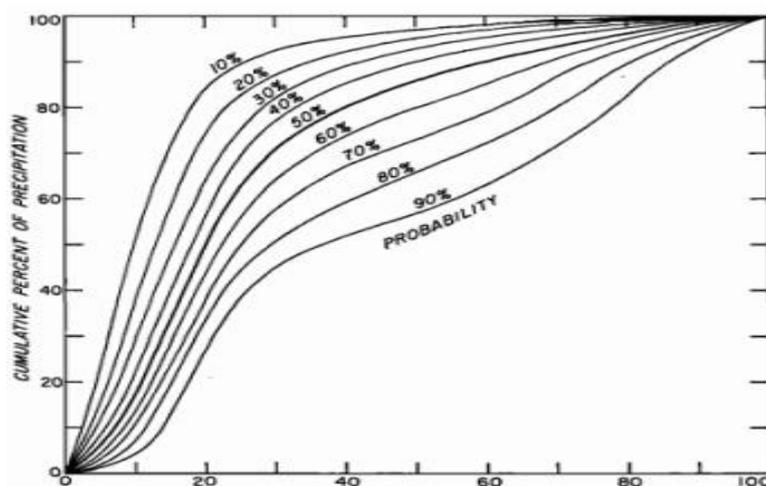
Figura 9 - Hietograma definido pelo método de Chicago.



Fonte: TUCCI (1993).

No entanto, a validade deste trabalho depende da uniformidade climática das regiões envolvidas, uma vez que as curvas não foram submetidas a relações matemáticas exatas, mas sim utilizadas de aproximação a parâmetros hidrometeorológicos, como a utilização de mapas climáticos para a determinação do tipo de precipitação e isoietas. Desta forma, essa relação pode ser usada para estimar as distribuições temporais em regiões de clima e fisiografia similares, como em áreas urbanas de 25 a 1000 quilômetros quadrados e em pequenas bacias rurais (FERREIRA, 2015).

Figura 10 – Relação dos Percentuais Acumulados de Precipitação com o Percentual Acumulado do Tempo para o 1º quartil.



Fonte: FERREIRA (2015).

4.6.3. Modelos hidrológicos

A vazão máxima é utilizada na previsão de enchentes e no projeto de obras hidráulicas tais como condutos, canais, bueiros, entre outras. O hidrograma de projeto é necessário quando o volume, a distribuição temporal e o pico são importantes no funcionamento da obra hidráulica. A vazão máxima e o hidrograma de projeto são necessários para o controle e atenuação de cheias numa determinada área, dimensionamento de obras hidráulicas de drenagem urbana, perímetro de irrigação, diques e extravasores de barragens, entre outros. A estimativa destes valores tem importância decisiva nos custos e na segurança dos projetos de engenharia (TUCCI,

1993). Segundo AWWA (1966) *apud* Tucci (1993) cerca de 20% das falhas de 193 barragens deveram-se a subdimensionamento de vertedores.

Para estimar a vazão máxima de projeto, utilizam-se usualmente o Método Racional e o Método SCS, a serem detalhados a seguir.

4.6.3.1. Método Racional

A vazão máxima pode ser estimada com base na precipitação pelo Método Racional, que engloba todos os processos em apenas um coeficiente. Este método é largamente utilizado na determinação da vazão máxima de projeto para bacias pequenas, de até 2 km² (TUCCI, 1993). Os princípios básicos dessa metodologia são:

- Considera a precipitação intensa de projeto igual ao tempo de concentração;
- Adota um coeficiente único de perdas denominado C (coeficiente de Runoff), estimado com base nas características da bacia (Quadro 2);
- Não avalia o volume de cheia e a distribuição temporal das vazões.

Quadro 2 - Exemplo de Valores de Coeficiente de Runoff (C).

Características da Bacia	C
Superfícies Impermeáveis	0,90 – 0,95
Terreno Estéril Montanhoso	0,80 – 0,90
Terreno Estéril Ondulado	0,60 – 0,80
Terreno Estéril Plano	0,50 – 0,70
Prados, Campinas, Terreno Ondulado	0,40 – 0,65
Matas Decíduas, Folhagem Caduca	0,35 – 0,60
Matas Coníferas, Folhagem Permanente	0,25 – 0,50
Pomares	0,15 – 0,40
Terrenos Cultivados em Zonas Altas	0,15 – 0,40
Terrenos Cultivados em Vales	0,10 – 0,30

Fonte: TUCCI (1993).

A vazão de projeto estimada pelo Método Racional é dada por:

$$Q = 0,278 \times C \times I \times A \quad \text{Eq. (02)}$$

Onde:

Q = Vazão [m³/s];

C = Coeficiente de Runoff;

I = Intensidade [mm/h]; e

A = Área da Bacia [km²].

4.6.3.2. Método SCS

O método SCS é aplicado para áreas que variam de 2 km² a 5000 km². Está baseado no conceito de hidrograma unitário, que foi proposto pela primeira vez em 1932, por Sherman, usando 1cm para chuva excedente para as unidades do Sistema Internacional (TOMAZ, 2013). Na prática, para se obter o hidrograma unitário são necessárias as precipitações e vazões do local de estudo. Como normalmente não se tem esses dados, são utilizadas fórmulas empíricas e, assim, se tem o que é chamado de hidrograma unitário sintético.

Segundo *apud* Porto (1995) *apud* Tomaz (2013), no hidrograma sintético é determinada a vazão de pico e a forma do hidrograma baseado em um triângulo tendo as características físicas da bacia.

Para estimar o volume de chuva por este método são utilizadas as seguintes equações:

- Quando $P > I_a$:

$$Q = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \quad \text{Eq. (03)}$$

Onde:

Q = Escoamento [mm];

P = Chuva acumulada [mm];

I_a = Perdas Iniciais [mm];

S = Parâmetro de armazenamento.

- Quando $P \leq I_a$:

$$Q = 0$$

- Perdas Iniciais:

$$Ia = \frac{S}{5} \quad \text{Eq. (04)}$$

- Parâmetro de Armazenamento (S):

$$S = \left(\frac{25400}{CN} \right) - 254 \quad \text{Eq. (05)}$$

Onde:

CN = Cobertura do solo;

S = Parâmetro de Armazenamento.

Os valores de CN em função do tipo de solo (A, B, C e D) e das condições da cobertura são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Valores de CN.

Condição	A	B	C	D
Florestas	41	63	74	80
Campos	65	75	83	85
Plantações	62	74	82	87
Zonas Comerciais	89	92	94	95
Zonas Industriais	81	88	91	93
Zonas Residenciais	77	85	90	92

Fonte: TUCCI (1993).

4.6.4. Modelos Hidrológicos

Modelos hidrológicos capazes de representar matematicamente diversos processos físicos como a transformação de precipitação em escoamento, a evapotranspiração, o armazenamento de água no solo e aquíferos, a propagação das cheias em toda rede de drenagem de bacias hidrográficas são ferramentas pertinentes em vários tipos de análises hidrológicas. Estes modelos são aplicados para diversos estudos, dentre eles previsões de vazões em tempo real e estimativa de vazões em locais sem dados (PONTES et al., 2015).

Dentre os diversos modelos existentes e presentes em muitas bibliografias, destaca-se o modelo para análises hidrológicas desenvolvido pela Hydrology Engineering Center, denominado Hydrologic Modeling Systems (HEC-HMS).

4.6.4.1. HEC-HMS

O Hydrology Engineering Center (HEC) dos US Army Corps of Engineers (USACE) desenvolveu modelos informáticos para análises hidrológicas (HEC-1) e hidráulicas (HEC-2) que estão entre os mais conhecidos e universalmente utilizados. Atualmente, estes modelos evoluíram para os conhecidos HEC-HMS (Hydrologic Modeling Systems) e HEC-RAS (River Analysis Systems), ambos com interfaces bem feitas e simplificadas, que permitem uma utilização fácil e intuitiva (SANTOS, 2017).

Entretanto, segundo Tavares e Castro (2005) *apud* Santos (2017), ainda que o HEC-HMS apresenta-se como uma ferramenta computacional que simplifica o processo de modelagem hidrológica, isto significa que o operador, mesmo assim, necessita ter conhecimentos e suscetibilidade quanto aos métodos a serem seguidos.

O modelo apresenta interface gráfica amigável e inúmeras particularidades, que o tornam um aplicativo flexível com competência de criar gráficos a partir das informações a serem determinadas no projeto, onde cada parâmetro poderá ser avaliado, originando novas saídas do modelo hidrológico, e por sua vez, novo pós processamento por parte do SIG (PETERS, 1998, p.31 *apud* SANTOS, 2017).

Este modelo permite realizar simulações dos processos de evaporação, precipitação e escoamento em bacias hidrográficas. Os resultados podem ser utilizados diretamente em conjunto com outros modelos para analisar a disponibilidade de recursos hídricos, a drenagem urbana, a previsão de cheias e os impactos de futuras urbanizações nos recursos hídricos (SANTOS, 2017).

5. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a realização do trabalho consiste em um estudo de caso quantitativo, constituído pelas seguintes etapas: caracterização da barragem de rejeito e do seu entorno, definição da microbacia local tomando como exutório a crista da barragem, estudos hidrológicos e hidráulicos, escolha do método e equações a serem utilizados para dimensionamento do vertedor e dimensionamento do vertedor da barragem de rejeito.

5.1. Área de estudo: caracterização da barragem de rejeito

Como área de estudo utilizou-se uma barragem de rejeito hipotética (**ANEXO I**), construída em etapa única, sendo suas características apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Características da Barragem Hipotética.

Dados gerais da barragem de rejeito	
Cota da soleira do vertedouro	747,00 m
Cota máxima de lançamento do rejeito	745,00 m
N.A. máximo normal	747,00 m
Cota da crista da barragem hipotética	750,00 m
Borda livre operacional	3,0 m
Área do espelho d'água	521.583 m ²
Área da bacia de contribuição	1.800.000 m ²
Relação reservação/bacia	0,29

Fonte: Aatoria Própria (2019).

5.2. Estudo Hidrológico

Para caracterizar e melhor representar o comportamento hidrológico e hidráulica da barragem de rejeitos em estudo, são necessários alguns dados e

informações como áreas de contribuição, distribuição temporal das chuvas, definição do método de transformação chuva-vazão, curva de descarga do vertedor e relações cota x área x volume do reservatório. Inicialmente, foi determinada a área de contribuição por meio do software AutoCad, a partir das curvas de nível. Na **Figura 11** é apresentada a delimitação da área de contribuição obtida. Além disso, foi estimado o tempo de concentração por meio da fórmula de Kirpich e, posteriormente, definido o tempo de retardo (lag time), considerado como 60% do tempo de concentração. Em relação ao CN, adotou-se o valor de 90, considerando que a superfície da área da bacia está coberta com solo tipo C e em terra/rocha: superfície dura. No Quadro 3 são apresentados os parâmetros área de contribuição, lag time e o valor de CN.

Figura 11 – Delimitação da Área de Contribuição da Barragem de Rejeito em Estudo.



Fonte: Autoria própria (2019).

No estudo hidrológico, foram obtidos hietogramas para um tempo de recorrência (T_r) de 10.000 anos, conforme a NBR-13.028, e diferentes durações de chuvas, por meio do Método de Huff, considerando a chuva de projeto apresentada no Quadro 5.

As curvas cota x área x volume do reservatório foram obtidas pela Equação do Tronco de Pirâmide.

Quadro 5 - Parâmetros Obtidos e Estimados para a Barragem Hipotética

Parâmetro	Valor
Área de contribuição (Km ²)	1,8
lag time (minutos)	10
CN	90

Fonte: Autoria Própria (2019).

Quadro 6 - Chuva de Projeto Definida pelo Método de Huff (Tr = 10.000 anos)

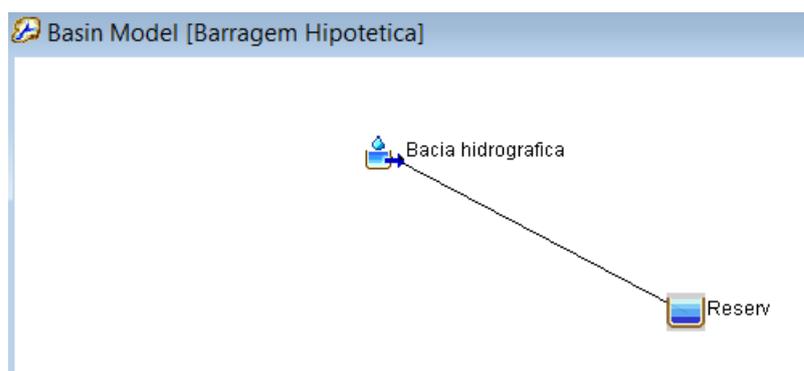
Tempo	Altura de precipitação (mm)
1 h	90
2 h	120
3 h	140
4 h	152
6 h	173
8 h	188
9 h	192
10 h	197
12 h	208
18 h	227
24 h	240
2 dias	315
3 dias	389
5 dias	497
7 dias	584
8 dias	619
9 dias	653
10 dias	688
15 dias	855

Fonte: Autoria Própria (2019).

5.3. Simulações e Dimensionamento do Vertedor

A barragem de rejeitos hipotética e o vertedor foram representados graficamente, no modelo HEC-HMS, conforme **Figura 12**.

Figura 12 - Representação da área de estudo no programa HEC-HMS.



Fonte: Autoria própria (2019).

Neste trabalho, na simulação hidrológica foram utilizados os métodos apresentados no Quadro 7. Realizaram-se simulações para o período de retorno (TR) de 10.000 anos e as durações da chuva apresentadas no Quadro 6, considerando as larguras do vertedor iguais a 2, 3 e 4 metros.

Quadro 7 - Métodos Utilizados nas Simulações

Parâmetro	Método
Precipitação	Fornecimento de uma chuva de projeto (Método de Huff)
Escoamento superficial	Método SCS –Curver Number
Amortecimento em reservatório	Curvas Cota x Volume x Descarga (Método de Puls)

Fonte: Autoria própria (2019).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Estudos Hidrológicos

6.1.1. Distribuição temporal das chuvas: Método de Huff (50% do 2o quartil)

Foi utilizado o Método de Huff para realização da distribuição temporal das chuvas. Os dados de entrada para o modelo de Huff (1967) são: a duração da chuva em horas ou minutos, o total precipitado em milímetros, o período de retorno das chuvas em anos, o número de blocos de chuva. São apresentadas, a seguir, as distribuições temporais das chuvas para o período de retorno de 10.000 anos e duração de chuva de 1h, 2h, 3h, 4h, 6h e 8h (Quadro 6). No **ANEXO II** são apresentadas as distribuições temporais das chuvas com duração de 10h, 12h, 18h, 24h, 48h, 72h, 120h, 168h e 240.

Quadro 8 - Distribuição Temporal das Chuvas (mm)

Duração	1h	2h	3h	4h	6h	8h
Tr = 10.000 anos	7,97	10,62	5,01	2,81	3,19	1,80
	25,39	33,85	17,74	10,65	12,12	7,00
	32,07	42,76	29,14	18,02	20,51	12,61
	16,53	22,04	34,93	24,86	28,29	17,52
	5,58	7,44	26,51	28,72	32,68	22,35
	2,46	3,28	14,17	25,45	28,96	26,06
			6,79	17,44	19,85	26,46
			3,48	10,48	11,93	22,87
			2,24	6,04	6,88	17,13
				3,38	3,85	11,78
				2,48	2,82	7,93
				1,67	1,91	5,18
						3,31
						2,50
					2,06	
					1,46	
Total	90	120	140	152	173	188

Fonte: Autoria própria (2019).

6.2. Curvas cota x área x volume do reservatório

As curvas cota x área x volume do reservatório foram obtidas pela Equação do Tronco de Pirâmide, dada por:

$$V = (A1 + A2 + \sqrt[3]{A1 * A2}) * \frac{Z1 - Z2}{3} \quad \text{Eq. (06)}$$

Em que: V é o volume [em m³]; A é área [em m²]; e Z é a cota [em m].

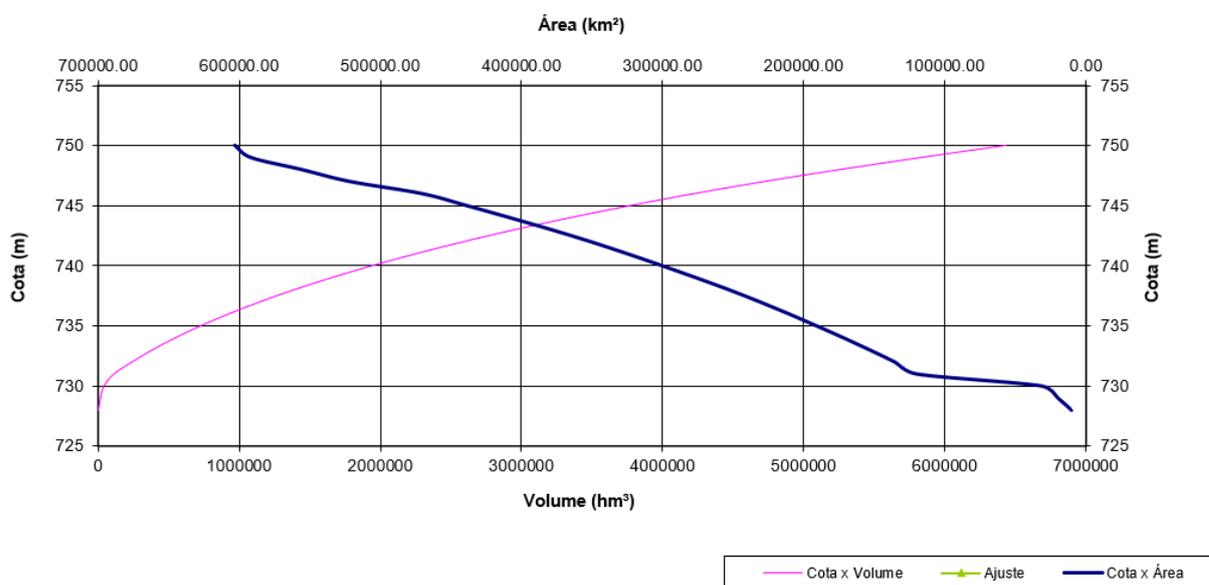
No Quadro 9 e na **Figura 13** são apresentadas as relações cota x área x volume do reservatório.

Quadro 9 - Curvas cota x área x volume.

Dados de entrada		Dados de cálculo	
Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Volume acum. (m ³)
728	9.812	0	0
729	19.306	14.294	14.294
730	30.817	24.838	39.132
731	119.527	70.345	109.477
732	135.166	127.266	236.744
733	152.837	143.911	380.655
734	171.297	161.979	542.634
735	190.594	180.860	723.494
736	210.265	200.349	923.843
737	230.932	220.518	1.144,360
738	252.714	241.741	1.386,102
739	276.018	264.280	1.650,382
740	300.064	287.957	1.938,339
741	324.927	312.413	2.250,752
742	350.894	337.827	2.588,580
743	378.823	364.769	2.953,349
744	408.387	393.512	3.346,862
745	438.884	423.544	3.770,406
746	470.653	454.676	4.225,082
747	521.583	495.900	4.720,982
748	556.089	538.744	5.259,725
749	591.981	573.941	5.833,667
750	603.164	597.564	6.431,231

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 13 - Curvas Cota x Área x Volume (barragem hipotética).



Fonte: Autoria própria (2019).

6.3. Curva de descarga do vertedor

Neste estudo, foi considerada como estrutura de saída da barragem de rejeito um vertedor tipo soleira delgada de seção retangular.

A curva de descarga deste tipo de vertedor é dada por:

$$Q = C \times L \times H^{3/2} \quad \text{Eq. (06)}$$

Em que, C é o coeficiente de descarga (adotado: 1,7); L é a largura do vertedor, em metros; e H é a diferença das cotas, em metros.

Foram consideradas larguras de vertedor de 2m, 3m e 4m, nas simulações.

Na Tabela 1 são apresentadas as curvas de descarga em função da largura do vertedor.

Tabela 1 - Curvas de Descarga do Vertedor.

Cota (m)	L = 2 m	L = 3 m	L = 4 m
	Vazão (m ³ /s)	Vazão (m ³ /s)	Vazão (m ³ /s)
747	0,00	0,00	0,00
748	3,40	5,10	6,80
749	9,62	14,42	19,223
750	17,67	26,50	35,33

Fonte: Autoria própria (2019).

Onde:

L = Largura do vertedor.

6.4. Simulações e dimensionamento do vertedor

Para o dimensionamento do vertedor foram feitas simulações considerando as larguras de 2m, 3m e 4m. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4, respectivamente.

Tabela 2 - Resultados da Simulação para a Largura de 2 metros.

Duração	Q vertedor (m ³ /s)	NA max (m)	Qafluente (m ³ /s)	Qamortecida (m ³ /s)
1 h	0,39	747,24	79,60	79,21
2 h	0,64	747,33	59,60	58,96
3 h	0,83	747,39	49,00	48,17
4 h	0,94	747,42	40,40	39,46
6 h	1,14	747,48	31,20	30,06
8 h	1,28	747,52	25,60	24,32
9 h	1,30	747,53	23,20	21,90
10 h	1,34	747,54	21,60	20,26
12 h	1,43	747,56	19,00	17,57
18 h	1,55	747,59	13,80	12,25
24h	1,60	747,61	11,10	9,50
2 dias	2,03	747,71	7,40	5,37
3 dias	2,36	747,78	6,10	3,74
5 dias	2,59	747,83	4,70	2,11
7 dias	2,61	747,84	4,00	1,39
8 dias	2,58	747,83	3,70	1,12
9 dias	2,54	747,82	3,50	0,96
10 dias	2,50	747,82	3,30	0,80
15 dias	2,34	747,78	2,70	0,36

Fonte: Autoria própria (2019).

Onde:

Q = Vazão.

Tabela 3 - Resultados da Simulação para a Largura de 3 metros.

Duração	Q vertedor (m³/s)	NA max (m)	Qafluente (m³/s)	Qamortecida (m³/s)
1 h	0,60	747,20	79,60	79,00
2 h	1,00	747,30	59,60	58,60
3 h	1,20	747,40	49,00	47,80
4 h	1,40	747,40	40,40	39,00
6 h	1,70	747,50	31,20	29,50
8 h	1,80	747,50	25,60	23,80
9 h	1,90	747,50	23,20	21,30
10 h	1,90	747,50	21,60	19,70
12 h	2,00	747,50	19,00	17,00
18 h	2,20	747,60	13,80	11,60
24h	2,20	747,60	11,10	8,90
2 dias	2,60	747,60	7,40	4,80
3 dias	3,00	747,70	6,10	3,10
5 dias	3,10	747,70	4,70	1,60
7 dias	3,00	747,70	4,00	1,00
8 dias	2,90	747,70	3,70	0,80
9 dias	2,80	747,70	3,50	0,70
10 dias	2,80	747,70	3,30	0,50
15 dias	2,50	747,60	2,70	0,20

Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 4 - Resultados da Simulação para a Largura de 4 metros.

Duração	Q vertedor (m³/s)	NA max (m)	Qafluente (m³/s)	Qamortecida (m³/s)
1 h	0,77	747,23	79,60	78,83
2 h	1,26	747,32	59,60	58,34
3 h	1,60	747,38	49,00	47,40
4 h	1,80	747,41	40,40	38,60
6 h	2,13	747,46	31,20	29,07
8 h	2,34	747,49	25,60	23,26
9 h	2,38	747,50	23,20	20,82
10 h	2,44	747,50	21,60	19,16
12 h	2,57	747,52	19,00	16,43
18 h	2,70	747,54	13,80	11,10
24h	2,72	747,54	11,10	8,38
2 dias	3,14	747,60	7,40	4,26
3 dias	3,43	747,63	6,10	2,67
5 dias	3,41	747,63	4,70	1,29
7 dias	3,23	747,61	4,00	0,77
8 dias	3,10	747,60	3,70	0,60
9 dias	3,00	747,60	3,50	0,50
10 dias	2,90	747,57	3,30	0,40
15 dias	2,56	747,52	2,70	0,14

Fonte: Autoria própria (2019).

Pode-se observar que os valores da vazão amortecida diminuem gradualmente nas três simulações, visto que a vazão amortecida é a que fica armazenada no reservatório e quando se chega no limite de armazenamento a água irá verter. Nota-se que a menor vazão vertida foi para a simulação em vertedor de 2 metros de largura, enquanto que o NA máximo da água foi maior que as demais simulações.

Na Tabela 5 são apresentados os valores da borda livre, considerando as diferentes larguras do vertedor.

Tabela 5 - Valores da borda livre.

Largura do vertedor (m)	Cota da crista da barragem (m)	NA max vertedor (m)	Borda livre (m)
2	749,00	747,84	1,16
3	749,00	747,70	1,30
4	749,00	747,63	1,37

Fonte: Autoria própria (2019).

Segundo ELETROBRÁS (2003), recomenda-se que a borda livre seja de no mínimo 1,0 m em maciços de terra ou enrocamento, considerando a passagem da decamilenar (período de retorno igual a dez mil anos). Dessa forma, o vertedor de largura de 2,0 m apresenta-se como viável técnica e economicamente.

7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE FUTUROS TRABALHOS

Esta pesquisa apresenta o estudo hidráulico de uma barragem hipotética de rejeitos, utilizando um vertedor tipo soleira delgada, de seção retangular, como estrutura de saída. Realizaram-se simulações, utilizando o programa HEC-HMS, de forma a dimensionar o vertedor, considerando um período de retorno de 10.000 anos e diversas durações de chuva.

Foram realizadas simulações para vertedores variando a largura da soleira em 2, 3 e 4 metros. Através das simulações feitas por meio da modelagem hidrológica-hidráulica, utilizando o software HEC-HMS, foram obtidos diferentes valores de vazões efluentes, bem como alturas de borda livre no vertedor. ELETROBRÁS (2003) recomenda que a borda livre mínima, em barragens com maciço de terra ou enrocamento, para a segurança do projeto, seja de 1,0 metro. Desta forma, os resultados obtidos apontam que todas as simulações se enquadraram nesse critério, pois apresentaram valores maiores que 1 metro.

Após as simulações e análises, definiu-se como mais vantajoso o vertedor de largura 2 metros, visto que dentre os outros foi o que se apresentou mais viável econômica e tecnicamente, pois respeita o critério técnico de borda livre, e, por ter a largura menor, possivelmente apresentará menor custo de investimento em obras de construção e manutenção que os demais.

Para futuros trabalhos, propõe-se a continuação dos estudos para um sistema extravasor completo, englobando todos seus elementos: canal de restituição, bacia de dissipação, drenos de fundo, etc, de forma a se generalizar e simplificar a metodologia de projeto de dimensionamento de sistemas extravasores de emergência em barragens rejeito de mineração. O vertedor é uma estrutura vital para o funcionamento do sistema, mas cabe ressaltar que não basta o dimensionamento adequado deste, sendo fundamental o projeto do sistema extravasor por completo.

Sugere-se em projeto de pesquisa o desenvolvimento de metodologias e sistemas que possibilitem que de forma automatizada, a partir da inserção da coordenada geográfica de um ponto central do barramento, permita obter vazões com tempo de retorno previamente definidos e as dimensões dos sistemas extravasores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual do Empreendedor sobre segurança de barragens**. 7 ed. Brasília: ANA, 2016. 117 p.

ARAÚJO, Cecília Bheringde. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

ASSIS, A; ESPÓSITO, T. **Construção de barragens de rejeitos sob uma visão geotécnica**. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS - REGEO, 3., 1995, Ouro Preto, **Anais**. Ouro Preto: ABMS/ABGE/CBGB, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-13028**: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos. Rio de Janeiro: Abnt, 2017. 16 p.

BACCI, Denise de La Corte; LANDIM, Paulo Milton Barbosa; ESTON, Sérgio Médici de. **Aspectos e impactos ambientais de pedreira em área urbana**. Rem: Rev. Esc. Minas., Ouro Preto, v. 59, n. 1, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br> . Acesso em: 10 Nov 2018.

BOWKER, L.; CHAMBERS, D. The risk, public liability & economics of tailings storage facility failures. **ResearchPaper**. Stonington, ME, 2015.

BRASIL. Constituição (1990). **Decreto nº 99274**, de 06 de junho de 1990. Brasília, DF, Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=328>>. Acesso em: 18 nov. 2018.

BRASIL. Constituição (1981). Lei nº 6938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.. **Política Nacional do Meio Ambiente**. Brasília, DF,

BRASIL. Instituto Brasileiro De Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração**. Brasília, 2016.

BRASIL. Lei Federal nº 12.234, de 2010. Instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 21 set. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm>. Acesso em: 05 out. 2018.

BROWN, David. et al. **501 Desastres mais devastadores de todos os tempos**. Trad. Catharina Pinheiro. 1ª edição brasileira. São Paulo: Editora Lafonte, 2012.

CARVALHO, Larissa Soares. **Análise do comportamento hidráulico da caixa de transição de sistema extravasor em encosta por meio de modelo hidráulico reduzido**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2016.

CASTRO, Leandro Vida Pinheiro de. **Avaliação do Comportamento do Nível D'água em Barragem de Contenção de Rejeito Alteada a Montante**. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2008.

COLLISCHONN, Walter; TASSI, Rutineia. **Introduzindo hidrologia: Volume de escoamento: método SCS**. Ed. da Universidade: IPH – UFRGS. p. 60-61 (Versão 5). 2008. 155 p.

COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS. **Perspectivas do Meio Ambiente do Brasil – Uso do Subsolo**. MME - Ministério de Minas e Energia, 2002. Disponível em www.cprm.gov.br. Acesso em 18 Nov 2018.

Department of Industry, Tourism and Resources – DITR – Australian Government. **Tailings Management – Leading Practice Sustainable Development Program for the mining Industry**. Australia, 2007. 73 p.

DUARTE, Anderson Pires. **CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO E DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NO ESTADO DE MINAS GERAIS EM RELAÇÃO AO POTENCIAL DE RISCO**. 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ELETROBRÁS. **Critérios de projeto civil em Usina Hidrelétricas**. Brasil, 2003. 277 p.

FARIAS, Carlos Eugênio Gomes. **Mineração e meio ambiente no Brasil**. Relatório Preparatório para o CCGE/Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento

PNUD. Contrato 2002. Disponível em: http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo011_02.pdf>. Acesso em: 17 out. 2018.

FERREIRA, Manoela Gomes de Braga. **ANÁLISE REGIONAL DA DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DE PRECIPITAÇÕES SUB DIÁRIAS PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS**. 2015. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Ufmg, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

FRANCA, M. **Caracterização e modelação numérica e experimental da ruptura provocada por galgamento de barragens de enrocamento**. 2002. Tese de Doutorado. INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO.

GERMANY, Darcy José. **A mineração no Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2002. 48 p.

IBAMA. O estado dos solos. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2006. Disponível em: <http://www2.ibama.gov.br/~geobr/Livro/cap2/subsolos.pdf>. Acesso em: 18 Nov 2018.

KLOHN, E. J. **The development of current tailing dam design and construction methods**, In: Design and Construction of Tailing Dams, D. Wilson (ed.), Colorado School of Mines: Golden – USA, 1981.

LINS, Fernando Antônio de Freitas. **Brasil 500 anos – a construção do Brasil e da América Latina: histórico, atualidade e perspectivas**/F. A. F. Lins, F. E. V. Lápido Loureiro, G. A. A. Sá Cavalcanti de Albuquerque. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2000. 254 p.

MANCIN, Rinaldo César. **Estagnação das pesquisas na área gera expectativas negativas**. 2012. Disponível em: <http://www.sebrae-sc.com.br/ideais/default.asp?vcdtexto=2820> >. Acesso em: 18 out. 2018

MINAS GERAIS (Estado). Deliberação Normativa nº 62, de 17 de dezembro de 2002. **Dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais**. DN COPAM 62/2002. Belo Horizonte, MG.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (Brasília). Ibama. Wilfred Brandt. **LICENCIAMENTO AMBIENTAL FEDERAL: MANUAL DE NORMAS E PROCEDIMENTOS PARA LICENCIAMENTO AMBIENTAL NO SETOR DE EXTRAÇÃO MINERAL**, 2001.

OLIVEIRA, José Bernardo Vasconcelos de. **Manual de operação de barragens de contenção de rejeitos como requisito essencial ao gerenciamento dos rejeitos e à segurança de barragens**. Ouro Preto, MG. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, NUGEO, 2010.

PONTES, Paulo RM et al. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 888-904, 2015.

SANTOS, Juliano Böeck. **MODELAGEM HIDROLÓGICA HEC-HMS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO LAVAPÉS, BOTUCATU-SP**. 2017. 80 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, Botucatu, 2017.

SILVA, João Paulo Souza. Impactos ambientais causados por mineração. **Revista Espaço da Sophia**, Brasília, v. 8, n. 1, p.1-13, nov. 2007. Mensal.

SOARES, Lindolfo. **Barragem de Rejeitos**. Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, 2010.

TOMAZ, Plínio. Método do SCS. In: TOMAZ, Plínio. **Curso de Manejo de águas pluviais**. Guarulhos: 2013. Cap. 38. p. 1-26.

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

TUCCI, Carlos E. M.. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 3. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1993. 943 p.

TURELLA, Débora Saccaro. **Critérios de dimensionamento para bacia de dissipação por ressalto hidráulico tipo I**. 2010. Disponível em: < <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/26027>>. Acesso em 5 Mai 2019.

VIEIRA, E. et. al. **Exploração Mineral de Areia e um Meio Ambiente Ecológicamente Equilibrado: É possível conciliar?** 6. ed. Brasília: Sustentabilidade em Debate, 2015. 22 p.

WAGNER, A. et. al. A eleição presidencial e a mineração. **Gazeta Mercantil**. São Paulo, 2002. p. A3.

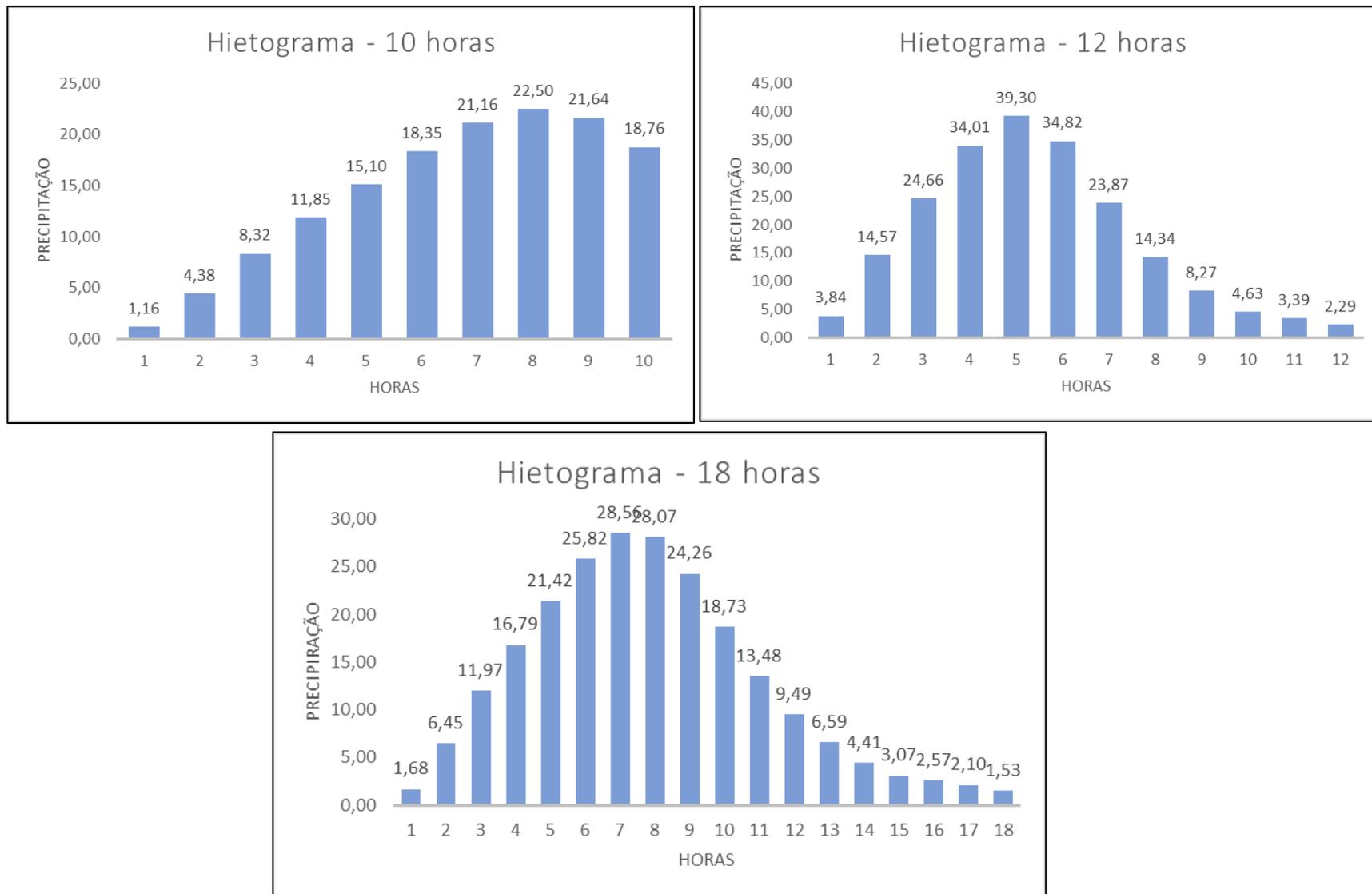
ANEXO I – BARRAGEM DE REJEITO HIPOTÉTICA

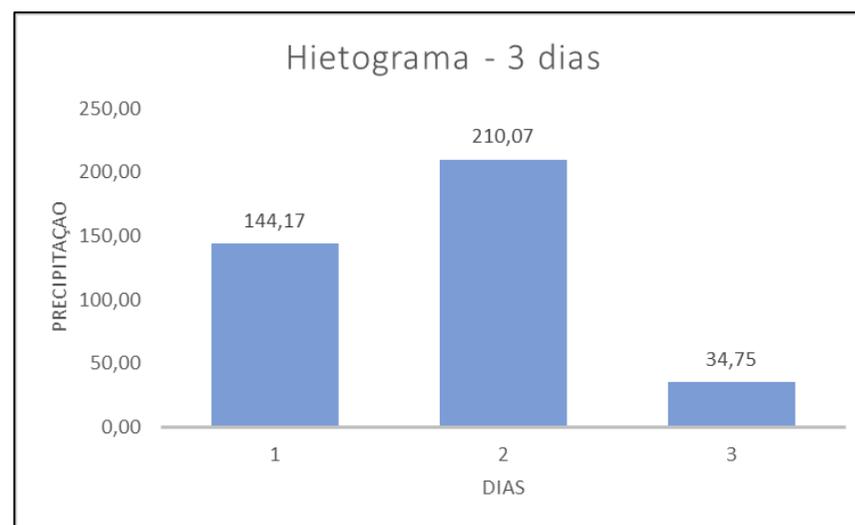
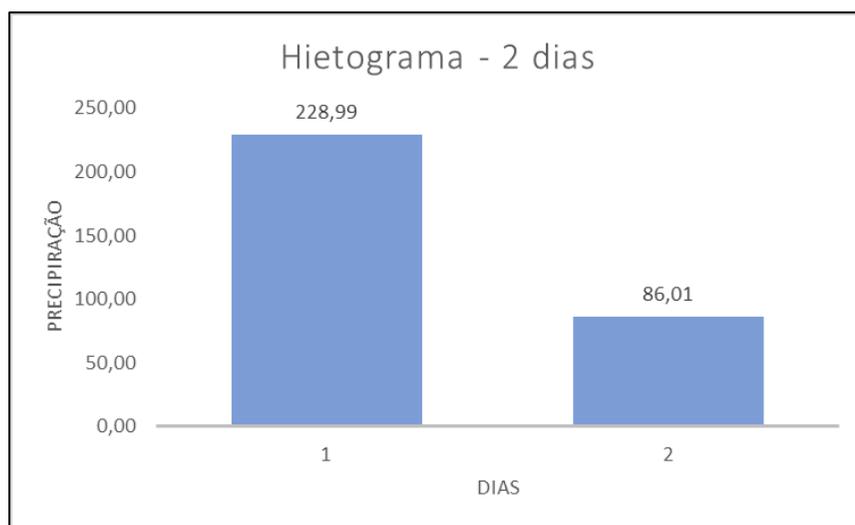
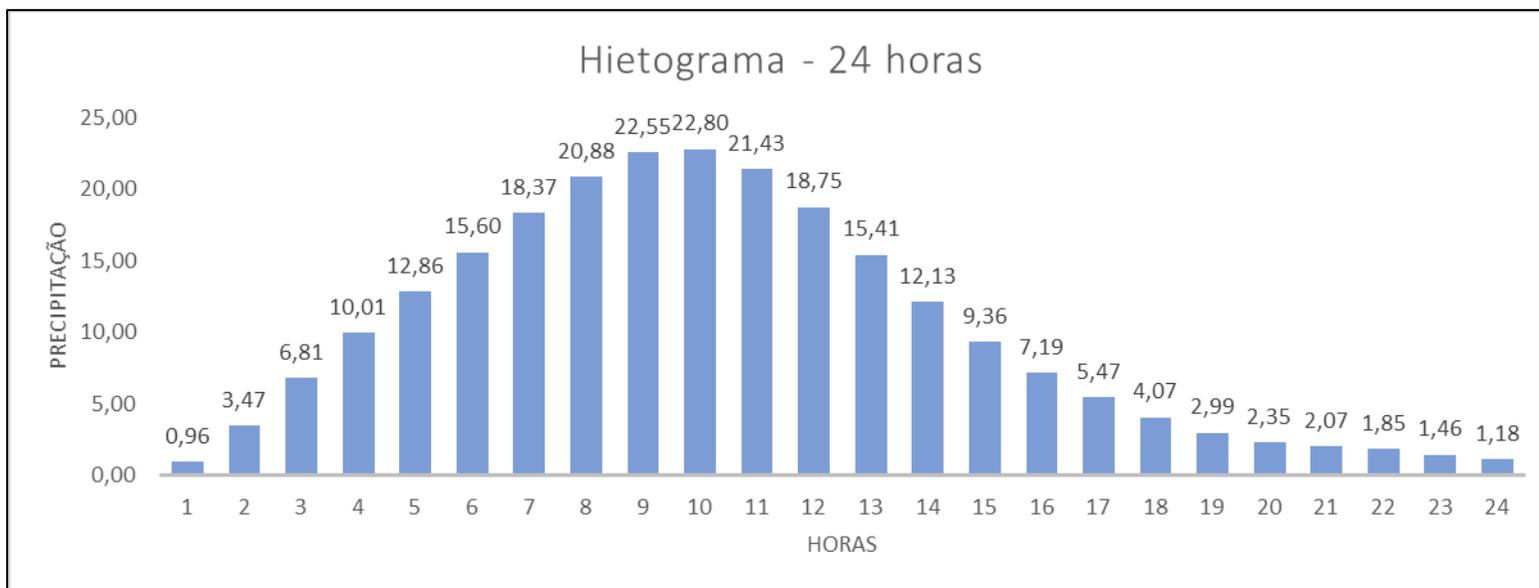
— Curvas de nível de 5 metros

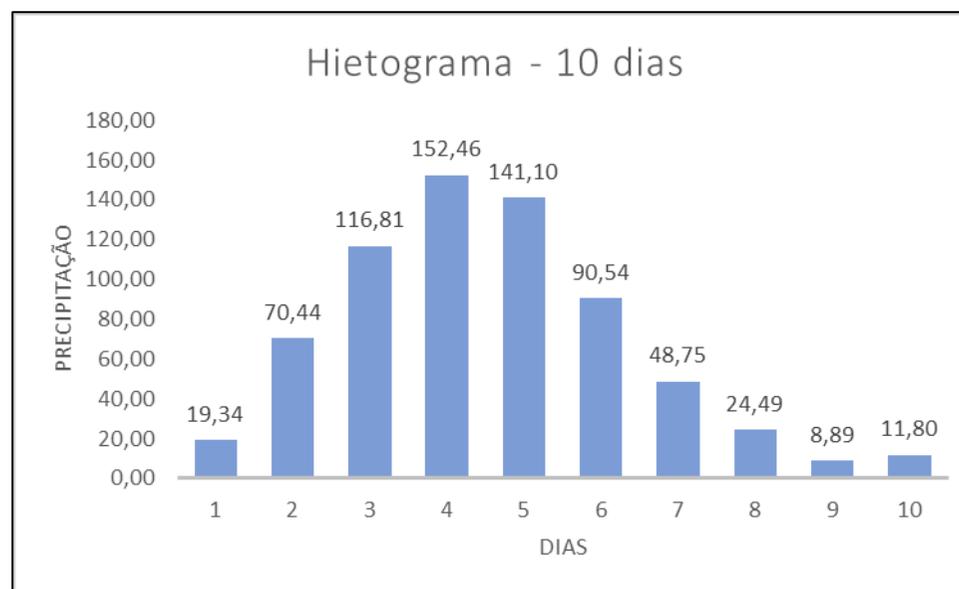
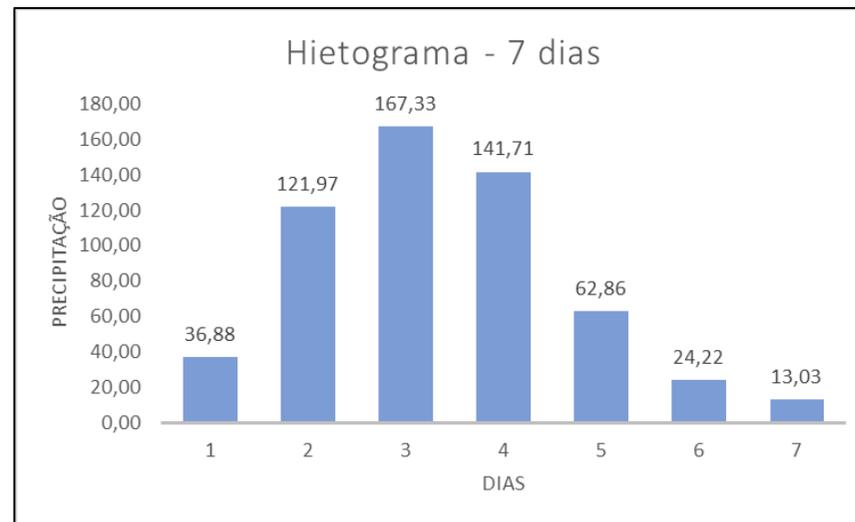
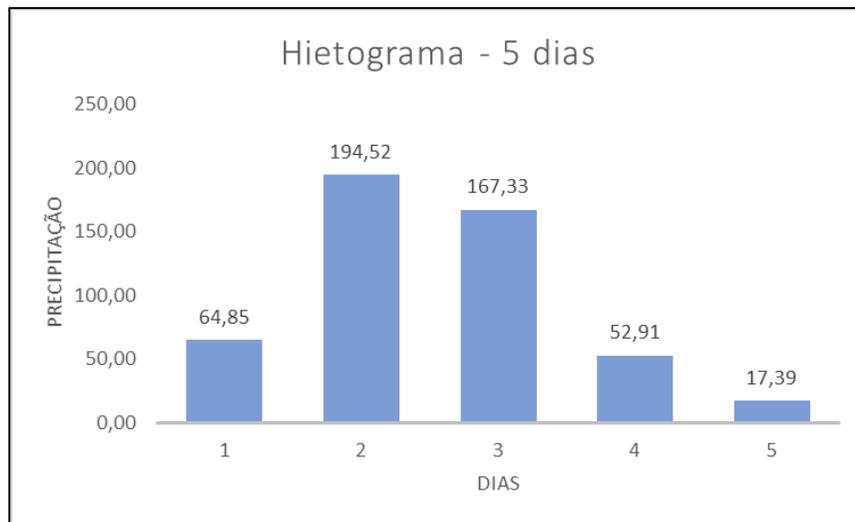


Curva de nível	Cota (m)
1	728
2	729
3	730
4	731
5	732
6	733
7	734
8	735
9	736
10	737
11	738
12	739
13	740
14	741
15	742
16	743
17	744
18	745
19	746
20	747
21	748
22	749
23	750
24	751
25	752
26	753
27	754
28	755
29	756

ANEXO II – DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DAS CHUVAS DO PROJETO (mm)







Fonte: Autoria própria.