

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

# ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA POR GALGAMENTO EM BARRAGENS USINA HIDRELÉTRICA DE EMBORCAÇÃO – MG

ANA LUIZA RABELO PRADO

BELO HORIZONTE

2019

## ANA LUIZA RABELO PRADO

# ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA POR GALGAMENTO EM BARRAGENS USINA HIDRELÉTRICA DE EMBORCAÇÃO – MG

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

Orientador(a): Prof.<sup>a</sup> Dra. Lilia Maria de Oliveira

**BELO HORIZONTE** 

2019

#### ANA LUIZA RABELO PRADO

## ESTUDO DE RUPTURA HIPOTÉTICA POR GALGAMENTO EM BARRAGENS USINA HIDRELÉTRICA EMBORCAÇÃO – MG

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

Data de aprovação: <u>*DS*/12</u>/19

Banca examinadora:

Lília Maria de Oliveira Prof<sup>a</sup> Dra. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Veenst, Amenl MADRE

Luciana Peixoto Amaral Prof<sup>a</sup> Dra. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Túlio Cesar Floripes Gonçalves Prof. MSc. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

#### RESUMO

PRADO, Ana Luiza Rabelo. Estudo de Ruptura Hipotética por Galgamento em Barragens – Estudo de Caso da Usina Hidrelétrica de Emborcação – MG. 2019. 55p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

Entre os diversos usos dos recursos hídricos, a utilização para fins de geração de energia por meio de usinas hidrelétricas é um dos mais comuns no Brasil, levando em consideração a abundância destes recursos no país. Basicamente, a estrutura de uma usina hidrelétrica é composta por barramento, sistema de captação e adução de água, casa de força e sistema extravasor. A barragem tem por objetivo interromper o curso normal do rio e permitir a formação do reservatório que, além de reservar a água, permitem a formação do desnível necessário para a configuração da energia hidráulica, a captação da água em volume adequado e a regularização da vazão dos rios em períodos de chuva ou estiagem. Em função das características técnicas das barragens, podem ocorrer diferentes tipos de falhas, dentre elas, pela ocorrência do galgamento (overtopping), que ocorre quando o nível d'água no reservatório se eleva além da cota da crista da barragem. Apesar da existência de diversos métodos de simulação de rompimento de barragens, faz-se necessário a utilização de um modelo adequado, levando em consideração todas as variáveis relacionadas a cada fenômeno de ruptura existente. Conhecer adequadamente o hidrograma afluente decorrente de um evento de ruptura permite a determinação dos tempos de alerta e evacuação de áreas a jusante A aplicação de parâmetros hidrológicos corretos para cada caso possibilita uma maior confiabilidade e estabilidade do modelo a ser utilizado. Para o estudo em questão, optou-se por aplicar um modelo de simulação de ruptura hipotética por galgamento na barragem da Usina Hidrelétrica de Emborcação em Araguari – MG, devido ao tipo do maciço da estrutura e a extensa área a ser impactada pelo empreendimento em caso de rompimento do reservatório. Como dados de entrada foram utilizadas as curvas cota x área x volume do reservatório e a curva de descarga do vertedor, além do histórico de vazões a fluentes ao reservatório de Emborcação obtidos através da Agência Nacional de Águas e os parâmetros de brecha de ruptura obtidos por diferentes métodos. Através da simulação utilizando o software HEC-HMS, foram obtidos hidrogramas de ruptura para os diferentes modelos, observando grandes variações nos valores de vazão de pico obtidas, apesar da proximidade dos volumes obtidos.

Palavras-Chave: Usina Hidrelétrica, Ruptura de Barragem, Galgamento, HEC-HMS.

#### ABSTRACT

PRADO, Ana Luiza Rabelo. Hypothetical Dam Break Study by Overtopping -Hydroelectric Power Station Emborcação Study Case – MG. 2019. 55p. Monograph (Graduate) – Departament of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

Among the various uses of water resources, the use for power generation through hydroelectric power station is one of the most common in Brazil, considering the abundance of these resources in the country. Basically, the structure of a hydroelectric power station is composed of a dam, a water intake and intake system, a powerhouse and an emergency spillway. The purpose of the dam is to interrupt the normal course of the river and allow the formation of a reservoir that, in addition to reserving water, allows the formation of the unevenness necessary for the configuration of hydraulic energy, the capture of water in adequate volume and the regularization of flow. rivers in periods of rain or drought. Due to the technical characteristics of the dams, different types of faults may occur, including the occurrence of overtopping, which occurs when the water level in the reservoir rises above the dam's crest level. Despite the existence of several dam rupture simulation methods, it is necessary to use an adequate model, taking into account all the variables related to each existing rupture phenomenon. Knowing properly the affluent hydrograph resulting from a rupture event allows the determination of alert times and evacuation of downstream areas. The application of the correct hydrological parameters for each case enables greater reliability and stability of the model to be used. For the study in question, it was decided to apply a hypothetical overtopping rupture simulation model in the dam of the Hydroelectric Power Station Emborcação in Araguari - MG, due to the structure's massive type and the large area to be impacted by the project in case reservoir rupture. As input data we used the elevation x area x volume curves of the reservoir and the discharge gage, as well as the history of inflows to the Emborcação reservoir obtained from the Agência Nacional de Águas and the rupture breach parameters obtained by different methods. Through the simulation using the HEC-HMS software, rupture hydrograms were obtained for the different models, observing large variations in the peak flow values obtained, despite the proximity of the obtained volumes.

Keywords: Hydroelectric Power Station, Dam Break, Overtopping, HEC-HMS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil esquemático de uma usina hidrelétrica1
Figura 2 - Barragem de Gravidade6
Figura 3 - Barragem de Arco7
Figura 4 - Barragem em contraforte7
Figura 5 - Barragem de terra - enrocamento8
Figura 6 - Exemplo de evolução de falha por erosão interna9
Figura 7 - Exemplo de evolução de falha por galgamento10
Figura 8 - Causas de rompimento de barragens12
Figura 9 - Sub-causas de rompimento de barragens13
Figura 10 - Representação da brecha de ruptura de barragem16
Figura 11 - Usina Hidrelétrica de Emborcação - Araguari - MG21
Figura 12 - Detalhamento da crista da barragem de Emborcação22
Figura 13 - Croqui esquemático do reservatório da UHE Emborcação23
Figura 14 – Localização da UHE Emborcação no Rio Paranaíba26
Figura 15 – Distribuição de UHE's na Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba27
Figura 16 - Representação da área de estudo no software HEC-HMS29
Figura 17 - Estrutura da simulação de ruptura hipotética da UHE de Emborcação29
Figura 18 - Série de vazões e volume útil máximos para a UHE Emborcação30
Figura 19 - Gráfico de Vazões Afluentes da UHE de Emborcação em 200731
Figura 20 - Curva Cota x Área x Volume da UHE Emborcação
Figura 21 - Perfil do vertedouro da Usina Hidrelétrica de Emborcação34
Figura 22 - Curva de descarga do vertedouro da UHE de Emborcação35
Figura 23 - Croqui dos parâmetros de brecha obtidos para Froehlich (2008)37
Figura 24 - Croqui dos parâmetros de brecha para Von Thun and Gillette (1990)37
Figura 25 - Croqui dos parâmetros de brecha obtidos para Fread e Harbaugh38
Figura 26 - Comparação dos hidrogramas de ruptura resultantes da simulação no
HEC-HMS
Figura 27 - Deplecionamento do reservatório e hidrograma para Von Thun e Gillette
(1990)
Figura 28 - Deplecionamento do reservatório e hidrograma para Fread e Harbaugh
40
Figura 29 - Deplecionamento do reservatório e hidrograma para Froehlich

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Alguns cidentes com barragens no Brasil	12
Quadro 2 - Matriz de Classificação de Barragens - ANA	15
Quadro 3 - Matriz de Classificação de Barragens - ANEEL	15
Quadro 4 - Definição dos parâmetros da brecha de ruptura	17
Quadro 5 - Classificação de Risco - Usina Hidrelétrica de Emborcação	24
Quadro 6 - Métodos Utilizados nas Simulações	29
Quadro 7 - Polinômios das curvas cota x área x volume da UHE Emborcação	32
Quadro 8 - Parâmetros de formação da brecha obtidos para a UHE Emborcação	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações empíricas para largura da brecha de ruptura	18
Tabela 2 - Coeficiente empírico conforme Von Thumn (1990)	18
Tabela 3 - Equações empíricas para determinação do tempo de formação da b	recha
	19
Tabela 4 - Características Físicas do Reservatório de Emborcação	22
Tabela 5 - Área municipal afetada pela UHE de Emborcação	27
Tabela 6 - Série de vazões afluentes da UHE de Emborcação em 2007	31
Tabela 7 - Dados da Curva Cota – Área – Volume – UHE Emborcação	32
Tabela 8 - Curva de descarga do vertedor da UHE Emborcação	35

### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANA Agência Nacional de Águas
- ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANM Agência Nacional de Mineração
- CEMIG Companhia Energética de Minas Gerais
- CFURH Compensação Financeira pela Utilização dos Recursos Hídricos
- CGH Centrais Geradoras de Energia
- CNRH Conselho Nacional de Recursos Hídricos
- DPA Dano Potencial Associado
- HEC HMS Hydrologic Modeling Systems
- HIDROWEB Sistema de Informações Hidrológicas
- IBAMA Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
- ICOLD International Commission on Large Dams
- IRSB Inspeções Regulares de Segurança de Barragens
- PAE Plano de Ação de Emergência
- PCH Pequena Central Hidrelétrica
- PSB Elaboração do Plano de Segurança de Barragens
- RHN Rede Hidrometeorológica Nacional
- RSB Revisão Periódica de Segurança de Barragens
- SAR Sistema de Acompanhamento de Reservatórios
- SIG Sistema de Informações Geográficas
- SNISB Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
- SNIRH Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos
- UHE Usina Hidrelétrica de Energia

# SUMÁRIO

1	I DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	1
2	2 JUSTIFICATIVA	3
3	3 OBJETIVOS	5
	3.1 Objetivo Geral	5
	3.2 Objetivos Específicos	5
4	1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
	4.1 Métodos construtivos de barragens	6
	4.1.1 Barragens em concreto	6
	4.1.2 Barragens de aterro	7
	4.2 Principais causas de rompimentos de barragens	9
	4.3 Histórico de acidentes com barragens no Brasil	11
	4.4 Influência no Meio Ambiente	13
	4.5 Legislação de Segurança de Barragens no Brasil	14
	4.6 Aspectos hidráulicos e hidrológicos no estudo do rompimento de	
	barragens	16
	4.6.1 Parâmetros de formação da brecha de ruptura	16
	4.6.2 Largura da brecha de ruptura	18
	4.6.3 Tempo de formação da brecha	19
	4.6.4 Aspectos Hidrológicos	20
5	5 METODOLOGIA	21
	5.1 Área de Estudo	21
	5.2 Caracterização da Bacia Hidrográfica e área à jusante da barragem	24
	5.3 Dados Hidrológicos da Barragem de Emborcação	28
	5.4 Simulação no HEC-HMS	28
6	S RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
	6.1 Estudo Hidrológico	30
	6.2 Curvas Cota x Área x Volume	32
	6.3 Curva de Descarga do Vertedor	34
	-	
	6.4 Parâmetros de brecha	36
7	6.4 Parâmetros de brecha CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	36 41

#### 1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Entre os diversos usos dos recursos hídricos, a utilização para fins de geração de energia por meio de usinas hidrelétricas é um dos mais comuns no Brasil, levando em consideração a abundância destes recursos no país. Segundo o Balanço Energético Nacional de 2018, o Brasil é o país com maior potencial hidrelétrico do mundo, chegando a possuir cerca de 1300 usinas hidrelétricas em operação com uma potência instalada de aproximadamente 99,3 GW (ENERGÉTICA, 2019).

Basicamente, a estrutura de uma usina hidrelétrica é composta por barramento, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouro de emergência, que funcionam em conjunto e de maneira integrada. (ANEEL, 2008).

Segundo o Art. 2 da Lei nº 12334 de setembro de 2010, "barragem é qalquer estrutura em um curso permanente ou temporário de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas", permitindo a formação do reservatório que, além de reservar a água, permitem a formação do desnível necessário para a configuração da energia hidráulica, a captação da água em volume adequado e a regularização da vazão dos rios em períodos de chuva ou estiagem.



Figura 1 - Perfil esquemático de uma usina hidrelétrica

Fonte: Altas de Energia Elétrica – ANEEL (2008).

Segundo Saliba (2009), acidentes e rupturas de barragens de usos diversos têm sido observados em território nacional. No entanto, observada a tradição do Brasil no setor de construção e operação de barragens, relativamente poucos esforços

foram feitos no sentido de contabilizar os riscos de ruptura inerentes a essas atividades.

Em função das características técnicas das barragens, podem ocorrer diferentes tipos de falhas, dentre elas, pela ocorrência do galgamento (*overtopping*), que ocorre quando o nível d'água no reservatório se eleva além da cota da crista da barragem, ou seja, quando o sistema extravasor não tem capacidade suficiente para escoar uma onda de cheia de projeto e a água verte sobre a crista, iniciando-se assim a erosão do talude de jusante da barragem que pode resultar na formação de uma brecha de ruptura de forma regressiva, bem como a ruptura global do barramento.

Apesar da existência de diversos métodos de simulação de rompimento de barragens, faz-se necessário a utilização de um modelo adequado, levando em consideração todas as variáveis relacionadas a cada fenômeno de ruptura existente. A aplicação de parâmetros hidrológicos corretos para cada caso possibilita uma maior confiabilidade e estabilidade do modelo a ser utilizado, a fim de se obter informações e cenários reais de ruptura para serem utilizados como base na formulação de um Plano de Ação de Emergência (PAE).

Neste trabalho serão expostas as etapas de um estudo hidrológico para simulação de rompimento hipotético de barragens pelo fenômeno de galgamento, comparando diferentes métodos em um estudo de caso na Usina Hidrelétrica de Emborcação, obtendo hidrogramas de ruptura.

#### 2 JUSTIFICATIVA

As barragens, levando-se em consideração o barramento, o reservatório e qualquer estrutura relacionada, são obras necessárias para a gestão dos recursos hídricos e contenção de rejeitos de mineração ou de resíduos industriais. Para tanto, é necessário que a operação e manutenção da barragem seja realizada adequadamente, bem realização de estudos hidrológicos de ruptura, para que seja possível conhecer o hidrograma deste evento, sendo essa uma etapa importante na a elaboração do PAE.

Apesar das legislações vigentes, metodologias e técnicas construtivas avançadas, a segurança das barragens é de extrema importância para o meio ambiente e a sociedade, pois a possibilidade de ruptura dessas estruturas vem gerando dúvidas e incertezas relacionadas à estabilidade das mesmas, levando-se em consideração os últimos acontecimentos de ruptura de barragens no Brasil.

A segurança de barragens deve ser considerada um aspecto fundamental tanto para os empreendedores quanto para as entidades legais relacionadas com este processo, tendo em vista os possíveis impactos a serem gerados por um evento de ruptura para a sociedade no entorno dessas estruturas assim como para o meio ambiente, sendo necessária a garantia das condições mínimas de segurança durante a sua operação e à desativação do empreendimento (ANA, 2016a).

Visto a importância da garantia de segurança das estruturas de barramento, a Lei nº 12334 de 20 de setembro de 2010 foi criada com o objetivo principal de, conforme seu Art. 3º, " *I - garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências*" além de proporcionar instrumentos de classificação de risco e acompanhamento da situação real das barragens que irão corroborar com a implementação de estudos adequados à cada tipo de estrutura.

O sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por Dano Potencial Associado (DPA), como instrumento da Lei supracitada, cita que as barragens classificadas como de DPA alto devem ter avaliadas as consequências adversas no caso de ruptura ou falha operacional da barragem por seus empreendedores. Sendo o fenômeno de galgamento a maior causa de rompimento em barragens de terra e enrocamento segundo o *International Commission on Large Dams* (ICOLD, 1973), o estudo de ruptura desses tipos de barragens é elemento indispensável para a segurança das mesmas bem como de seu entorno.

Conhecer adequadamente o hidrograma afluente decorrente de um evento de ruptura permite a determinação dos tempos de alerta e evacuação de áreas a jusante, bem como dos níveis de inundação e velocidades de escoamento associados, determinados por meio de propagação hidrodinâmica. A partir daí, pode-se elaborar um plano de emergência realista, que proporcione a minimização do número de vítimas, das perdas econômicas e de danos ao meio ambiente (SALIBA, 2009).

Para o estudo em questão, optou-se por aplicar um modelo de simulação de ruptura hipotética por galgamento na barragem da Usina Hidrelétrica de Emborcação em Araguari – MG devido ao tipo do maciço ser de terra-enrocamento e a extensa área a ser impactada pelo empreendimento em caso de rompimento do reservatório.

## **3 OBJETIVOS**

## 3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é a comparação de metodologias para geração de hidrogramas de ruptura de barragens pelo fenômeno de galgamento.

## 3.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, têm-se:

- Simular computacionalmente o rompimento hipotético da barragem da Usina Hidrelétrica de Emborcação no Rio Paranaíba.
- Utilizar características da barragem para prever a brecha de ruptura da estrutura pelo fenômeno de galgamento e estimar a vazão máxima para geração de hidrogramas de rompimento através do software HEC-HMS (*Hydrologic Modeling Systems*).

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 4.1 Métodos construtivos de barragens

A barragem é uma barreira utilizada para regularizar a vazão de um rio e se destina a represar a água para diversas finalidades, sendo a principal para geração de energia. Normalmente, as barragens utilizadas em usinas hidrelétricas podem se dividir em dois tipos principais: barragens de concreto e barragens de aterro.

#### 4.1.1 Barragens em concreto

As barragens de concreto são aquelas construídas essencialmente com materiais granulares naturais (areia) ou produzidos artificialmente (ANA, 2016), e podem ser classificadas como barragens de gravidade, barragens em arco ou barragens de contrafortes armados. As barragens de gravidade têm seção trapezoidal, sendo indicadas para vales largos de declividade suave, e pela grande pressão em sua fundação necessita que a mesma seja ancorada em rocha.



Figura 2 - Barragem de Gravidade

Fonte: VIEIRA JUNIOR e SALLES, 2011.

A barragem em arco é uma barragem de concreto massa ou armado, curvada para montante na direção do reservatório, sendo indicada para vales estreitos. A curvatura em planta assegura um comportamento arco, que equilibra grande parte das pressões da água, desde que as ombreiras assegurem o necessário apoio (ANA, 2016).





Fonte: VIEIRA JUNIOR e SALLES, 2011

A barragem em contraforte é formada por uma laje impermeável à montante, apoiada em contrafortes verticais, exercendo compressão na fundação maior do que na barragem de concreto gravidade.



#### Figura 4 - Barragem em contraforte

Fonte: VIEIRA JUNIOR e SALLES, 2011

#### 4.1.2 Barragens de aterro

As barragens de aterro são estruturas essencialmente constituídas por materiais naturais ou processados, podendo ter diferentes tipos, de acordo com os fatores condicionantes locais (ANA, 2016), e são normalmente utilizadas em usinas hidrelétricas. As barragens de aterro se classificam em barragens de terra, de terra-enrocamento e de enrocamento.

Segundo Eletrobrás (2000), a barragem de terra é apropriada para locais onde a topografia se apresenta suavemente ondulada, nos vales pouco encaixados, e onde existam áreas de empréstimo de materiais argilosos/arenosos suficientes para a construção do maciço compactado.

O enrocamento é um dispositivo amortecedor geralmente composto por estrutura executada em pedra, destinado à proteção de taludes e canais contra efeitos erosivos ou solapamentos, causados pelos fluxos d'água.

Segundo a Agência Nacional de Águas (2016), nas barragens mistas de terraenrocamento, os taludes podem ser mais íngremes do que nas barragens de terra, o que permite reduzir consideravelmente o volume da barragem. Nessas estruturas, o aterro é feito com fragmentos de rocha ou cascalho, compactado em camadas, e devem possuir uma zona impermeável, formada por solos e filtros de material granular, sendo particularmente adequadas para obras de grande altura (para obras de altura inferior a 20 metros.



#### Figura 5 - Barragem de terra - enrocamento

Os acidentes ocorridos em barragens dependem do tipo de barragem em que ocorrem, em função, principalmente, das suas características físicas e métodos construtivos.

Segundo Rute (2018), levantamentos históricos de eventos envolvendo o rompimento de barragens indicam que, de modo geral, as estruturas nas quais o maciço é constituído por terra contribuem com os maiores índices de acidentes registrados.

Fonte: MARANGON, 2009.

#### 4.2 Principais causas de rompimentos de barragens

Segundo Lauriano (2009), a ruptura de barragens é um evento que possui baixa probabilidade de ocorrência, porém apresenta um elevado potencial de destruição no vale a jusante.

Segundo Collischonn (1997), o tipo de barragem é importante no que diz respeito às causas da ruptura. As barragens de concreto são mais suscetíveis a problemas na fundação ou na estrutura, vindo a ocorrer colapsos quase instantâneos. Já as barragens de terra são sensíveis ao galgamento, em cheias maiores que as de projeto, quando o vertedouro não é suficiente e a água verte sobre a crista da barragem.

Normalmente, as causas de ruptura de barragens podem estar relacionadas à três tipos de fenômenos: a erosão interna (*pipping*), o galgamento (*overtopping*) ou falhas na fundação. O fenômeno de erosão interna ou *pipping*, segundo Mota (2017), ocorre quando a água se infiltra pelo solo compactado ou pela fundação gerando forças erosivas que puxam as partículas do solo através da percolação da água formando um tubo ou um canal no interior da barragem.

O início da ocorrência de erosão interna se dá no momento em que as forças de percolação excedem as forças resistentes da estrutura (RUTE, 2018). A Figura 6 abaixo é um exemplo da evolução de ruptura de barragens pelo fenômeno de *piping*.



#### Figura 6 - Exemplo de evolução de falha por erosão interna.

Fonte: USACE (2014).

De acordo com a ANA, o fenômeno de galgamento está relacionado com a elevação do nível d'água no reservatório:

"A ruptura por galgamento ocorre quando o nível d'água no reservatório se eleva além da cota da crista da barragem. No caso das barragens de terra, o galgamento produz um arraste de materiais e a posterior ruptura. No caso das barragens de concreto, um galgamento não produz necessariamente uma ruptura, porém, as sobrecargas a que a barragem pode ser submetida podem conduzi-la à ruptura (ANA, 2012, p.15)"

Cheias ao longo dos vales são eventos comuns que se repetem periodicamente, de maior ou menor magnitude (BALBI, 2008). Para a ruptura por galgamento ocasionada por chuvas intensas, as chuvas – e, consequentemente as vazões resultantes – podem ser muito diferentes, mas a associação de todas as vazões geradas concorre para elevar o nível acima da crista da barragem, como mostra a Figura 7 abaixo.





Fonte: USACE (2014).

Ainda em relação à ruptura por galgamento, segundo a ANA (2012), esse tipo de rompimento também pode ser causado por uma ruptura a montante de outra barragem, de tal modo que a barragem de jusante é incapaz de laminar e verter todo volume advindo da barragem de montante, elevando-se o nível acima da cota da crista e provocando uma ruptura em cascata.

Segundo Jónatas (2013), o galgamento em barragens de terra causa o corte em profundidade do coroamento e a erosão do material do talude de jusante produzindo à formação de uma área frágil fazendo que a barragem colapse localmente, podendo o processo de corte em profundidade evoluir até atingir a base da barragem.

#### 4.3 Histórico de acidentes com barragens no Brasil

Nos últimos anos, acidentes e rupturas de barragens de usos diversos têm sido observados em território nacional. No entanto, observada a tradição do Brasil no setor de construção e operação de barragens, relativamente poucos esforços foram feitos no sentido de contabilizar os riscos de ruptura inerentes a essas atividades (SALIBA, 2009).

Apesar da aplicação de legislações e fiscalizações, atreladas a métodos e técnicas construtivas avançadas, a segurança das barragens vem sendo um assunto recorrente devido a insegurança frente aos riscos reais de ruptura dessas estruturas, gerando dúvidas e incertezas relacionadas à estabilidade das mesmas, levando-se em consideração o histórico de acidentes.

Diante dos principais desastres ambientais e sociais decorrentes do rompimento de barragens no Brasil, dois acidentes se destacam por suas magnitudes. O rompimento da Barragem de Fundão, em 2015, localizada no Município de Mariana em Minas Gerais, segundo a ANA, gerou imensos impactos ambientais, sociais e econômicos na bacia do Rio Doce, atingindo 35 cidades no estado de Minas Gerais e 03 (três) no Espirito Santo.

O mais recente cenário no Brasil envolvendo barragens ocorreu em janeiro de 2019, na Barragem B1, localizada no Município de Brumadinho em Minas Gerais, que além dos impactos sociais, de acordo com a Defesa Civil, chegando a 223 mortes e 70 desaparecidos, causou também impactos ambientais de grandes proporções, destruindo pelo menos 269,84 hectares (IBAMA, 2019).

O Quadro 1 a seguir mostra eventos de ruptura de barragens ocorridos no Brasil, sendo alguns destes ocasionados pelo fenômeno de galgamento, como é o caso da UHE Euclides da Cunha, a barragem de São Francisco e o Açude de Orós.

Local	Ano	Finalidade da barragem
Ceará	1960	Reservatório de uso múltiplo,
São Paulo	1977	Geração de energia
Minas Gerais	1986	Barragem de rejeito minerário
Minas Gerais	2001	Barragem de rejeito minerário
Minas Gerais	2003	Barragem de rejeitos industriais
Minas Gerais	2007	Barragem de rejeito minerário
Minas Gerais	2015	Barragem de rejeito minerário
Minas Gerais	2019	Barragem de rejeito minerário
	Local Ceará São Paulo Minas Gerais Minas Gerais Minas Gerais Minas Gerais	LocalAnoCeará1960São Paulo1977Minas Gerais1986Minas Gerais2001Minas Gerais2003Minas Gerais2007Minas Gerais2015Minas Gerais2019

Quadro 1 – Alguns cidentes com barragens no Brasil

Fonte: Autoria própria (2019).

Segundo o ICOLD (1973), em barragens de terra e enrocamento, casos de *piping* e galgamento correspondem por 73% das causas de ruptura.

De acordo com Zhang, Xu e Jia (2007), as causas de rompimento de barragens com a maior porcentagem de ocorrência estão relacionadas com a erosão e deslizamento e o galgamento, tendo como causa secundária mais comum (cerca de 60%) a erosão no corpo da barragem, conforme Figura 8 e Figura 9 a seguir.

#### Figura 8 - Causas de rompimento de barragens



Fonte: MOTA (2017) adaptado de ZHANG, XU E JIA (2007).



Figura 9 - Sub-causas de rompimento de barragens

Fonte: MOTA (2017) adaptado de ZHANG, XU E JIA (2007).

#### 4.4 Influência no Meio Ambiente

No cenário de barramento para geração de energia elétrica, apesar da importância das usinas hidrelétricas de energia (UHE's) no setor econômico brasileiro, a implantação dessas estruturas para este fim vem sendo discutida em diversos setores da sociedade, compreendendo os danos sociais e ambientais decorrentes da área inundada proveniente do rompimento das barragens. Por outro lado, a discussão a respeito dos impactos das usinas hidrelétricas ganha uma importância ainda maior na medida em que a maior parte do potencial hidrelétrico brasileiro a ser explorado encontra-se na bacia amazônica (LIMA, 2015).

Dentre os impactos ambientais relacionados a hidrologia, clima, erosão, assoreamento e impactos sob a fauna e flora provenientes da instalação de usinas hidrelétricas previstas e analisadas em um Estudo de Impacto Ambiental, a possibilidade de rompimento da estrutura de barramento de água gera maior preocupação no que tange a magnitude dos dados sociais e ambientais advindos da ruptura, mostrando a importância dos estudos de impactos ambientais e métodos de análise de risco de rompimento para minimizar os danos ambientais e promover uma maior segurança dessas estruturas.

Em função dos impactos ambientais provenientes da implantação das UHE's, o Estado Brasileiro instituiu em 1988, através da Constituição Federal, a compensação financeira a ser paga pelas usinas hidrelétricas e trata-se de percentual pago por Itaipu Binacional (*Royalties*) e pelas concessionárias de geração hidrelétrica

(Compensação Financeira pela Utilização dos Recursos Hídricos – CFURH) em face da utilização de recursos hídricos.

A compensação financeira é um dos instrumentos econômicos importantes na gestão dos recursos hídricos e do meio ambiente, tendo como objetivo compensar os estados e municípios brasileiros pelas externalidades provocadas pela implantação de uma usina hidrelétrica.

#### 4.5 Legislação de Segurança de Barragens no Brasil

No Brasil, a inserção legal da temática de Segurança de Barragens se deu com a promulgação, em setembro de 2010, da Lei nº 12.334, onde os órgãos fiscalizadores foram inseridos no tema para executá-lo, como a Agência Nacional de Águas (ANA), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e seus órgãos descentralizados e a Agência Nacional de Mineração (ANM).

No que tange à Lei 12.334/2010, a mesma estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Este documento estabelece que as barragens serão classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco e por dano potencial associado, com base em critérios estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) (FERLA, 2017).

Em relação aos órgãos fiscalizadores, a ANA é responsável pela fiscalização das barragens de usos múltiplos que ela tenha outorgado o direito de uso dos recursos hídricos quando o objeto for acumulação de água e aquelas que sejam outorgáveis por ela, exceto para aproveitamento energético (NEVES, 2018). Já a ANEEL é responsável pela fiscalização das barragens com fins de geração hidrelétrica, sendo ela a entidade que concede ou autoriza o uso do potencial hidráulico nesta situação. (NEVES, 2018).

De acordo com a Lei nº 12.334/2010, ficam como obrigações dos empreendedores, os seguintes itens:

- Elaboração do Plano de Segurança de Barragens (PSB);
- Revisão Periódica de Segurança de Barragens (RSB);
- Inspeções Regulares de Segurança de Barragens (IRSB);
- Plano de Ação de Emergência (PAE).

Segundo Neves (2018), o PSB deve conter dados técnicos da barragem, levando em consideração as etapas como a construção, operação, manutenção e o panorama do estado atual da segurança, obtido por meio das inspeções realizadas. O instrumento deve servir como uma ferramenta de planejamento de gestão da segurança da barragem. Além disso, o PSB deve englobar também as inspeções e revisões periódicas de segurança com o objetivo de manter eficazes as medidas para prevenção de acidentes.

De acordo com a ANA, as barragens fiscalizadas devem seguir a Resolução Nº236/2017 e para a ANEEL, será utilizada a Resolução Nº696/2015, sendo que para ambas as resoluções, o Plano de Ação Emergencial será exigido para barragens de Classes A e B, conforme os Quadro 2 e Quadro 3 abaixo.

Catagoria da Risso	Dano Potencial Associado			
Categoria de Risco	Alto	Médio	Baixo	
Alto	А	В	С	
Médio	А	С	D	
Baixo	А	D	D	

Quadro 2 - Matriz de Classificação de Barragens - ANA

Fonte: Resolução Nº236/2017 - ANA.

Quality of matriz at oracomologico de Darrageno Antele
--

Coto norio do Disso	Dano Potencial Associado			
Calegona de Risco	Alto	Médio	Baixo	
Alto	А	В	В	
Médio	В	С	С	
Baixo	В	С	С	

Fonte: Resolução Nº696/2015 - ANEEL.

## 4.6 Aspectos hidráulicos e hidrológicos no estudo do rompimento de barragens

#### 4.6.1 Parâmetros de formação da brecha de ruptura

Segundo Lauriano (2010), "o processo de ruptura e formação da brecha é de grande influência para a magnitude, duração e forma do hidrograma de saída da barragem." De acordo com Collischonn e Tucci (1997) a brecha é "a abertura formada pela falha da barragem, pela qual a água do reservatório passa, podendo alargá-la e aprofundá-la". Na Figura 10 é representada a brecha de ruptura em barragens.



Figura 10 - Representação da brecha de ruptura de barragem

Fonte: Autoria própria (2019).

Os principais parâmetros geométricos que definem a geometria da brecha são:

- Profundidade da brecha (Hd): É a distância vertical entre a base inferior da brecha, após a sua completa formação, e a crista da barragem.
- Largura de base da brecha (Bbb): É a largura da base da brecha após a sua completa formação.
- Declividade dos taludes laterais (z): Caracterizam a forma de abertura da brecha.
- Largura média da brecha (B): Largura média da brecha obtida por equações empíricas.
- Altura do nível d'água (Hw): É a altura do nível d'água no momento da ruptura.

Além dos parâmetros geométricos, existe também o tempo de formação da brecha de ruptura, que é o intervalo de tempo entre o início da formação da brecha e a sua formação completa (MOTA, 2017).

Para determinação dos parâmetros de formação da brecha, existem diversos estudos e critérios de pesquisadores. De acordo com a Eletrobrás (2003), os dados necessários para um estudo deste tipo são topográficos e de configuração das margens e do fundo do rio (tipo de cobertura vegetal e uso do solo), bem como a cota definidora do início e do final da inundação; tempo para a formação da brecha de ruptura e a forma da brecha (largura, profundidade e ângulo lateral), de acordo com a Quadro 4 abaixo.

Tipo de barragem	Tempo para formação total da brecha (t)	Largura média da Brecha	Declividade da lateral da brecha (z)
Arco	t < 0,1 h	Comprimento da Crista	Entre zero e a declividade do vale
Contraforte	0,1 h < t < 0,3 h	Múltiplos trechos	Normalmente zero
Gravidade	0,1 h < t < 0,3 h	Um ou mais trechos	Normalmente zero
Terra e enrocamento	0,1 h < t < 1 h (compactada)	Entre 1 e 5 vezes a altura da barragem	Entre 0,25 e 1,0

Quadro 4 - Definição dos parâmetros da brecha de ruptura

Fonte: Adaptado de Eletrobrás (2003).

Nos itens a seguir serão apresentados os diferentes modelos de equações empíricas existentes para obtenção dos parâmetros de formação da brecha de ruptura bem como determinação da vazão de pico, dentre eles os métodos de Fread e Harbaugh (1976)<sup>1</sup>, Von Thun e Gillette (1990)<sup>2</sup> e Froehlich (2008)<sup>3</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> FREAD, D. L. e HARBAUGH T. E. [1973] *Transient hydraulic simulation of breached Earth dams, Proceedings A.S.C.E.*, Journal of the Hydraulic Division, vol. 99, n. 1, p. 139-154

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> VON THUN, J. L.; GILLETTE. D. R. 1990, *Guidance on Breach Parameters*, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado: 1990, 17 p.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> FROEHLICH, David. C. *Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties*. JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING, december, 2008.

#### 4.6.2 Largura da brecha de ruptura

Para a definição da largura da brecha de ruptura, poderão ser adotados modelos de formação de brecha com variação não linear inicialmente, como o modelo simplificado criado por Fread e Harbaugh em 1976. Usualmente a brecha é adotada como tendo forma triangular ou trapezoidal, com largura média que pode ser calculada pelas seguintes equações empíricas (Tabela 1).

Tabela 1 - Equações empíricas para largura da brecha de ruptura

Autor	Largura
Fread e Harbaugh (1976)	$B = 0,1803.K_0.(V.H)^{0,25}$
Von Thun e Gillette (1990)	$B = 2,5. h_w + C_b$
Froehlich (2008)	$B = 0,27. K_0. V_w^{0,32}. h_b^{0,04}$

Fonte: Adaptado de COSTA (1985) e WAHL 1998, apud, MOTA (2017).<sup>4</sup>

Onde:

B = largura média da brecha (m);

ko = coeficiente empírico dependente do tipo de material (ko=1,0 para galgamento);

V ou  $V_w$  = volume do reservatório no momento de ruptura (m<sup>3</sup>);

H = profundidade a montante, em metros acima do fundo da brecha;

h<sub>w</sub> = altura de água acima do fundo da brecha (m);

 $h_b = altura da brecha (m);$ 

C<sub>b</sub> = coeficiente empírico característico do material, conforme Tabela 2.

С <sub>ь</sub> (m)
6,1
18,3
42,7
54,9

Tabela 2 - Coeficiente empírico conforme Von Thumn (1990)

Fonte: Adaptado de MOTA (2017).

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Costa, J. E. (1985) – "Floods from Dam Failures", U.S. Geological Survey Open-File Report 85-560, 54 p, Denver, Colorado.

Froehlich (2008) indica para a inclinação lateral da brecha 1,0H:1V para ruptura em galgamento e 0,7H:1V para os outros tipos de ruptura.

#### 4.6.3 Tempo de formação da brecha

Para a definição do tempo de formação da brecha, poderá ser utilizado também os modelos de equações empíricas citados anteriormente para obtenção da largura da brecha, de acordo com a Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Equações empíricas para determinação do tempo de formação da brecha

Autor	Tempo de Ruptura
Fread e Harbaugh (1976)	$T = 0,00714.V^{0,47}.H^{-0,9}$
Von Thun e Gillette (1990)	$t_f = B/4h_w$
Froehlich (2008)	$t_f = 63.2 \ x \ \left(\frac{V_w}{g \ x \ {h_b}^2}\right)^{\frac{1}{2}}$

Fonte: Adaptado de COSTA (1985) e WAHL (1998), apud, MOTA (2017).

Onde:

T ou t<sub>f</sub> = tempo de ruptura (horas);

V ou V<sub>w</sub> = volume do reservatório (m<sup>3</sup>);

H = profundidade a montante (metros acima do fundo da brecha).

h<sub>w</sub> = altura de água acima do fundo da brecha (m);

 $h_b = altura da brecha (m);$ 

B = largura média da brecha (m);

g = aceleração da gravidade (9,80665 m/s<sup>2</sup>).

O tempo de formação da brecha é um dos parâmetros mais importantes na obtenção dos hidrogramas de ruptura. Quanto maior é o tempo de formação de brecha, mais laminados são os hidrogramas resultantes (ANA, 2012), ou seja, mais amortecidos.

Além dos parâmetros citados, é necessária para aplicação dos métodos a definição das características físicas das estruturas de estudo, como a tipologia da barragem, comprimento da crista, altura máxima do barramento, cota da crista da barragem, nível máximo normal e volume de acumulação do reservatório, bem como o volume na crista da barragem e a cota da soleira do extravasor.

#### 4.6.4 Aspectos Hidrológicos

Para o estudo hidrológico será utilizado o método de propagação de ondas no reservatório para cálculo do hidrograma afluente considerando o escoamento do extravasor.

Assim como a vazão máxima e hidrogramas de projeto são de extrema importância no controle e dimensionamento de extravasores de barragens, são também para estudos de rompimento para determinação do hidrograma de ruptura. O hidrograma é determinado com base na precipitação, levando em consideração a discretização da bacia, precipitação de projeto, perdas iniciais, escoamento superficial e subterrâneo e escoamento em rios e reservatórios (TUCCI, 1993).

Atualmente, para estudos de determinação do hidrograma de ruptura de barragens (*Dam break*), existem diversos modelos hidrológicos e softwares de modelagem, com destaque para o HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*).

O HEC-HMS é um software de uso livre de modelagem hidrológica que faz parte do pacote da HEC com procedimentos hidrológicos tradicionais como infiltração, escoamento superficial e hidrogramas (MOTA, 2017). Este modelo permite gerar hidrograma de ruptura a partir do trânsito do hidrograma afluente na barragem bem como obtenção da vazão de pico de ruptura.

#### 5 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a realização do consiste em um estudo de caso quantitativo na Usina Hidrelétrica de Emborcação, constituído pelas seguintes etapas: caracterização física da usina, do reservatório e de seu entorno, caracterização da bacia hidrográfica, estudos hidrológicos, determinação dos parâmetros de brecha e simulação de ruptura hipotética da barragem com a utilização do software HEC-HMS para geração de hidrograma. Nos tópicos a seguir serão descritas as metodologias utilizadas.

### 5.1 Área de Estudo

A Usina Hidrelétrica de Emborcação oficialmente denominada Teodomiro Santiago de propriedade da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), está situada no curso superior do rio Paranaíba, na divisa dos estados de Minas Gerais e Goiás, com casa de força na margem esquerda em área do município de Araguari, no Triângulo Mineiro. Na margem oposta, a hidrelétrica ocupa área do município goiano de Catalão. Na Figura 11 é mostrada a localização do barramento da Usina de Emborcação.



Figura 11 - Usina Hidrelétrica de Emborcação - Araguari - MG.

#### Fonte: CEMIG (2019).

A construção da usina foi marcada pela utilização de tecnologias avançadas para a época: concretagem a vácuo, aeração da calha do vertedouro e escavação mecanizada dos condutos forçados (CACHAPUZ, 2006).

Em agosto de 1981, os túneis de desvio do rio Paranaíba foram fechados, tendo início o enchimento do reservatório e inundação de extensa área nos municípios de Abadia dos Dourados, Araguari, Douradoquara, Grupiara, Cascalho Rico, Estrela do Sul, Monte Carmelo (MG), Catalão, Davinópolis, Ouvidor e Três Ranchos (GO) (BRANDI,2005).

A Usina Hidrelétrica de Emborcação possui uma barragem do tipo terraenrocamento com 1612 m de comprimento e foi construída para criar um reservatório de regularização com capacidade total de armazenamento de 17,7 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> de água e permitir a instalação de uma casa de força de 1.192 MW de potência instalada, sendo que possui uma área de 480,08 km<sup>2</sup>. Na Figura 12 é mostrado o detalhamento da crista da barragem da UHE de Emborcação.



Figura 12 - Detalhamento da crista da barragem de Emborcação

Fonte: DIVINO (2010).

As principais características do reservatório e da estrutura vertente da Usina Hidrelétrica de Emborcação são descritas na Tabela 4 a seguir.

Localização			
Rio	Paranaíba		
Coordenadas geográficas	18°27'5.00"S e 47°59'12.98"W		
Município	Araguari – MG		
Bacia Hidrográfica			
Bacia	Rio Paranaíba		
Área de drenagem	38721,00 km²		
Vazão média	471,44 m³/s		
Tipo de Barragem			
Tipologia	Terra-Enrocamento		

#### Tabela 4 - Características Físicas do Reservatório de Emborcação

Dados da Barragem			
Altura máxima	158,00 m		
Cota no coroamento	665,00 m		
Comprimento	1612,00 m		
Reserva	tório		
Tipo do reservatório	Acumulação		
Área do reservatório	480,81 km <sup>2</sup>		
Nível Máximo Normal	661		
Nível Mínimo Normal	615		
Volume total máximo	17725,00 hm³		
Volume útil	13055,72 hm³		
Vazão afluente máxima	3347,00 m³/s		
Verted	ouro		
Тіро	Superfície controlada		
Localização	Ombreira esquerda		
Capacidade máxima	8200,00 m³/s		
Número de comportas	4		
Vazão por comporta	2050,00 m³/s		
Cota de fundo	576,50 m		
Cota da soleira	642,00		

Fonte: Adaptado de CEMIG, 2019.

No croqui apresentado na Figura 13, é apresentado o reservatório considerado no estudo de ruptura hipotética na UHE Emborcação.







A área de um reservatório é função da cota do nível d'água de montante assim como essa cota é função do volume armazenado no reservatório. Para determinação das curvas Cota x Área x Volume da Usina Hidrelétrica de Emborcação foram utilizados os dados do Sistema de Informações Hidrológicas – HIDROWEB, integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

De acordo com o SNIRH, o portal HidroWeb é uma ferramenta que oferece o acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede

Hidrometeorológica Nacional (RHN), reunindo dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos. Para a UHE de Emborcação foi utilizado o Relatório Técnico de Batimetria realizado em 2016 para atualização das curvas cota x área x volume.

De acordo com os dados de 2019 do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, a barragem da Usina Hidrelétrica de Emborcação possui as seguintes informações quanto a classificação de risco (Quadro 5).

Categoria de RiscoDano Potencial AssociadoBaixoAlto

Quadro 5 - Classificação de Risco - Usina Hidrelétrica de Emborcação

Fonte: SNISB - http://www.snisb.gov.br - Acesso em 02/09/19.

### 5.2 Caracterização da Bacia Hidrográfica e área à jusante da barragem

A Usina Hidrelétrica de Emborcação está situada na bacia hidrográfica do rio Paranaíba, sendo essa a segunda maior unidade da Região Hidrográfica do Paraná, ocupando 25,4% de sua área e com uma área de drenagem de 222,6 mil km<sup>2</sup>. A bacia possui 197 municípios além do Distrito Federal e é ocupada por 12 usinas hidrelétricas de responsabilidade da CEMIG.

A bacia hidrográfica do Rio Paranaíba está localizada nas regiões Sudeste e Centro-Oeste e confronta ao sul com a bacia do Rio Grande, ao leste com a Bacia do São Francisco, ao norte com a Bacia Araguaia-Tocantins, em Goiás. Os principais tributários do Rio Paranaíba são os rios São Marcos, Corumbá, Piracanjuba, Meia Ponte, Verde, Corrente, Claro, dos Bois e Aporé, pela margem direita, e os rios Dourados, Perdizes, Bagagem, Araguari, Piedade, Tijuco e Prata, pela margem esquerda.

Segundo a Agência Nacional de Águas, a bacia se caracteriza por um clima tropical quente em todas as estações do ano e possui uma média anual de precipitação de 1500 mm. Na Figura 14 é apresentada a bacia hidrográfica do Rio Paranaíba e a localização das UHE's inseridas em seu território. No caso da UHE de Emborcação, a área de drenagem da bacia corresponde a 28179 km<sup>2</sup>, sendo essa a área de contribuição considerada neste estudo.

Em relação à área inundada de reservatórios, a bacia do rio Paranaíba possui 19 usinas hidrelétricas em operação, 01 em construção e está prevista a implantação de mais 22 empreendimentos de acordo com dados da ANEEL. De um modo geral, os reservatórios são unidades hidráulicas de acumulação e passagem de água utilizados para garantir a quantidade de água necessária para a geração de energia. Assim, o volume útil de um reservatório tem como objetivo regularizar a vazão em uma determinada seção de um rio, ou seja, armazenar o excesso de água dos períodos chuvosos e utilizar esta reserva acumulada nos reservatórios destas barragens para compensar as deficiências dos períodos de estiagem (ANA, 2018). No caso da UHE Emborcação o volume útil compreende a 13055,72 hm<sup>3</sup>.



Figura 14 – Localização da UHE Emborcação no Rio Paranaíba

Fonte: Boletim de Monitoramento dos Reservatórios do Rio Paranaíba (ANA,2018).

A Figura 15 mostra a posição da UHE Emborcação na bacia do Paranaíba e suas afluências. Apesar de haver outros contribuintes, a vazão afluente ao reservatório advém principalmente dos rios Paranaíba, Corumbá e São Marcos. A área de drenagem incremental possui um total de 18.119,72 km<sup>2</sup> (62,1% da área de drenagem total) (CEMIG, 2016).



Figura 15 – Distribuição de UHE's na Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba

Considerando a área ocupada na bacia hidrográfica pela UHE Emborcação (Tabela 5), o seu reservatório abrange os municípios de Abadia dos Dourados, Araguari, Cascalho Rico, Douradoquara, Estrela do Sul, Grupiara, Monte Carmelo (MG); Catalão, Davinópolis, Ouvidor e Três Ranchos (GO), com uma área alagada municipal de aproximadamente 268,63 km<sup>2</sup>, sendo uma área considerável e de grande importâncias nos estudos de ruptura do reservatório, conforme.

Tabela 5 - Á	rea mun	icipal a	fetada pela l	JHE de Em	borcação	)
	,		,		,	

UHE Emborcação	Área dos Municípios (km²)	Área municipal alagada (km²)	Área municipal não alagada (km²)
Abadia dos Dourados	894,51	28,53	865,97
Araguari	2.730,63	22,17	2.708,45
Cascalho Rico	367,73	77,28	290,44
Douradoquara	313,37	46,68	266,68
Estrela do Sul	820,33	6,08	814,24
Grupiara	192,55	77,43	115,12
Monte Carmelo	1.353,67	10,43	1.343,23
Total	6.672,79	268,63	6.404,13

Fonte: Adaptado de FERREIRA (2004).

Fonte: CEMIG, 2016.

#### 5.3 Dados Hidrológicos da Barragem de Emborcação

A caracterização hidrológica da bacia do Reservatório de Emborcação é realizada pela Agência Nacional de Águas (ANA) e pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), sendo esse o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN).

Os dados referentes à situação dos reservatórios coordenados pelo ONS são disponibilizados diariamente por meio do Relatório Diário da Situação Hidráulico-Hidrológica das Usinas Hidrelétricas e são consolidados e disponibilizados mensalmente pela ANA por meio do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR).

Em relação à UHE Emborcação, para o estudo em questão, foi considerada a série de vazões afluentes máximas na simulação de ruptura hipotética do reservatório de Emborcação e os dados foram obtidos através do SAR, referente ao período de 1993 a 2019 e, mais especificamente, para o período de janeiro de 2007 a março de 2007, por apresentar os maiores picos. Assim como a série de vazões, para caracterizar e representar o comportamento hidrológico e hidráulico da barragem objeto deste estudo, são necessários dados e informações como a área de contribuição, curva de descarga do vertedor e as relações cota x área x volume do reservatório. As informações referentes aos itens supracitados foram obtidas através do Relatório Técnico de Batimetria realizado pela CEMIG em 2016, onde houve a atualização das curvas cota x área x volume.

#### 5.4 Simulação no HEC-HMS

Para o estudo em questão, serão realizadas simulações no software HEC-HMS para obtenção dos hidrogramas afluentes máximos comparando métodos distintos para cálculo de brecha de ruptura. O reservatório de Emborcação e a bacia hidrográfica do Rio Paranaíba foram representados graficamente conforme Figura 16 e o modelo hidrológico estruturado de acordo com a Figura 17 e Quadro 6.



Figura 16 - Representação da área de estudo no software HEC-HMS



### Figura 17 - Estrutura da simulação de ruptura hipotética da UHE de Emborcação



Fonte: Autoria própria (2019).

Parâmetro de entrada	Método	Fonte de Dados
Basin model	Modelo da bacia hidrográfica do Rio Paranaíba	ANA
Metereologic Models	-	-
Control Specifications	Período de vazões máximas	ANA - SAR
Time Series Data	Série de vazões afluentes máximas	ANA - SAR
	Curva Cota – Volume	CEMIG
Pareid Data	Curva de Descarga	Equação de descarga de vertedor retangular

Fonte: Autoria própria (2019).

#### 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 6.1 Estudo Hidrológico

A vazão natural afluente a uma usina hidrelétrica é a vazão que seria observada naquele posto de medição considerando o rio na sua condição natural, ou seja, imaginando que não existe nenhum reservatório capaz de regularizar a vazão em nenhum ponto do rio. Levando em consideração um cenário extremo, o estudo hidrológico foi baseado na obtenção do histórico da série de vazões afluentes máximas ao reservatório de Emborcação obtido do SAR, conforme Figura 18.

Conforme apresentado, a vazão afluente máxima registrada no período compreendido entre 1993 e outubro de 2019 foi de 3347 m<sup>3</sup>/s, sendo que neste mesmo momento foi observada uma vazão defluente de 2263 m<sup>3</sup>/s.







Diante dos resultados apresentados na Figura 18, tendo em vista a necessidade de utilização do pior cenário para realização da simulação deste estudo, optou-se por considerar as vazões afluentes registradas 01/01/2007 e 01/03/2007 por ser o período de máximas observadas, conforme Figura 19. Na Tabela 6 são mostrados os valores das vazões para o cenário estudado.





Fonte: Autoria própria (2019).

Tabela 6 - Série de vazões afluentes da UHE de Emborcaç	;ão em	2007
---	--------	------

Data da Medição	Afluência (m³/s)	Data da Medição	Afluência (m³/s)
01-jan-07	1415,84	31-jan-07	2076,95
02-jan-07	1632,30	01-fev-07	2142,75
03-jan-07	1669,65	02-fev-07	1906,88
04-jan-07	1695,61	03-fev-07	2305,16
05-jan-07	1962,16	04-fev-07	2163,53
06-jan-07	2224,29	05-fev-07	3083,48
07-jan-07	2218,87	06-fev-07	2712,30
08-jan-07	2025,02	07-fev-07	3347,41
09-jan-07	1884,16	08-fev-07	2661,15
10-jan-07	1661,05	09-fev-07	2585,86
11-jan-07	1865,93	10-fev-07	2387,32
12-jan-07	1770,08	11-fev-07	2155,70
13-jan-07	2008,04	12-fev-07	2165,69
14-jan-07	2231,97	13-fev-07	2389,50
15-jan-07	2176,91	14-fev-07	2152,50
16-jan-07	3173,13	15-fev-07	2321,01
17-jan-07	2586,32	16-fev-07	2237,70
18-jan-07	2480,43	17-fev-07	2271,89
19-jan-07	2180,27	18-fev-07	2105,31
20-jan-07	2181,63	19-fev-07	2152,50
21-jan-07	1953,83	20-fev-07	1904,50
22-jan-07	1740,78	21-fev-07	1776,00
23-jan-07	1636,31	22-fev-07	1714,80
24-jan-07	1536,57	23-fev-07	1516,80
25-jan-07	1737,97	24-fev-07	1596,81
26-jan-07	1822,46	25-fev-07	1505,50
27-jan-07	1602,44	26-fev-07	1454,30
28-jan-07	1950,01	27-fev-07	1645,50
29-jan-07	2239,70	28-fev-07	1629,70
30-jan-07	2289,65	01-mar-07	1459,00

Fonte: Adaptado de SAR (2019).

## 6.2 Curvas Cota x Área x Volume

Através do SAR foi possível obter o relatório técnico da UHE Emborcação com a atualização dos polinômios Cota x Área x Volume, conforme mostrado no Quadro 7 abaixo.

Quadro 7 - Polinômios das curvas cota x área x volume da UHE Emborcação

Polinômio Cota x Volume	$y = 0,03040297x^3 - 54,47512x^2 + 32646,08x - 6541191$
Polinômio Cota x Área	$y = -0,0004015232x^3 + 0,8571429x^2 - 595,8748x + 135808,7$

Fonte: Adaptado de CEMIG (2016).

A partir dos polinômios conforme o Quadro 7 acima e considerando os níveis máximo e mínimo operativo do reservatório de Emborcação, foram obtidas as curvas Cota x Área x Volume por meio do ajuste dos valores variando dentro do limite destes níveis, conforme valores da Tabela 7 e Figura 20.

Cota (m)	Área (km)	Volume (hm <sup>3</sup> )	Cota (m)	Ároa (km)	Volume (hm <sup>3</sup> )
615,38	140,17	4334,51	638,71	265,08	8890,55
615,73	141,46	4383,79	639,69	273,62	9154,31
616,71	145,20	4524,23	640,70	283,66	9435,70
617,57	148,55	4650,51	641,71	292,74	9726,74
618,58	152,54	4802,56	642,69	301,00	10017,60
619,71	157,04	4977,44	643,58	308,36	10288,69
620,66	160,95	5128,46	644,59	316,81	10604,30
621,58	164,90	5278,33	645,63	325,63	10938,33
622,59	169,53	5447,17	646,67	334,76	11281,65
623,60	174,44	5620,86	647,62	343,22	11603,63
624,55	179,15	5788,78	648,62	352,23	11951,31
625,53	184,15	5966,77	649,65	361,73	12318,92
626,69	190,27	6183,86	650,59	370,49	12663,01
627,64	195,43	6367,07	651,71	381,07	13083,79
628,50	200,05	6537,11	652,59	389,68	13422,87
629,72	206,58	6785,09	653,71	400,78	13865,44
630,73	212,18	6996,51	654,65	410,13	14246,51
631,66	217,49	7196,26	655,56	419,28	14623,84
632,68	223,56	7421,12	656,50	428,83	15022,38
633,69	230,10	7650,13	657,65	440,88	15522,40
634,76	236,99	7899,94	658,59	450,90	15941,50
635,62	242,87	8106,20	659,53	461,04	16370,02
636,60	249,90	8347,57	660,59	472,75	16864,87
637,58	256,85	8595,80	661,00	480,81	17725,00

Tabela 7 - Dados da Curva Cota – Área – Volume – UHE Emborcação

Fonte: Adaptado de CEMIG (2016).



Figura 20 - Curva Cota x Área x Volume da UHE Emborcação

Fonte: Autoria própria (2019).

#### 6.3 Curva de Descarga do Vertedor

O vertedouro da UHE Emborcação é do tipo superfície controlada localizado na ombreira esquerda e possui uma calha de 58,5 m de largura e 366 m de comprimento, com capacidade de 8200 m<sup>3</sup>/s e formada por uma ogiva clássica e 04 (quatro) comportas de setor de 12,0 m x 18,77 m. A velocidade na concha é da ordem de 40 m/s, sendo a descarga específica de 129,91 m<sup>3</sup>/s/m e a vazão por comporta de 2.050,00 m<sup>3</sup>/s (PEREIRA, 2015). O perfil do vertedouro da Usina Hidrelétrica de Emborcação é apresentado na Figura 21.



Figura 21 - Perfil do vertedouro da Usina Hidrelétrica de Emborcação

Fonte: Adaptado de PEREIRA, 2015.

Para determinação da curva de descarga, levando em consideração a indisponibilidade de dados por parte da CEMIG, optou-se por estimar a vazão escoada pelo vertedor através da Equação 1. Na Tabela 8 são apresentados os valores obtidos para a curva de descarga da UHE de Emborcação, variando a altura na cota da soleira até a crista da barragem.

$$Q = C_d x L x H^{1,5}$$
 Eq. 01

Em que:

Q = Vazão passante pelo vertedor, em m<sup>3</sup>/s;

Cd = Coeficiente de descarga, adimensional;

L = Comprimento do vertedouro, em m;

H = Altura de lâmina d'água no vertedouro, em m.

Para o estudo foi considerado um vertedor retangular de soleira delgada, onde o coeficiente de descarga adotado foi de 1,2.

Na Figura 22 é apresentado o gráfico obtido para a curva de descarga do vertedor da UHE Emborcação.



Figura 22 - Curva de descarga do vertedouro da UHE de Emborcação



Tabela 8 ·	Curva de	descarga do	vertedor da	UHE Emborcação
------------	----------	-------------	-------------	----------------

Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³∕s)
642	0	654	2918,16
643	70,20	655	3290,43
644	198,56	656	3677,30
645	364,77	657	4078,25
646	561,60	658	4492,80
647	784,86	659	4920,51
648	1031,73	660	5361,00
649	1300,12	661	5813,90
650	1588,44	662	6278,88
651	1895,40	663	6755,63
652	2219,92	664	7243,88
653	2561,10	665	7743,35

Fonte: Autoria própria (2019).

De acordo com o ONS, a UHE Emborcação possui uma vazão de restrição de 5.000 m<sup>3</sup>/s, sendo que vazões defluentes superiores causam transbordamentos generalizados na calha do rio Paranaíba, além da inundação da estrada de acesso à usina.

#### 6.4 Parâmetros de brecha

Neste item são apresentados os resultados encontrados para os hidrogramas de ruptura da brecha formada na barragem da Usina Hidrelétrica de Emborcação, cujo volume no nível d'água máximo normal é de 17.725.000.000 m<sup>3</sup>. Para simplificar o estudo, optou-se por realizar a simulação considerando o nível do reservatório igual à cota da crista da barragem, evitando-se a necessidade de gerar hidrogramas fictícios capazes de causar a ruptura da barragem em outros níveis. Os resultados dos parâmetros geométricos para a brecha de ruptura em seu estado final, calculados pelas equações das Tabelas 4 e 6, estão apresentados no Quadro 8.

		Froehlich	Von Thun and Gillette	Fread and Harbaugh
Dados de entrada	Largura Média da Brecha (m)	943,95	276,15	302,67
	Tempo de formação de brecha (h)	4,70	0,78	4,92
	Elevação do topo da brecha (m)	665,00	665,00	665,00
	Elevação do fundo da brecha (m)	642,00	642,00	642,00
	NA máximo atingido (m)	661,00	661,00	661,00
	Hd (m)	158,00	158,00	158,00
	Hb (m)	158,00	158,00	158,00
	Hw (m)	88,50	88,50	88,50
	Vw (m³)	17.725.000.000	17.725.000.000	17.725.000.000
	k <sub>0</sub>	1,50	NA	1,50
	Cb	NA	54,90	NA
	Declividade (z)	1,00	1,00	1,00
Dados de Saída	Vazão de Pico (m³/s)	189.327,40	111.970,40	52.221,20
	Volume (m <sup>3</sup> )	8.095.941,80	7.930.533,40	7.791.572,70
	Elevação de pico (m)	642,00	642,00	642,00

Quadro 8 - Parâmetros de formação da brecha obtidos para a UHE Emborcação

г

NA: Não se aplica.

#### Fonte: Autoria própria (2019).

Como esperado, a aplicação de diferentes modelos resultou em elevadas diferenças entre os parâmetros de formação da brecha e, consequentemente, entre as vazões de pico dos hidrogramas de ruptura.

Nas Figura 23 a 25 são apresentados os croquis para os parâmetros de brecha de ruptura obtidos na simulação da barragem da UHE Emborcação, onde foram geradas vazões de pico de 52.221,20 m<sup>3</sup>/s, 111.970,40 m<sup>3</sup>/s e 189.327,40 m<sup>3</sup>/s,

٦

mostrando uma grande nos resultados obtidos para os métodos adotados, conforme mostrado no Quadro 8 acima.



Figura 23 - Croqui dos parâmetros de brecha obtidos para Froehlich (2008)



#### Figura 24 - Croqui dos parâmetros de brecha obtidos para Von Thun and Gillette (1990)



Fonte: Autoria própria (2019).



Figura 25 - Croqui dos parâmetros de brecha obtidos para Fread e Harbaugh (1976)

Fonte: Autoria própria (2019).

A simulação do deplecionamento do reservatório associada aos parâmetros de tempo de formação e geometria final da brecha, resultaram na formação dos hidrogramas apresentados nas Figuras 23, 24 e 25. Os hidrogramas representados para cada metodologia foram comparados na Figura 26, no qual observa-se uma grande variação dos picos de vazão, conforme é apresentado na Quadro 8.

Figura 26 - Comparação dos hidrogramas de ruptura resultantes da simulação no HEC-HMS



Fonte: Autoria própria (2019).

Normalmente, nos estudos de dam break observa-se que os parâmetros geométricos da brecha exercem menor influência na vazão de pico do que o tempo de formação da brecha, onde as vazões máximas apresentam diferenças consideráveis em função do tempo de ruptura, com valores menores quanto maior é o tempo de ruptura (MELO, 2013). Ainda segundo o autor, para tempos de formação menores, os acréscimos de carga hidráulica (variável de maior peso relativo na equação de vertedouros) são mais intensos, facultando um deplecionamento mais acelerado do reservatório.

No estudo em questão, o comportamento das vazões de pico em relação ao tempo de formação de brecha foi diferente no caso do reservatório da Usina Hidrelétrica de Emborcação, em que a vazão máxima não é necessariamente gerada pelo menor tempo, como mostrado nas Figuras 27 a 29. Além disso, observa-se que para o período considerado de vazões máximas afluentes não houve galgamento da barragem de Emborcação. Este fato pode acontecer em função de uma restrição nas seções imediatamente a jusante do reservatório (restrição de 5.000 m<sup>3</sup>/s), onde o sistema extravasor foi dimensionado de forma suficiente para evitar que o nível do reservatório ultrapassasse o nível máximo estabelecido em projeto, impedindo o galgamento do maciço e, consequentemente, a ruptura da barragem.

Em virtude da não obtenção da curva de descarga oficial para a UHE Emborcação, é importante destacar que a utilização da equação de descarga para obtenção dos valores de vazão, considerando um vertedor retangular de soleira delgada, pode ter influenciado nos resultados finais deste estudo.



Figura 27 - Deplecionamento do reservatório e hidrograma para Von Thun e Gillette (1990)





Figura 28 - Deplecionamento do reservatório e hidrograma para Fread e Harbaugh (1976)



Figura 29 - Deplecionamento do reservatório e hidrograma para Froehlich (2008)



Fonte: Autoria própria (2019).

De acordo com a Figura 29, observa-se que o hidrograma de Froehlich (2008), para uma largura de brecha e tempo de formação maiores quando comparados aos demais modelos, demonstrou acréscimos de carga hidráulica maiores, facultando um deplecionamento acelerado do reservatório e geração de vazão de pico maior.

#### 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa apresenta o estudo de ruptura hipotética da barragem da Usina Hidrelétrica de Emborcação, utilizando os dados reais do reservatório disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico e pela Agência Nacional de Águas, levando em consideração o fenômeno específico de ruptura por galgamento.

É importante pontuar que para a obtenção da curva de descarga do extravasor para a barragem de Emborcação foi necessária a utilização de equação hidráulica para obtenção da vazão defluente, devido à falta de disponibilidade de dados reais por parte da CEMIG, sendo um ponto que pode influenciar nos resultados deste estudo.

Realizaram-se simulações utilizando o software HEC-HMS, de modo a comparar diferentes metodologias para obtenção dos parâmetros de brecha e, consequentemente, a geração dos hidrogramas de ruptura. Para cada metodologia, foi possível observar que as maiores vazões de pico estão relacionadas com larguras de ruptura maiores e não necessariamente com o tempo de formação de brecha menor, que neste caso, se mostra coerente devido a grande dimensão do reservatório, a extensa área de drenagem do mesmo bem como a existência de uma vazão de restrição à jusante do barramento.

Foi verificado que o hidrograma de ruptura por Von Thun and Gillette (1990) apresentou um tempo de esvaziamento do reservatório menor em relação aos demais métodos e uma vazão de pico alta, mesmo não se comparando com os resultados obtidos para o modelo de Froehlich (2008), onde apresentou também um tempo relativamente curto mas uma vazão ainda superior.

É importante destacar que, considerando o período de vazões afluentes máximas adotado, não houve a ocorrência de ruptura da barragem da Usina Hidrelétrica de Emborcação por galgamento ao correto dimensionamento do sistema extravasor, onde conseguiu suportar o aumento do nível máximo estabelecido em projeto devido à uma onde de cheia.

Portanto, para trabalhos futuros propõe-se a continuação dos estudos de dam break para propagação da onda de cheia à jusante da UHE Emborcação, utilizando diferentes metodologias, com o objetivo de conhecer melhor os impactos da inundação resultante no caso de ruptura do reservatório. Para este fim, recomendase a utilização dos dados relacionados as características de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio Paranaíba no estudo hidrológico, bem como as seções topobatimétricas da barragem para propagação do hidrograma, que irão proporcionar um maior conhecimento do cenário real de ruptura e que irá subsidiar a elaboração do Plano de Ação Emergência para evacuação da população a jusante.

## 8 REFERÊNCIAS

ANA. Agência Nacional de Águas (Brasil) (Org.). Relatório de Segurança de Barragens 2016. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2016a. 226 p.

ANA. Agência Nacional de Águas (Brasil) (Org.). **Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2016b.132 p.

ANA. Agência Nacional de Águas. Engecorps Engenharia S.a. Elaboração de Estudos para Concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para Mitigação dos Efeitos de Cheias nas Bacias dos Rios Muriaé e Pomba e Investigações de Campo Correlatas: Estudo de Ruptura de Barragens. Brasília, 2012. 114 p.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Boletim de Monitoramento dos Reservatórios do Rio Paranaíba**, Brasília, v.3, n.05, p.1-15, mai. 2018.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 3. ed. Brasília, 2008. 236 p.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Matriz energética brasileira. 2019.** Disponível em: < http://www2.aneel.gov.br>.

BALBI. Diego Antonio Fonseca. **Metodologia para elaboração de Planos de Ações Emergenciais para inundações induzidas por barragens: Estudo de caso: Barragem de Peti - MG**. 353 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte, 2008.

BRANDI, Paulo. Usinas da Cemig: a história da eletricidade em Minas e no Brasil: 1952-2005. Rio de Janeiro, Brazil Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, Memória da Eletricidade CEMIG, Governo de Minas, 2005.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 21 set. 2010.

Conselho Nacional de Recursos Hídricos. [S. I.], 10 de julho de 2012.

\_\_\_\_. Resolução nº 144, de 10 de julho de 2012. Ministério do Meio Ambiente.

\_\_\_\_\_. Resolução Normativa nº 696, de 15 de dezembro de 2015. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. [S. I.], 15 de dezembro de 2015.

\_\_\_\_\_. Resolução nº 236, de 30 de janeiro de 2017. Agência Nacional de Águas. [S. I.], 30 de janeiro de 2017.

BRASIL. Lucas Samuel Santos. Utilização de modelagens uni e bidimensional para a propagação de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem: Estudo de caso: Barragem de Rio das Pedras – MG. 222 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, Minas Gerais, 2005.

CACHAPUZ, P. B. B. Usinas da Cemig: A história da eletricidade em Minas e no Brasil 1952-2005. Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 2006. 301 p.

CEMIG. Relatório Técnico de Batimetria da Usina Hidrelétrica de Emborcação: Atualização das Curvas Cota x Área x Volume. Araguari: Rural Tech Comércio e Serviços Eireli, 2016. 148 p. Disponível em: <a href="http://www.snirh.gov.br/hidroweb/">http://www.snirh.gov.br/hidroweb/</a>. Acesso em: 20 out. 2019.

CEMIG. **Companhia Energética de Minas Gerais**. 2019. Disponível em: <a href="http://www.cemig.com.br/pt-br/a\_cemig/nossos\_negocios/usinas">http://www.cemig.com.br/pt-br/a\_cemig/nossos\_negocios/usinas</a>. Acesso em: 13 out. 2019.

CESTARI JUNIOR, Euclydes. Estudo de propagação de ondas em planície de inundação para elaboração de plano de ação emergencial de barragens: UHE Três irmãos estudo de caso. 2013. 189 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2013.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (CBDB). Guia Básico de Segurança de Barragens. São Paulo: 1999. 78 p.

\_\_\_\_\_. A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: Cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: Sindicato Nacional dos Editoresde Livros, 2011. 533 p.

COLLISCHON, W.; TUCCI, C. E. M. Análise do Rompimento Hipotético da barragem de Ernestina. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 2, n. 2, Jul./Dez. 1997.

DIVINO, Paula Luciana. **Comportamento de Enrocamentos em Barragens – Estudo de Caso da Barragem de Emborcação.** 2010. 226 f. Tese (Doutorado) -Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <a href="https://www.nugeo.ufop.br/teses-e-dissertacoes">https://www.nugeo.ufop.br/teses-e-dissertacoes</a>>. Acesso em: 18 out. 2010.

ELETROBRÁS. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. 2003. 279 p.

ELETROBRAS. Centrais Elétricas do Brasil. Diretrizes para projetos de PCHs. 2000.

ENERGÉTICA. **Empresa de Pesquisa. Balanço Energético Nacional**. 2018. Disponível em: <a href="http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018">http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018</a>. Acesso em: 10 out. 2019.

FERLA, Rute. Utilização de diferentes equações empíricas na previsão de características de inundação proveniente do rompimento de barragens. In: XIII Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, 2017. Porto: 2017.

FERREIRA, Vinícius Verna Magalhães. **Avaliação de Externalidades do Setor Hidrelétrico no Estado de Minas Gerais.** 2004. 192 f. Tese (Doutorado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos., Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Disponível em: www.ibama.gov.br. Acesso em: 06 de abril de 2019.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS. Lessons from Dam Incidents. Paris: ICOLD, Reduced Edition, 1973.

JÓNATAS, R., **Rotura de Barragens de Aterro por Galgamento – Ensaio Experimentais com Aterros Homogéneos**. Dissertação de Mestrado Integrado, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.

LAURIANO, A. W. **Estudo de Ruptura de Barragem de Funil: comparação entre os modelos FLDWAY e HEC-RAS.** Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010, 203 p.

LIMA, Fernando Neves. Avaliação das Probabilidades de Falhas em Barragens, associadas a eventos de naturezas hidráulicas e hidrológicas: Estudo de caso da PCH Cajuru. 2014. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em

Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

LIMA, G. R. **Compensação ambiental de usinas hidrelétricas: análise da gestão federal e propostas de aplicação.** Dissertação (mestrado). UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético. Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

MELO, Leonardo Pires Reis de. Análise comparativa de metodologias de Previsão de inundação decorrente da Ruptura de barragens de rejeitos: Caso hipotético da barragem tico-tico. 2013. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

MELO, J. F. de. **Dam-Break Flood Risk Assessment. Second International Dam World Conference.** Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, Lisboa, Portugal, p. 47 – 56, 2015.

MORAIS, José Luciano Mendonça; FADUL, Élvia; CERQUEIRA, Lucas Santos. Limites e desafios na gestão de recursos hídricos por comitês de bacias hidrográficas: um estudo nos estados do nordeste do Brasil. Read. Revista Eletrônica de Administração (porto Alegre), [s.l.], v. 24, n. 1, p.238-264, abr. 2018.

MOTA, K. R. R. Rompimento e delimitação da área de inundação da barragem Salto Moraes em Ituiutaba/MG. Uberlândia: FECIV, 2017. p.66.

NEVES, Luiz Paniago. **Segurança de Barragens – Legislação federal brasileira em segurança de barragens comentada**. E-book livre, Brasília, 2018. Disponível em: <a href="http://www.anm.gov.br">http://www.anm.gov.br</a>.

PEREIRA, Geraldo M. **Projeto de usinas hidrelétricas passo a passo.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

RUTE. **Metodologia Simplificada para Análise de Aspectos Hidráulicos em rompimento de barragens**. 2018. 223 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pósgraduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SALIBA, A. P. M. **Uma nova abordagem para análise de ruptura por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado**. 2008. 179 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SANTOS, Juliano Böeck. **Modelagem hidrológica HEC-HMS da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés, Botucatu-SP**. 2017. 80 f. Tese (Doutorado) -Curso de Agronomia, Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, Botucatu, 2017.

SAR, Agência Nacional de Águas. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios. 2019.** Disponível em: <a href="https://www.ana.gov.br/sar/>http

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

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. **HEC-RAS, River Analysis System**. Hydraulic Reference Manual. Version 1. Davis: 1995a.

\_\_\_\_\_. **Using HEC-RAS for Dam break studies**. Hydrologic Engineering Center. Washington: 2014. 74 p.

VIEIRA JUNIOR, L. P. SALLES, M. F. A tecnologia do concreto aplicada ao projeto de barragens. Melhores práticas tecnologia do concreto. Concreto & construções. Ano XXXIX no 63, 2011, 15-23p.

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.