



**FACULDADE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS
DE CONSELHEIRO LAFAIETE**

ENGENHARIA CIVIL

WILLIAM DAVI JUNIOR PINTO

Pré-dimensionamento de uma barragem de terra

**Conselheiro Lafaiete
2021**

WILLIAM DAVI JUNIOR PINTO

Pré-dimensionamento de uma barragem de terra

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Faculdade Presidente Antônio Carlos de Conselheiro Lafaiete, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Tatiana Aparecida Rodrigues

**Conselheiro Lafaiete
2021**

WILLIAM DAVI JUNIOR PINTO

Pré-dimensionamento de uma barragem de terra

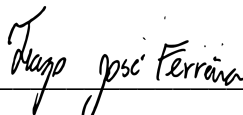
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade Presidente Antônio Carlos de Conselheiro Lafaiete, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 02 de dezembro de 2021

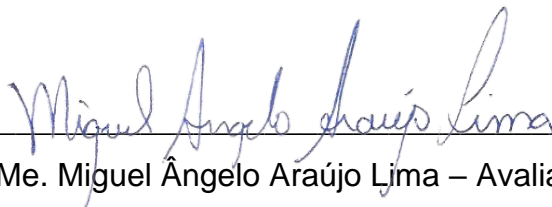
BANCA EXAMINADORA



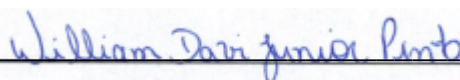
Prof. Ma. Tatiana Aparecida Rodrigues – Orientador – FUPAC



Prof. Me. Tiago José Ferreira – Avaliador – FUPAC



Prof. Me. Miguel Ângelo Araújo Lima – Avaliador – FUPAC



William Davi Junior Pinto – Aluno - FUPAC

**Conselheiro Lafaiete
2021**

Dedicatória: Dedico este trabalho primeiramente a Deus e a Nossa Senhora de Aparecida, a minha mãe Gloria e minha irmãs Rosiana e Roseni por toda dedicação e compreensão ao longo do curso e pelo incentivo à realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus e a Nossa Senhora de Aparecida, pela força e perseverança durante o curso e pela vitória de me formar como Engenheiro Civil.

A minha orientadora e Prof.^a Ma. Tatiana Aparecida Rodrigues, pelo apoio e incentivo a minha pesquisa e pela oportunidade de poder desfrutar um pouco de seus conhecimentos.

Aos amigos da Farmácia João Paulo II, pela parceria, compreensão e paciência.

A minha mãe Gloria e minhas irmãs Roseni e Rosiana, por todo o carinho, dedicação e esforço pela concretização de um sonho que hoje podemos desfrutar juntos.

A todos os meus colegas de sala: pelos momentos que passamos juntos nesses cinco anos; pelas agradáveis lembranças que nunca sairão do meu coração e pela eterna amizade consolidada entre todos nós.

Finalmente, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão desta pesquisa.

Desconfie do destino e acredite em você. Gaste mais horas realizando que sonhando, fazendo que planejando, vivendo que esperando porque, embora quem quase morre esteja vivo, quem quase vive já morreu.

Sarah Westphal

RESUMO

O trabalho apresentado busca agrupar os dados referentes as barragens brasileiras, trazendo os principais tipos existentes com dados atuais. O objetivo é disponibilizar material recente de estudo para comunidade acadêmica interessada, com análise de documentos oficiais de órgãos brasileiros e de controle, materiais estrangeiros e, por fim, faz um pré-dimensionamento de uma barragem de terra em local real escolhido pelo acadêmico após pesquisa por GPS. Utiliza-se de pesquisa bibliográfica de fontes confiáveis, como livros, artigos científicos, websites, cursos online, revistas e notas de aulas de outras instituições. O uso de barragens no Brasil é essencial para o desenvolvimento regional e nacional. Com as técnicas e normas existentes, é possível projetar e executar qualquer tipo de barragem com qualquer tipo de construção adequada ao seu tipo sem abrir mão da segurança. Desde que acompanhada por profissional de engenharia civil qualificado para tal e com estudos necessários para a realização do empreendimento. Barragens são estruturas seguras e vitais para o desenvolvimento da agricultura, pecuária e indústria do país e por isso deve-se desenvolver uma cultura de profissionais especializados na realização desse tipo de obra.

Palavras-chave: Barragem. Terra. Dimensionamento. Engenharia. Geotecnia.

ABSTRACT

The presented work seeks to group the data concerning Brazilian dams, bringing together the main existing types with current data. The objective is to make available recent study material for the interested academic community, with analysis of official documents from Brazilian and control agencies, foreign materials and, finally, makes a pre-dimensioning of an earth dam in a real location chosen by the academic after research by GPS. It uses bibliographic research from reliable sources, such as books, scientific articles, websites, online courses, magazines and class notes from other institutions. The use of dams in Brazil is essential for regional and national development. With the existing techniques and norms, it is possible to design and execute any type of dam with any type of construction suitable for its type without giving up safety. As long as it is accompanied by a qualified civil engineering professional and with the necessary studies for the undertaking. Dams are safe and vital structures for the development of agriculture, livestock and industry in the country and therefore a culture of specialized professionals should be developed for this type of work.

Keywords: Dam. Earth. Dimensioning. engineering. Geotechnics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Imagem aérea da barragem da usina de Itaipu	19
Figura 2 - Gráfico retirado através de planilha eletrônica do relatório de segurança	21
Figura 3 - Barragem de Marzagão	23
Figura 4 - Barragem de gravidade.....	24
Figura 5 - Barragem de concreto de gravidade aliviada.....	25
Figura 6 – Barragem em contraforte Roselend Dam.....	25
Figura 7 - Barragem Aldeadavila dam in international douro natural park.....	26
Figura 8 - Barragem de concreto compactado	27
Figura 9 - Tipos de barragens de enrocamento	28
Figura 10 - Barragem I, com vistas ao norte	30
Figura 11 - Vista aérea do rompimento da Barragem 1, em direção ao norte.....	30
Figura 12 - Mapa do Brasil, pontos extremos e fronteiras.....	34
Figura 13 - Vista da ombreira direita	43
Figura 14 - Vista da ombreira esquerda	43
Figura 15- Vista da área de inundação	44
Figura 16 - Eixo da barragem.....	44
Figura 17 - Localização do vertedouro	45
Figura 18 - Traçado do rio.....	45
Figura 19 - Projeto barragem	46
Figura 20 - Atividades no entorno da barragem	47
Figura 21 - Exemplo de mapa topográfico	48
Figura 22 - Limite do lago.....	49
Figura 23 - Valor de folga em relação ao Fetch	51
Figura 24 - Inclinações de Taludes de Barragens Homogêneas.....	54
Figura 25 - Espessura mínima do enrocamento.....	55
Figura 26 - Taludes após proteções.....	56
Figura 27 - Esquema do experimento de Darcy	57
Figura 28 - Coeficientes de permeabilidade do solo	58
Figura 29 - Tabela para verificação de piping	58
Figura 30 - Representação do córrego.....	59
Figura 31 - Coeficiente n	60

Figura 32 - Representação do canal extravasor.....	61
Figura 33 - Representação do sistema de descarga de fundo	62
Figura 34 - Corte transversal do sistema RepresaXDescarregador de fundo	62
Figura 35 - Valores de Cd em relação a carga recebida pelo descarregador	63
Figura 36 - Vista geométrica da barragem	66
Figura 37 - Espessura mínima do enrocamento.....	66
Figura 38 - Taludes após proteções.....	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Reservas mundiais de minério de ferro em 2013.....	32
Gráfico 2 – Maiores produtores de minério de ferro do mundo no ano de 2001.....	33
Gráfico 3 – Tipos de materiais mais utilizados nas barragens do Brasil.....	35
Gráfico 4 – Distribuição de barragens pelo Brasil.....	36
Gráfico 5 – Função das barragens do Sul do Brasil.....	37
Gráfico 6 – Função das barragens do Nordeste do Brasil.....	38
Gráfico 7 – Função das barragens do Norte do Brasil.....	39
Gráfico 8 - Função das barragens do Centro-oeste do Brasil.....	40
Gráfico 9 - Função das barragens do Sudeste do Brasil.....	41
Gráfico 10 - Velocidade média máxima anual de ventos em Minas Gerais.....	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Questionário aplicado a moradores sobre barragens.....	47
---	----

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Resultados obtidos para o pré-dimensionamento da barragem	65
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANM	Agência Nacional de Mineração
CCR	Concreto Compactado com Rolo
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
FUPAC	Faculdade Presidente Antônio Carlos
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MG	Minas Gerais
NBR	Norma técnica brasileira
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
RSB	Relatório de Segurança de Barragens
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 BARRAGENS.....	19
2.1.1 SOBRE O RELATÓRIO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS	21
2.2 TIPO DE BARRAGENS.....	22
2.2.1 Barragens de terra	22
2.2.1.1 Barragem de terra homogênea	23
2.2.1.2 Barragem de terra zoneada.....	23
2.2.2 Barragens de concreto	23
2.2.2.1 Barragem de concreto gravidade	23
2.2.2.2 Barragem de concreto de gravidade aliviada	24
2.2.2.3 Barragem em contraforte.....	25
2.2.2.4 Barragem de concreto abóbada	25
2.2.2.5 Barragem de concreto compactado	26
2.2.3 Barragens de enrocamento	27
2.2.3.1 Barragem de enrocamento com núcleo impermeável	27
2.2.3.2 Barragem de enrocamento face impermeável.....	27
2.2.4 Barragem Mista	28
2.3 JUSTIFICATIVAS PARA ESCOLHA DO TIPO DE BARRAGEM	28
2.4 ESTUDO PRELIMINARES	28
2.4.1 Estudo topográfico	28
2.4.2 Geologia	29
2.4.3 Hidrologia	29
2.5 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA.....	29
2.6 ACIDENTES E INCIDENTES DE BARRAGENS NO BRASIL	29
2.6.1 Rompimento da barragem de Brumadinho	29
2.6.1.1 Histórico	29
2.6.1.2 Causas do rompimento	31
2.7 PANORAMA DAS BARRAGENS BRASILEIRAS.....	31

2.7.1 Panorama brasileiro	33
2.7.1.1 Panorama brasileiro – Região Sul	36
2.7.1.2 Panorama brasileiro – Região Nordeste.....	37
2.7.1.3 Panorama brasileiro – Região Norte	38
2.7.1.4 Panorama brasileiro – Região Centro-oeste	39
2.7.1.5 Panorama brasileiro – Região Sudeste	40
3 METODOLOGIA	42
3.1 ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA.....	42
3.2 DADOS OBTIDOS IN-LOCO E GPS DA REGIÃO DE LOCAÇÃO DA BARRAGEM	42
3.2.1 Localização	42
3.3 ENTREVISTAS	46
3.4 JUSTIFICATIVA DA BARRAGEM NO LOCAL.....	47
3.5 PROCESSOS UTILIZADOS NO DIMENSIONAMENTO.....	48
3.5.1 Curva de nível	48
3.5.2 Cálculo de altura de onda	48
3.5.3 Cálculo da velocidade de onda	50
3.5.4 Cálculo da folga	50
3.5.5 Definição da altura da lâmina do vertedouro	51
3.5.6 Definição do nível do reservatório	51
3.5.7 Cota da soleira	51
3.5.8 Cota máxima da barragem	52
3.5.9 Cálculo de altura da barragem	52
3.5.10 Cálculo de largura de crista	52
3.5.11 Cálculo do nível mínimo de água	53
3.5.12 Cálculo do tamanho dos taludes	53
3.5.12.1 Para talude a montante	54
3.5.12.2 Para talude a jusante.....	54
3.5.13 Cálculo da base da barragem	55
3.5.14 Proteção dos taludes	55
3.5.15 Proteção do coroamento	56
3.5.16 Cálculo de vazão pela barragem	56
3.5.17 Cálculo de proteção contra pipping	58
3.5.18 Cálculo de vazão do rio que alimenta o reservatório da barragem	59

3.5.19 Cálculo do extravasora	60
3.5.20 Cálculo da descarga de fundo	61
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	64
4.1 CURVA DE NÍVEL	64
4.2 DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DOS MÉTODOS DO CAPÍTULO 3.....	64
4.3 PROTEÇÃO DOS TALUDES E COROAMENTO.....	66
4.3.1 Proteção dos taludes – talude de montante	66
4.3.2 Proteção dos taludes – talude de jusante	67
4.3.3 Proteção do coroamento	67
5 CONCLUSÃO	68
REFERÊNCIAS	70
ANEXO I – RESULTADO DAS EQUAÇÕES	73

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Mello (2011), a primeira barragem que se tem notícia no Brasil é descrita em um mapa holandês do final do século XVI da cidade de Recife-PE. Queiroz (2009), afirma que de uma forma geral, barragens são obras de engenharia civil constituídas por estruturas projetadas e construídas com a finalidade de acumular água e resíduos líquidos ou sólidos.

Da geração de energia elétrica à exploração ambiental, as barragens estão presentes na paisagem, impactando o ecossistema em que estão inseridas. Sua construção visa aproveitar ao máximo os recursos ambientais disponíveis, assim como destinar possíveis rejeitos gerados por atividades de exploração ambiental. Utilizam-se de estruturas de contenção que possuem a função de reter materiais sólidos afluentes ou um reservatório hídrico que pode ser utilizado para diversos fins: produção de energia elétrica, fornecimento de água às populações, etc. (COSTA, 2016).

Os acidentes das barragens de Mariana-MG e Brumadinho-MG, ocorridos em novembro de 2015 e janeiro de 2019, respectivamente, acenderam o debate sobre a segurança das barragens no Brasil. Tornando-o necessário (FONSECA, 2019).

Cada categoria de barragem pode ter um ou mais métodos de construção, geralmente escolhido segundo as limitações orçamentárias, utilização, viabilidade técnica, impacto ambiental, etc. Nas técnicas de construção de barragens, destacamos: método de montante, método de jusante, método de linha de centro, enrocamento e gravidade (COSTA, 2016).

Os órgãos responsáveis pelas barragens brasileiras são definidos de acordo com a finalidade, sendo assim, barragens com fins de acumulação de água são de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA), para fins de geração de energia elétrica a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), para disposição final ou temporária de rejeitos de mineração a Agência Nacional de Mineração (ANM) e em todos os casos são sujeitas a fiscalização do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) (ASSESSORIA DE COMUNICAÇÃO SOCIAL – ASCOM, 2019).

No Brasil, existem cerca de vinte e um mil e novecentos e cinquenta barragens, segundo relatório de segurança de barragens, do ano de 2019, elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA), órgão do governo federal. Nas mais utilizadas no

território brasileiro, podemos citar: barragens de terra, barragens de rejeitos, barragens enrocamento com face de concreto e barragens de concreto por gravidade.

É necessário então, contrapor cada categoria de barragem existente em nosso país, com abordagem técnica, explicativa e sucinta. O histórico recente em relação às barragens exige essa abordagem.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo da pesquisa é realizar o pré-dimensionamento de uma barragem de terra.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Analisar, através de planilhas eletrônicas oficiais de órgãos competentes, a quantidade de barragens, sua categoria e sua distribuição pelo país;
- b) Analisar, através de documentos de viabilidade técnica, as principais justificativas para a escolha da categoria de barragem e o(s) método(s) de construção;
- c) Realizar entrevista *in-loco* com possíveis beneficiados pela construção de uma barragem;
- d) Coleta de dados *in-loco*.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BARRAGENS

De acordo com Queiroz (2018), barragens são obras de engenharia civil constituídas de estruturas projetadas e construídas com a finalidade de acumular água, resíduos líquidos ou sólidos, proteção contra enchentes e etc. São geralmente aterros artificiais de seção trapezoidal construídos em um vale para o acúmulo de água.

Como características básicas, essas estruturas têm de ser impermeáveis e seguras o bastante para evitar a perda excessiva de água, de tal forma que possa gerar acúmulo, com a formação de um lago artificial a montante (QUEIROZ, 2018). A Figura 1, apresenta fotografia aérea da Usina Itaipu Binacional, que teve construção iniciada em 1974.

Figura 1 - Imagem aérea da barragem da usina de Itaipu



Fonte: Alexandre Marchetti/IB, 2020

Para Costa (2016), o projeto de uma barragem envolve aspectos muito diversificados, sobretudo por abranger fatores de natureza bastante distinta quando considerados em função do aspecto focado: obra propriamente dita ou ambiente em que a obra será inserida.

A obra exige que alguns fatores sejam levados em consideração:

- a) Objetivo da obra;

- b) Tipo de barragem;
- c) Características do dimensionamento;
- d) Métodos construtivos empregados;
- e) Custos;
- f) Geologia e geotecnia;
- g) Impactos ambientais;
- h) Clima e recursos hídricos.

As barragens podem ser construídas com diversos tipos de materiais, como concreto ciclópico, concreto armado, concreto compactado com rolo (CCR), gabiões, pedra argamassada, enrocamento e solos compactados (COSTA, 2016).

Os principais componentes de uma barragem convencional são a estrutura de retenção ou barramento, a sua fundação e as ombreiras, a zona vizinha a jusante, as estruturas extravasoras, as estruturas de adução e o reservatório (RELATÓRIO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS 2019, 2020).

O projeto e a construção de barragens exigem estudos ambientais, hidrológicos, geológicos e geotécnicos detalhados, além de concepção e execução rigorosa, pois uma falha no projeto ou construção implica grandes perdas materiais e de vidas. É um tipo de construção que exige engenheiros civis especialistas, com profundos conhecimentos na área de geotecnia, principalmente em mecânica dos solos, e nas áreas de hidráulica, hidrologia, drenagem e estruturas, além de geólogos de engenharia especializados, que dão suporte quanto à geologia da área (QUEIROZ, 2018).

Podemos dividir as barragens de acordo com o seu objetivo:

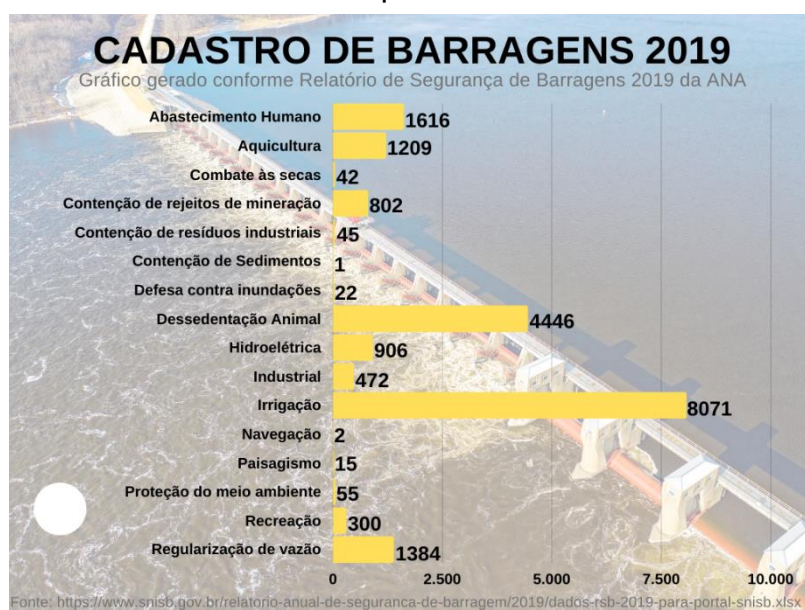
- a) Barragens de regularização: objetivam a regularização do regime hidrológico de um rio, gerenciando seu volume hídrico de acordo com fatores climáticos e/ou criando lagos artificiais destinados a geração de energia elétrica e atividades de piscicultura (COSTA, 2016);
- b) Barragens de contenção: objetivam reter água e sedimentos oriundos de atividades industriais ou rejeitos de mineração. Quando retêm água, amortecem ondas de enchentes, evitando inundações e liberando o montante hídrico de forma a evitar danos. Quando retém cargas sólidas ou mista, evitam que os materiais retidos poluem o meio ambiente (COSTA, 2016).

No Brasil, com a aprovação da Lei 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, a Agência Nacional de Águas e Saneamento

Básico (ANA), passou a ser a responsável pela fiscalização da segurança das barragens por ela outorgadas, em geral barramentos para usos múltiplos, e pela criação e constituição do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS, 2016).

Atualmente estão cadastradas no SNISB, 19.388 barragens, das quais 82% possuem informação de capacidade, 44% de altura, e 45% possuem ato de autorização, outorga ou licenciamento. Do total de barragens cadastradas, sabe-se que 5.285 se submetem à Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB, e 2.336 não são submetidas à PNSB. As demais, que totalizam 61% das barragens cadastradas, não possuem informações suficientes para definir se a barragem é ou não submetida à PNSB, fato preocupante, que persiste ano após ano (RELATÓRIO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS 2019, 2020). A Figura 2 representa dados sobre barragens no Brasil.

Figura 2 - Gráfico retirado através de planilha eletrônica do relatório de segurança



Fonte: Planilha de Excel do Relatório de Segurança de Barragens 2019, 2020

2.1.1 Sobre o Relatório de Segurança de Barragens

Seus objetivos são apresentar à sociedade um panorama da evolução da segurança das barragens brasileiras, da implementação da PNSB, apontar diretrizes para a atuação de fiscalizadores e empreendedores de barragem e para a atuação da Defesa Civil, e destacar os principais acontecimentos no ano (RELATÓRIO DE

SEGURANÇA DE BARRAGENS 2019, 2020). No âmbito da PNSB, o RSB é elaborado, anualmente, sob a coordenação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que se baseia em informações enviadas pelas 33 entidades fiscalizadoras de segurança de barragens. Posteriormente, a ANA enviou o Relatório ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), para apreciação. Em seguida, o CNRH o envia ao Congresso Nacional (RELATÓRIO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS 2019, 2020).

Também compõem este Relatório uma planilha com as informações utilizadas como base para elaboração deste documento, contendo o cadastro das barragens dos fiscalizadores, uma tabela resumo com as informações organizadas por cada entidade fiscalizadora, a lista de barragens classificada como Categoria de Risco Alto, os cursos de capacitação realizados e os recursos públicos nas esferas federal e estadual (RELATÓRIO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS 2019, 2020).

2.2 TIPO DE BARRAGENS

2.2.1 Barragens de terra

De acordo com Quintas (2002), são consideradas barragens de terra aquelas cuja estrutura é constituída fundamentalmente por terra.

É um dos tipos mais comuns encontrados no Brasil, podendo-se construir barragens de terra apoiadas sobre solos moles, já que tolera fundações mais deformáveis (MASSAD, 2003). A Figura 3 representa a barragem de Marzagão, localizada em Minas Gerais.

Figura 3 - Barragem de Marzagão



Fonte: Revista Brasil Mineral, 2017

Um dos problemas que mais preocupam o projetista é o *piping* ou erosão regressiva tubular, no próprio corpo da barragem ou nas suas fundações. Ocorre quando há carreamento de partículas de solo pela água em fluxo, numa progressão de jusante para montante, podendo formar um tubo de erosão, que pode evoluir para cavidades relativamente grandes no corpo das barragens, levando-as ao colapso (MASSAD, 2003).

2.2.1.1 Barragem de terra homogênea

Segundo Marangon (2004), são aquelas compostas de um único tipo de solo, exceto na proteção de taludes, já que nesse caso é necessária impermeabilidade superior.

2.2.1.2 Barragem de terra zoneada

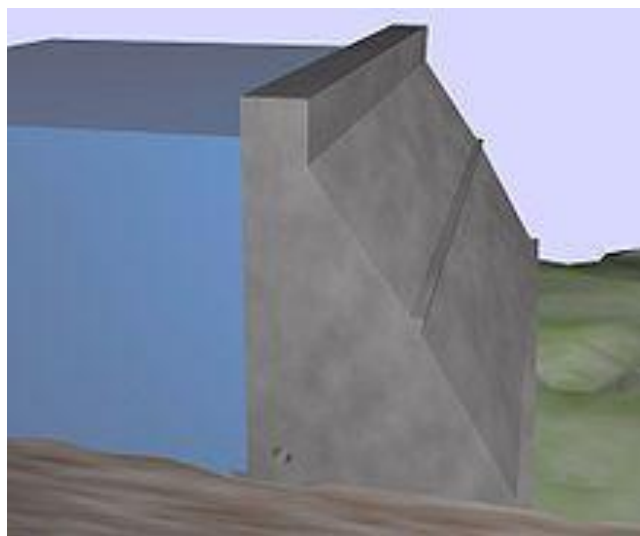
De acordo com Massad (2003), barragem de terra zoneada, são construídas com um único solo de empréstimo, mas compactado em condições diferentes de umidade, o que confere ao solo características geotécnicas diferentes.

2.2.2 Barragens de concreto

2.2.2.1 Barragem de concreto gravidade

Também conhecida como barragem de concreto massa, Costa (2016) descreve esse tipo de barragem como maciça, com pouca armadura. Sua característica física é ter uma estrutura que trabalha com compressão, podendo ter seu traçado retilíneo ou em curva. A Figura 4, traz a esquematização de uma barragem de concreto por gravidade.

Figura 4 - Barragem de gravidade



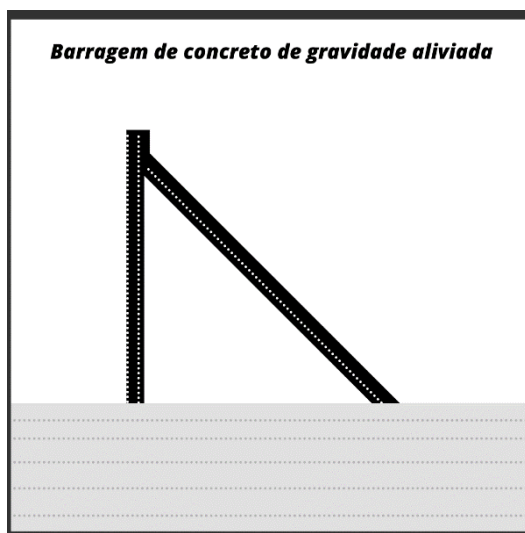
Fonte: EngWhere, 2021

2.2.2.2 Barragem de concreto de gravidade aliviada

De acordo com Costa (2016), esse tipo de barragem apresenta estrutura mais leve com maior consumo de armadura.

Barramento esse usado, por exemplo, na barragem principal da usina hidrelétrica de Itaipu, com altura total de 185 metros (ITAIPU BINACIONAL, 2008). A Figura 5 ilustra exemplo de barragem de concreto de gravidade aliviada.

Figura 5 - Barragem de concreto de gravidade aliviada



Fonte: Autor, 2021

2.2.2.3 Barragem em contraforte

Trata-se de uma barragem de estrutura leve, concentrando em uma pequena área da fundação os esforços sofridos. É por esse motivo que essas estruturas possuem elevada concentração de armadura. Em contrapartida usa pouco concreto (COSTA,2016). A Figura 6 apresenta a barragem Roselend Dam, exemplo de barragem em contraforte.

Figura 6 – Barragem em contraforte Roselend Dam



Fonte: Wikipédia, 2021

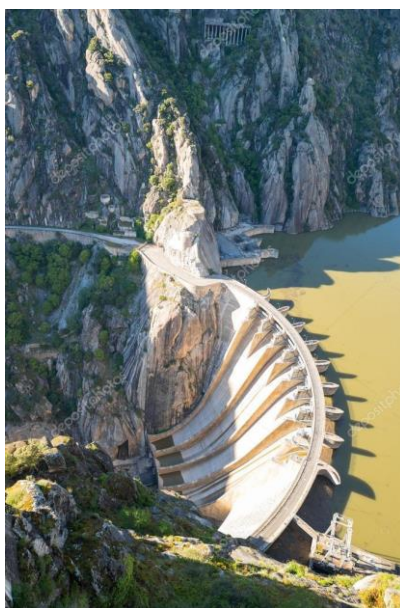
2.2.2.4 Barragem de concreto abóbada

Esse tipo de barragem, geralmente é construído em vales estreitos e que

geralmente possuem ombreiras nas laterais, que servem de apoio para a estrutura. As fundações devem ser muito resistentes devido aos grandes esforços que sofrem.

É comum neste tipo de barragem que a altura da base da crista seja maior que a própria extensão da estrutura (BELLOTO; BELCHIOR; MATTOS; SILVA; VICENTINI, 2021). A Figura 7 apresenta a barragem de Aldeadavila, exemplo de barragem de concreto abóbada.

Figura 7 - Barragem Aldeadavila dam in international douro natural park



Fonte: Depositphotos,2016

2.2.2.5 Barragem de concreto compactado

Barragem de concreto compactado, também conhecidas como barragens de concreto rolado, é descrita por Costa (2016), como uma barragem de concreto por gravidade que o concreto é compactado, sendo construído por montante. A Figura 8 ilustra exemplo de barragem de concreto compactado.

Figura 8 - Barragem de concreto compactado



Fonte: EngWhere, 2021

2.2.3 Barragens de enrocamento

Segundo Massad (2003), barragens de enrocamento apresentam elevados níveis de confiabilidade, devido ao elevado ângulo de atrito dos materiais utilizados na sua construção.

Costa (2016), divide as barragens de enrocamento em duas categorias:

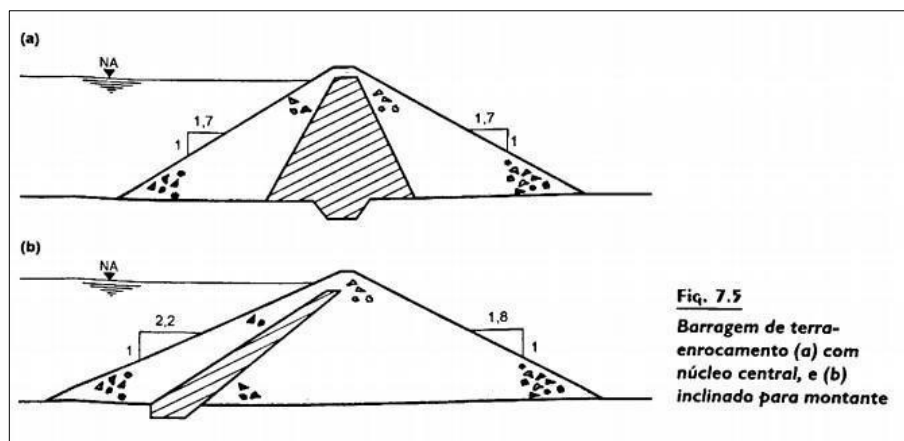
2.2.3.1 Barragem de enrocamento com núcleo impermeável

Nesse método a vedação da água é realizada por meio de um núcleo argiloso, separado do enrocamento por zonas de transição. Dessa forma evita-se o carreamento do material fino para o interior do enrocamento (COSTA, 2016).

2.2.3.2 Barragem de enrocamento face impermeável

Neste método, a impermeabilização é realizada por meio de uma camada de material vedante, podendo ser, material asfáltico, placas de concreto ou chapas de aço (COSTA, 2016). A Figura 9 traz esquematização de barragem de enrocamento com face impermeável.

Figura 9 - Tipos de barragens de enrocamento



Fonte: Obras de terra, 2003

2.2.4 Barragem Mista

Segundo Costa (2016), “barragem mista é aquela constituída por diferentes materiais ao longo da sua seção transversal”.

2.3 JUSTIFICATIVAS PARA ESCOLHA DO TIPO DE BARRAGEM

De acordo com Moliterno (1995), diversos fatores influenciam na escolha do tipo de barragem que será construída. O terreno que receberá a fundação, a disponibilidade de recursos no canteiro de obras, a possibilidade de solução de problemas durante o empreendimento, a função da obra e sua justificação.

2.4 ESTUDO PRELIMINARES

Ao começar o projeto de uma barragem, seja lá qual o seu tipo, função ou importância, é imprescindível que alguns estudos sejam realizados anteriormente (MOLITERNO, 1995).

2.4.1 Estudo topográfico

Segundo Borges (2013) a Topografia [do grego topos (lugar) e graphein (descrever)] é a ciência aplicada cujo objetivo é representar, no papel, a configuração de uma porção de terreno com as benfeitorias que estão em sua superfície.” Esse estudo é necessário para definição das locações da planta, auxiliando diretamente na escolha da localização da barragem, sua área de inundação e características da

região (MOLITERNO, 1995).

2.4.2 Geologia

Conhecer as características do solo em que será apoiada a barragem é de extrema importância para a delimitação de parâmetros essenciais para uma obra sem grandes intercorrências e desperdícios. Ao final da coleta de dados, podemos definir detalhamento das características morfológicas da área a ser trabalhada (MOLITERNO, 1995).

2.4.3 Hidrologia

De acordo com Moliterno (1995), nessa parte do projeto, estuda-se as características pluviométricas da região, assim como a disponibilidade de água armazenada na camada subterrânea.

2.5 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

No Brasil, para a construção de barragens, utiliza-se da Norma brasileira ABNT NBR 13028 que caracteriza os diversos tipos de etapas deste tipo de obra. Com revisão em 2018, esta norma atualiza diversos processos (ABNT NBR 13028:2017, 2017).

2.6 ACIDENTES E INCIDENTES DE BARRAGENS NO BRASIL

2.6.1 Rompimento da barragem de Brumadinho

2.6.1.1 Histórico

Em 25 de janeiro de 2019, por volta das 12h, a barragem de rejeitos da mina Córrego do Feijão em Brumadinho-MG rompeu-se (VALE, 2019). A Figura 10 mostra a barragem I da mina do Córrego do Feijão, no dia 7 de junho de 2018, antes do rompimento. A Figura 11 mostra a barragem I da mina do Córrego do Feijão, no dia 28 de março de 2019, após o rompimento da barragem.

Figura 10 - Barragem I, com vistas ao norte



Fonte: Google Earth 3D, imagem de 7 de julho de 2018

Figura 11 - Vista aérea do rompimento da Barragem 1, em direção ao norte



Fonte: Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão, 2019

A barragem era construída por meio do método de alteamento à montante, que segundo Pereira (2005), é considerado um método construtivo menos seguro quanto comparado a outros existentes. Nesse método construtivo, inicia-se com um dique que a maneira em que o reservatório vai se enchendo, outro dique é criado, apoiando-se no dique inicial (GAZOLLA, 2019). Esse método é utilizado por ser mais barato e simples de ser construído, no entanto, é associado à maioria das rupturas ocorridas. (GAZOLLA, 2019).

O impacto inicial de uma ruptura como o caso da barragem da Vale S.A., foram as centenas de mortes ocorridas (G1, 2019). A exploração de minério de ferro na

mina do Córrego do Feijão, vinha desde 1973, quanto a então Ferteco Mineração a controlava (PEREIRA; FREITAS; GUIMARÃES, MÂNGIA; 2019).

Em 27 de abril de 2001 a mineradora Vale, adquiriu a barragem. A barragem possuía 86 metros de altura e 720 metros de crista, guardando um total de 11,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos (VALE, 2021).

2.6.1.2 Causas do rompimento

De acordo com o Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão (2019), encomendado pela Vale, o rompimento ocorreu dentro do talude da barragem por uma perda de resistência significativa e repentina, chamada liquefação estática.

Segundo Penna, Filho, Araújo e Almeida (2010), a liquefação estática acontece quando depósitos granulares, em condições saturadas, recebem um esforço repentino capaz de produzir uma situação não drenada.

Segundo Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão (2019), após os estudos, o rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão ocorrido em 25 de janeiro de 2019, ocorreu devido a vários fatores. O histórico de rompimentos de barragens de rejeito, quase sempre são causados por mais de um evento. No caso de Brumadinho-MG, verificou-se que o rompimento foi causado principalmente por:

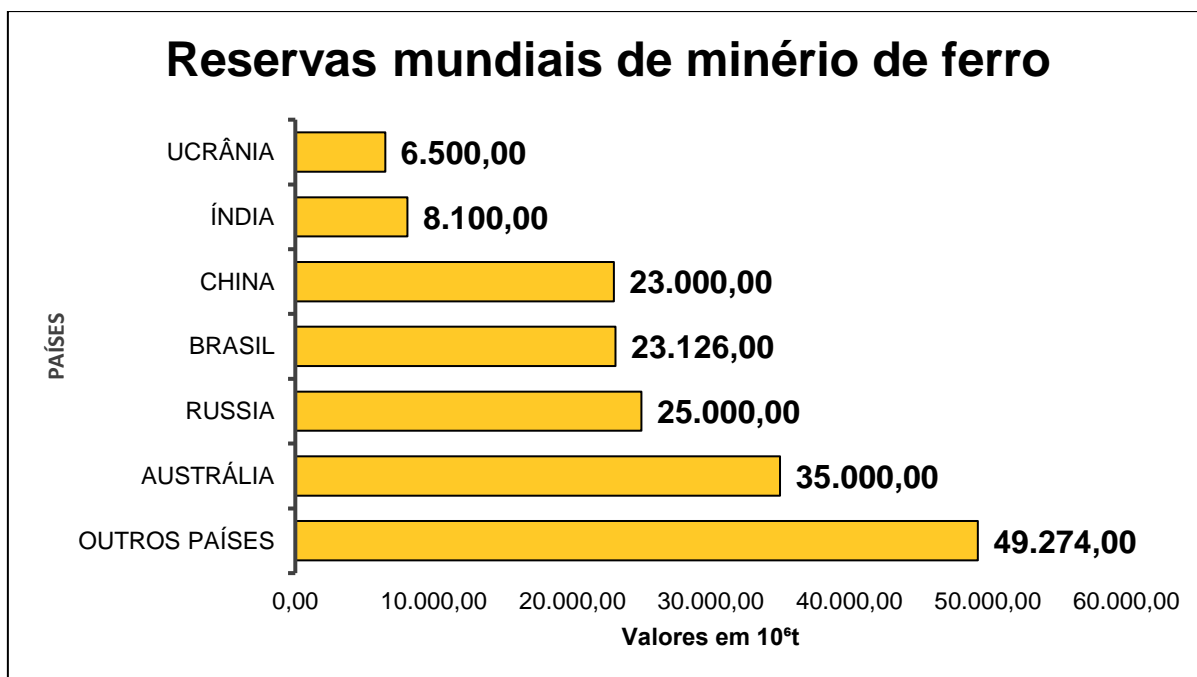
- a) Estação chuvosa: a época do rompimento havia alta precipitação na região que pode ter saturado ainda mais o solo do talude;
- b) Alto teor de rejeitos pesados no reservatório da barragem;
- c) Drenagem ineficiente ou inexistente;
- d) Inclinação demasiadamente íngreme do talude.

2.7 PANORAMA DAS BARRAGENS BRASILEIRAS

De toda a água disponível no mundo, apenas aproximadamente 3% é considerada potável e 0,77% é acessível (REVISTA QNEsc, 2001). O Brasil dispõe de aproximadamente 20% desde total (LÉVÊQUE, 1999).

Em consonância, o Brasil possui uma das maiores reservas de minério de ferro do planeta. O Gráfico 1 representa base com dados das reservas mundiais de minério de ferro no ano de 2013, coletadas pela DNPM/DIPLAM e USGS no ano de 2014.

Gráfico 1 - Reservas mundiais de minério de ferro em 2013



Fonte: DNPM/DIPLAM; USGS - Mineral Commodity Summaries – 2014

Essas características, fazem com que a economia do país passe essencialmente por duas atividades. A exploração de recursos minerais e a exploração de energia.

O Brasil é responsável por aproximadamente 20% da exportação mundial de minério de ferro (DNPM/DIPLAM; USGS,2014). O Gráfico 2, representa os maiores produtos de minério de ferro no ano de 2021 no mundo.

Gráfico 2 -Maiores produtores de minério de ferro do mundo no ano de 2001



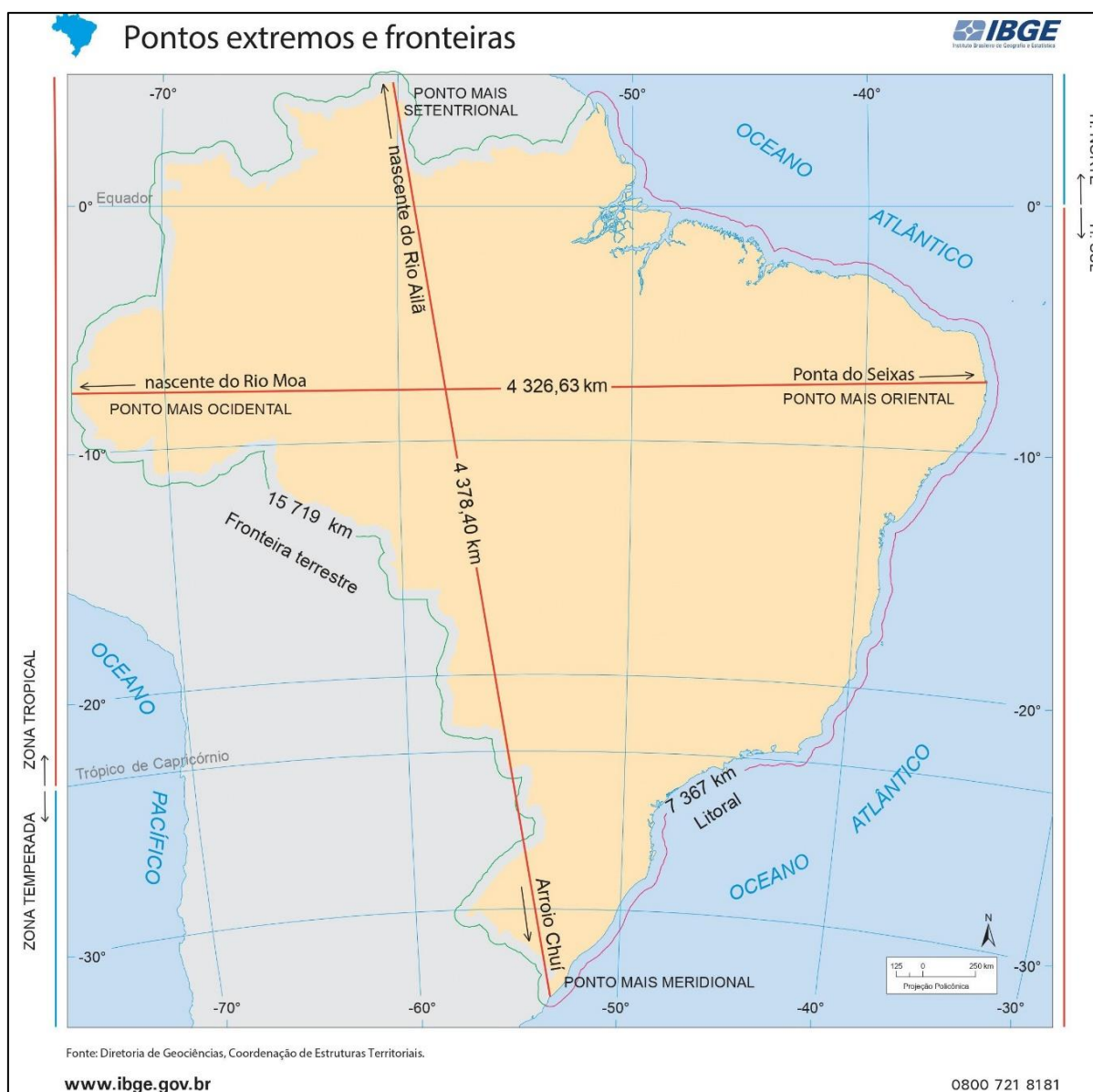
Fonte: DICIONÁRIO de Mineralogia e Gemologia, 2014

E possui como principal fonte geradora de energia elétrica, as hidroelétricas. Fazendo com que seja, no território nacional, comum a presença de grandes, médias e pequenas barragens, das mais diversas tipologias (EPE, 2021).

2.7.1 Panorama brasileiro

Um país continental como o Brasil, enfrenta uma dificuldade adicional em catalogar, fiscalizar e gerenciar todas as estruturas de barragens presentes em seu território. A Figura 12, exemplifica o tamanho desse desafio.

Figura 12 - Mapa do Brasil, pontos extremos e fronteiras



Fonte: IBGE, Diretoria de Geociências, Coordenação de Estruturas Territoriais, 2021

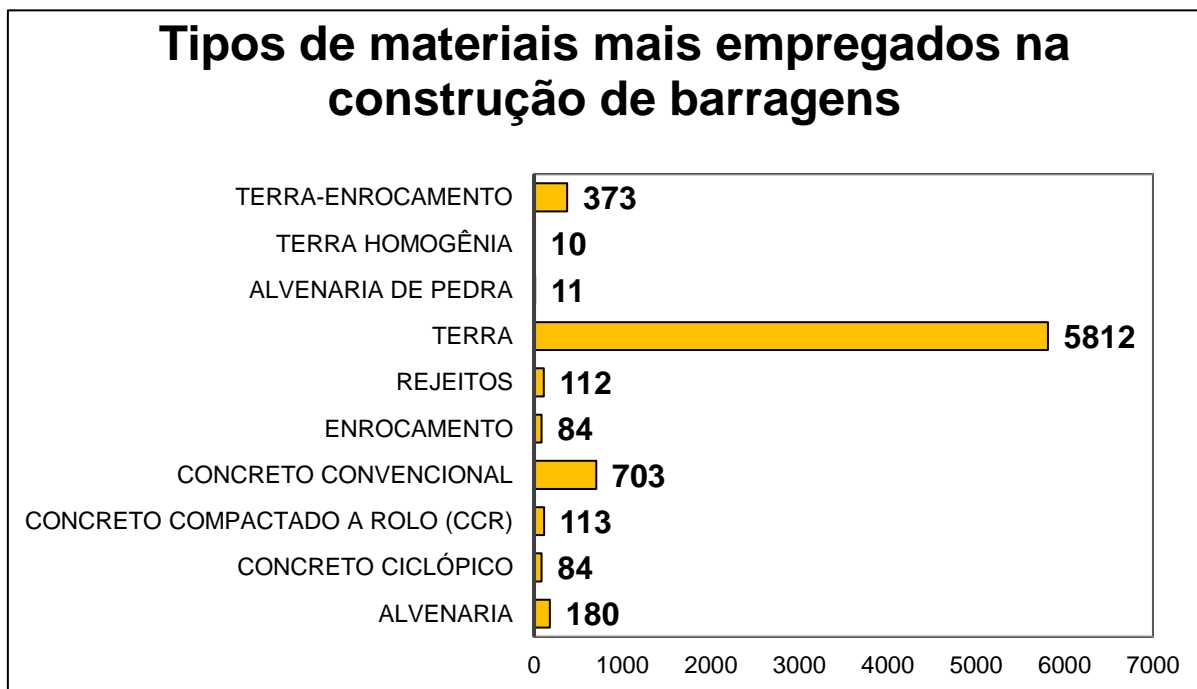
Em uma análise do Relatório Anual de Seguranças de Barragens de 2020, desenvolvido pela ANA que, muitas barragens, apesar de catalogadas, não apresentam dados suficientes.

No relatório divulgado com dados de 2019, sessenta e cinco e noventa e dois décimos por centos (65,92%), esse número significa que em termos absolutos, das vinte e um mil e novecentos e cinquenta e três barragens catalogadas pela ANA, quatorze mil e quatrocentos e setenta e um não possuem informações como, o tipo de material empregado na sua construção.

Ainda de acordo com o Relatório Anual de Seguranças de Barragens de 2020,

podemos extrair as seguintes informações, representadas no Gráfico 3 em forma de gráfico para elucidar os tipos de materiais mais utilizados.

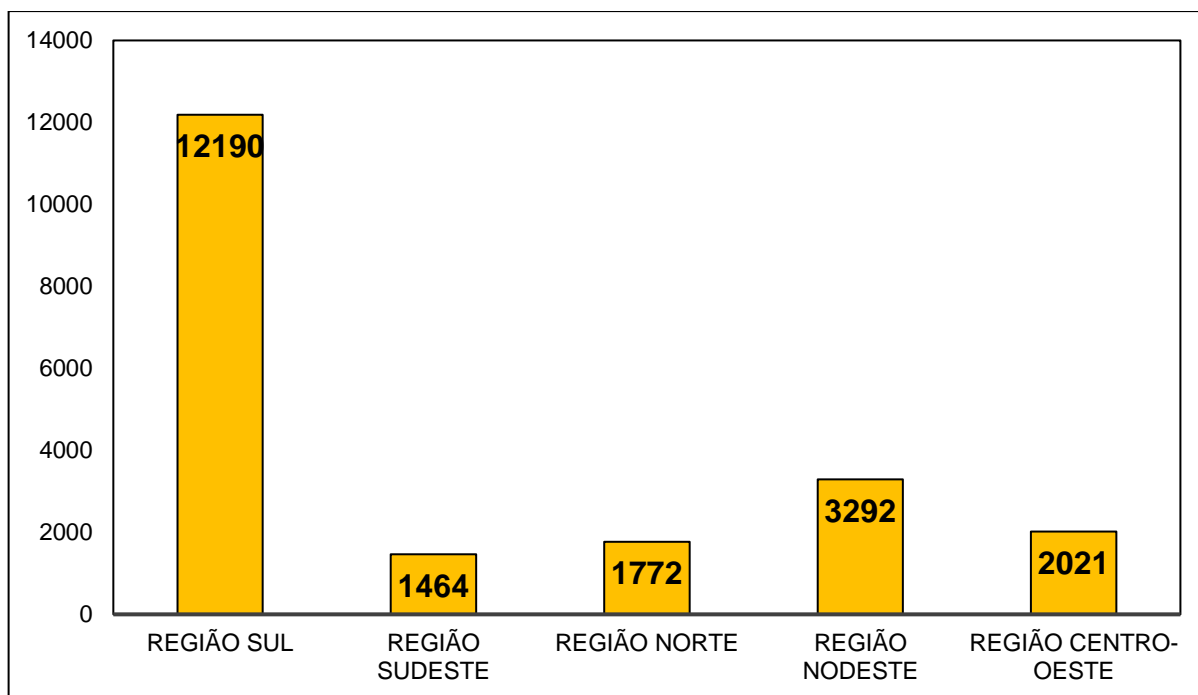
Gráfico 3 - Tipos de materiais mais utilizados nas barragens do Brasil



, Fonte: Planilha de Excel do Relatório de Segurança de Barragens 2019, 2020

Notavelmente a região Sul do Brasil, possui a maior quantidade de barragens catalogadas do Brasil, seguida pelas regiões Nordeste, Centro-oeste, Norte e Sudeste, respectivamente como mostra o Gráfico 4 com os dados quantitativos das barragens brasileira no ano de 2019.

Gráfico 4 - Distribuição de barragens pelo Brasil

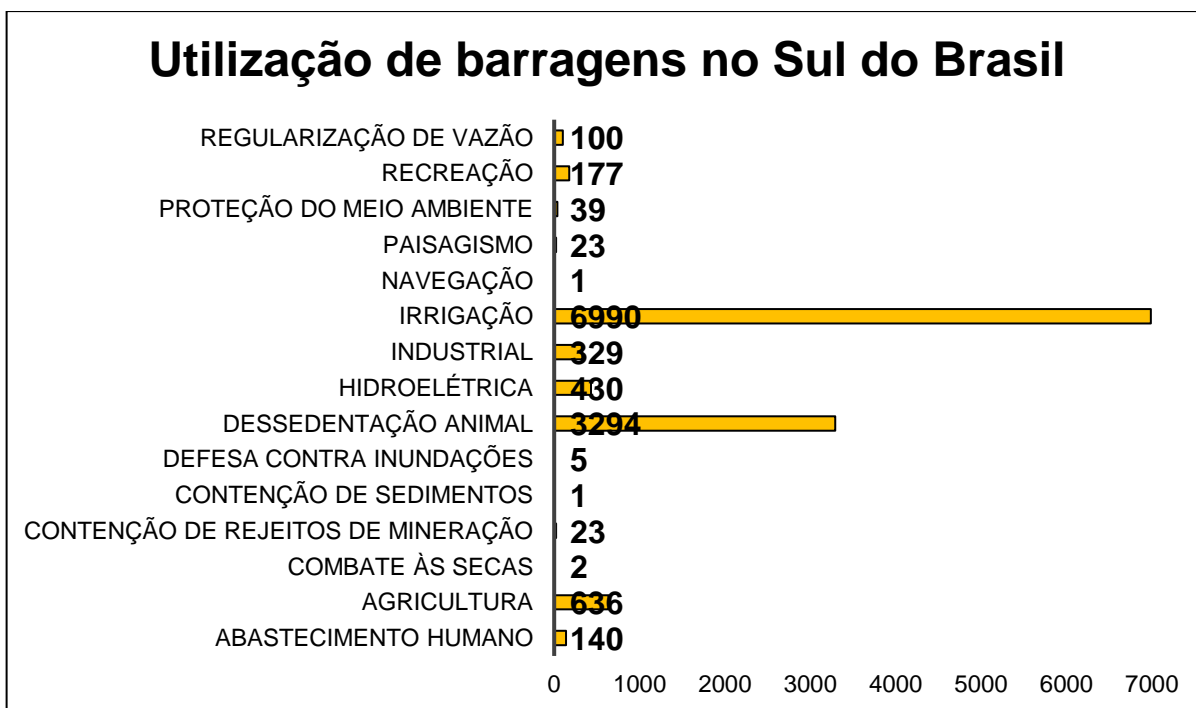


Fonte: Planilha de Excel do Relatório de Segurança de Barragens 2019, 2020

2.7.1.1 Panorama brasileiro – Região Sul

Apesar de possuir a menor quantidade de estados federativos do Brasil (IBGE, 2021), junto com o Centro-Oeste (excluí-se o Distrito Federal), a região Sul é a que apresenta a maior média de barragens catalogadas por região. Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul possuem juntos, doze mil e cento e noventa barragens. (Planilha de Excel do Relatório de Segurança de Barragens 2020, 2021). Deste total, como mostra o Gráfico 5 que traz os dados de função de barragens, veremos que cinquenta e sete inteiros e trinta e quatro centésimos por cento (57,34%), são utilizadas na irrigação. Estes dados agrupados pelo RSB-2020, fundamenta-se já que a agroindústria é um dos setores mais bem colocados dentro da economia da Região Sul, com a produção de alimentos como milho, arroz, soja, cebola e maçã (LUIZ, 2019).

Gráfico 5 - Função das barragens do Sul do Brasil

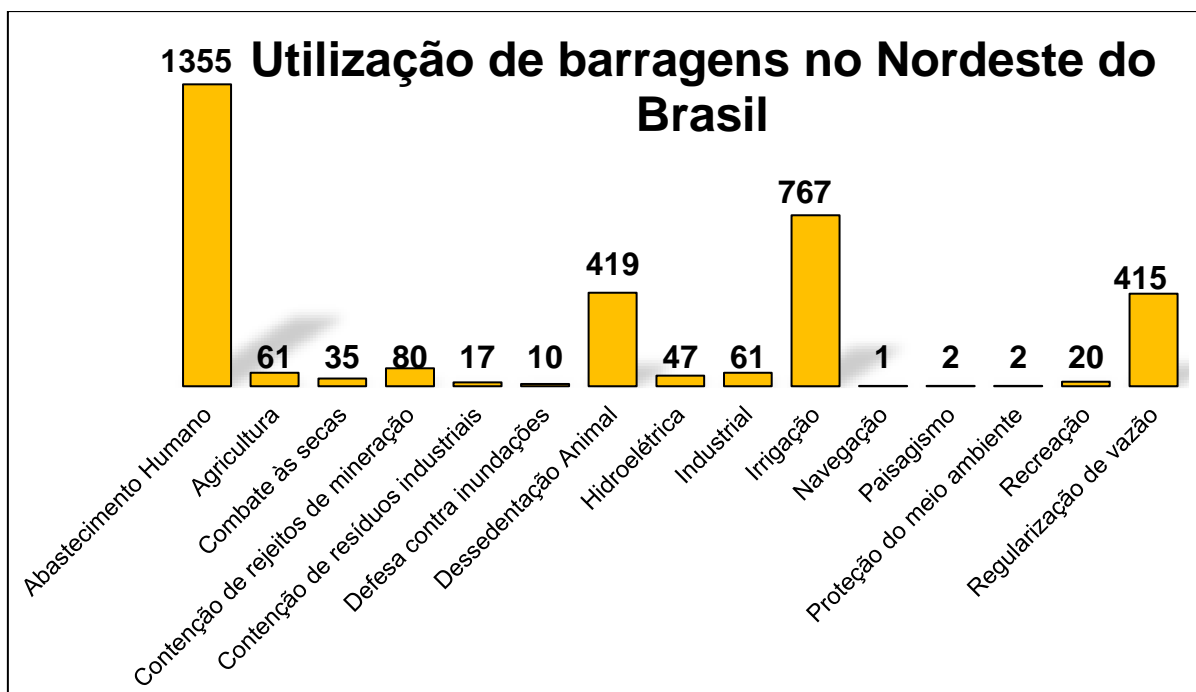


Fonte: Planilha de Excel do Relatório de Segurança de Barragens 2019, 2020

2.7.1.2 Panorama brasileiro – Região Nordeste

A região nordeste do Brasil, possui a maior quantidade de estados federativos do Brasil (IBGE, 2021), seu clima é considerado semiárido (Azevedo, P. V. et al., 1998). O Gráfico 6 apresenta os dados relativos à utilização das barragens situadas na região nordeste do país, é possível demonstrar através do conjunto de dados apresentados que na região Nordeste, a maior índice de barragens é utilizado no abastecimento humano, dessedentação animal e irrigação.

Gráfico 6 - Função das barragens do Nordeste do Brasil

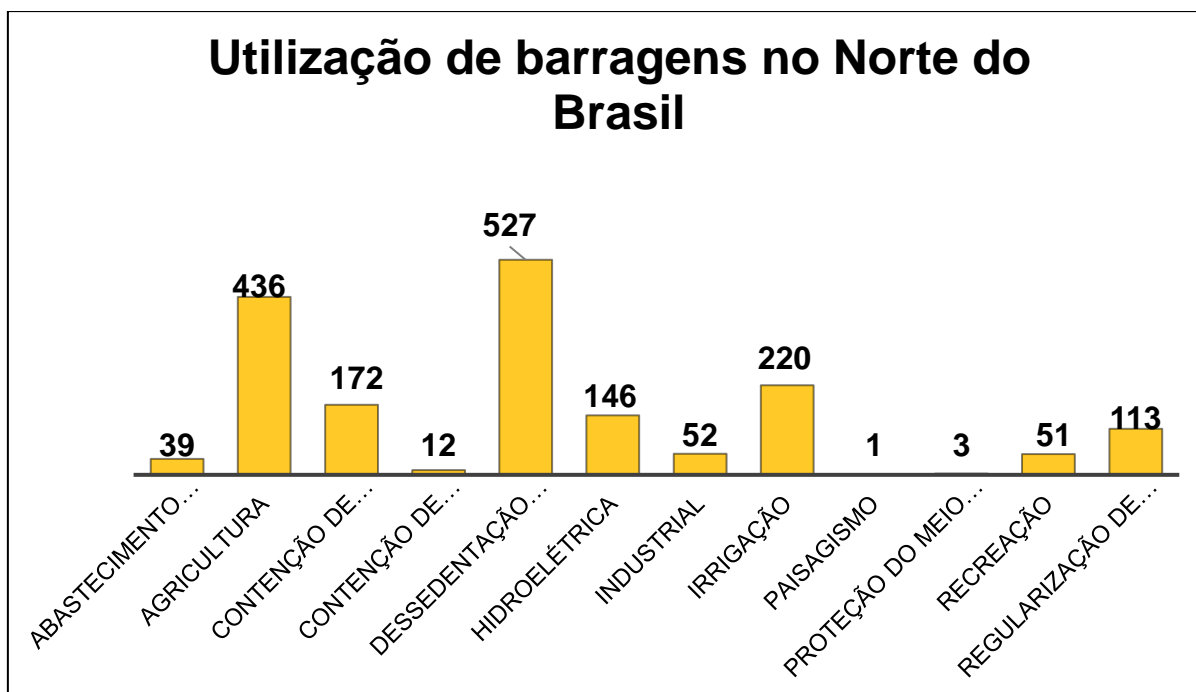


Fonte: Planilha de Excel do Relatório de Segurança de Barragens 2019, 2020

2.7.1.3 Panorama brasileiro – Região Norte

A maior região em área territorial do Brasil (MATIAS, 2020), também possui a maior bacia hidrográfica do mundo (MENDONÇA, 2021). No entanto a região norte é apenas a terceira região do Brasil com mais barragens (RSB-2020,2021). O Gráfico 7, atesta as principais funções atribuídas às barragens da região.

Gráfico 7 - Função das barragens do Norte do Brasil

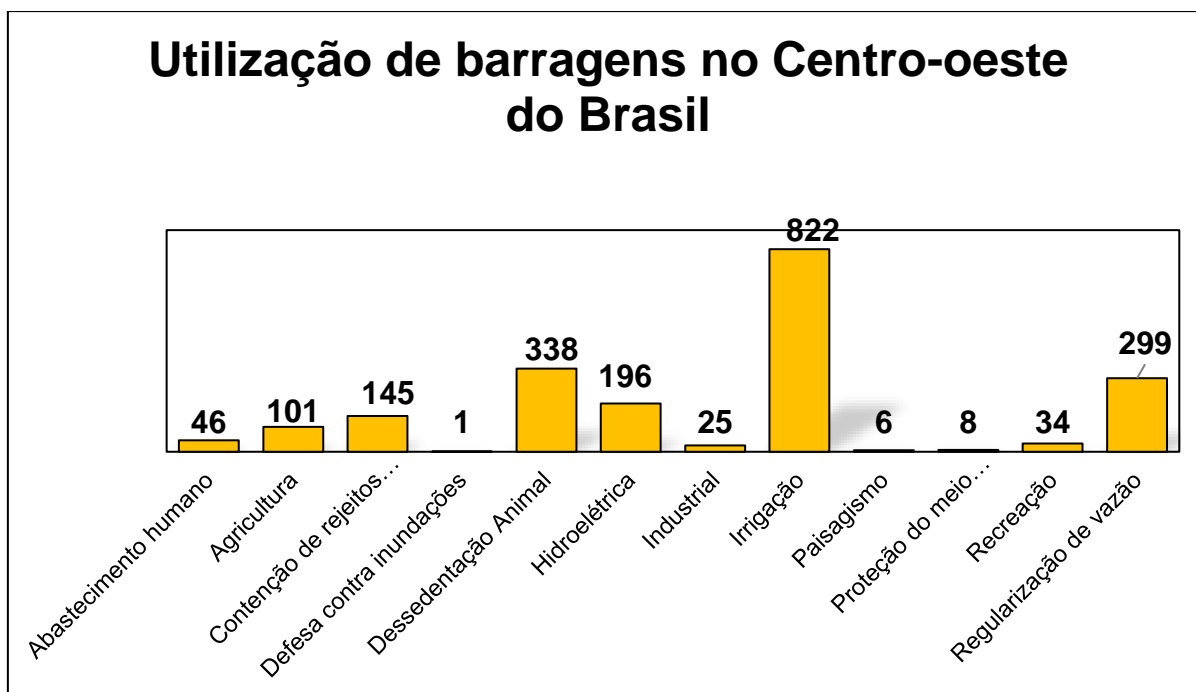


Fonte: Planilha de Excel do Relatório de Segurança de Barragens 2019, 2020

2.7.1.4 Panorama brasileiro – Região Centro-oeste

A região do planalto do Brasil, possui clima tropical continental em quase toda região (MATIAS, 2021). A principal atividade econômica da região é a primária, detentora do maior rebanho de bovinos do país e com uma grande fertilidade em suas terras. O relevo na região centro-oeste do Brasil é composto por planaltos, depressões e planícies. O Gráfico 8, atesta as principais funções atribuídas às barragens da região.

Gráfico 8 - Função das barragens do Centro-oeste do Brasil

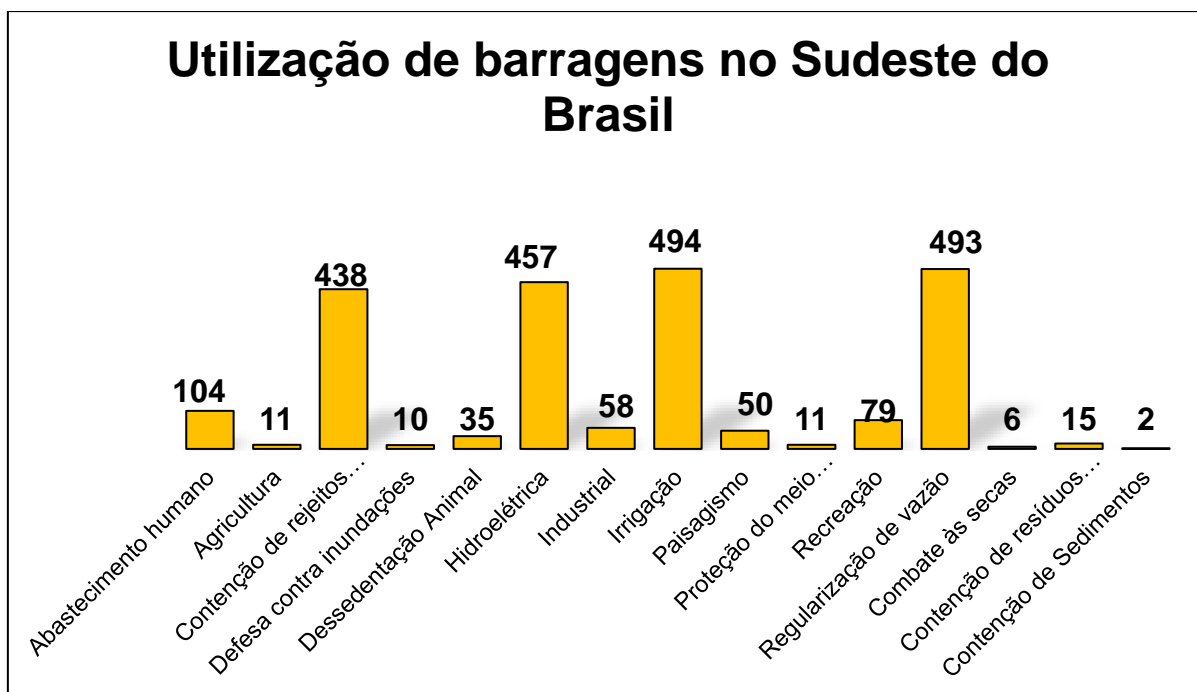


Fonte: Planilha de Excel do Relatório de Segurança de Barragens 2019, 2020

2.7.1.5 Panorama brasileiro – Região Sudeste

A região mais próspera economicamente do Brasil, o Sudeste, apresenta economicamente, um setor primário moderno e mecanizado, um setor secundário denso com grandes empresas e o setor terciário extremamente completo (CAMPOS, 2021). O Sudeste concentra, oitenta e nove milhões de habitantes (IBGE, 2020), representando quarenta e um inteiros e sessenta centésimos por cento (41,60%) da população brasileira (IBGE, 2021), fazendo dessa a região a mais populosa do Brasil (CAMPOS, 2021). O Gráfico 9, atesta as principais funções atribuídas às barragens da região.

Gráfico 9 - Função das barragens do Sudeste do Brasil



Fonte: Planilha de Excel do Relatório de Segurança de Barragens 2019, 2020

3 METODOLOGIA

Obteve-se os resultados e respostas acerca da análise de características das barragens brasileiras, através de pesquisa descritiva.

3.1 ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

- a) Análise bibliográfica de autores especializados, como Guilherme Franco Belchior, Igor Ferraz da Fonseca, Walter Duarte Costa, Priscila Marques Correa, Antonio Moliterno, Rudney C. Queiroz entre outros diversos autores relacionados as ciências da engenharia civil, como geologia, biotecnica, topografia, estruturas, mecânica de fluídos, teoria dos materiais;
- b) Análise da norma regulamentadora vigente no país, aqui representada pela ABNT NBR13028 - Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos;

3.2 DADOS OBTIDOS IN-LOCO E GPS DA REGIÃO DE LOCAÇÃO DA BARRAGEM

3.2.1 Localização

A barragem está localizada em um vale localizado no distrito de Hermilo Alves em Carandaí-MG, nas coordenadas -21.000975, -43.778183. As Figuras 13, 14 e 15 representam o local de implantação do barramento.

Figura 13 - Vista da ombreira direita



Fonte: Autor, 2021

Figura 14 - Vista da ombreira esquerda



Fonte: Autor, 2021

Figura 15- Vista da área de inundação



Fonte: Autor, 2021

Já as Figuras 16, 17, 18 e 19 representam, respectivamente, o eixo da barragem em marrom, a localização do vertedouro em vermelho, o traçado do rio em azul e a projeção completa da barragem.

Figura 16 - Eixo da barragem



Fonte: Adaptado pelo autor (Google Earth Pro, 2021)

Figura 17 - Localização do vertedouro



Fonte: Adaptado pelo autor (Google Earth Pro, 2021)

Figura 18 - Traçado do rio



Fonte: Adaptado pelo autor (Google Earth Pro, 06/2019)

Figura 19 - Projeto barragem



Fonte: Adaptado pelo autor (Google Earth Pro, 2021)

3.3 ENTREVISTAS

Após visita na região próxima ao local de construção de barragem, apresentou-se questionário a dois moradores sobre o que eles achavam sobre a construção de uma barragem naquele local para armazenamento de água.

O Quadro 1 abaixo, apresenta o questionário do qual, os moradores foram submetidos e a suas respostas de forma objetiva, respondendo com SIM ou NÃO. Sempre que a resposta foi negativa, explicou-se fatos pertinentes a pergunta realizada e após foi refeita a pergunta.

Quadro 1 - Questionário aplicado a moradores sobre barragens

PERGUNTAS	MORADOR 1	MORADOR 2
O senhor sabe a função de uma barragem?	SIM	NÃO
O senhor, de acordo com as suas condições, acredita que um reservatório mais próximo melhoraria a sua produção agropecuária atual?	SIM	SIM
Para a sua comunidade seria interessante esse empreendimento?	SIM	SIM
Sabendo, do histórico recente de grandes tragédias ocorridas com barragens, o senhor confia nessas estruturas?	SIM	SIM
Seria uma obra, na sua opinião, de grande urgência?	NÃO	NÃO

Fonte: Autor, 2021

3.4 JUSTIFICATIVA DA BARRAGEM NO LOCAL

Justifica-se a construção de uma barragem no local para utilização de irrigação. Como mostra a Figura 20, há grande volume de plantação e criação de gado nas proximidades.

Figura 20 - Atividades no entorno da barragem



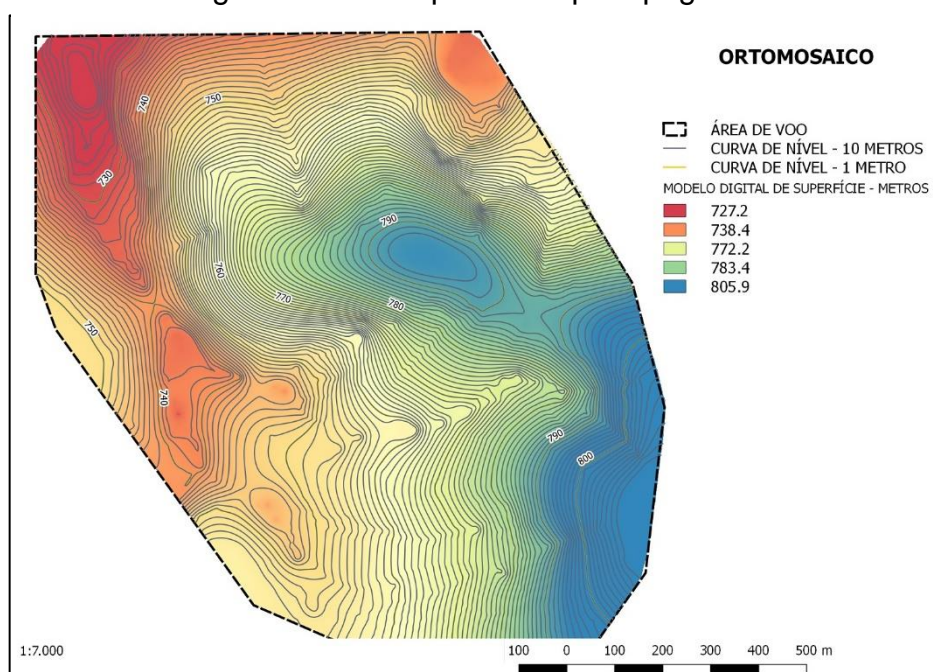
Fonte: Adaptado pelo autor (Google Earth Pro, 2021)

3.5 PROCESSOS UTILIZADOS NO DIMENSIONAMENTO

3.5.1 Curva de nível

Curvas de nível são linhas que conectam diversos pontos de mesmo valor altimétrico, formando um mapa topográfico. Juntas elas ajudam a verificar os níveis de altitude de um terreno ou qualquer irregularidade em sua superfície (MAPPA, 2021). A Figura 21, apresenta modelo de mapa topográfico.

Figura 21 - Exemplo de mapa topográfico



Fonte: Portal Mappa, 2021

3.5.2 Cálculo de altura de onda

No limite oposto a barragem, o rio que à abastece, possui uma descontinuidade, localizada em uma cachoeira. Essa cachoeira por vez, possui uma queda de aproximadamente quinze metros. Sabendo disso e com a informação de cotas, determina-se que o limite da área de inundação da barragem, é onde se encontra a cachoeira. Observa-se a Figura 19 do item 3.2.1. A Figura 22 traz uma projeção do lago formado após o represamento. O volume aproximado do represamento será de 146 m³.

Figura 22 - Limite do lago



Fonte: Adaptado pelo autor (Google Earth Pro, 2021)

Para calcular a altura máxima das ondas utiliza-se a equação de Stevenson-Molitor, que é representada pela Equação 1 quando o comprimento da barragem até o limite do lago for menor que 30 quilômetros:

$$h = 0,75 + 0,032\sqrt{v'L} - 0,27\sqrt[4]{v'L} \quad (1)$$

Para os casos em que o comprimento até o limite do lago seja maior que 30 quilômetros, usa-se a Equação 2:

$$h = 0,032\sqrt{v'L} \quad (2)$$

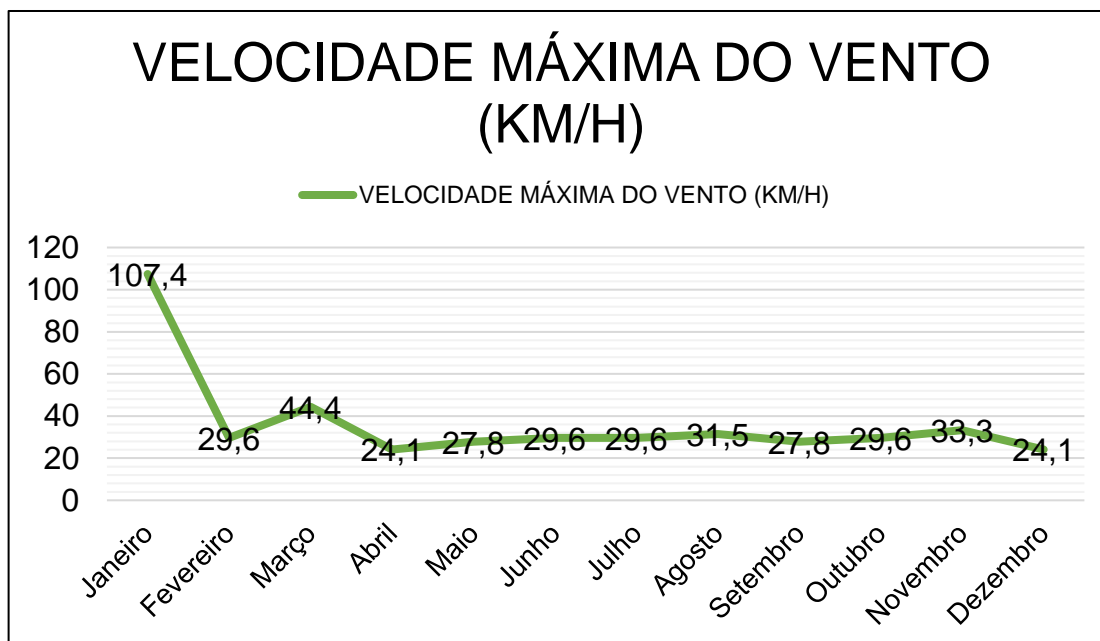
As incógnitas destas Equações, significam:

- a) L: distância entre os limites do lago (Barragem/Limite inferior) em quilômetro
- b) v' : velocidade média dos ventos em quilômetro por hora.

Para encontrar a média anual de ventos, utiliza-se o site meteorológico tempo.com. O Gráfico 10 representa a média anual do ano de 2020 do estado de

Minas Gerais.

Gráfico 10 - Velocidade média máxima anual de ventos em Minas Gerais



Fonte: Tempo, 2021

De acordo com o Gráfico 10, determina-se que a média anual de ventos em Minas Gerais foi de trinta e seis quilômetros por hora no ano de 2020.

Com o auxílio do software Google Earth Pro, é possível medir a distância máxima que o lago pode chegar, que é de cento e noventa e nove metros. Com esses dados, utiliza-se a Equação 1 para distância menor que 30 quilômetros.

3.5.3 Cálculo da velocidade de onda

Para o cálculo de velocidade de onda, utiliza-se a Equação 3 de Gaillard.

$$V = 1,5 + 2 * h \quad (3)$$

Onde:

- a) V é a velocidade de onda em metros por segundo
- b) h a altura de onda em metros

3.5.4 Cálculo da folga

Para calcular a folga entre a cota máxima de água e a crista da barragem, utiliza-se a Equação 4:

$$F = 0,75h + \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

Onde:

- a) F é o valor da folga
- b) h a altura de onda em metros
- c) g o valor da gravidade igual a 9,81 metros por segundo ao quadrado

Também é possível, adotar o método de Bureau of Reclamation, que é um método mais conservador, a Figura 23 apresenta tabela que define o valor de folga em função do comprimento do lago.

Figura 23 - Valor de folga em relação ao Fetch

Fetch (quilômetros)	Borda Livre mínima (metros)
< 1,5	1,0
1,5	1,2
5,0	1,5
7,5	1,8
15,0	2,0

Fonte: Bureau of Reclamation, 2002

3.5.5 Definição da altura da lâmina do vertedouro

A lâmina de água do vertedouro, será definida levando em consideração as características do rio que alimenta o lago formado pela barragem.

3.5.6 Definição do nível do reservatório

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), a cada cem litros de água tratada no Brasil, mais de setenta e dois litros vão para a agricultura e pecuária. Como podemos ver na Figura 20 do item 3.4, de dados extraídos do software Google Earth Pro, verifica-se grande atividade agropecuária na região.

3.5.7 Cota da soleira

Para definição da cota da soleira, utiliza-se a Equação 5.

$$C_s = C_t + NA \quad (5)$$

Onde:

- a) C_s é a cota da soleira
- b) C_t é a cota do talvegue
- c) NA o nível de água

3.5.8 Cota máxima da barragem

Para definição da cota máxima da barragem, utiliza-se a Equação 6:

$$C_c = C_s + F + H_s \quad (6)$$

Onde:

- a) C_c é a cota do coroamento da barragem
- b) C_s a cota da soleira
- c) F a folga
- d) H_s a lâmina de sangria do vertedouro

3.5.9 Cálculo de altura da barragem

Para o cálculo da altura da barragem, usa-se os valores da cota de coroamento e talvegue, na Equação 7:

$$H = C_c - C_t \quad (7)$$

Onde:

- a) H é a altura da barragem
- b) C_c é a cota do coroamento da barragem
- c) C_t é a cota do talvegue

3.5.10 Cálculo de largura de crista

A crista é a uma das últimas etapas da construção de uma barragem, sendo muito importante para a estabilidade da barragem, ou seja, quanto maior sua largura, maior a estabilidade total da estrutura executada.

Para cálculo da crista, usa-se a Equação 8:

$$C = 3 + \frac{5}{17} * (H - 3) \quad (8)$$

Onde:

- a) H é a altura da barragem;
- b) C é a largura da crista.

3.5.11 Cálculo do nível mínimo de água

Nessa etapa do projeto, determina-se o nível mínimo de água especificado para a barragem em execução, em relação ao nível máximo de água encontrado. Usa-se a Equação 9:

$$N. A. \text{ min} = N. A. \text{ máx} - 40\% \quad (9)$$

Onde:

- a) N.A. máx é o valor em metros máximo da lâmina de água do reservatório.

3.5.12 Cálculo do tamanho dos taludes

De acordo com o solo em que a barragem está locada, considera-se a seguinte proporção para o cálculo dos taludes a montante e jusante, de acordo com a Figura 24, que descreve as inclinações de taludes de barragens homogêneas em relação ao solo.

Figura 24 - Inclinações de Taludes de Barragens Homogêneas

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

Fonte: Hradileck, 2002

- a) Montante: 1:3
- b) Jusante: 1:2,5

3.5.12.1 Para talude a montante

Para o cálculo do talude a montante, usa-se a Equação 10:

$$3 = \frac{L_{\text{montante}}}{H} \quad (10)$$

Onde:

- a) L_{montante} é o tamanho do talude montante em metros;
- b) H a altura da barragem.

3.5.12.2 Para talude a jusante

Para cálculo do talude a jusante, usa-se a Equação 11:

$$2,5 = \frac{L_{\text{jusante}}}{10} \quad (11)$$

Onde:

- a) L_{jusante} é o tamanho do talude jusante em metros
- b) H a altura da barragem em metros

3.5.13 Cálculo da base da barragem

A base da barragem é definida pelas dimensões dos seus taludes, a montante e jusante e da largura da sua crista. Usa-se a Equação 12:

$$B = L_{\text{montante}} + L_{\text{jusante}} + C \quad (12)$$

Onde:

- a) B é o tamanho da base em metros
- b) L_{montante} é o tamanho do talude a montante em metros
- c) L_{jusante} é o tamanho do talude a jusante em metros
- d) C é a comprimento da crista em metros

3.5.14 Proteção dos taludes

Para proteção do talude a montante, usa-se o que chamamos de rip-rap, que é basicamente formado por duas camadas. A primeira camada, entra em contato direto com o talude e é formada basicamente por materiais de menor granulometria, como por exemplo, areia, pedregulhos e britas. Por cima, adiciona-se camada superior do rip-rap, geralmente formada por rochas maiores, que não são carregadas pela força de onda gerada pelo vento da região.

A Figura 25, traz as espessuras mínimas do rip-rap para pequenos barramentos. De acordo com o tamanho máximo do reservatório formado pela barragem, admite-se que a espessura mínima seja de quarenta e cinco centímetros.

Figura 25 - Espessura mínima do enrocamento

Fetch (km)	Espessura mínima (cm)
<1,5	45
4	60
8	75
>10	90

Fonte: Costa e Lança, 2001

Para evitar processos causados por intemperismo no talude a jusante, geralmente opta-se pelo plantio de espécies presentes na região em consonância do uso de drenos superficiais ao longo do talude.

3.5.15 Proteção do coroamento

No coroamento, recomenda-se declividade para montante, com o intuito de drenagem hídrica. Pode-se aplicar camada de cascalhos, afim de evitar erosões.

A Figura 26, detalha qual será a aparência final após a aplicação das proteções ao talude.

Figura 26 - Taludes após proteções



Fonte: CMB Consultoria, 2007

3.5.16 Cálculo de vazão pela barragem

Para cálculo da vazão pela barragem. Usa-se a Equação 13 com o auxílio de software para obtenção de alguns dados após análise:

$$q = k * H * \frac{Nf}{Nq} \quad (13)$$

Onde:

- a) K é a condutividade hidráulica;
- b) H a altura da barragem;

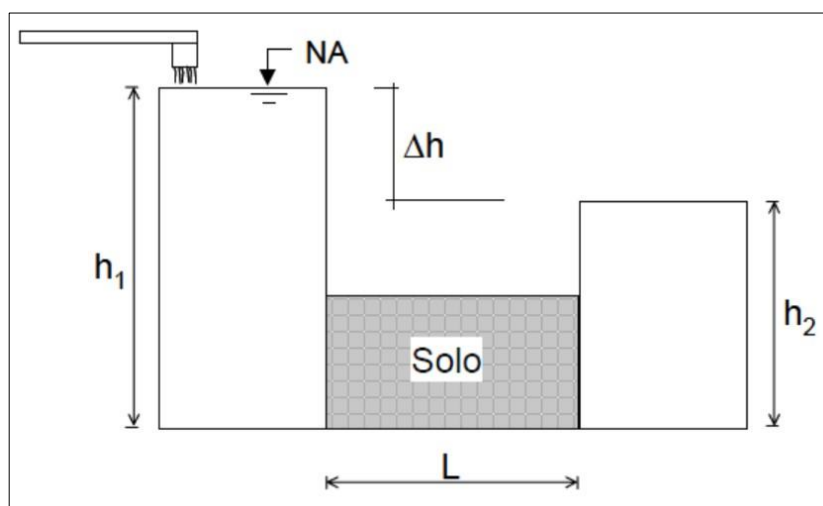
- c) Nf as porções de solo delimitadas pelas linhas de fluxo obtidas pelo software;
- d) Nq o número de fatias de solo na vertical obtidos pelo software.

Estabelece o valor de K, de acordo com a Lei de Darcy, proposta a partir de resultados de experimentos realizados pelo francês Henry Darcy, em 1856 (Marinho, 2020). A Equação 14 é usada para demonstração do valor K:

$$Q = k * \frac{\Delta h}{L} * A \quad (14)$$

A Figura 27, mostra o esquema do qual Darcy extraiu os dados necessários para a montagem da fórmula utilizada para obtenção da condutividade hidráulica K.

Figura 27 - Esquema do experimento de Darcy



Fonte: Guia da Engenharia, 2021

Por se tratar de um dimensionamento de uma barragem para fins educacionais, adota-se o valor de K igual a 1×10^{-7} , considerando que o solo em que a barragem a ser instalada é de baixa permeabilidade. A Figura 28, apresenta a tabela de dados padrões para permeabilidade de solos de acordo com a lei de Darcy.

Figura 28 - Coeficientes de permeabilidade do solo

	<i>K</i>		<i>Material</i>	<i>Características de escoamento</i>
	<i>cm/seg</i>	<i>m/dia</i>		
10^{-2}	1 a 100	864 a 86400	Pedregulho limpo	Aqüíferos bons
10^{-3}	0,001 a 1	0,86 a 864	Areia limpas, misturas de areia limpas e pedregulho	
10^{-7}	10^{-7} a 10^{-3}	$8,64 \times 10^{-5}$ a 0,86	Areias muito finas; siltes; misturas de areia, silte e argila; argilas estratificadas	Aqüíferos pobres
10^{-9}	10^{-9} a 10^{-7}	$8,64 \times 10^{-7}$ a $8,64 \times 10^{-5}$	Argilas não alteradas	Impermeáveis

Fonte: Marangon, 2018

Em continuidade ao cálculo de vazão da barragem, utiliza-se do software GeoStudio 2021.3, para a obtenção dos dados N_f e N_q , para o andamento da fórmula apresentada.

3.5.17 Cálculo de proteção contra piping

Segundo Arthur, 1976 e Azevedo, 2005, piping é um processo de erosão que ocorre no interior da barragem.

Para evitar que este fenômeno ocorra, é necessário a realização de um filtro interno na barragem que evite a erosão tubular da sua estrutura. Usa-se para fins de cálculo o material: areia média. A Figura 29 traz a relação de cada material para que seja possível o cálculo e verificação de piping.

Figura 29 - Tabela para verificação de piping

Jaz.	Material	k (cm/s)	Granulometria (mm)			
			D ₁₀	D ₁₅	D ₅₀	D ₈₅
A	Areia fina siltosa	$3,0 \times 10^{-2}$	0,055	0,065	0,15	0,3
B	Areia fina e média	$2,0 \times 10^{-2}$	0,14	0,1	0,35	0,8
C	Areia média e grossa	$3,0 \times 10^{-1}$	0,55	0,60	2	5
D	Areia grossa c/ pedregulhos	1	1	1,5	6	13
E	Pedregulho	$1,44 \times 10^{+2}$	12	15	40	80

Fonte: Marangon, 2018

Como não há estudos granulométricos do terreno da barragem e se tratando

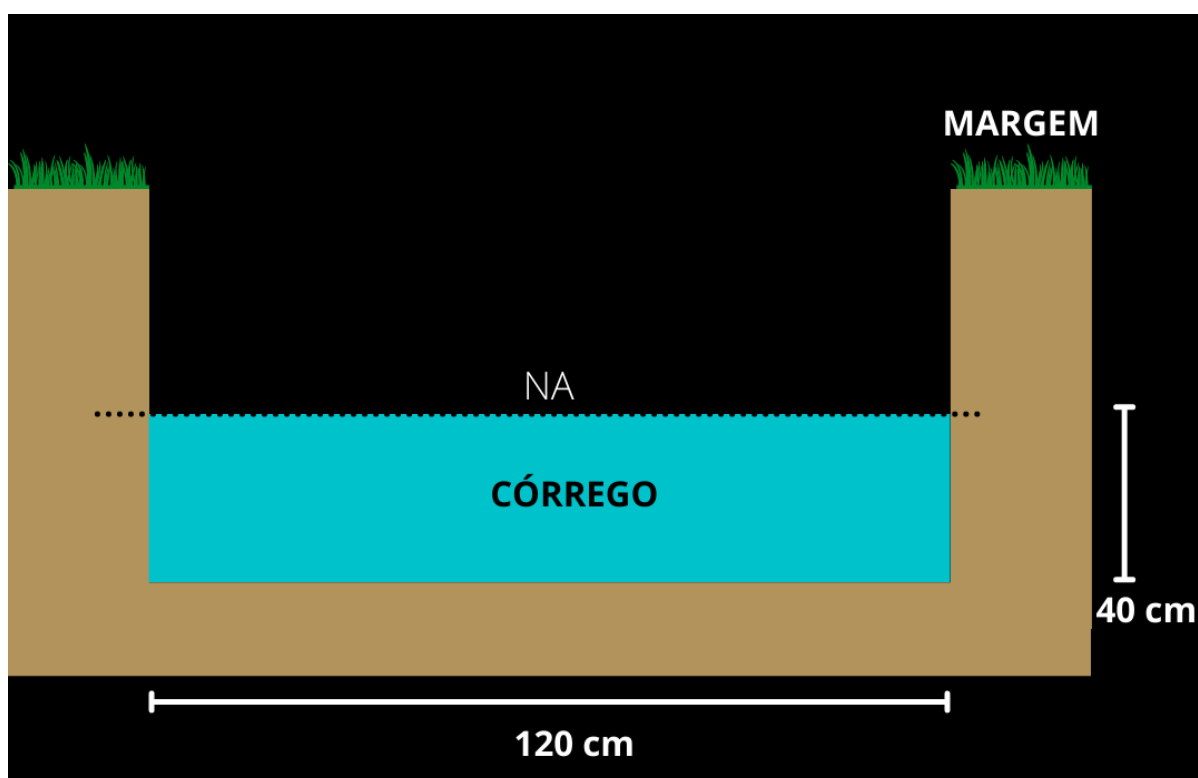
de uma barragem do tipo de terra homogênea, assume-se que o solo utilizado para o barramento será areia grossa. Usa-se então, Equação 15:

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{85}(\text{solo})} < 4 \text{ ou } 5 \quad (15)$$

3.5.18 Cálculo de vazão do rio que alimenta o reservatório da barragem

A represa formada pelo barramento, é alimentada por um córrego de pequeno porte. Para cálculo de vazão deste córrego, foram realizadas medições in loco, e a partir desses dados, desenvolve-se o seguinte sistema que, representa suas dimensões, apresentado na Figura 30.

Figura 30 - Representação do córrego



Fonte: Autor, 2021

Com dados do nível de água médio do rio e a sua largura, representados na Figura 32, pode-se através da equação de Manning, calcular a vazão aproximada do córrego. Adota-se declividade de 1%. Logo, usa-se a Equação 16 para encontrar o dado de vazão.

$$n \cdot \frac{Q}{\sqrt{I}} = A * R^{\frac{2}{3}} \quad (16)$$

Onde:

- a) A representa a área molhada;
- b) P o perímetro molhado;
- c) R_h o raio hidráulico;
- d) y_0 a altura de lâmina de água;
- e) I_0 a declividade de fundo;
- f) n o coeficiente de rugosidade dado na Figura 31 retirada do site Atlas Digital das Águas de Minas, 2011 que representa os valores para cada tipo situação;
- g) Q a vazão do canal.

Figura 31 - Coeficiente n

Natureza das paredes	Condições das paredes			
	Muito boas	Boas	Regulares	Más
Canais de terra, retilíneos e uniformes	0,017	0,020	0,0225	0,025
Canais abertos em rocha, lisos e uniformes	0,025	0,030	0,0330	0,035
Canais curvilíneos e lamosos	0,025	0,025	0,0275	0,030
Canais com leito pedregoso e vegetação nos taludes	0,025	0,030	0,0350	0,040
Canais com fundo de terra e talude com pedras	0,028	0,030	0,0330	0,035
Canais com revestimento de concreto	0,012	0,014	0,016	0,018
Canais dragados	0,025	0,028	0,030	0,033
Gabião	0,022	0,030	0,035	-

Fonte: Atlas Digital das Águas de Minas, 2011

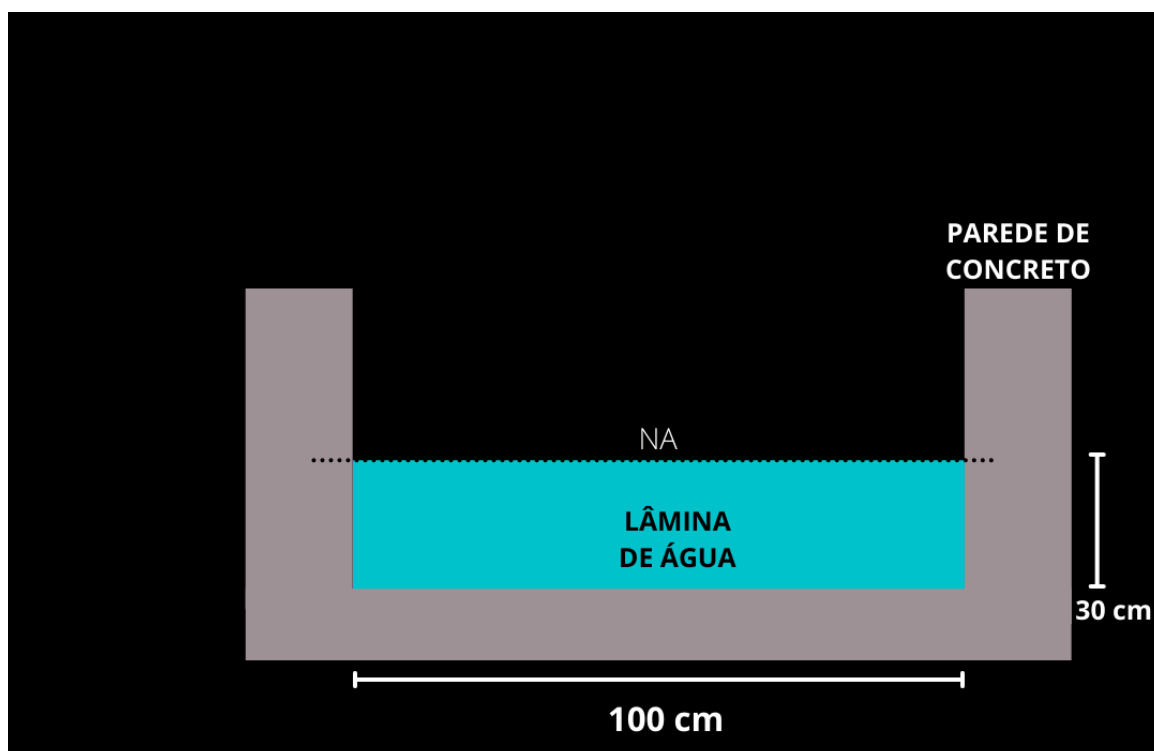
3.5.19 Cálculo do extravasora

O extravasor segundo o Atlas Digital das Águas de Minas, 2011 é um sistema que permite o escoamento da vazão máxima de enchente, protegendo as estruturas da barragem. O extravasor é composto por um canal, que pode ser dimensionado pela

equação de Manning, como vemos no item 3.5.18 na Equação 16. Usa-se a Figura 33 para definição do coeficiente n .

Define-se para o projeto, um canal retangular revestido de concreto com medidas de um metro de altura nas suas laterais e um metro de largura, com uma declividade de 1% para talude. A Figura 32 representa ao corte transversal do canal.

Figura 32 - Representação do canal extravasor



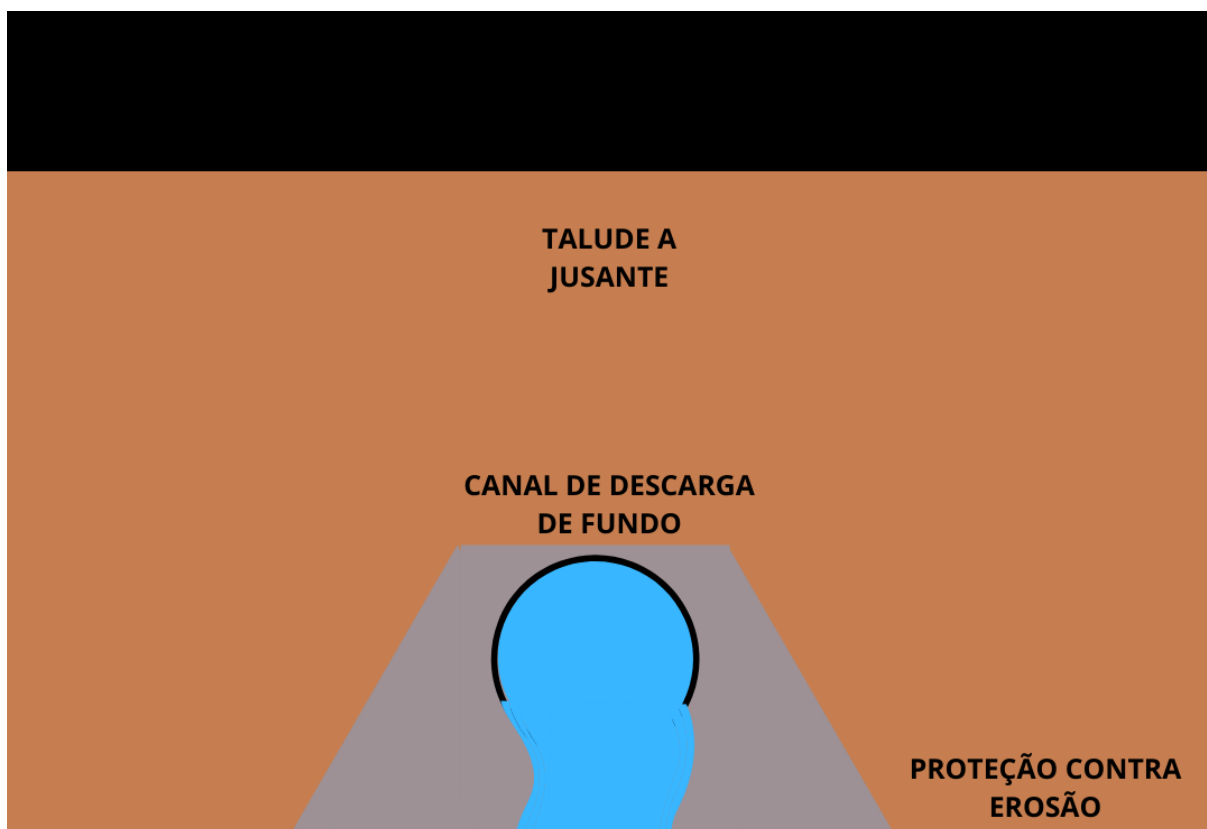
Fonte: Autor, 2021

De acordo com dados mencionados e após a análise da Figura 32, substitui-se os valores na Equação 16.

3.5.20 Cálculo da descarga de fundo

É uma estrutura que possui a função de manter o curso d'água existente com alimentação hídrica constante à jusante por meio de tubulações. Para a barragem de terra pré-dimensionada, opta-se pela tubulação sob o maciço. A Figura 33 ilustra como o sistema ficará disposto.

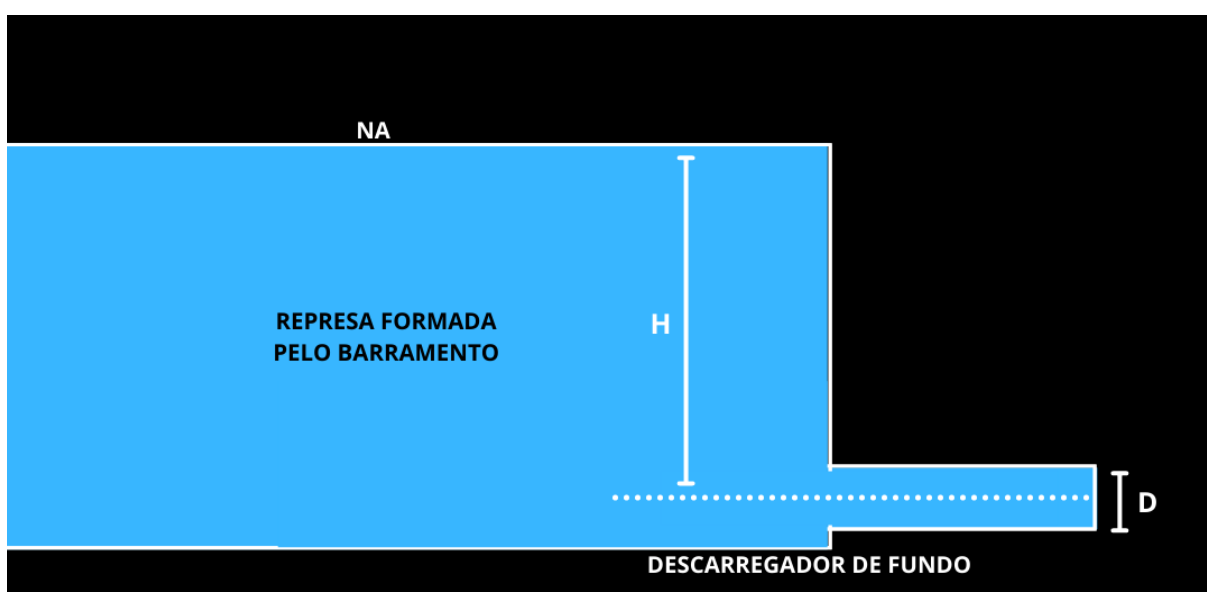
Figura 33 - Representação do sistema de descarga de fundo



Fonte: Autor, 2021

Por se tratar de um conduto forçado, como pode-se ver na Figura 34, utiliza-se a Equação 17.

Figura 34 - Corte transversal do sistema RepresaXDescarregador de fundo



Fonte: Autor, 2021

$$Q = C_d * A * \sqrt{2 * g * H} \quad (17)$$

Onde:

- a) Q é a vazão em $\frac{m^3}{s}$;
- b) A é área da seção em m^2 ;
- c) g a aceleração da gravidade
- d) H a carga sobre o descarregador em m;
- e) C_d é o coeficiente de descarga;

O valor C_d é dado de acordo com a Figura 35, que representa os valores de C_d .

Figura 35 - Valores de C_d em relação a carga recebida pelo descarregador

Carga h (m)	Diâmetro do orifício, cm				
	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
0.20	0.653	0.632	0.609	0.607	0.607
0.40	0.651	0.625	0.610	0.607	0.607
0.60	0.648	0.625	0.610	0.607	0.608
0.80	0.645	0.623	0.610	0.607	0.608
1.00	0.642	0.622	0.610	0.607	0.608
1.50	0.638	0.622	0.610	0.607	0.608
2.00	0.636	0.622	0.610	0.607	0.608
3.00	0.634	0.621	0.611	0.607	0.608
5.00	0.634	0.621	0.611	0.607	0.608
10.00	0.634	0.621	0.611	0.607	0.609

Fonte: Azevedo Neto, 2015

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 CURVA DE NÍVEL

Para o dimensionamento da barragem neste terreno, considera-se que a cota nos limites do vale é de 1118 metros de elevação onde serão apoiadas as ombreiras e que no centro do vale seja de 1098 metros de elevação em relação ao nível do mar, elevando-se 0,40 metros a cada metro a partir do centro do eixo de barramento para cada lado até a cota 1118. Considera-se ainda que, na ombreira direita (montante para jusante) seja dimensionado um vertedouro.

4.2 DADOS OBTIDOS ATRAVÉS DOS MÉTODOS DO CAPÍTULO 3

Após os estudos realizados nos Capítulo 3, a Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para o pré-dimensionamento da barragem.

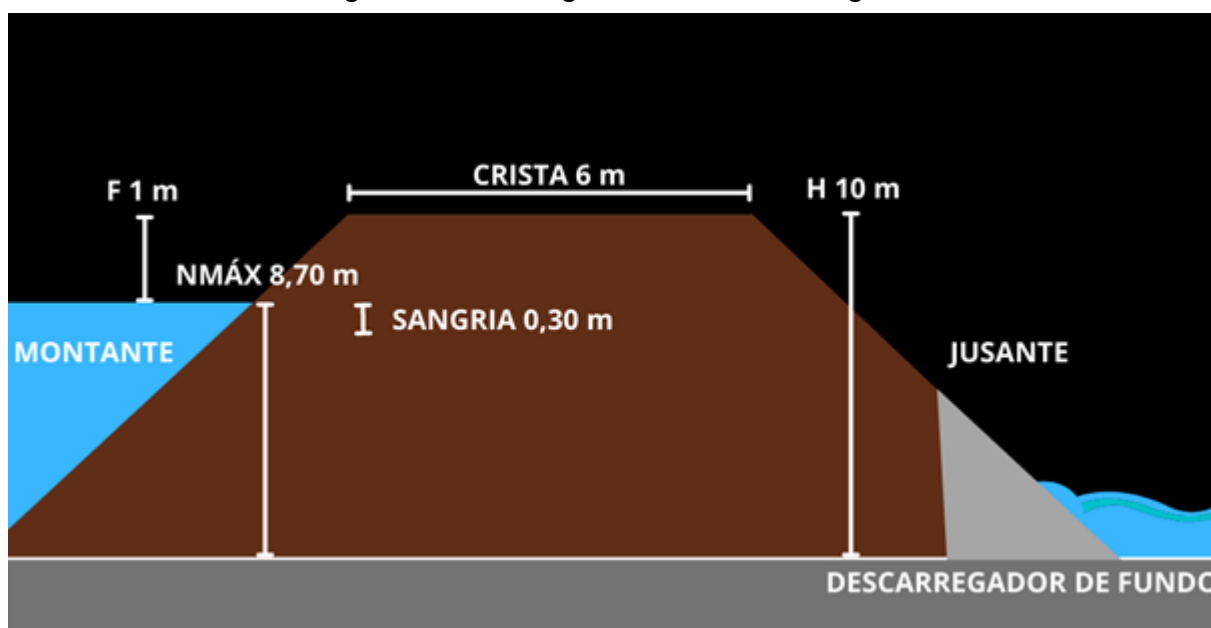
Tabela 1 - Resultados obtidos para o pré-dimensionamento da barragem

Item	Valor
Volume aproximado de água armazenada no lago via GPS	146 m ³
Cálculo de altura de onda	0,393585 m
Cálculo da velocidade de onda	2,287 m/s
Cálculo da folga	1 m
Definição da altura da lâmina do vertedouro	30 cm
Definição do nível máximo do reservatório	8,70 m
Cálculo do nível mínimo de água	5,22 m
Cota da soleira	1106
Cota do talvegue	1098
Cota máxima da barragem	1107,3
Cálculo de altura da barragem	10 m
Cálculo de largura de crista	6 m
Cálculo do tamanho do talude a montante	30 m
Cálculo do tamanho do talude a jusante	25 m
Cálculo da base da barragem	61 m
Cálculo de vazão pela barragem	$3,125e - 5 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$
Cálculo de proteção contra piping	Atende
Cálculo de vazão do rio que alimenta o reservatório da barragem	$0,74 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
Cálculo do extravasor	$0,82 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$
Cálculo da descarga de fundo	$0,55 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

Fonte: Autor, 2021

A Figura 36, apresenta os detalhes da barragem após o pré-dimensionamento.

Figura 36 - Vista geométrica da barragem



Fonte: Autor, 2021

4.3 PROTEÇÃO DOS TALUDES E COROAMENTO

4.3.1 Proteção dos taludes – Talude de montante

Para proteção do talude a montante, usa-se o que chamamos de rip-rap, que é basicamente formado por duas camadas. A primeira camada, entra em contato direto com o talude e é formada basicamente por materiais de menor granulometria, como por exemplo, areia, pedregulhos e britas. Por cima, adiciona-se camada superior do rip-rap, geralmente formada por rochas maiores, que não são carregadas pela força de onda gerada pelo vento da região.

A Figura 37, traz as espessuras mínimas do rip-rap para pequenos barramentos. De acordo com o tamanho máximo do reservatório formado pela barragem, admite-se que a espessura mínima seja de quarenta e cinco centímetros.

Figura 37 - Espessura mínima do enrocamento

Fetch (km)	Espessura mínima (cm)
<1,5	45
4	60
8	75
>10	90

Fonte: Costa e Lança, 2001

4.3.2 Proteção dos taludes – Talude de jusante

Para evitar processos causados por intemperismo, opta-se pelo plantio de gramíneas presentes na região, além de drenos superficiais ao longo do talude.

4.3.3 Proteção do coroamento

No topo da barragem, aplica-se declividade de 2% para montante, com o intuito de drenagem hídrica. Aplica-se camada de cascalhos, também presentes na região, para minimizar possíveis erosões.

A Figura 38, detalha qual será a aparência final após a aplicação das proteções ao talude.

Figura 38 - Taludes após proteções



Fonte: CMB Consultoria, 2007

5 CONCLUSÃO

O trabalho apresentado proporcionou um levantamento das principais características das barragens existentes no Brasil.

Possui-se no Brasil grandes bacias hidrográficas, grandes reservas de minerais e uma grande população, o que faz com que no território nacional, haja necessidade de barragens, de pequeno e grande porte, para os mais diversos usos.

Na criação de energia elétrica, por exemplo, o país é altamente dependente da energia produzida por usinas hidrelétricas, que necessitam de grandes complexos de barragens, com é o caso da Usina Binacional de Itaipu que abastece grande parte da população do Brasil e do Paraguai. Apenas para essa finalidade há aproximadamente mil e trezentas barragens.

Em contrapartida, há necessidade de barragens de irrigação, controle de vazão, dessedentação animal e destinação de resíduos, que podem utilizar tecnologia mais retrógradas.

Após os acidentes envolvendo grandes barragens, despertou-se o questionamento de qual o método mais eficiente e seguro para construção de barragens.

Percebe-se que, apesar de existir tecnologias mais seguras, todos os métodos construtivos, podem ser seguros quando seguido os parâmetros exigidos pelas normas de engenharia, que visam a segurança dessas estruturas.

É necessário um projeto que possa prever, o início de funcionamento, quais as manutenções e o tempo entre elas e por fim o descomissionamento de uma barragem que já não atenda aos pré-requisitos de segurança mínimos exigidos ou que já tenha atingido o seu limite operacional.

Por outro lado, existe um grande desafio em monitorar todas as barragens do território nacional. Para se ter uma ideia, das quase vinte e duas mil barragens existentes no Brasil, doze mil não apresentam sequer informações, com altura e volume.

O pré-dimensionamento de uma barragem de terra é algo que requer um profundo estudo da região em que será instalado, sua utilização, suas dimensões e padrões de segurança.

Infelizmente no Brasil, muitas dessas barragens são construídas sem o acompanhamento de um engenheiro civil qualificado e até mesmo sem um projeto

técnico. Esse tipo de prática, pode causar acidentes que resultam em mortes e perdas materiais, que podem fazer com que, barragens de terra sejam associadas a estruturas não seguras.

A partir desse trabalho, novos estudos podem se basear em suas referências lógicas, fazendo com que novos acadêmicos se interessem por um tema complexo, mais essencial, que é a construção das mais diversas barragens.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Thiago. **Maior consumidor de água no Brasil, setor agrícola se defende e prega a precificação, educação e investimentos como soluções.**

Brasil. Disponível em:

<https://arquivos.ana.gov.br/institucional/sag/CobrancaUso/Noticias/BrasilPost-MaiorConsumidorDeAguaSetorAgricolaSeDefendeEPregaAPrecificacao,EducacaoEInvestimentos.pdf>. Acesso em: 16 set. 2021.

Azevedo, P.V., B.B. da Silva e M.F.G. Rodrigues, 1998. **Previsão Estatística das Chuvas de Outono no Estado do Ceará.** Rev. Bras. de Meteor., v. 13, no. 1, 19-30.

BRASIL DE FATO. **Das 24 mil barragens do Brasil, apenas 780 passaram por fiscalização.** Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br/2019/01/28/das-24-mil-barragens-do-brasil-apenas-780-passaram-por-fiscalizacao-em-2017/>. Acesso em: 19 abr. 2021.

BRASIL ESCOLA. **Rompimento da barragem em Brumadinho.** Disponível em:

<https://brasilecola.uol.com.br/biologia/rompimento-barragem-brumadinho.htm>.

Acesso em: 14 abr. 2021.

BRASIL ESCOLA. **Região norte.** Disponível em:

<https://brasilecola.uol.com.br/brasil/regiao-norte.htm>. Acesso em: 19 set. 2021.

CARVALHO, Victor. **Mercado Internacional de minério de ferro.** Ouro Preto, ano 2017. Disponível em:

CEDS. **Métodos de investigações aplicados em obras de construção de barragens.** Disponível em: <http://sou.undb.edu.br/public/publicacoes/metodos-de-investigacoes-aplicados-em-obras-de-construcao-de-barragens-cliusson-filho-e-claudemir-gomes1.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2021

Costa, T. da; Lança, R. **Capítulo I. Hidrologia de Superfície. Escola Superior de Tecnologia. Área de Engenharia Civil, Núcleo de Hidráulica e Ambiente.**

Universidade do Algarve. Faro, Portugal, 2001.

DNPM. **Ferro (Fe).** Disponível em: <https://www.dnpm-pe.gov.br/Detalhes/Ferro.htm>.

Acesso em: 18 set. 2021.

ECYCLE. **Brasil tem 156 barragens em condição crítica espalhadas pelo país.**

Disponível em: [https://www.ecycle.com.br/component/content/article/63-meio-ambiente/8421-brasil-tem-156-barragens-em-condicao-critica-espalhadas-pelo-pais.html#:~:text=Relat%C3%B3rio%20da%20Ag%C3%A2ncia%20Nacional%20de%20%C3%81guas%20\(ANA\)%20mostra%20que%20o,os%20tipos%20em%2022%20estados..](https://www.ecycle.com.br/component/content/article/63-meio-ambiente/8421-brasil-tem-156-barragens-em-condicao-critica-espalhadas-pelo-pais.html#:~:text=Relat%C3%B3rio%20da%20Ag%C3%A2ncia%20Nacional%20de%20%C3%81guas%20(ANA)%20mostra%20que%20o,os%20tipos%20em%2022%20estados..) Acesso em: 16 abr. 2021.

EDUCA MAIS BRASIL. **Economia da região sul.** Disponível em:

<https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/matematica/economia-da-regiao-sul>.

Acesso em: 19 set. 2021.

ELLOTO, B. V. .; BELCHIOR, G. F. .; MATTOS, M. de O.; SILVA, M. V. da .; VICENTINI, A. H. MÉTODOS CONSTRUTIVOS: BARRAGEM DE CONCRETO EM ARCO DUPLO. ANAIS DO FÓRUM DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO UNIFUNEC, [S. l.], v. 11, n. 11, 2021. Disponível em: <https://seer.unifunec.edu.br/index.php/forum/article/view/4916>. Acesso em: 30 maio. 20

FONSECA, I. F. D. A CONSTRUÇÃO DE GRANDES BARRAGENS NO BRASIL, NA CHINA E NA ÍNDIA: SIMILITUDES E PECULIARIDADES DOS PROCESSOS DE LICENCIAMENTO AMBIENTAL EM PAÍSES EMERGENTES. **IPEA**, Rio de Janeiro-RH, v. 1, n. 1, p. 8-30, ago./2013. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/2037/1/TD_1868.pdf. Acesso em: 21 abr. 2021.

G1. Entenda como funciona a barragem da Vale que se rompeu em Brumadinho. Disponível em:

<https://g1.globo.com/economia/noticia/2019/01/28/entenda-como-funciona-a-barragem-da-vale-que-se-rompeu-em-brumadinho.html>. Acesso em: 18 set 2021.

Geologia de barragens. (2016). (n.p.): Oficina de Textos. Disponível em: https://www.google.com.br/books/edition/Geologia_de_barragens/m9g6DAAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=0. Acesso em: 20 mai. 2021

GRASSI, Marco. **As águas do planeta**. Brasil, ano 2001. Disponível em: <http://qnesc.s bq.org.br/online/cadernos/01/aguas.pdf>. Acesso em: 20 set. 2021.

GUIA ESTUDO. **Economia da Região Sul**. Disponível em: <https://www.guiaestudo.com.br/economia-da-regiao-sul>. Acesso em 24 set 2021. https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/810/1/MONOGRAFIA_MercadoInternacionalMin%C3%A9rio.pdf. Acesso em: 15 set. 2021.

IBGE. **Países mais extensos do mundo**. Disponível em: <https://cnae.ibge.gov.br/en/component/content/article/94-7a12/7a12-vamos-conhecer-o-brasil/nosso-territorio/1461-o-brasil-no-mundo.html>. Acesso em: 15 set. 2021.

IBGE. **Pontos extremos e fronteiras**. Disponível em: https://educa.ibge.gov.br/images/7a12/mapas/Brasil/mapa_pontos-extremosfronteiras.pdf. Acesso em: 18 de out. 2021.

INFOPÉDIA. **Barragem**. Disponível em: <https://www.infopedia.pt/dicionarios/lingua-portuguesa/barragem>. Acesso em: 12 abr. 2021.

Itaipu Binacional. **Itaipu atualiza o planejamento estratégico empresarial**. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/itaipu-atualiza-o-planejamento-estrategico-empresarial>. Acesso em: 02 jun. 2021.

ITAIPU BINACIONAL. **Perguntas frequentes**. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/perguntas-frequentes>. Acesso em: 16 set. 2021.

JESUS, Carlos. **Ferro**. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/sumarios/ferro-sumario-mineral-2014>. Acesso em 16 set 2021.
MAPPA. **Curva de Nível: o que é e como fazer automaticamente?**. Disponível em: <https://mappa.ag/blog/curva-de-nivel-o-que-e-e-como-fazer-automaticamente/>. Acesso em: 11 dez. 2021.

Marques, C. P. Topografia e Geoprocessamento. Grupo A, 2017. 9788595022713. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595022713/>. Acesso em: 02 Jun. 2021

MEDEIROS, Fernanda. Relatório de segurança de barragens: 2019. **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**, Brasília-DF, v. 1, n. 1, p. 9-69, abr./2020. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2019/rsb19-v0.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

MELLO, F. M. D. **A história das Barragens no Brasil Séculos XIX, XX e XXI: Cinquenta anos do comitê brasileiro de barragens**. 1. ed. Rio de Janeiro-RJ: Imprensa Indústria Gráfica, 2011. p. 1-534.

MENDONÇA, Gustavo Henrique. "Bacia Amazônica"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/brasil/bacia-amazonica.htm>. Acesso em: 19 set. 2021.

MINERA JR.. **Conheça um pouco mais sobre as barragens de rejeito**. Disponível em: <https://minerajr.ufop.br/blog.texto26setembro.html>. Acesso em: 18 set. 2021.

Moliterno, A. Caderno de estruturas em alvenaria e concreto simples. Editora Blucher, 1995. 9788521216575. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521216575/>. Acesso em: 02 Jun. 2021

MUNDO EDUCAÇÃO. **Desastre ambiental em Brumadinho**. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/biologia/desastre-ambiental-brumadinho.htm>. Acesso em: 12 abr. 2021.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Região sudeste**. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/regiao-sudeste.htm>. Acesso em 18 set. 2021.

NBR. **ABNT NBR1308**. Disponível em: <https://pedlowski.files.wordpress.com/2019/03/nbr13028-2018.pdf>. Acesso em 24 mai. 2021.

POLITIZE!. **Barragem de rejeitos e os casos Mariana e Brumadinho**. Disponível em: <https://www.politize.com.br/barragem-de-rejeitos/#:~:text=No%20dia%205%20de%20novembro,cidade%20de%20Mariana%2C%20Minas%20Gerais..> Acesso em: 12 abr. 2021.

PUBLICA. **Brasil registra mais de três acidentes em barragens por ano**.

Disponível em: <https://apublica.org/2019/01/brasil-registra-mais-de-tres-acidentes-em-barragens-por-ano/>. Acesso em: 17 set. 2021.

PUC GOIAS. **Taludes de montante e jusante**. Disponível em: http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/barragem_terra_2.pdf. Acesso em: 15 set. 2021.

Queiroz, R. C. Geologia e geotecnia básica para engenharia civil. Editora Blucher, 2016. 9788521209584. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521209584/>. Acesso em: 02 Jun. 2021.

RADILEK, Peter et al. **Avaliação de pequenas barragens**. Brasília: Bureau of Reclamation, United States Department of Interior, 2002. 74 p. il. [Manual de Irrigação, v.6]

ROBERTSON, K. P., MELO, Lucas, WILLIAMS, J.D., WILSON, W.G.. **Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da barragem I Do Córrego do feijão**. Ano 2019. Disponível em: <https://bdrb1investigationstacc.z15.web.core.windows.net/assets/Feijao-Dam-I-Expert-Panel-Report-PORT.pdf>. Acesso em: 22 set. 2021.

SNISB. **Relatório anual de segurança de barragens 2019**. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2019>. Acesso em: 20 mai. 2021.

SILVA, Isabella. **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. ISSN 2675-0104 – v.4, n.1, jun. 2019. Disponível em: <http://www.revista.direitofranca.br/index.php/icfdf/article/viewFile/924/pdf>. Acesso em: 19 set. 2021

SINAGÊNCIAS. **ANA, ANEEL, ANM e órgãos federais se unem para atuação conjunta em segurança de barragens**. Disponível em: ANA, ANEEL, ANM e órgãos federais se unem para atuação conjunta em segurança de barragens – SINAGENCIAS. Acesso em: 15 set. 2021.

VALE. **Brumadinho**. Disponível em: <http://www.vale.com/esg/pt/Paginas/Brumadinho.aspx>. Acesso em: 17 set. 2021.

ANEXO I – RESULTADO DAS EQUAÇÕES

Cálculo da altura de onda

$$h = 0,75 + 0,032\sqrt{v'L} - 0,27^4\sqrt{v'L} \quad (1)$$

$$h = 0,75 + 0,032\sqrt{36 * 0,20} - 0,27^4\sqrt{36 * 0,20}$$

$$h = 0,393585\text{m}$$

Cálculo da velocidade de onda

$$V = 1,5 + 2 * h \quad (3)$$

$$V = 1,5 + 2 * 0,393585$$

$$V = 2,287\text{m/s}$$

Cálculo da folga

$$F = 0,75h + \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

$$F = 0,75 * 0,393585 + \left(\frac{2,287^2}{9,81}\right)$$

$$F = 0,5617\text{m}$$

Apesar do método acima ser seguro, optou-se por uma abordagem mais conservadora para a definição de altura da folga. Para tal, usa-se o método de Bureau of Reclamation, adotando o valor de um metro, conforme mostra a Figura 23 que define o valor de folga em função do comprimento do lago.

Cota da soleira

$$Cs = Ct + NA \quad (5)$$

$$Cs = 1098 + 8$$

$$Cs = 1106$$

Cota máxima da barragem

$$Cc = Cs + F + Hs \quad (6)$$

$$Cc = 1106 + 1 + 0,3$$

$$Cc = 1107,3$$

Cálculo de altura da barragem

$$H = Cc - Ct \quad (7)$$

$$H = 1108 - 1098$$

$$H = 10\text{m}$$

Cálculo de largura de crista

$$C = 3 + \frac{5}{17} * (H - 3) \quad (8)$$

$$C = 3 + \frac{5}{17} * (10 - 3)$$

$$C = 5,10\text{m}$$

De acordo com a Equação 9, adota-se o valor de largura de crista de seis metros.

Cálculo do nível mínimo de água

$$\text{N. A. min} = \text{N. A. máx} - 40\% \quad (9)$$

$$\text{N. A. min} = 8,70 - 40\%$$

$$\text{N. A. min} = 5,22\text{m}$$

Cálculo do tamanho dos taludes

Para talude a montante:

$$3 = \frac{L_{\text{montante}}}{H} \quad (10)$$

$$3 = \frac{L_{\text{montante}}}{10}$$

$$L_{\text{montante}} = 30\text{m}$$

Para talude a jusante:

$$2,5 = \frac{L_{\text{jusante}}}{10} \quad (11)$$

$$2,5 = \frac{L_{\text{jusante}}}{10}$$

$$L_{\text{jusante}} = 25\text{m}$$

Cálculo da base da barragem

$$B = L_{\text{montante}} + L_{\text{jusante}} + C \quad (12)$$

$$B = 30 + 25 + 6$$

$$B = 61\text{m}$$

Cálculo de vazão pela barragem

$$q = k * H * \frac{N_f}{N_q} \quad (13)$$

$$q = (1e - 7) * 1000 * \frac{5}{16}$$

$$q = 3,125e - 5 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \frac{1}{\text{m}}$$

Cálculo de proteção contra piping

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{85}(\text{solo})} < 4 \text{ ou } 5 \quad (15)$$

$$\frac{0,60}{5}$$

$$0,12$$

Atende as especificações da fórmula.

Cálculo de vazão do rio que alimenta o reservatório da barragem

$$n \cdot \frac{Q}{\sqrt{I}} = A * R^{\frac{2}{3}} \quad (16)$$

$$0,025 * \frac{Q}{\sqrt{1\%}} = 0,48 * (0,48/2)^{2/3}$$

$$Q = 0,74 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Cálculo do extravasora

$$n \cdot \frac{Q}{\sqrt{I}} = A * R^{\frac{2}{3}} \quad (16)$$

$$0,012 * \frac{Q}{\sqrt{1\%}} = 0,30 * (0,30/1,60)^{2/3}$$

$$Q = 0,82 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Cálculo da descarga de fundo

$$Q = C_d * A * \sqrt{2 * g * H} \quad (17)$$

$$Q = 0,6 * (\pi * 0,15^2) * \sqrt{2 * 9,81 * 8,55}$$

$$Q = 0,55 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$