



**11 a 15 de setembro de 2017**  
**Belo Horizonte – MG**

**ELABORAÇÃO DE ÁRVORES DE EVENTOS SOB O CENÁRIO DE GALGAMENTO (*OVERTOPPING*) PARA UMA BARRAGEM NA REGIÃO DE DIAMANTINA**

Luan Domingues da Silva<sup>1</sup>, Mariana Alvarenga Ruas e Silva<sup>2</sup>, Rodrigo Medeiros de Almeida<sup>3</sup>, Josias Eduardo Rossi Ladeira<sup>4</sup>

<sup>1</sup> PUC-MG, Belo Horizonte, lndomingues@outlook.com

<sup>2</sup> PUC-MG, Belo Horizonte, mariana.aruas@gmail.com

<sup>3</sup> PUC-MG, Belo Horizonte, rodrigobillm@gmail.com

<sup>4</sup> PUC-MG, Belo Horizonte, josiasladeira@pucminas.br

**RESUMO**

As barragens são estruturas construídas em cursos d'água objetivando reter elevadas quantidades de água para abastecimento ou produção de energia elétrica cuja aplicação viabilizou-se progressivamente no Brasil devido ao alto potencial hidráulico disponível no país. Porém, à medida que a quantidade de empreendimentos hidrelétricos em operação no Brasil aumentou, conseqüentemente também cresceu o número de acidentes ou incidentes, os quais nos últimos oito anos representam oitocentas ocorrências. Diante deste aumento inesperado de acidentes de barragens ocorridos tanto no país quanto no mundo, manifestou-se uma maior preocupação das sociedades civil e científica em compreender o perigo propiciado por estas estruturas devido a inadequações nas etapas de planejamento, projeto, construção e operação. Um dos modos mais comuns de ruptura de barragens hidrelétricas, correspondendo a 47%, dar-se-á por galgamento (*overtopping*), cuja natureza é hidrológica, pois há transporte de água de montante à jusante sobre a crista; Esse transporte é causado por eventuais cheias e dimensionamento ineficiente de estruturas hidráulicas como vertedouro, filtros, drenos, crista, entre outros. Em prol de analisar os riscos propiciados, foram elaborados modelos que sistematizam informações a fim de precisar a frequência com que eventos característicos possam ocorrer e a significância de suas conseqüências. Um modelo comumente aplicado a segurança de barragens de energia elétrica, o ETA - Event Tree



**11 a 15 de setembro de 2017**  
**Belo Horizonte – MG**

Analysis (Análise por Árvore de Eventos), é uma representação gráfica o qual principia a análise a partir de um risco percorrendo sucessivamente para a sucessão lógica de ocorrência do evento e atingindo o efeito último. Nesta perspectiva, esta pesquisa se insere ao tema de segurança de barragens e objetiva aplicar o método de análise ETA para simular os principais cenários previstos, assim como avaliar a probabilidade de ruptura por galgamento de uma barragem de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH), localizada na região de Diamantina, Minas Gerais.

**Palavras-chave:** Segurança de barragens; árvore de eventos; galgamento; overtopping.

## **1. INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos, o Brasil testemunhou graves incidentes e acidentes envolvendo empreendimentos hidrelétricos que, em sua totalidade, chegam a 800 episódios, isto é, uma adversidade em barragens a cada três ou quatro dias. (SAYÃO *apud* VIANNA, 2015, P. 19) [1]. Estes problemas tem intensificado a preocupação de estudiosos do segmento acerca da segurança de barragens, o qual, conforme ANA – Agência Nacional de Águas (2015) [2] mostra-se como uma alternativa de identificar, controlar, corrigir eventuais irregularidades ou no mínimo reduzir os efeitos. Em concordância, Espósito *et al.* (2010) [3] afirma que a cultura de segurança de barragens trata-se de uma responsabilidade e propagação em escala mundial.

Segundo Caldeira e Espósito (2010) [4], embora o Brasil seja um país mundialmente conhecido pela competência no setor de engenharia de barragens no que tange às fases de planejamento, projeto e construção, ainda havia na década de 2000, barragens sem critérios nestas fases e sem inspeções, manutenções e gestão de segurança. Apesar disso, o empenho para regulamentação da segurança de barragens no Brasil tem surtido efeito, já que a Lei Federal nº 12.334/2010, a qual estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens foi aprovada. Neste sentido, Oliveira *et al.* (2017) [5] destaca que esta lei já produziu frutos positivos em relação a discussões e à



**11 a 15 de setembro de 2017**  
**Belo Horizonte – MG**

conscientização da população e do governo, porém ainda há entes do sistema que não se adequaram à lei por meio do estabelecimento de fluxos e procedimentos.

Sendo assim, este artigo propõe a elaboração de Árvores de Eventos para uma barragem na região de Diamantina a fim de contribuir para obtenção de informações quantitativas acerca dos principais riscos relacionados à ocorrência de galgamento.

## **2. OBJETIVO**

Este artigo objetiva elaborar Árvores de Eventos para a barragem de uma PCH na região de Diamantina ante a hipótese de galgamento. Para isto, primeiramente, buscou-se bibliografias influentes na literatura de segurança de barragens e, posteriormente, por meio de uma visita técnica e uma reunião com dois engenheiros responsáveis pela fase de projeto do empreendimento, os autores obtiveram informações peculiares e importantes à elaboração da Árvore de Eventos.

Neste sentido, pode-se afirmar que este artigo, classifica-se como uma pesquisa descritiva quanto aos objetivos, pois tenciona alertar e apontar os aspectos de projeto, de construção e de operação que possam ser contornados ou corrigidos para evitar a ruptura do barramento em estudo por galgamento.

## **3. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO**

### **3.1. Análise de risco**

Análise de risco, conforme SPANCOLD (2012, p. 21) [6], é uma ferramenta útil para auxiliar na tomada de decisão, pois possibilita a integração de toda informação disponível de segurança da barragem que posteriormente pode ser medida em função de sua importância à segurança global. De acordo com Vianna (2015, p. 32) [1], tal quantificação apresenta alta complexidade à gestão de riscos por envolver muitas variáveis com alto grau de precisão e incertezas que, segundo Melo e Fusaro (2015, p.



**11 a 15 de setembro de 2017**  
**Belo Horizonte – MG**

2) [7], ocorrem graças à simplificação das condições reais para aplicação de análises numéricas as quais representam a barragem por meio de equações físicas.

Segundo *United States Bureau of Reclamation - USBR* (2015, p. 4) [8], durante o processo de análise de risco, há estimativa qualitativa ou quantitativa de ocorrência e significância dos efeitos destes eventos potenciais. Melo e Fusaro (2015, p. 4) [7] afirmam que as análises de natureza qualitativa baseiam-se em escalas de ordenação numérica para caracterizar as grandezas de probabilidade, enquanto as análises quantitativas evidenciam as incertezas embasando-se em valores numéricos de probabilidade.

### **3.2. Ruptura por galgamento**

Este tipo de ruptura ocorre quando o nível d'água do reservatório ultrapassa o nível *maximorum* de operação da barragem e provoca a extrapolação da água de montante à jusante, provocando assim, a ruptura da mesma.

Os modos de ruptura mais comuns em barragens de terra e enrocamento são o galgamento e o *piping*, conforme afirma Rémy (2017) [9]. Confirmando isto por meio de dados, Foster, Fell e Spannagle (2000) *apud* Vianna (2015) [1] apontam que das rupturas de barragens ocasionadas até 1986, eliminando as barragens construídas no Japão (ante 1930) e na China, 47 % foram causadas por galgamento, 46 % por *piping*, 5 % por escorregamento e 4 % por liquefação.

De acordo com Pereira, Rocha e Hora (2017) [10], o galgamento ocorre geralmente quando há ocorrência de cheias excepcionais superiores a cheias de projeto, confirmando a subestimação de cheias em muitos casos de ruptura, como o rompimento das barragens paulistas de Caconde e de Euclides da Cunha, em 1977. Além destas, muitas barragens de empreendimentos hidrelétricos internacionais romperam pela mesma causa, dentre elas: barragem chinesa Baqiao (1975); barragem indiana Gujarat (1979); barragem neozelandesa Opuha (1997); barragem venezuelana El guapo (1999); barragem alemã Gläishuttle (2002). (PEREIRA, ROCHA E HORA, 2017) [10]



**11 a 15 de setembro de 2017**  
**Belo Horizonte – MG**

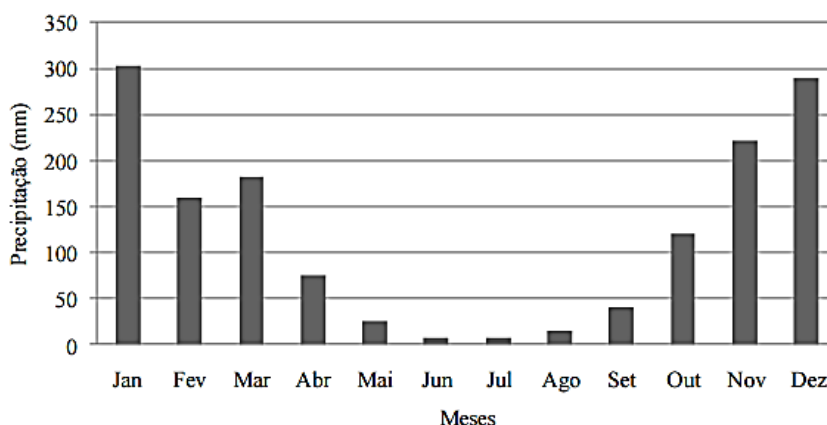
#### **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

##### **4.1. A barragem na região de Diamantina**

A barragem em estudo objetiva acumulação de água para produção de energia elétrica e está inserida no baixo curso do rio Pardo Pequeno cuja seção típica é de solo e enrocamento em razão da viabilidade técnica ambiental de utilizar o material escavado do túnel adutor. O empreendimento encontra-se em torno de 57 km de distância da cidade de Diamantina, onde habitam, conforme estimativas do IBGE (2016) [11], cerca de 48 mil habitantes.

A altura máxima do barramento é de 17 metros. Já o reservatório da PCH opera a fio d'água e possui perímetro, profundidade média e máxima, comprimento e largura média de 174 km, 8,5 m, 17 m, 3.400 m e 300 m, respectivamente. Além disso, o volume máximo do reservatório é de aproximadamente 4.000.000 m<sup>3</sup>.

Quanto ao clima regional, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, é identificado como tropical de altitude (*Cwb*), sendo assim, evidenciado pela estação seca no inverno e pela estação chuvosa no verão. Ainda, segundo Ribeiro *et al.* (2011), a pluviosidade máxima histórica no período de 32 anos registrada na estação pluviométrica de Diamantina–MG ocorre nos meses de novembro, dezembro e janeiro como pode ser constatado no Figura 1.



**Figura 1. Precipitação média mensal em Diamantina (1977 a 2009), Ribeiro *et al.* (2011) [12]**

**11 a 15 de setembro de 2017**  
**Belo Horizonte – MG**

#### 4.2. Diagrama de influência

O diagrama de influência é um mecanismo empregado para auxiliar na execução da Árvore de Eventos. Segundo Melo (2014) [13], diagramas de influência são representações gráficas que demonstram as associações entre os eventos iniciadores (perigos), os estados da natureza, as componentes, as condições do sistema e os respectivos efeitos ou consequências, tendo em conta as incertezas. Em consonância, Ladeira (2007) [14] afirma que os diagramas de influência são combinados em uma sequência lógica com intuito de apoiar a elaboração dos ramos lógicos das Árvores de Eventos. O diagrama de influência efetuado referente ao presente estudo é apresentado na Figura 2.

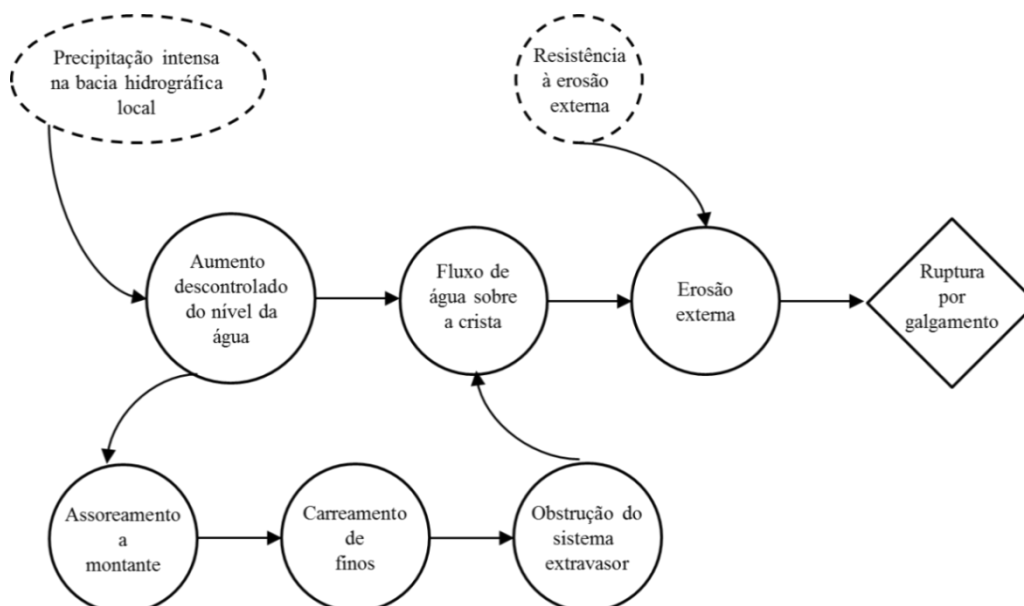


Figura 2. Diagrama de influência, adaptado de PIMENTA (2009, p. 459) [15]

#### 4.3. Árvore de eventos (ETA – Event Tree Analysis)

Este tipo de análise, denominado ETA (Event Tree Analysis), trata-se de um mecanismo lógico e indutivo cujo tratamento pode ser qualitativo, quantitativo e semiquantitativo. (VIANNA, 2015, p. 38) [1]. De acordo com USBR (2015) [8], a



**11 a 15 de setembro de 2017**  
**Belo Horizonte – MG**

Árvore de Eventos é geralmente utilizada como ferramenta de análise de risco da segurança em barragens, o qual consiste em identificar, caracterizar e estimar os riscos. Espósito *et al.* (2010, p. 6) [3] salienta que o emprego da Árvore de Eventos no contexto das barragens de terra abrange a modelação da barragem como um sistema composto por diversos subsistemas que desempenham funcionalidades individuais estabelecidas garantindo assim a operação da estrutura. Ladeira (2007) [14] destaca que a Árvore de Eventos se sobressai em virtude da possibilidade de um entendimento pertinente por ser uma análise gráfica, favorecendo assim o discernimento qualitativo do estudo.

A construção da ETA exige o entendimento de todas as fases de desenvolvimento das variadas formas de falha que são representadas graficamente por sistemas físicos cuja estrutura se dispõe em ordem cronológica, da esquerda para direita. (MELO E FUSARO, 2015, p. 13) [7]. Tal elaboração, segundo Espósito *et al.* (2010) [3], é realizada por meio de sistemas binários ou dicotômicos em que assume uma situação de sucesso e outra de falha por meio de uma dada sequência. Já a quantificação das probabilidades de ocorrência dos eventos em cada nó é uma questão bastante discutida na aplicação do método cuja estimativa poderá ser efetuada de acordo com informações disponíveis. (MELO E FUSARO, 2015) [7]. Além disso, Vianna (2015) [1] ressalta que a ETA é uma ferramenta de diagnóstico devido ao seu caráter de realizar inferências acerca do comportamento de uma barragem. Tais inferências são realizadas quantitativamente e, aplicadas a este artigo seguirão os valores fixados, como apresenta a Tabela 1.

<b>Descrição qualitativa</b>	<b>Probabilidades</b>
Impossível <sup>(1)</sup>	0,00001
Quase impossível <sup>(2)</sup>	0,01
Improvável <sup>(3)</sup>	1,00
Incerto <sup>(4)</sup>	0,50
Provável <sup>(5)</sup>	0,90
Quase certo <sup>(6)</sup>	0,99
Certo <sup>(7)</sup>	0,99999

**Tabela 1. Relação de incertezas, adaptado de (VICK, 1992) *apud* (Foster e Fell, 1999) [16]**



**11 a 15 de setembro de 2017**  
**Belo Horizonte – MG**

Em que:

- (1) – Praticamente impossível de ocorrer;
- (2) – Não apresenta probabilidade de acontecer;
- (3) – Muito difícil de ocorrer;
- (4) – Duvidoso ou indeterminado;
- (5) – Apresenta probabilidade de acontecer;
- (6) – Quase certo de ocorrer;
- (7) – Praticamente certo de acontecer.

As situações de risco analisadas em Árvores de Eventos aplicadas em barragens estão relacionadas àquelas que podem ocasionar a ruptura da estrutura, podendo ser basicamente de caráter hidrológico, estrutural ou geotécnico.

As Árvores de Eventos implementadas nesta pesquisa avaliaram os riscos hidrológicos tanto para a fase de operação, quanto para a fase de execução, sendo esta última de extrema importância devido aos atrasos comuns em cronogramas.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1. Hipótese de galgamento para a fase de implantação**

Os atrasos ocorrentes em cronogramas de obras de barragens, geralmente na estação mais chuvosa, podem ocasionar o galgamento tanto da ensecadeira quanto do barramento em execução, como o incidente sucedido no objeto de estudo deste artigo em dezembro de 2015. As Figuras 3 e 4, apresentam a ensecadeira em seu estado normal e após o galgamento devido a um evento de precipitação, respectivamente.



**11 a 15 de setembro de 2017**  
**Belo Horizonte – MG**



**Figura 3: Ensecadeira em conformidade com cronograma, fotografia dos autores.**



**Figura 4: Ensecadeira galgada em consequência de atraso no cronograma, fotografia dos autores.**

Em virtude deste incidente ocorrido na fase de implantação da barragem inserta a esta pesquisa, percebeu-se a relevância do emprego da Árvore de Eventos a fim de estimar a probabilidade de ruptura do barramento sob esta conjuntura. Neste sentido, a Figura 5 apresenta a Árvore de Eventos construída para este estudo de caso durante o período executivo avaliando o risco hidrológico.

11 a 15 de setembro de 2017  
 Belo Horizonte – MG

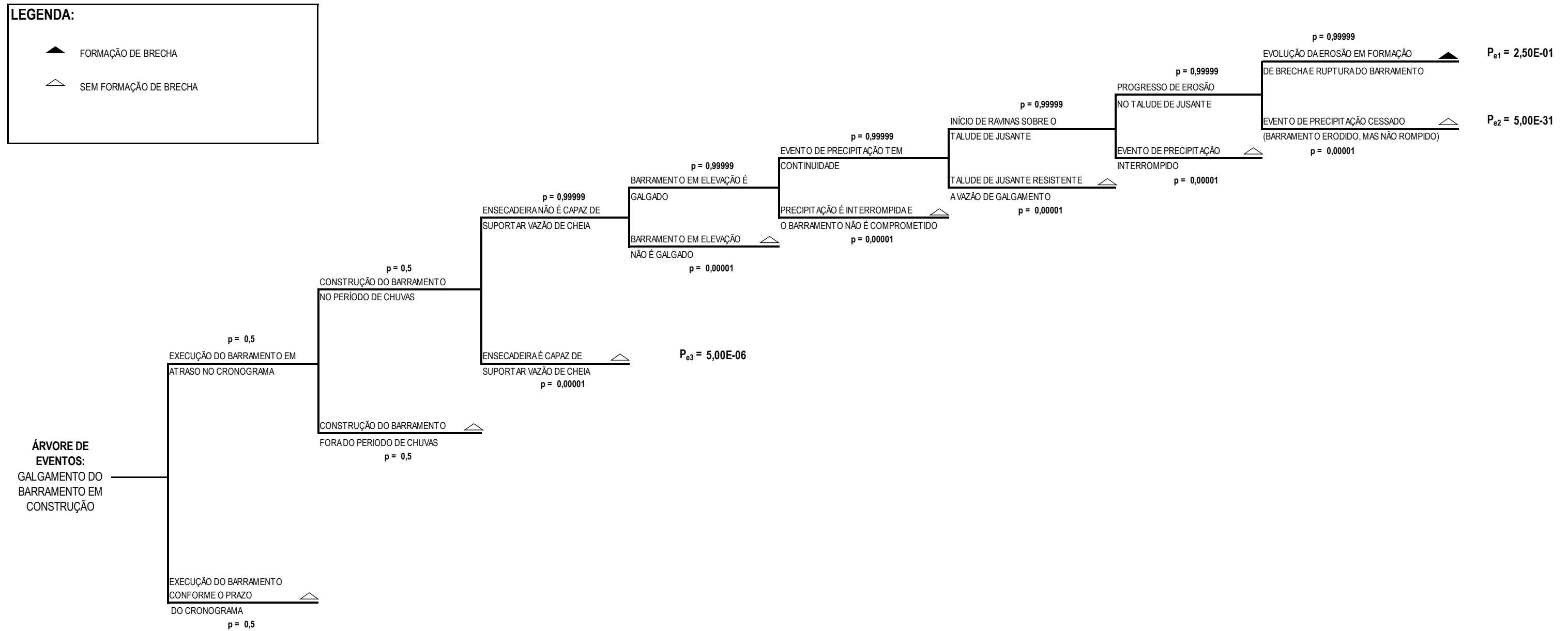


Figura 5. Árvore de Eventos para o barramento em fase de construção sob o cenário de galgamento, elaborado pelos autores.

**11 a 15 de setembro de 2017**  
**Belo Horizonte – MG**

## **5.2. Hipótese de galgamento para fase de operação**

Para construção do barramento compreendido neste estudo, na fase de projeto, realizou-se estudos hidrológicos acerca da bacia hidrográfica local e das cheias máximas prováveis a fim de dimensionamento da altura, da borda livre e dos principais dispositivos hidrológicos, como o extravasor e o vertedouro cujo tipo é o bico de pato. Segundo os engenheiros responsáveis pelo projeto básico, esta modalidade de vertedouro é extremamente eficiente por apresentar uma capacidade de vertimento alta devido ao seu alongamento a montante para captação de água. Além disso, este vertedouro possuiu um reforço por tirantes em sua base a fim de aumentar a solidarização barramento-vertedouro e de evitar a subpressão nesta interface. Já o extravasor do barramento consiste em um dispositivo de transposição de água no formato retangular e incorporado ao maciço. A Figura 6 mostra a barragem deste estudo após o seu enchimento em operação normal e os principais seus elementos hidrológicos.



**Figura 6. Barragem em operação normal, fotografia dos autores.**

11 a 15 de setembro de 2017  
 Belo Horizonte – MG

A fase de operação normal trata-se de uma condição do empreendimento em que está sujeito a eventuais falhas e circunstâncias adversas às quais podem originar um incidente ou até mesmo levar à ruptura do barramento. Sendo assim, elaborou-se uma Árvore de Eventos, conforme revela a Figura 7, sob suposição de operação em que uma cheia possa causar a ineficiência hidráulica do extravasor.

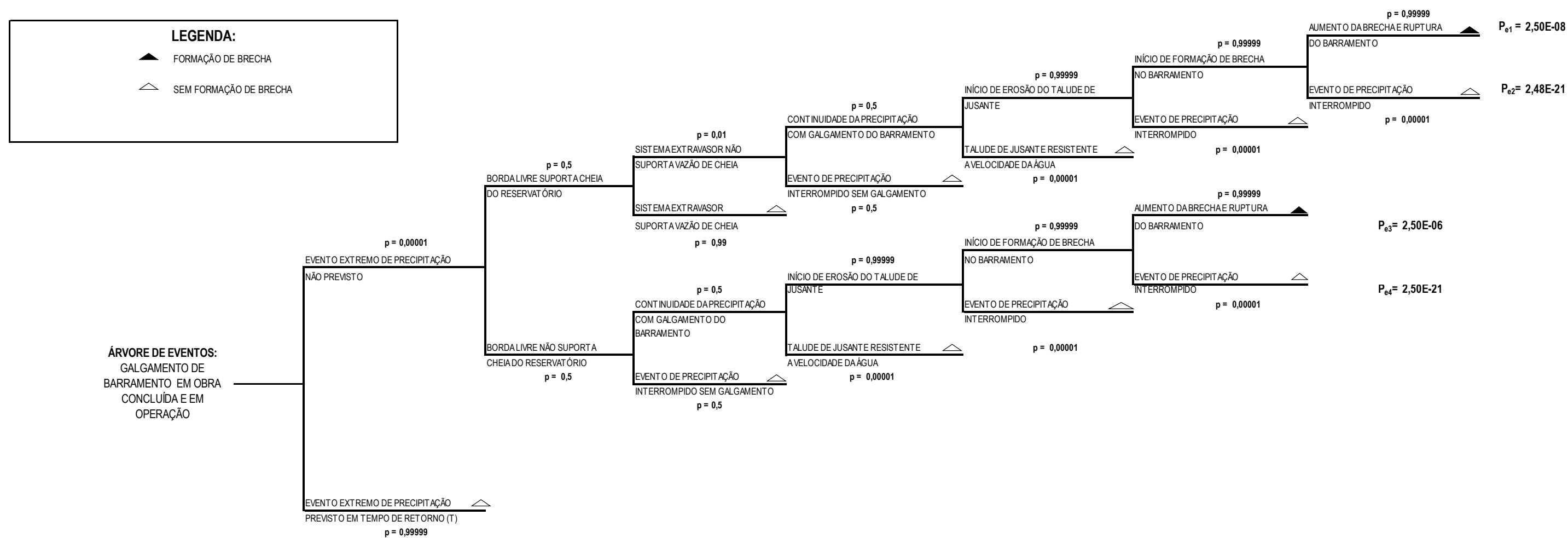


Figura 7. Árvore de Eventos para o barramento em fase de operação sob o cenário de galgamento, elaborado pelos autores.



**11 a 15 de setembro de 2017**  
**Belo Horizonte – MG**

## **6. CONCLUSÕES**

Tendo em vista o real galgamento da ensecadeira e das camadas executadas do objeto em estudo na fase de implantação, admite-se que a probabilidade 0,25 revelada pela Árvore de Eventos representada pela Figura 5 é consistente, apesar de ser um valor alto. Esta probabilidade reforça a importância de seguir o cronograma de obras de uma PCH, principalmente por possuir uma relação dependente em relação aos períodos chuvosos.

Já em relação à segunda Árvore de Eventos, exposta pela Figura 7 cuja análise supôs o risco de galgamento em condições de operação, a maior probabilidade corresponde a  $2,50e^{-06}$ . Tal valor, sob a ótica de segurança de barragens, corresponde a um valor relativamente baixo, denotando assim que para esta modalidade de análise e sob esta condição, o barramento não possui risco eminente de ruptura.

Os estudos futuros recomendados pelos autores correspondem à elaboração de Árvores de Eventos supondo a ruptura do barramento na fase de operação em consequência da diminuição da eficiência hidráulica do vertedouro, tendo como causa principal uma eventual subpressão na interface vertedouro-barramento. Além disso, rupturas por galgamento que iniciam por meio da erosão regressiva do vertedouro, como ocorrido na barragem de Oroville em fevereiro deste ano nos Estados Unidos, também podem ser exploradas e aplicadas em Árvores de Eventos em complemento a esta pesquisa.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] VIANNA, L. F. V. **Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens:** auxílio ao processo de tomada de decisão. 2015. 159 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em geotecnia e transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

[2] ANA – Agência Nacional das Águas. **Manual do empreendedor:** Guia para construção de barragens. v.6. Brasília: ANA, 2015.



**11 a 15 de setembro de 2017**  
**Belo Horizonte – MG**

[3] ESPÓSITO, T.; NAGHETTINI, M.; LADEIRA, J.; CALDEIRA, L. Análise por Árvores de Eventos: ferramenta para gestão de risco em barragens de terra. **Revista Lusobrasileira de Geotecnia**, Lisboa, v. 120, n. , p.3-24, 01 nov. 2010.

[4] CALDEIRA, L.; ESPÓSITO, T. Gestão de segurança de barragens: cenários e perspectivas das legislações portuguesa e brasileira. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 12., 2010, Gramado. **Anais...** CBDB: 2010.

[5] OLIVEIRA, A. M. de; LOUZADA, A. F.; PALHETA, J. L. V. Fragilidades e desafios para consolidação da Política Nacional de Segurança de Barragens. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, 31, 2017, Belo Horizonte. **Anais...** CBDB: 2017.

[6] SPANCOLD - Spanish National Committee On Large Dams. **Technical guide on operation of dams and reservoirs: risk analysis applied to management of dam safety**. Espanha: 2012.

[7] MELO, A. V. de; FUSARO, T. C. Avaliação de métodos de análise de riscos aplicados a barragens. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, 30, 2015, Foz do Iguaçu. **Anais...** CBDB: 2015.

[8] USBR – United States Bureau of Reclamation, Risk guidelines. In: USBR; **Best practices in dam and levee safety risk analysis**. Estados Unidos: 2015. Cap. 9.

[9] RÉMY, J. P. P. Lições aprendidas por um especialista em engenharia geotécnica na prática do monitoramento do desempenho e da avaliação da segurança de barragens. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, 31, 2017, Belo Horizonte. **Anais...** CBDB: 2017.

[10] PEREIRA, G. M.; ROCHA, O. J.; HORA, A. F. da. Aumento da capacidade de descarga de vertedouros e descarregadouros. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, 31, 2017, Belo Horizonte. **Anais...** CBDB: 2017.

[11] IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. População de Diamantina. 2016. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/v4/brasil/mg/diamantina/panorama> >. Acesso em: 14 jun. 2017.

[12] RIBEIRO, B. G.; SOUZA, M. J. H. de; CUPOLILLO, F. Estimativa da erosividade da chuva em Diamantina – MG (1977-2009). In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 17, 2011, Guarapari. **Anais...** Guarapari: 2011.

[13] MELO, A. V. **Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso das barragens da Cemig GT**. 2014. 244 f. Tese (Mestrado) – Programa



**11 a 15 de setembro de 2017**  
**Belo Horizonte – MG**

de pós-graduação em geotecnia e transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

[14] LADEIRA, J. E. R. **Avaliação de segurança em barragem de terra, sob cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos: o caso UHE – São Simão.** 2007. 210 f. Tese (Mestrado) – Programa de pós-graduação em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

[15] PIMENTA, M. de L. B. **Abordagens de risco em barragens de aterro.** 2009. 573 f. Tese (Doutorado) - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Universidade técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.

[16] FOSTER, M.; FELL, R. **A framework for estimating the probability of embankment dams by internal erosion and piping using event tree methods.** UNICIV Report No R-377, School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales. ISBN 85841 344 2, Sydney, Austrália, 1999.