



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDICIPLINAR DE ANGICOS – CMA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS – DENGE
INTERDISCIPLINAR EM CIENCIA E TECNOLOGIA

PEDRO FÉLIX DE MEDEIROS NETO

**PROCESSOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS MISTAS E INTERFERÊNCIA NO
DESEMPENHO DE OBRAS DE TERRA: ESTUDO NA LITERATURA**

ANGICOS – RN

2021

PEDRO FÉLIX DE MEDEIROS NETO

**PROCESSOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS MISTAS E INTERFERÊNCIA NO
DESEMPENHO DE OBRAS DE TERRA: ESTUDO NA LITERATURA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus Angicos, para obtenção do título de Bacharel em Ciência Tecnologia.

Orientadora: Marcilene Vieira da Nóbrega, Prof(a)
DSc

ANGICOS – RN

2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

N469p Neto, Pedro Félix de Medeiros.
 Processos construtivos de barragens mistas e
 interferência no desempenho de obras de terra:
 estudo na literatura / Pedro Félix de Medeiros
 Neto. - 2021.
 51 f. : il.

 Orientador: Marcilene Vieira da Nóbrega.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
 Tecnologia, 2021.

 1. Barragens mistas. 2. Processos contrutivos.
 3. Rupturas em barragens. 4. Tipos de barragens.
 I. Nóbrega, Marcilene Vieira da , orient. II.
 Título.

PEDRO FÉLIX DE MEDEIROS NETO

**PROCESSOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS MISTAS E INTERFERÊNCIA NO
DESEMPENHO DESSAS OBRAS DE TERRA: ESTUDO NA LITERATURA.**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA,
Campus Angicos, para obtenção do título de
Bacharel em Ciência e Tecnologia.

DEFENDIDA EM: 01/06/2021

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Marcilene Vieira da Nóbrega (UFERSA)
Presidente

Prof. Dr. Osvaldo Nogueira de Sousa Neto (UFERSA)
Primeiro membro

Prof. Dr. Arthur Gomes Dantas de Araújo (UFERSA)
Segundo membro

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em especial a minha avó, Maria Dantas de Medeiros em que esteve presente em todos os momentos da minha vida, sempre me apoiando e ajudando a enfrentar as batalhas da vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer a Deus por me dá forças, pois foi a ele que eu recorri nos momentos mais difíceis desta caminhada, dando forças para seguir em frente.

Agradeço a minha família, pois sem eles não teria chegado aqui. Agradeço a minha mãe, Claudete Dantas de Medeiros, a minha querida avó, Maria Dantas de Medeiros. Também ao meu pai Sergio Botelho e a minha mãe de coração, Fabiola Coelho a qual é minha maior incentivadora, sempre dando conselhos para a vida; a minha namorada Maria Alice, por ter a paciência de entender todos os momentos dedicados aos estudos.

Agradeço também aos meus amigos Francisco Wesley, Luís Victor, Pablo Adriel e Lucas Padilhas, companheiros de casa na qual passamos por inúmeras dificuldades, sempre um ajudado o outro. E também Rayanne Gomes, Fernanda Medeiros, Maria Gislaynne, Ruanne Nogueira, Pedro Victor e Matheus Delgado, por participarem desta caminhada com noites em claro estudando e se dedicando.

Agradeço imensamente a minha orientadora Prof(a) Marcilene Vieira da Nóbrega, por me indicar os melhores caminhos no desenvolvimento desta pesquisa, e pelos conhecimentos transmitidos.

“O sertanejo é, antes de tudo, um forte”.

(Engenheiro Euclides da Cunha)

RESUMO

As barragens são estruturas criadas pelo homem desde a antiguidade, que propiciam inúmeros benefícios à humanidade, com as suas mais diversas aplicações e de importância no âmbito social e econômico. Porém podem trazer várias consequências às populações que se encontram a jusante, ocasionados por falhas estruturais que podem gerar um colapso total das mesmas. Por conseguinte, este trabalho tem a finalidade de realizar estudos na literatura das diversas barragens mistas; processos construtivos, problemas que venham a ocorrer nas suas estruturas, consequências e soluções relacionadas. O trabalho foi realizado por meio de estudos na literatura, que foram recolhidas em periódicos, teses, dissertações e artigos científicos. Foi constatado que as barragens mistas apresentam estruturas simples, mas que devem ser realizadas com critérios técnico, devem ser bem elaboradas partindo de estudos preliminares, visando melhor qualidade nos seus processos construtivos, já que em muitas barragens foram levantados alguns problemas que podem levar essas estruturas a um colapso, baseado nesses levantamentos foram identificados os principais problemas que podem levar uma barragem mista a ruptura são: galgamento, piping e percolação. Nos últimos anos, o número de acidentes envolvendo barragens tem aumentado, tendo em vista, vários países criaram leis específicas para o controle, segurança e reparos, em que o Brasil foi criada a lei N° 12334/2010, que visa a segurança das barragens.

Palavras-chave: Barragens mistas. Processos construtivos. Rupturas em barragens. Tipos de barragens.

ABSTRACT

Dams are structures created by man since ancient times, which provide countless benefits to mankind with their various applications of great importance in the social and economic sphere. However, they can bring several consequences to the populations that are downstream, caused by structural failures that can cause their total collapse. Therefore, the purpose of this work is to carry out literature studies of the various mixed dams, construction processes, problems that may occur in their structures, consequences and related solutions. The work was carried out by means of studies in the literature, which were collected in periodicals, theses, dissertations, and articles. With the study it was observed that mixed dams have simple structures, but they must be built with a high degree of care, they must be well elaborated starting from well prepared preliminary studies aiming at better quality in their construction processes, since in many dams some problems that may lead these structures to collapse were raised. Based on these surveys the main problems that may lead a dam to collapse were identified, which are: overtopping, piping and percolation. In recent years, the number of accidents involving dams has increased, in view of which, several countries have created specific laws for the control, safety and repairs, in which Brazil was created the law N° 12334/2010, which aims at dam safety.

Keywords: Mixed dams. Construction processes. Dam failures. Types of dams.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Barragem de gravidade..	18
Figura 2- Barragem em arco ou aboboáda.	18
Figura 3- Barragem de contraforte.	19
Figura 4- Barragem de Apipucos na cidade de Recife.	20
Figura 5- Barragem de Cedros..	20
Figura 6- Barragem homogênea.	21
Figura 7- Barragem zonada..	21
Figura 8 - (a) Barragem de enrocamento com núcleo central. (b) Enrocamento com núcleo inclinado..	23
Figura 9 - Barragem de enrocamento com núcleo de concreto asfáltico.....	23
Figura 10 - Barragem de enrocamento com face de concreto.	24
Figura 11 - Aplicação do filtro.	27
Figura 12 - Transição dos materiais.	27
Figura 13 - Rip-Rap.....	28
Figura 14- Talude.	29
Figura 15- Vertedouro.	30
Figura 16 – materiais de terra no maciço da barragem.....	30
Figura 17 - Homogeneização do solo.	31
Figura 18 - Rolo pé-de-carneiro.	32
Figura 19 - Rolo pneumático.	33
Figura 20 - Rolo vibratório liso.	33
Figura 21 - Rolo tamping.	34
Figura 22 - Transporte e lançamento de concreto asfáltico.....	35
Figura 23 - Concretagem por meio de bombeamento.	36
Figura 24 - Barragem de Orós..	39
Figura 25 - Barragem UHE Campos Novos.....	41
Figura 26 - Ruptura na barragem Eng. Armando Ribeiro Gonçalves.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Acidentes históricos com barragens.	45
Tabela 2 - Categorias de causas de rompimento de barragens.	47
Tabela 3 - Idade das barragens em fracasso.	47

LISTA DE ABREVITURA E SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Águas
BEFC	Barragem De Enrocamento com Face De Concreto
BENA	Barragem De Enrocamento com Núcleo De Argila
BENCA	Barragem De Enrocamento com Núcleo De Concreto Asfáltico
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
PAE	Plano de Ação Emergencial
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
UHE	Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1	PARTE1 - BARRAGENS E SUAS CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	16
3.2	TIPOS DE BARRAGENS	16
3.2.1	Barragem de concreto	17
3.2.2	Barragens de terra.....	19
3.2.3	Barragens de enrocamento	21
3.3	BARRAGENS MISTAS	22
3.3.1	Tipos de barragens mistas	22
3.3.2	PROCESSOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS MISTAS	24
•	<i>Estudos preliminares</i>	24
•	<i>Fundações</i>	25
•	<i>Processo de transição dos materiais</i>	26
•	<i>Taludes</i>	28
•	<i>Crista</i>	29
•	<i>Borda livre</i>	29
•	<i>Vertedouro</i>	29
3.3.3	Materiais de vedação das barragens mistas	30
•	<i>Compactação dos enrocamentos</i>	36
3.4	PARTE 2 INFLUÊNCIA DA EXECUÇÃO DAS BARRAGENS MISTAS NA SUA VIDA ÚTIL – PESQUISAS REALIZADAS.	36
3.5	PROBLEMAS QUE OCORRERAM EM BARRAGENS MISTAS (CAUSAS, CONSEQUÊNCIAS E SOLUÇÕES).....	39
4	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48

REFERÊNCIAS50

1 INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas construídas transversalmente em vales de rios e riachos. São obras de importantes para a sociedade, pois acumulam grandes volumes de água, ocasionando diversos benefícios, tais como: geração de energia elétrica, consumo humano, consumo animal, irrigação, controle de cheias, acúmulo de resíduos, pesca e lazer. Para atender as diversas finalidades, as barragens também apresentam vários tipos de estruturas, e para escolher o tipo de barragem a ser construída, estudos devem ser realizados para atender as limitações, onde variam de região para região, determinando o tipo de barragens a ser construída e quais materiais irão compor o seu maciço.

Com o crescimento populacional desordenado, aumento das secas e crises hídricas, as barragens têm desempenhado um papel importante na história da humanidade, auxiliando no desenvolvimento das populações devido ao grande acúmulo de água. Porém, nos últimos anos a segurança das barragens vem chamando atenção cada vez mais devido aos eventuais acidentes. Muitos ocorrem pelas enchentes ocasionadas que podem produzir consequências catastróficas, em especial quando localizadas a montante de zonas bastante povoadas.

Devido a um grande aumento no número de acidentes, envolvendo as mais variadas barragens, muitos estudos estão sendo elaborados a fim de esclarecer os eventuais acontecimentos que ocasiona o colapso dessas estruturas.

Atualmente, vários países vêm elaborando leis específicas para o controle da segurança dessas estruturas, onde no Brasil, a lei que foi sancionada e a Lei 12.334/2010 que estabelece a segurança de barragens. Portanto, a pesquisa propôs apresentar casos de rupturas em barragens mistas, causas, consequências e soluções

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Realizar um estudo na literatura sobre barragens mistas com ênfase em seus processos construtivos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Fazer estudo sobre os conceitos básicos que envolvem as barragens mistas.
- Buscar pesquisas que relacionem os processos construtivos das barragens mistas e seu desempenho estrutural.
- Buscar na literatura casos de registros de colapsos em barragens mistas e relatar suas causas e consequências.
- Propor, baseado no estudo realizado, quais os procedimentos que devem ser adotados para evitar colapsos nesse tipo de estrutura.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Por se tratar de um estudo na literatura, o trabalho foi dividido em duas partes: primeiro realizou-se um levantamento sobre os conceitos básicos sobre barragens e o levantamento histórico dessa tecnologia. Em seguida, abordou-se especificamente as barragens mistas com sua definição, tipos, histórico de aplicação desse tipo de tecnologia e seus processos construtivos. Ainda dentro do estudo teórico básico foram colocados os principais problemas que podem ocorrer nesse tipo de estrutura, suas causas e soluções.

Na segunda parte da fundamentação teórica colocou-se o levantamento que foi realizado, como objetivo geral do trabalho, sobre as pesquisas realizadas para levantar barragens que tenham ocorrido problemas, suas causas, consequências e soluções apresentadas pelos autores.

3.1 Parte1 - Barragens e suas considerações gerais

As barragens são elementos estruturais construídos em vales de rios e riachos, construídas transversalmente ao curso d'água com a função de acumular água para as mais variadas finalidades, como: produção de energia elétrica, irrigação, abastecimento de água para o consumo humano, regularização contra as secas e enchentes, abastecimento de água para o uso industrial, navegação, aquicultura, lazer e turismo, acúmulo de resíduos industriais e de rejeitos de mineração.

Muitas das vezes a construção de uma barragem visa atender somente uma das finalidades citadas, no entanto, na maioria dos casos não é bem assim, ela acaba abrangendo as outras, dependendo do seu local de implantação. Por exemplo, uma barragem cuja a finalidade é controle de cheias e acaba servindo para recreação, aquicultura e abastecimento nos períodos de estiagem, entre outros. (MASSAD, 2010)

As barragens podem ser caracterizadas pelo tipo de material que a constitui, podendo serem construídas de terra, concreto, enrocamento e mistas, em que as barragens mistas são constituídas de dois ou mais materiais na sua seção transversal. (QUINTAS, 2002)

3.2 Tipos de barragens

Sabe-se que na atualidade as barragens podem ser construídas das mais diversas formas e variedades, atendendo aos seus objetivos, ao seu projeto hidráulico e ao tipo de material de construção a ser utilizado, atendendo a topografia e a geologia do local de construção. (MARANGON, 2004).

De acordo com Quintas, (2002), os principais tipos de barragens são barragens de concreto, barragens de terra e barragens de enrocamento. Neste item serão descritas de forma breve as barragens do tipo concreto e de terra. As barragens de enrocamento, nas quais se inserem as barragens mistas (objeto de estudo dessa pesquisa), serão tratadas de forma mais detalhada.

3.2.1 Barragem de concreto

As barragens de concreto podem ser constituídas de concreto simples ou concreto armado, podendo ser construídas das seguintes maneiras: barragem por gravidade, contraforte, arco ou abóboda (CAPUTO, 2017).

As barragens de concreto devem ser construídas sobre maciços rochosos que apresentem alta resistência e poucas fissuras, mesmo assim, fazendo necessário a remoção dessas capas superiores e executada a injeção de calda de cimento para aumentar a resistência e diminuir a permeabilidade (CAPUTO, 2017).

As barragens de gravidade (Figura 1) são estruturas sólidas de concreto, que tem sua estabilidade assegurada pelo peso de sua própria estrutura, sendo o tipo de barragem mais resistente e com menor custo de manutenção. Portanto, à necessidade de ser construída sobre uma fundação que apresente boas características de deformação, resistência e estanqueidade. (MARANGON, 2004).



Figura 1- Barragem de gravidade. FONTE: Disponível em: <https://www.engwhere.com.br/barragem-de-gravidade-represas-de-gravidade>.

As barragens em arco ou abóbada (Figura 2) são construídas em vales estreitos com altura superior à sua largura, geralmente são construídas de concreto armado, apresentando menor consumo de concreto quanto as barragens de gravidade, sua geometria é curvada para a montante da barragem onde as cargas transmitidas pela água são transferidas para as ombreiras sustentadas no maciço rochoso e com uma pequena parcela para fundação. (QUINTAS, 2002).



Figura 2- Barragem em arco ou aboboáda. FONTE: Disponível em: <https://www.jz.eng.br/tipos-de-contencoes-mais-usadas-na-engenharia/>

As barragens de contraforte (Figura 3) assim como as barragens em arco ou aboboádas, são constituídas de concreto armado. Construídas principalmente em lugares

onde há pouco material de empréstimo, e que a mão de obra seja abundante e barata. (QUINTAS, 2002).



Figura 3- Barragem de contraforte. FONTE: Disponível em:

<https://impermeabilizacao.komercialize.com.br/Post/67/tipos-de-barragens-e-como-evitar-rompimentos-catastroficos>

3.2.2 Barragens de terra

Sabe-se que a água é um elemento essencial para a vida humana. Com esse pensamento a sociedade procurou desenvolver meios para o acúmulo desse bem tão precioso, criando reservatórios em cursos d'água. O primeiro registro de uma barragem de terra foi a aproximadamente 5000 anos a.C. localizada no Egito e com altura de 12m. (MASSAD, 2010).

A primeira barragem de terra construída no Brasil foi na Região Nordeste do país, no Estado do Pernambuco, no final do século XVI. Conhecida como Açude Apipucos (Figura 4) e situada onde atualmente é a cidade de Recife (MELLO, 2010).



Figura 4- Barragem de Apipucos na cidade de Recife. FONTE: (MELLO, 2011, p.18.)

O avanço na construção de barragens no Brasil se deu no ano de 1880, logo após a grande seca no Nordeste, causada pelo fenômeno *El Niño*, que ocasionou várias mortes no nordeste brasileiro. A partir daí o imperador Dom Pedro II nomeou uma comissão para solução desses problemas naturais, com a criação de barragens e estradas de acesso ao litoral. A primeira barragem construída foi a do açude Cedro (Figura 5), situada no município de Quixadá, no Estado do Ceará. (MELLO, 2011).

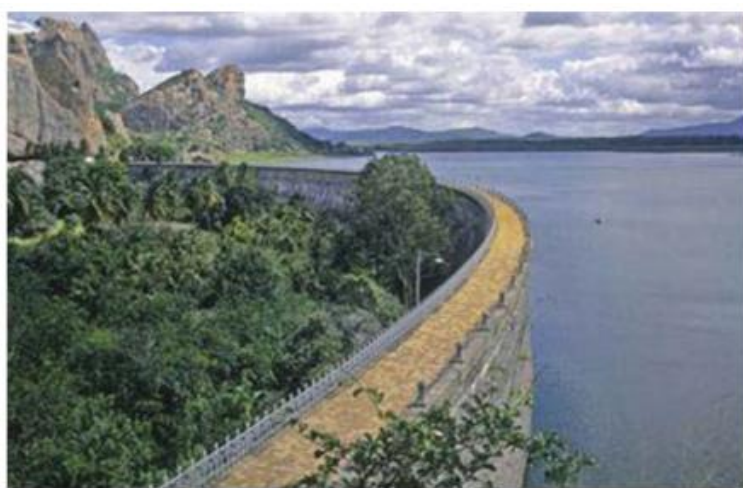


Figura 5- Barragem de Cedros. FONTE: (MELLO, 2011, p.19).

As barragens de terra são as mais frequentes no território brasileiro. Pode-se atribuir esse fato em função do Brasil possuir grande abundância de solo com as mais diversas características, dentre elas as argilas, considerado um dos melhores materiais

para construções de barragens. No que tange as barragens de terra, elas podem ser construídas de duas maneiras: homogêneas e zonadas.

As barragens homogêneas (Figura 6) são constituídas de um único material no seu corpo. Esse material deve apresentar alta resistência a tensão e permeabilidade, apresentar também uma inclinação suave nos taludes, minimizando a erosão e garantindo melhor estabilidade durante sua vida útil. (MASSAD, 2010).



Figura 6- Barragem homogênea. Fonte: (CAPUTO, 2017, p. 517)

As barragens zonadas (Figura 7), são caracterizadas por serem constituídas de um material impermeável no seu núcleo, e material permeável nos seus espaldares, como: areias, cascalhos ou misturas desses materiais, garantindo uma melhor estabilidade dos taludes. (MARANGON, 2004).

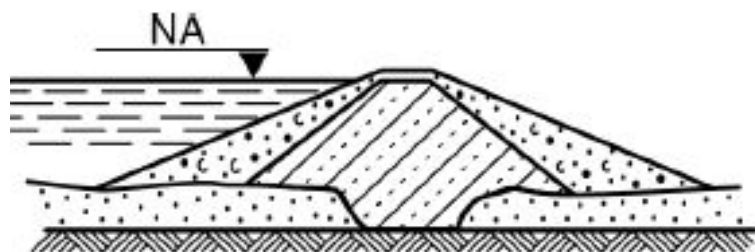


Figura 7- Barragem zonada. FONTE: (CAPUTO, 2017, p. 520).

3.2.3 Barragens de enrocamento

Até os primeiros anos do século XIX as barragens eram construídas apenas de solos homogêneos, quando Telford, iniciou o uso de argilas no núcleo de barragens, construindo as primeiras barragens de terra zonadas compactadas com o pisoteio humano e animal, garantindo melhor estanqueidade do material (MASSAD, 2010).

De acordo com Massad, (2010), só em 1850 foram construídas as barragens de enrocamento, sem compactação, na qual não tinha uma boa sustentação dos taludes, pois as rochas não se compactavam umas com as outras, causando recalques bruscos. Estudos declaram que esse método foi arquitetado pelos mineiros da Califórnia e só no século XIX para o século XX iniciou-se a compactação mecânica.

Segundo Cruz, (1996), os enrocamentos são materiais fragmentados de rochas, e quando submetidos a variações de tensões, apresentam falhas nas suas estruturas ocasionados pelo deslocamento ou rolamento dos materiais.

No decorrer dos anos, o conceito de enrocamento recebeu transformações, devido ao acúmulo de experiência. Como exemplo desta evolução, o enrocamento era meramente lançado. Atualmente, os enrocamentos são compactados com rolo vibratório, visando uma maior densidade e, conseqüentemente, atingindo maiores valores de rigidez e resistência do maciço. (Cruz, 1996)

3.3 Barragens mistas

Dentro das barragens de enrocamento, estão as barragens mistas (barragem estudada nesta pesquisa) que são constituídas por mais de um material na sua seção transversal, na qual o material empregado deve apresentar baixa permeabilidade.

Construir uma barragem mista, torna-se um empreendimento atrativo em locais que há pouco material de terra para empréstimo, adequado para o maciço impermeável. A presença de grandes volumes de escavações em rochas pode garantir o material necessário para conclusão da obra.

As barragens mistas precisam sempre de um elemento de vedação, já que os enrocamentos apresentam elevados índices de permeabilidade. O elemento de vedação define o tipo de barragem mista a ser construída. (QUINTAS, 2002)

3.3.1 Tipos de barragens mistas

✓ Barragens de enrocamento com núcleo de argila (Figura 8): constituída com um núcleo impermeável de argila e enrocamento nos seus espaldares, com o seu núcleo podendo ser construído de forma vertical ou inclinada, espesso ou delgado, em que na forma inclinada garante melhor estabilidade no enrocamento de jusante. Porém,

o enrocamento de montante apresenta menos estabilidade, mas as suas forças resultantes são compensadas com o enchimento do reservatório (GAIOTO, 2003).

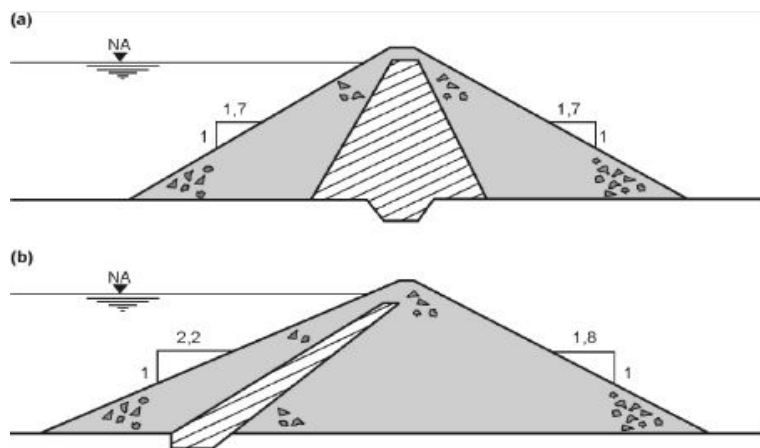


Figura 8 - (a) Barragem de enrocamento com núcleo central. (b) Enrocamento com núcleo inclinado.
Fonte: (MASSAD, 2010).

✓ Barragens de enrocamento com núcleo de concreto asfáltico (Figura 9): constituídas de material betuminoso no seu núcleo e enrocamento nos seus espaldares, essas barragens são geralmente construídas quando a pouco material de terra, que apresentem boas qualidades para a construção de uma barragem de terra/enrocamento. Sabe-se que o material betuminoso apresenta um elevado índice de elasticidade, sendo um diferencial na construção de barragens, pois ele tem a capacidade de suportar grandes deformações (MELO; CARDOSO; SOBIRES, 2016).



Figura 9 - Barragem de enrocamento com núcleo de concreto asfáltico. Fonte:
http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/puc_barragens_02_classificacao_2013-2.pdf

✓ Barragens de enrocamento com face de concreto (Figura 10): executadas de maneira que mais de 70% do seu corpo é composto de rochas, compactadas com

camadas acima de 60 cm e abaixo de 100 cm e eventualmente coberto por uma camada impermeabilizante de concreto no seu paramento de montante. (CRUZ; MATERÓN; FREITAS, 2014).

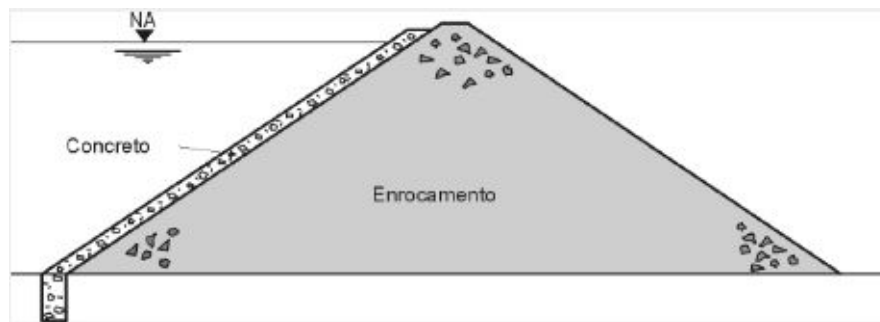


Figura 10 - Barragem de enrocamento com face de concreto. Fonte: (MASSAD, 2010)

3.3.2 Processos construtivos de barragens mistas

- *Estudos preliminares*

De acordo Gaioto, (2003), para a construção de uma barragem mista devem ser levados em consideração vários fatores de extrema importância antes da distinção dos processos construtivos.

A escolha do local de implantação de uma barragem se dá basicamente pelos estudos topográficos da região, condições geológicas - geotécnicas das fundações, materiais de construção, dimensões e locação do vertedouro, condições do meio ambiente, condições climáticas e experiência de construção.

O primeiro passo para a construção de uma barragem é a topografia. Os estudos topográficos da região determinarão os primeiros parâmetros para qual tipo de barragem é mais conveniente para o projeto. Esses estudos têm a finalidade de analisar os vales e a inclinação das ombreiras. Outra função importante dos levantamentos topográficos são os de arquitetar as seções transversais e perfil longitudinal mais adequadas para o projeto. (CHIOSSI, 2016).

O estudo geológico - geotécnico realizará as investigações na área de inundação e locação da barragem, acompanhando a evolução do projeto. A princípio, são realizados estudos com base no mapeamento geológico em que são analisadas fotografias aéreas, mapas topográficos e imagens de satélites que fazem investigações da superfície na qual

as finalidades são as pesquisas para materiais de construção e investigações nas fundações do projeto.

Os estudos hidrológicos, visa estudar as condições climáticas da região onde será implantada o maciço da barragem, com isso, tem finalidade de determinar o dimensionamento do vertedouro, cotas de cristas e borda livre da barragem. (COSTA, 2012)

A investigação da rocha de fundação estabelece técnicas para reconhecimento da superfície e subsuperfície, esses estudos de reconhecimento geológico são os de abertura de trincheiras e poços, sondagem a trado, percussão e rotativa. (GAIOTO, 2003).

De acordo com Cruz, (1996), os materiais devem ser analisados não só para materiais que iram compor o corpo da barragem, mas sim para diversos movimentos de terra, rochas e agregados. Esses materiais servirão para a construção de canteiros, estradas, desvios, ensecadeiras para o desvio dos rios, entre outros; destacando que os materiais de construção devem estar disponíveis nas proximidades da construção da barragem, tendo que dá prioridade aos materiais derivados de escavações obrigatórias.

A falta de planejamento na análise dos materiais para a construção pode levar a uma condição que acontece em muitas das construções de barragens, já que não é raro descobrir no decorrer da construção que o material acabou. Esse evento acaba alterando o orçamento da obra que em muitas vezes acaba ficando inviável a construção e parando a obra no seu decorrer.

- *Fundações*

As condições das fundações estão sujeitas às características físicas, químicas e mineralógicas das rochas, que suportará o peso da barragem. Nas investigações das fundações de uma barragem, coleta-se um testemunho de rocha, onde é realizada uma descrição mineralógica. Recomenda-se registrar a porcentagem de recuperação dos testemunhos e realizar os ensaios de perda d'água. Por meio desse ensaio, é possível determinar se a rocha de fundação é permeável ou não, caso apresente fraturas o material é permeável.

As rochas de fundação apresentam de imediato o problema da determinação da capacidade de carga em que a rocha deve resistir a esforços de cisalhamento, escorregamento, percolação e erosão. (CHIOSSI, 2016).

Nas fundações em rocha, grande maioria dos materiais de fundação não apontam influências na deformação da barragem e nem na estabilidade global da mesma, apenas os folhetos de rochas que apresentam aspectos descontínuos de baixa resistência. Visto que os folhetos apresentam menos capacidade de carga que os xistos. Outro fator importante que deve ser levado em consideração, é que não são resistentes a agentes do intemperismo, efeitos de percolação e agentes mecânicos. (CRUZ, 1996).

Nas fundações de solos sedimentares, abrange os mais diversos materiais como: cascalho, areias, siltes e argilas.

Os cascalhos estão submissos a grandes efeitos de percolação; nas areias, a necessidade de um cuidado especial quanto a estabilidade e estanqueidade pois também ocorre percolação, quando constituem a fundação da barragem. No caso de solos siltosos e argilosos deve-se observar o tipo de curva granulométrica do solo de fundação. Se porventura suas curvas apresentem descontinuidades em que os materiais constituintes não sejam filtros uns dos outros, tem que ser atribuído um “cut - off”. (CRUZ, 1996).

- *Processo de transição dos materiais*

Conforme Gaioto, (2003), para o processo construtivo do maciço de uma barragem, são solicitados alguns serviços essenciais, nas zonas de contato entre materiais diferentes, fundamentais para garantir o perfeito funcionamento de alguns dispositivos, como os filtros, transições, enrocamentos membranas de concreto e etc.

Os filtros (Figura 11) são elementos essenciais no processo de construção de uma barragem, na qual permite que o fluxo de água percorra sobre ele sem comprometer o maciço, esses filtros podem ser construídos de três maneiras, que são os tapetes drenantes, filtro pé de jusante e filtro em chaminé que pode ser vertical ou inclinada e materiais de transição.

Segundo Cruz, Materón, Freitas, (2014), nas barragens de enrocamento com face de concreto, é necessário o uso do filtro em chaminé mesmo se tratando de enrocamentos, pois os filtros evitam o acúmulo de água na parte superficial e diminuem a supressão no corpo da barragem.

Os filtros em chaminé, são filtros construídos de materiais granulares, em que na maioria das barragens são usadas um tipo de areia grossa natural. Gaioto, (2003), fala que sua espessura é da ordem de 1 metro, normalmente adotada em função da altura mínima

requerida para a sua construção. Podem ser lançadas de acordo com o levantamento da barragem ou também pode ser escavado uma valeta depois de levantado o maciço e aplicando a areia, compactando-a.

O filtro de tapete de drenante, é construído sobre a superfície de fundação, cuja sua função é evitar a percolação pela fundação da barragem, direcionando o fluxo de água para a jusante.



Figura 11 - Aplicação do filtro. Fonte: (GAIOTO, 2003)

O processo de transição dos materiais ocorre da seguinte forma: são geralmente construídos com blocos menores e aumentando as partículas gradativamente até chegar nos paramentos, na qual essas zonas de transições, permitem melhor distribuição das tensões causadas pelo enrocamento, fazendo com que as tensões no núcleo sejam mais uniformes (Figura 12), diminuindo o efeito da deformação diferencial. (NETO, 2013).



Figura 12 - Transição dos materiais. Fonte: (NETO, 2013)

O rip - rap (Figura 13) é um processo de construção que inclui uma camada de transição entre o enrocamento e o material impermeável. Nos aterros, as camadas são lançadas após a construção de uma certa altura do maciço e feito uma raspagem no talude

para realizar o lançamento do material que no caso é constituído de areia e brita, e em seguida lançado o enrocamento com blocos de rochas maiores.

Nas barragens de enrocamento com núcleo de concreto asfáltico, não é realizado esse procedimento, tendo em vista os materiais são lançados simultaneamente.



Figura 13 - Rip-Rap. Fonte: <https://www.facebook.com/inframataengenharia/posts/2424748267564708>

A transição entre estruturas de concreto e solos, são utilizados rolos pneumáticos, soquetes manuais, em camadas contínuas nas encostas do concreto. A compactação com rolos pneumáticos é mais eficiente, pois tem a capacidade de passar com os pneus bem próximos do contato entre o solo e o concreto. (GAIOTO, 2003).

- *Taludes*

Entende-se por taludes qualquer superfície inclinada que limita um maciço, que podem ser de rocha, terra ou até mesmo de ambos, naturais ou artificiais.

Os taludes naturais (Figura 14), muitas vezes conhecidos como encostas, são originados pelas ações geológicas ou intemperismo ao longo dos anos. Já os taludes artificiais são obras construídas pelo homem através de máquinas, em que o processo construtivo é conhecido como terraplanagem, essas obras são barragens, rodovias, ferrovias, e outras obras que necessitam de um barramento.

Nos taludes das barragens mistas, a inclinação irá depender dos tipos de materiais que serão empregados na sua composição, sua geometria interna, fundação e condições de construção e operação da obra. Para os enrocamentos devem ser adotadas, em condições preliminares conceitos de estudos de condições semelhantes. Pois, nas barragens de enrocamento, as inclinações são maiores, visto que não acontecem erosões

externas já que os enrocamentos são materiais com dimensões granulares maiores. (FILHO; ANDRADE, 2015)

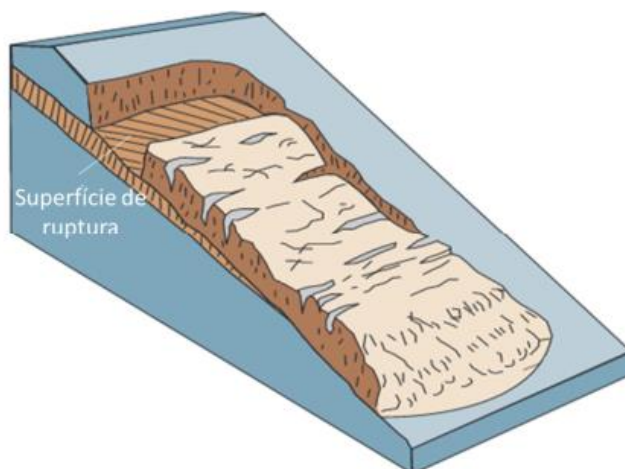


Figura 14- Talude. Fonte:(FILHO; ANDRADE, 2015)

- *Crista*

É a parte superior da barragem, sua largura varia de acordo com o tipo da barragem, porém, em muitos dos casos se adota uma largura de três metros para o tráfego de equipamentos de manutenção. (CRUZ, 1996)

- *Borda livre*

É a diferença entre a crista da barragem e a cota máxima do reservatório, essa diferença é projetada a fim de não deixar as ondas ocasionadas pelo vento ultrapassar a crista da barragem. (GAIOTO, 2003)

- *Vertedouro*

Segundo costa, (2012) o vertedouro de uma barragem pode ser dos mais variados tipos, podendo ser desde os mais convencionais, em calhas incorporadas a barragens ou em canais escavados em uma das margens, túneis e tulipa. Costa, (2012) também acrescenta que o problema mais frequente que pode ocorrer na estrutura refere-se à fixação das placas no maciço rochoso para evitar eventuais deslocamentos decorrentes do efeito de sucção provocado por vácuo hidráulico (Figura 15).



Figura 15- Vertedouro. (MELLO, 2011)

3.3.3 Materiais de vedação das barragens mistas

3.3.3.1 Barragens de enrocamento com núcleo de argila (BENA)

O material de terra (Figura 16): é transportado pelos mais diversos equipamentos, como: caçambas basculantes, dragas, correias transportadoras, calhas e tubulações. O material é lançado sobre a fundação ou superfície já compactadas do maciço, em camadas que serão definidas dependendo da granulometria do material e do grau de compactação do mesmo, o material é espalhado por uma máquina chamada motoniveladora, na qual irá distribuir o material formando camadas com a consistência desejada e devem ser espalhados paralelamente ao seu perfil longitudinal ou eixo da barragem, para evitar a formação de caminhos preferenciais de percolação. (GAIOTO, 2003).



Figura 16 – materiais de terra no maciço da barragem. Fonte:

<https://redepara.com.br/Noticia/197578/deputados-vistoriam-a-planta-industrial-do-salobo-e-sua-barragem-em-maraba>

- *Correção da umidade e homogeneização*

Para os materiais de terra, deve ser feita antes da compactação, a correção da umidade nas áreas de empréstimo. Em muitos dos casos os materiais são umedecidos para compensar as perdas de umidade no trajeto e lançamento do material, onde é tencionado que o material venha com a umidade acima da umidade ótima, garantindo melhor homogeneização do material e eficiência na compactação.

Muitas vezes as condições climáticas não auxiliam no processo construtivo, principalmente nos períodos com maiores incidências de chuva, deixando o material com elevado teor de umidade. Para ser feita a secagem do material, ele é exposto ao sol e gradeado com trator de pneus, antecipando o processo de secagem. Este gradeamento se dá na camada superficial do material.

A homogeneização (Figura 17): é realizada por tratores de pneus com grades de discos, em que trabalha continuamente as camadas de solos da barragem. Onde é utilizado para garantir uma mistura perfeita no material da camada posta com o material excedente da camada inferior, e por último como dito anteriormente otimização no teor de umidade do material. (GAIOTO, 2003).



Figura 17 - Homogeneização do solo. Fonte: <https://www.satel.com.br/tudo-que-voce-precisa-saber-sobre-terraplenagem/>

- *Compactação dos solos*

A técnica de compactação usada atualmente, se deu início em 1933, publicada pelo engenheiro norte americano, Ralph Proctor. Essa técnica é utilizada nas mais

diversas obras de Engenharia, como os aterros para diversas aplicações, como na construção de pavimentos, preenchimento com terra nas encostas de muros de arrimos, construção de barragens, entre outros. Cujas finalidades são aumentar a resistência, reduzir a deformação e diminuir a permeabilidade do material.

A compactação dos aterros em campo, consiste de diversos fatores: como áreas de empréstimo, transporte e lançamento dos materiais, correção da umidade e homogeneização, citados anteriormente.

Na compactação propriamente dita, deve-se escolher equipamentos padronizados de acordo com tipo do solo. Os principais tipos de equipamentos são rolos compactadores que podem ser vibratórios ou não, dos mais variados tipos e equipamentos de compactação manual.

O rolo pé de carneiro (Figura 18), são adequados para solos mais argilosos, pois têm a capacidade de penetrar já nas primeiras passadas na parte inferior das camadas, impossibilitando que uma placa superficial produza uma redução da ação do equipamento em profundidade. (MELLO, 1973).



Figura 18 - Rolo pé-de-carneiro. Fonte: (GAIOTO, 2003)

Os rolos pneumáticos (Figura 19), recebem uma importante influência do peso e da pressão nos pneus que podem variar entre 50 e 120 libras/pol², sendo bem dimensionados, se aplica a uma grande variedade de solos. Atualmente, são muito usados nas construções de pavimentos. (GAIOTO, 2003).



Figura 19 - Rolo pneumático. Fonte: <https://escad.com.br/frota-rolo-pneumatico/>

Rolo vibratório liso (Figura 20), são principalmente usados na compactação de materiais mais granulares, como areias, pedregulhos e enrocamentos. Os mais modernos, tem a capacidade de variar a frequência da vibração, podendo em muitos dos casos resultar uma maior eficiência na compactação do tipo de material. (GAIOTO, 2003)



Figura 20 - Rolo vibratório liso. Fonte: <https://mpterrapienagem.com.br/rolo-compactador-cat-cp-533-pd/>

Os rolos “tamping” (Figura 21) são rolos semelhantes ao rolo pé-de-carnero, o seu tambor apresenta patas mais largas e curtas. Eles podem operar com bastante eficiência com velocidades maiores que variam entre 15 e 20 km/h. (GAIOTO, 2003)



Figura 21 - Rolo tamping. Fonte: <https://mundialcursos.com.br/curso-operador-de-rolo-compactador/>

3.3.3.2 Barragem de enrocamento com núcleo concreto asfáltico (BENCA)

O concreto asfáltico é considerado um material betuminoso que é caracterizado pelo comportamento viscoso e elástico. Considerado um material que apresenta altas deformações na presença de elevadas temperaturas. Além destas características, os betumes devem exercer condições específicas relevantes a perda de massa pelo aumento da temperatura. (MELO, 2012).

A vedação tem posicionamento no núcleo do corpo da barragem confinante as tradições. Geralmente o núcleo é composto na posição vertical, e, para barragens que apresentam alturas elevadas, pode ser inclinado de montante para sentido jusante. Contudo, para construir o núcleo de concreto asfáltico inclinado se torna um empreendimento inviável, pois aumenta o custo na produção da barragem e aumenta a dificuldade nos reparos das trincas, sendo assim menos atrativa no processo de construção.

Como é grande a quantidade de concreto asfáltico aplicado na barragem, torna-se necessário a instalação de uma usina no canteiro de obra.

Esse material depois de usinado, é transportado e colocado na máquina pavimentadora como ilustrado na (Figura 22), em que deve dispor de características que permitam suporte do núcleo e garantam um comportamento integrado com o núcleo. (NETO, 2013).



Figura 22 - Transporte e lançamento de concreto asfáltico. Fonte: <https://pt.slideshare.net/rcdesenhos/barragem-de-enrocamento-com-nucleo-asfaltico-5651360>

- *Compactação do concreto asfáltico*

Atualmente o método mais utilizado é o da compactação mecânica, pois oferece melhores condições para um favorável controle nas suas propriedades e maior agilidade na sua execução. A partir de 1970, quase todas as (BENCA) passaram a ser executadas por essa tecnologia, pois elas apresentam baixo consumo de betume.

O núcleo asfáltico é lançado e ocorrem uma transição simultânea, rejeitando a utilização de formas, pois os materiais nas encostas oferecem uma armação ao núcleo. O lançamento e a compactação do núcleo e dos materiais de transição ocorrem ao mesmo tempo, sendo uma metodologia fundamental para garantia da qualidade do núcleo. Para isso, é necessário a utilização de três rolos de compactação, sendo dois para compactação dos enrocamentos de transições e uma para o núcleo de concreto asfáltico. A medida que a máquina vem lançando o material, dois dos rolos vem compactando os enrocamentos de transição e o terceiro realizando a compactação do núcleo. (MELO, 2012).

3.3.3.3 Barragem de enrocamento com face de concreto (BEFC)

Para o lançamento do concreto (Figura 23), emprega-se formas deslizantes de 1,3 metros de comprimento que operam a uma velocidade de 1 a 3 metros/hora sempre da parte mais baixa para mais alta. Usa-se no lançamento do material, caminhão betoneira, caçambas, bombas ou canaletas, em que estas últimas são as mais utilizadas; portanto faz-se necessário o lançamento do concreto quando a barragem está numa cota mais elevada, assim evitando recalques nas juntas antes do término da construção. (CRISPEL, 1991).

Para o firmamento do concreto a montante da barragem, é necessário a criação de um plinto no pé da barragem a montante.



Figura 23 - Concretagem por meio de bombeamento. Fonte: <https://www.eduric.com.br/produtos.html>

- *Compactação dos enrocamentos*

O lançamento de enrocamentos com emprego de rolos vibratórios e a aplicação das camadas mais delegadas são frequentemente empregadas para a área de montante da barragem, pois o principal objetivo é reduzir as deformações principalmente nos períodos de cheias das barragens. No paramento de jusante, também são usados a compactação com duas passadas. Em que é necessário o emprego de água para acelerar os recalques.

Além de que, procura-se usar um zoneamento interno no maciço da barragem, sendo necessário uma transição do material.

É comum observar que os enrocamentos se deformam com o nível de tensões aplicadas, mais também com o tipo de rocha, distribuição granulométrica e a forma dos blocos.

Um fator importante nos enrocamentos das barragens com face de concreto, é que o grau de compactação é crescente no sentido de jusante para montante no qual auxilia na impermeabilidade do maciço e também absorve o empuxo hidrostático e que suas camadas não podem ultrapassar a altura de 1 metro, visto que possibilitam maiores recalques. (CRUZ, 1996).

3.4 Parte 2 Influência da execução das barragens mistas na sua vida útil – pesquisas realizadas.

As barragens são estruturas que exigem critérios de segurança bem elaborados no seu projeto, construção e operação de planos de auscultação apropriado as complexidades de execução e riscos potencializados na sua estrutura.

Segundo o relatório de segurança de barragens, (2019), 70% das rupturas em barragens mistas devido as incertezas da capacidade de cheia, ocorrem nos primeiros 10 anos, em que as principais causas de acidentes são: insuficiente capacidade de descarga dos vertedouros e descarregador de fundo, causando o galgamento; problemas estruturais que causam erosão interna ou das fundações, formando um escoamento de água desordenado sobre o solo, conhecido como piping.

O galgamento ou transbordamento é um fenômeno que ocorre em períodos chuvosos, quando o vertedouro não tem a capacidade de extravasar totalmente a água afluente no rio, subindo o nível da água até transbordar pela crista, ocasionando as brechas devido o carregamento das partículas. (LAURIANO, 2009)

A erosão interna do solo se dá pela infiltração da água criando um entubamento no maciço da barragem, esse fenômeno é conhecido como “piping”. Nas barragens de terra eles são mais frequentes, principalmente quando ocorre o entupimento dos filtros drenantes. (TONUSSI, 2017)

Filho; Andrade, (2015) afirmam que os enrocamentos também são propícios a erosões, deslizamentos ocasionados pelas chuvas e ondas causadas pelos ventos na parte montante da barragem que se rompem por queda, salto ou rolamento.

A percolação é o fluxo de água fluindo no maciço da barragem e fundação, ocasionando falhas nas estruturas devido ao carregamento das partículas de solo ou de rochas, a qual a barragem está situada. (TONUSSI, 2017)

Nas barragens mistas, para evitar estes tipos de falhas nas estruturas, é necessário realizar o controle de fundação, em que o principal critério é evitar que o fluxo de água percorra o maciço e a fundação da barragem, evitando a ocorrência de percolação e “piping”.

Considerando que as barragens mistas podem ser construídas sobre um maciço permeável, como rochas fraturadas, cascalhos, areias, entre outros, as soluções existentes para o controle da percolação é a criação de cut – off e a injeção de calda de cimento dificultando a percolação.

O cut – off também conhecido como trincheira de vedação, refere-se a uma escavação feita no material de fundação, inteirada com solo compactado oriundo do núcleo impermeável, e no caso das barragens de enrocamento com núcleo de concreto

asfáltico, a trincheira de vedação é preenchida com mesmo material constituinte do núcleo. (LAURIANO, 2009).

Já para as barragens de enrocamento com face de concreto, a técnica utilizada é o alongamento do plinto camada de tapete impermeável a montante, que se baseia na lei de Darcy, em que diz que quando aumenta a distância de percolação a vazão tende a diminuir. (CRUZ, 1996).

Sabe-se que mesmo realizando estas etapas na construção, não se evita 100% da passagem de água pelo maciço, por isso faz-se necessário a criação de filtros e materiais de transição na construção da barragem direcionando a água para jusante sem comprometimento do maciço. (SOUZA, 2008)

Como boa parte do maciço dessas barragens são constituídas de enrocamentos, estes são os elementos mais estudados nesse tipo de estrutura, porque são os materiais que apresentam comportamentos mais complexos, na qual esses estudos se concentram em avaliar a resistência ao cisalhamento e deformabilidade. Crispel (1991) acrescenta que estudos da resistência visam a economicidade de se poder adotar taludes mais íngremes e investigações de compressibilidade, porém há receio de perdas d'água excessivas que podem prejudicar a rentabilidade da obra ocasionando fissuras.

Dentre as barragens mistas, a barragem de enrocamento com núcleo de concreto asfáltico e face de concreto vem ganhando espaço, devido as novas técnicas e equipamentos apropriados para a construção, mostrando algumas vantagens quanto as outras barragens de terra. Principalmente quando no local da construção não apresentam materiais suficientes para a vedação da barragem. Segundo Neto (2012), os custos dessas barragens são bem menores se comparados com as demais, apresentando rapidez na construção, confiabilidade em sua operação e pequenas limitações meteorológicas.

No Brasil, as barragens de enrocamento com núcleo de concreto asfáltico ainda é novidade, sendo que foram construídas apenas duas desse tipo, que são: a barragem de UHE Foz de Chapecó no estado de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, com altura de 48 metros, e a segunda no estado de Rondônia a barragem de UHE Jirau, localizada na Rio da Madeira inaugurada em 2016, com altura de 90 metros.

Melo, (2012), evidencia que as principais características do concreto asfáltico no uso em barragens, que são: baixa permeabilidade, para permitir uma perfeita permeabilidade; resistência suficiente contra os carregamentos externos; flexibilidade para suportar as deformações do aterro e fundações sem aparecimento de trincas; resistência ao envelhecimento; uma boa capacidade de cicatrização no caso de pequenas

fugas de finos, associados a resistência à erosão e boa aderência entre o concreto betuminoso e os materiais do aterro.

3.5 Problemas que ocorreram em barragens mistas (causas, consequências e soluções)

Durante anos, vários desses problemas citados acima ocorreram nos mais variados tipos de barragens, e no caso das barragens mistas não foi diferente. Abaixo são citados alguns acontecimentos históricos ocorridos no Brasil.

A barragem Presidente Juscelino Kubitschek de Oliveira, conhecido como açude Orós (Figura 24), foi construído no rio Jaguaribe, próximo à cidade de Orós, no estado do Ceará, com seu maciço constituído de enrocamento com núcleo de argila, que segundo Lauriano, (2009), em março de 1960, antes do término de sua construção, ocorreu uma precipitação inesperada em menos de uma semana, na qual este evento raro atingiu a área de drenagem da barragem.

Devido a reduzida capacidade de armazenamento da barragem, ocorreu um galgamento pela crista. O transbordamento ocorreu no dia 25 de março, criando uma brecha de 200 metros de comprimento e 35 metros de altura, com uma onda de cheia que atingiu o oceano Atlântico, localizado a 340 km de distância, causando vários danos aos moradores das cidades a jusante. Mello, (2011) destaca a grande importância das forças armadas nos resgates as vítimas, que segundo informações levantadas pelo autor, ocorreu apenas um óbito.



Figura 24 - Barragem de Orós. Fonte: (MELLO, 2011).

Lauriano, (2009) também relata o colapso das barragens Euclides da Cunha e Armando Salles de Oliveira, constituídas de enrocamento com núcleo de argila, que foram construídas nos anos de 1958 e 1966, no rio Pardo, no estado de São Paulo, segundo o autor, após de três semanas de chuvas intensas, no dia 20 de janeiro de 1977, uma cheia máxima de projeto, atingiu a barragem de Euclides da Cunha que estava situada a montante, na qual o problema ocorrido foi no controle de comportas do vertedouro que impediu a vazão da água, assim gerando o transbordamento, que gerou uma lamina de água de 1,2 metros, onde gerou uma brecha de 131 metros de comprimento e 53 metros de altura, que em seguida gerou uma galgamento em cascata, causando o galgamento na barragem de Armando Salles de Oliveira que abriu uma brecha de 168 metros de comprimento e 35 de altura, sem provocar mortes.

De acordo com Cruz; Materón; Freitas, (2014) a (BEFC) UHE Campos Novos no estado de Santa Catarina, localizada no rio Canoas, foi construída com enrocamentos compactado em camadas acima de 1,20 m de espessura, minimizando o tempo da construção. Porém, um acidente no túnel de desvio, que deveria estar lacrado, provocou o esvaziamento do reservatório em dois dias. Com o esvaziamento do reservatório, observaram o aparecimento de trincas na face de concreto, que essas camadas nos trechos com alturas mais elevadas, acabavam ocasionando recalques bruscos nos enrocamentos, provocando uma ruptura na laje como mostra a (Figura 25). Entretanto, ocorreu o mesmo fenômeno em outras três barragens durante o período de 2002 a 2006, Itapebi (2002), Barra Grande (2005) e Mohale (2006). Em particular na junta central da face em compressão como na barragem de UHE Campos Novos, na qual os autores relataram que as quatro barragens foram reparadas e estão em operação sem riscos de rupturas.

Segundo os autores, atualmente evita-se construir as camadas de enrocamento acima de 1 metro, minimizando os eventuais problemas possam chegar a ocorrer, principalmente nos primeiros anos de cheias das barragens.



Figura 25 - Barragem UHE Campos Novos. Fonte: (WILLINGHOEFER, 2015)

Por se tratar de um contexto regional, vale apresentar a ruptura da barragem Armando Ribeiro Gonçalves, conhecida como barragem de Açú, maior reservatório do Rio Grande do Norte. O acesso ao local é feito, a partir de Natal, pela BR-304 em que a distância da capital é cerca de 250 km.

A barragem de açú é composta de trechos homogêneos nas obreiras e de seções zonadas na parte central do maciço, em função das características da fundação.

A construção da barragem teve início no ano de 1979, com previsão de conclusão em fevereiro de 1982. Porém, em dezembro de 1981, quando a construção do aterro da barragem central encontrava-se com altura de 35 metros, ocorreu a ruptura do talude de montante da barragem. O primeiro sinal do acidente foi notado com o aparecimento de trincas na parede que se estendiam de forma descontínuas, ao longo da linha que define a superfície de jusante do núcleo da barragem. Onde em poucas horas as trincas foram se prolongando ao longo da barragem e aumentando a espessura, como apresentado na (Figura 26).



Figura 26 - Ruptura na barragem Eng. Armando Ribeiro Gonçalves. Fonte: <https://docplayer.com.br/64756007-Acidentes-barragens-no-brasil.html>

No relatório final sobre as causas dos acidentes, de acordo com notas publicadas pelo DNOCS na imprensa nacional em 1982. Atribui-se ao escorregamento às sobrepressões neutras no material argiloso que constitui o núcleo inferior da berma de montante.

Com o intuito de monitorar a barragem durante seus enchimentos, foram instalados marcos superficiais, extensômetros magnéticos, medidores de nível D'água, inclinômetros, piezômetros pneumáticos e piezômetros tipo Cassagrande nos trechos onde ocorreram os deslizamentos. (AMORIM, 2010)

No Brasil e em vários países do mundo, ocorreram vários acidentes envolvendo barragens, e que estes acidentes serviram de motivação à criação de leis específicas, normas e regulamentações a fim de garantir não só a estrutura das barragens, mas também o vale de jusante.

Para a solução de muitos desses problemas, no Brasil, no ano de 2010, foi sancionada a Lei Nº 12.334 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), essa lei se aplica à barragens destinadas a acumulação de água para quaisquer usos, a destinação temporária de rejeitos e a acumulação de resíduos industriais. Cujo os objetivos são:

- I. Garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências;
- II. Regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros de barragens em todo território nacional;
- III. Promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens;
- IV. Criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança;
- V. Corrigir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos;
- VI. Estabelece conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público;
- VII. Fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos.

Os órgãos públicos responsáveis por essas documentações são a Agência Nacional das Águas (ANA), institutos, secretarias e departamentos de cada região. (ANA, 2017).

De acordo ANA, (2017), para atuações de em casos de urgências e emergências, devem ser tomadas providencias inadiáveis, onde a gestão da emergência é efetuada em função do nível de resposta, que é a convenção utilizada para ordenar as situações que podem comprometer a segurança da população a jusante, procedidos pelo Plano de Ação Emergencial (PAE).

4 METODOLOGIA DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada por meio de um estudo na literatura, através de levantamento em periódicos e sites específicos de busca acadêmica. Para a realização da pesquisa utilizou-se algumas palavras chaves como: barragens mistas, processos construtivos; rupturas em barragens; tipos de barragens e barragens de enrocamento.

Na primeira etapa do trabalho, foi realizado um estudo sobre os conceitos básicos que envolvem as barragens mistas, buscando pesquisas que relacionem os processos construtivos das barragens mistas com o desempenho estrutural.

Na segunda etapa, realizou-se um levantamento de casos de registros de rupturas e colapsos envolvendo as barragens mistas, relatando as causas, consequências e quais procedimentos devem ser adotados para que esses eventos não ocorram. Nessa etapa foram pesquisados 6 artigos, 5 teses, 8 dissertações sendo a mais antiga em 1991 e a mais atual 2019.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos estudos levantados, observou-se que as principais influências nas estruturas das barragens, podem ser causadas por falhas nos processos construtivos e condições climáticas extremas, gerando fenômenos como: galgamento, percolação e piping.

Na fase dos processos construtivos, foi apresentado que os principais pontos de estudos das barragens mistas se deram na sua fundação, enrocamento e vedação. Onde o trabalho apontou algumas técnicas para amenizar os problemas de fundação como: a injeção de calda de cimento para a vedação das fendas existentes nas rochas, cut – off, conhecido como trincheira de vedação, aumento do comprimento do plinto e implantação de filtros de drenos.

Outro fator importante citado foi a criação de leis regulamentadoras, como a Lei 12.334 sancionada em 2010, para a elaboração de instrumentação e auscultação para garantir a segurança das barragens e o Plano de Ação Emergencial, para casos extremos, para que ocorra a evacuação das moradias a jusante, evitando mortes.

Fazendo uma análise dos resultados obtidos no referido trabalho, observou-se que os resultados corroboram com os trabalhos apresentados abaixo onde a pesquisa de Evangelista; Santos, (2019) foi uma pesquisa mais recente. Já no trabalho de Zhang; Yuanhua Xu. (2007), foi apresentado pela grande quantidade de barragens levantadas acrescentando informações mais detalhadas nos dados.

Evangelista; Santos, (2019) sucederam um levantamento bibliográfico a fim de identificar as principais causas de rompimentos nas estruturas de barragens e as principais consequências causadas por essas catástrofes.

Na Tabela 1, são apresentados alguns dos acidentes mais conhecidos, nacionalmente e internacionalmente, no qual aborda os tipos das barragens, fenômeno ocorrido, ano do acontecimento e números de mortos.

Tabela 1- Acidentes históricos com barragens. Fonte: Adaptado de (Evangelista; Santos, (2019) apud Jasen, (1993)

BARRAGENS	TIPO	CAUSA	ANO	CONSEQUÊNCIAS
South Fork - EUA	Terra	Galgamento	1853	Matou cerca de 2.200 pessoas
Dale Dyke - Inglaterra	Terra com núcleo de argila	Erosão interna	1864	Cerca de 238 mortos
Mill River - EUA	Terra	Galgamento	1874	Morte de 143 pessoas
Gove Dam	Enrocamento	Galgamento	1980	150 mortos

Barragem de Bouzey - França	Concreto Gravidade	galgamento	1895	Mais de 100 mortos
Austin na Pensilvânia - EUA	Concreto	Galgamento	1911	Média de 80 mortes
Barragem de St. Francis - EUA	Concreto em arco	Deslizamento da ombreira esquerda	1928	Matou 450 pessoas
Barragem Veja de Tera - Espanha	Contraforte	Galgamento	1958	Morreram 144 pessoas
Malpasset – França	Concreto em arco	Galgamento	1959	Matou cerca 421 pessoas
Orós – Brasil - Ceará	Terra e enrocamento	Galgamento	1960	Sem mortes devido a onda
Yar Dam	Terra	Galgamento	1961	Cerca de 145 mortes
Baldwin Hills – EUA	Terra	Erosão interna	1963	Cerca de 5 mortes
Barragem de vanjot – Itália	Concreto em arco	Galgamento	1963	Mais de 2.600 mortos
Búffalo Creek	Rejeito	galgamento	1972	Cerca de 125 mortos
Teton - EUA	Terra	Erosão interna	1976	Cerca de 11 pessoas mortas
Brumadinho - Brasil	Rejeito	Erosão interna	2019	Cerca de 250 mortes

Verificou-se que as principais influências nas estruturas são: galgamento; fenômeno causado por cheias e mal dimensionamento do vertedouro, assim causando o transbordamento pelo coroamento da barragem; piping, erosão interna e externa a jusante da barragem e percolação; quando o maciço da barragem absorve a água por meios porosos, onde esses problemas encontrados podem acarretar o colapso total da estrutura ocasionando perdas econômicas e mortes.

Zhang; Yuanhua xu. (2007), realizaram um estudo em mais de 900 casos de rompimentos de barragens em todo o mundo, coletados em literatura e compilados em um banco de dados. Em que 593 casos foram encontrados nas barragens com qualquer tipo de aterro. Dentre as 593 barragens estudadas foram retiradas para a análise 61 casos, destacando as barragens terra homogêneas, zonadas, enrocamento com núcleo de argila e enrocamento com face de concreto.

Os autores argumentaram que para a ocorrência de uma ruptura são levados em considerações vários fatores, deficiências das estruturas, diversos fenômenos climáticos, terrorismo e má gestão como apresentado na (Tabela 2). E que nas barragens mistas as

falhas são atribuídas principalmente ao galgamento, erosões no corpo e fundação da barragem parece ser menos provável. (ZHANG; YUANHUA XU, 2007)

Tabela 2 - Categorias de causas de rompimento de barragens. Fonte: Adaptado de Zhang; Yuanhua xu. (2007)

1 GALGAMENTO
Capacidade insuficiente do vertedouro
Inundação extrema excedendo os critérios do projeto
2 PROBLEMAS DE QUALIDADE
Tubulação no corpo da barragem
Deslizamento no corpo da barragem
Tubulação na fundação
Tubulação ao redor do vertedouro
Problemas de qualidade do vertedouro
Tubulações ao redor do bueiro e outras obras embutidas
Problemas de qualidade em bueiros e outras estruturas embutidas
3 MÁ GESTÃO
Diminuição da capacidade do reservatório para controle de enchentes devido ao excesso de armazenamento antes da temporada de cheias
Manutenção e operação deficientes
Elevação da crista do vertedouro não removida em tempo
Questão de organização: nenhum responsável pela gestão da barragem
4 DESASTRES
Terremoto
Guerras e ataques terroristas
Rompimento da barragem a montante
Toca de roedores e tatus
5 OUTROS
Bloqueio do vertedouro devido a deslizamento do reservatório
Rompimento devido a escavação na barragem para descarga
Mal planejamento do layout geral do projeto

Zhang; Yuanhua xu. (2007), também acrescenta que em muitos dos casos as barragens apresentam falhas nas suas estruturas antes mesmo dos 10 anos de vida, principalmente com os primeiros enchimentos após a construção, como consta na (Tabela 3).

Tabela 3 - Idade das barragens em fracasso. Fonte: Adaptado de Zhang; Yuanhua Xu, (2007)

Faixa etária	Número de casos	Porcentagem %
0-1	85	14.3
1-5	96	16.2
5-10	36	6.1
10-20	62	10.5
20-40	58	9.8
40-60	31	5.2

60-80	16	2.7
80-100	7	1.2
100-150	10	1.7
>150	6	1.0
Desconhecido	186	31.3
Soma	593	100.0

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho consistiu em entender os objetivos e problemas iniciais propostos, fundamentado por um estudo na literatura relacionando os conceitos básicos que envolvem as barragens mistas, mostrando os processos construtivos e apresentando problemas de rupturas envolvendo barragens mistas.

Ainda, as metodologias aplicadas foram suficientes para aplicar procedimentos e alcançar os objetivos gerais e específicos, onde a primeira etapa tinha a finalidade de relacionar os processos construtivos das barragens mistas, apresentando que sua eficiência pode ser comprometida através de ações climáticas, humanas e falhas nos processos construtivos, onde na maioria dos trabalhos levantados apontam que as principais rupturas são provenientes das ações climáticas, como por exemplo, chuvas intensas, fazendo com que o reservatório seja galgado.

Nesta pesquisa, também foram apresentados alguns casos de rupturas, onde foi mostrado rupturas em barragens mistas situadas no Brasil, mostrando suas causas e consequências. No entanto, na segunda etapa é verificada ainda algumas medidas para amenizar os impactos nas estruturas, tanto no processo de construção, como após a construção. Portanto, devido ao grande número de colapsos envolvendo barragens, foram criadas leis para supervisionar e controlar o comportamento destes fenômenos, como estudos preliminares, projetos bem elaborados e uma boa instrumentação/auscultação para que sejam evitados problemas futuros.

Por meio de estudos na literatura, autores na área de obras de terra, geologia – geotécnica e mecânica dos solos destacaram que as barragens são obras que requerem o máximo de cuidado nos seus processos construtivos, em que para a elaboração dessas estruturas devem ser realizadas por profissionais experientes, onde muitas dessas obras podem apresentar problemas complexos nos seus meios de produção. Diante destas constatações, a pesquisa assumiu importância, pois o projeto apresenta os problemas relevantes que podem ocorrer nos meios de produção e interferência durante sua vida útil.

Assim, no prosseguimento deste estudo, deve-se acompanhar as evoluções tecnológicas, que são implantadas nos processos construtivos e planos de instrumentação, em que constantemente novas tecnologias são implantadas aprimorando o comportamento destas estruturas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (Brasil). **Manual de políticas e práticas de segurança de barragens para entidades fiscalizadoras**. Brasília, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (Brasil). **Relatório de segurança de barragens**. Brasília, 2019.

AMORIM, Enio Fernandes. **Acidente na barregem Eng. Armando Ribeiro Gonçalves, em açu/RN**. Brasília. 12 p. 115-126, 2010.

BOUÇÃO, Carlos. **Deputados vistoriam a planta industrial do salobo e sua barragem em marabá**. Rede para. Disponível em: < <https://redepara.com.br/Noticia/197578/deputados-vistoriam-a-planta-industrial-do-salobo-e-sua-barragem-em-maraba> >. acesso em: 21/05/2021.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: mecânica das rochas, fundações e obras de terra**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

CHIOSSI, Nivaldo José. **Geologia de engenharia**. 3. ed. São Paulo: 2013.

CRISPEL, Flávio Alberto. **Barragem de enrocamento com face de concreto: simulação e parametrização por elementos finitos**. 1991. 257 p. Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 352 p.

CRUZ, P. T. d. **100 Barragens Brasileiras**. Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

CRUZ, Paulo T; MATERÓN, Bayardo; FREITAS, Manoel. **Barragens de enrocamento com face de concreto**. São Paulo: Oficina de texto, 2014.

ENGWHERE. **Barragem de gravidade ou represa de gravidade**. Disponível em: < <https://www.engwhere.com.br/barragem-de-gravidade-represas-de-gravidade/> >. Acesso em: 21/05/2021.

ESPÍNDOLA, Murilo, MACCARINE, Marciano. **Avaliação da densificação de uma mistura de enrocamentos para diferentes teores de finos**. São Paulo. v. 36, n. 3, p. 599 – 612, 2017.

EVANGELISTA, Tainara Messias dos Santos; SANTOS, isabella Christine de Paula. **Segurança de barragens: Uma revisão sistemática acerca das possíveis causas de rupturas em barragens e suas consequências**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Rio Verde, Rio Verde.

FERREIRA, Claudia. **Tipos de barragens e como evitar rompimentos catastróficos?**. Disponível em: <

<https://impermeabilizacao.komercialize.com.br/Post/67/tipos-de-barragens-e-como-evitar-rompimentos-catastroficos> >. Acesso em: 21/05/2021.

FILHO, Rodrigo José de Almeida Torres; ANDRADE, Vanessa Corrêa de. **Comparação entre análises determinísticas e probabilidade de estabilidade de taludes em barragens:** estudo de caso. 2015. 83 p. (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Curitiba.

FLAVIO MIGUEZ DE MELLO (Org.). **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI:** cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

GAIOTO, Nélcio. **Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento.** São Carlos: EESC-USP, 2003.

J.Z. ENGENHARIA. **Tipos de contenções mais usadas na engenharia.** Disponível em: < <https://www.jz.eng.br/tipos-de-contencoes-mais-usadas-na-engenharia/>>. Acesso em: 21/05/2021.

KLIMKIEVICZ, B. E. (2016). **Gestão de Risco Aplicado a Obras de Barragem.** Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-AA005/2016, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

LAURIANO, André Wilhian. **Estudo de ruptura da barragem de funil:** comparação entre os modelos fldwav e hec-ras. 2009. 193 f. dissertação (Mestrado) – universidade federal de minas gerais, escola de engenharia, Belo horizonte.

MARANGON, M. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra:** Barragens de Terra e enrocamento. 2004. 25 f. Material didático ou institucional. Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal De Juiz De Fora, Juiz de Fora, 2004.

MASSAD, Façal. **Obras de Terra:** Curso Básico de Geotecnia. 2. ed. Brasil: Oficina de texto, 2010.

MELO, Alexandre Prizmic; CARDOSO, Bruna da Silva; SOBIRES, Rinaldo Rosa. **Influência da Variação do Teor de Betume em Misturas Asfálticas para Aplicação em Barragem de Enrocamento com Núcleo de Concreto Asfáltico.** Engenharia do Século XXI, Belo Horizonte, v. 8, p. 31 – 41, 2019.

MELO, Rodrigo de. **Comportamento de percolação em barragens de enrocamento com núcleo de concreto asfáltico.** 2012. 94 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

NETO, Francisco Alberto David de Souza. **Concreto asfáltico para núcleo de barragens - caso da UHE Jirau, RO.** 2012. 131 p. Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola politécnica/ Curso de Engenharia, Rio de Janeiro.

QUINTAS, Fernandes Eduardo Geraldês. **Planejamento da Construção de Barragens de Terra**. 2002. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2002.

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

SOUSA, Kleber Isaac Silva. **Barragens de enrocamento com face de concreto: análise de tensões pelos elementos finitos na fase construtiva por etapas**. 2008.145 p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Textos, 2010.

TONUSSI, Artur Pagotto. **Estudo de ruptura de barragem por piping**. 2017. (GRADUAÇÃO) – Universidade Do Sul De Santa Catarina, Florianópolis.

WILLIINGHOEFER, Matheus. **Avaliação do Risco de Rompimento da Barragem de uma Pequena Central Hidrelétrica na Bacia do Rio do Peixe**. 2015. 86 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ZHANG, L. M.; XU, Y.; JIA, J. S. **Analysis of earth dam failures- A database approach**. *Isgsr2007- First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk*, Shanghai, v. 1, n. 1, p.293-302, 18 out. 2007.