

XV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

ANÁLISE DE RISCO DA BARRAGEM JABURU I: UMA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA, SEUS EFEITOS E CRITICIDADE (FMECA)

*Luísa Ciríaco Silva de Oliveira*¹ ; *Sofia Midauar Gondim Rocha*² ; *Samiria Maria de Oliveira*³ & *Iran Eduardo Lima Neto*⁴

RESUMO – Os danos causados pelo rompimento de uma barragem podem resultar em consequências sociais, ambientais e econômicas, além da potencial perda de vidas humanas. Diante disso, aplicou-se, no presente trabalho, uma Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e Criticidade (FMEA/FMECA) de forma a contribuir na identificação dos aspectos mais críticos da barragem e na priorização de estudos complementares, utilizando, como estudo de caso, a Barragem Jaburu I, localizada na Serra da Ibiapaba, Ceará. Os valores obtidos de número de prioridade de risco (NPR) variaram entre 2 e 350. Observou-se que os pontos mais críticos do sistema em estudo estão localizados nos subsistemas de drenagem interna da barragem, de fundação e das ombreiras. A identificação desses pontos possibilita o melhor direcionamento de ações e medidas de segurança da barragem.

ABSTRACT– The damage caused by a dam break can result in social, environmental and economic consequences and also represent potential loss of human lives. The present article used the Jaburu I Dam, located in Serra da Ibiapaba, Ceará, as the study subject and applied the Failure Modes Effects and Criticality Analysis (FMEA / FMECA) method to identify the most critical aspects of the dam and prioritize complementary studies. The values for the risk priority number (RPN) varied between 2 and 350. Based on the obtained results it can be seen that the most critical points of the system are located in the internal drainage subsystems of the dam, its foundation rock and abutments. The identification of these points makes it possible to improve the allocation of actions and dam safety measures.

Palavras-Chave – Barragem. FMECA. Risco.

¹) Afiliação: Universidade Federal do Ceará – UFC, Dep. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFC, Campus do Pici, bl. 713, 60.451-970, Fortaleza, Brasil, (85)997493191, luisaciriaciaco.so@gmail.com

²) Afiliação: Universidade Federal do Ceará – UFC, Dep. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFC, Campus do Pici, bl. 713, 60.451-970, Fortaleza, Brasil, sofiamidauar@gmail.com

³) Afiliação: Professora Adjunta, Universidade Federal do Ceará – UFC, Dep. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFC, Campus do Pici, bl. 713, 60.451-970, Fortaleza, Brasil, samiriamaria@hotmail.com

⁴) Afiliação: Professor Associado, Universidade Federal do Ceará – UFC, Dep. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFC, Campus do Pici, bl. 713, 60.451-970, Fortaleza, Brasil, iran@deha.ufc.br

1 INTRODUÇÃO

Um dos objetivos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelecida pela Lei Nº 12.334/2010, é fomentar uma cultura de segurança de barragens e de gestão de riscos no País, sendo esta última definida, em seu artigo 2º, inciso VI, como sendo “ações de caráter normativo, bem como aplicação de medidas para prevenção, controle e mitigação de riscos”.

De acordo com Biedermann (1997), os processos relacionados a segurança de barragens, devem considerar três pilares básicos: segurança estrutural, monitoramento e gestão de emergência. O primeiro está diretamente ligado às fases de projeto e construção, além de também se relacionar com o processo de manutenção continuada que deve existir durante a operação destas estruturas. O monitoramento e a gestão de emergência estão essencialmente ligados à definição de gestão de riscos apresentada pela Lei Nº 12.334/2010, e buscam, segundo Fusaro (2011), lidar com o risco remanescente inerente a tais estruturas.

Sabe-se que os danos causados pelo rompimento de uma barragem podem resultar em consequências sociais, ambientais e econômicas, além da potencial perda de vidas humanas, como foram observados em alguns dos últimos acidentes brasileiros envolvendo barragens. Assim, a gestão de riscos deve possibilitar uma análise ampla e buscar considerar todos os aspectos relacionados a ela. A identificação de situações críticas e a definição das ações a serem tomadas em situações de emergência envolvem, em muitos casos, processos decisórios muito complexos, tendo em vista que incluem grandes consequências e as decisões devem ser tomadas rapidamente (Vianna, 2015). Dessa forma, a utilização de técnicas de análise de risco prévias pode auxiliar na tomada de decisão em uma situação emergencial, além de contribuir para a elaboração dos planos de segurança de barragens (PSB) exigidos pela lei.

Dentre as diversas técnicas desenvolvidas para análise de risco, a Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA, sigla em inglês) se apresenta como uma ferramenta reconhecida e aceita internacionalmente por analistas de risco em diferentes áreas (Santos *et al.*, 2008). Tal método proporciona uma análise de risco qualitativa, contudo, pode também ser ampliada para uma análise semiquantitativa por meio da inclusão da criticidade, que busca incorporar a repercussão da probabilidade de ocorrência da falha ou da causa da falha, da severidade de seus efeitos e da dificuldade de detecção do processo (Baptista, 2009). Esta extensão do FMEA é denominada Análise dos Modos de Falha, seus Efeitos e Criticidade (FMECA).

Diante disso, o objetivo do presente trabalho é realizar uma análise por meio do FMECA, de forma a contribuir na identificação dos aspectos mais críticos da barragem e na priorização de estudos

complementares, utilizando, como estudo de caso, a Barragem Jaburu I, localizada na Serra da Ibiapaba, Ceará.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A Barragem Jaburu I, localizada entre os municípios de Ubajara/CE e Tianguá/CE, está inserida na região hidrográfica da Serra da Ibiapaba, ao noroeste do Estado. Essa obra se apresenta como uma estrutura de terra zoneada com altura máxima de 46 m e capacidade de acumulação de 138 hm³. De acordo com o projeto, o maciço é formado por um núcleo em argila arenosa e paramento de jusante em solo do tipo laterita. O sistema de drenagem interna é formado por drenos verticais e horizontais que descarregam no enrocamento de pé. Já o vertedouro está localizado na ombreira direita e não apresenta interferência no corpo da barragem. Além disso, a barragem Jaburu I possui um sistema de instrumentação composto por 61 piezômetros e 11 medidores de vazão (Assis, 2020).

A barragem, desde o início de sua operação, manifesta problemas, principalmente relacionados a percolação excessiva. Tais problemas têm origem devido ao tipo da rocha de fundação, sendo esta uma formação sedimentar com presença de um arenito fino, friável e pouco consistente, possibilitando a existência de erosões que podem progredir até a formação de cavernas (Santos, 2013). Segundo a documentação do empreendimento, o projeto previa, inicialmente, um tratamento de fundação com injeções de calda de cimento que garantisse a sua estanqueidade, contudo, durante a obra, a profundidade das injeções foi reduzida (CEARÁ, 2019).

Dentre os problemas enfrentados pode-se citar fissuras e abatimento do coroamento, fuga d'água com carreamento de material e formação de cavernas nas ombreiras, saturação do talude de jusante até 10 metros acima do *rock-fill* e início de um processo de *piping* pela fundação. Além dos problemas relacionados ao vertedouro, como a formação de sumidouros e cavernas e a existência de expressiva erosão regressiva no canal de restituição (Santos, 2013; Carneiro, 2019). Devido aos problemas descritos, a Barragem Jaburu I já passou por sete grandes intervenções corretivas, em diferentes anos, de forma a buscar garantir a segurança do empreendimento. A maioria destas teve como objetivo promover a estanqueidade da rocha de fundação e das ombreiras e foram realizadas em situações de caráter emergencial (CEARÁ, 2019).

2.2 Método

A aplicação do FMEA/FMECA se dá a partir da decomposição do sistema que se deseja analisar em subsistemas, componentes ou elementos. Em seguida, cada um destes deve ter sua função especificada, para que, dando prosseguimento ao método, seja feita a identificação dos principais modos potenciais de falha dos subsistemas e dos efeitos decorrentes destes (Melo, 2014). Os efeitos

podem ser considerados de diversas formas, por exemplo, efeitos locais e efeitos em outros componentes (Melo, 2014), contudo, neste trabalho foram considerados os efeitos finais. O passo seguinte é determinar as possíveis causas para os modos de falha descritos e especificar as medidas de controle que podem ser tomadas para cada situação.

É importante ressaltar que para a aplicação dessa técnica é de fundamental importância o conhecimento detalhado dos dados referentes ao sistema analisado (Santos *et al.*, 2008). Assim, as informações referentes à Barragem Jaburu I – projetos, relatórios de inspeções de segurança, histórico de anomalias, obras de recuperação, dados de instrumentação, dentre outros – foram solicitadas ao órgão empreendedor e complementadas a partir de pesquisas em outros trabalhos destinados à essa estrutura.

Finalizada a parte qualitativa da análise, segue-se para a inclusão da criticidade, que se dá a partir da determinação dos índices de ocorrência (O) – que indica a probabilidade de determinada falha acontecer –, de severidade (S) – que sinaliza o quão grave é o efeito descrito – e de detecção (D) – que indica a dificuldade em detectar uma falha em específico (Paiva e Pinheiro, 2015).

Com isso, calcula-se o Número de Prioridade de Risco (NPR) a partir da multiplicação dos três índices descritos. A depender da abordagem, o NPR pode ser atribuído tanto ao modo de falha quanto a causa do modo de falha (Paiva e Pinheiro, 2015). Nesse trabalho, o NPR foi calculado para cada uma das causas dos modos de falha. Os valores atribuídos aos índices descritos foram determinados com base nas Tabelas 1, 2 e 3.

Os resultados da análise do FMEA/FMECA são descritos em tabelas projetadas especificamente para o tipo de sistema de interesse (Bambara *et al.*, 2015). Existem, na literatura, diferentes arranjos para estruturação das tabelas do FMEA/FMECA, assim, para a análise de uma obra de barragem optou-se por utilizar um *layout* baseado nos trabalhos de Espósito e Palmier (2013), Portes (2013), Melo (2014) e Vianna (2015), que também aplicaram o método descrito para barragens (Figura 1).

Por fim, a partir da hierarquização dos valores de NPR pode-se avaliar o risco relativo associado a cada causa dos modos de falha. Além disso, os resultados obtidos também foram apresentados de forma gráfica, a partir da matriz de criticidade, que relaciona as classes de ocorrência e de severidade, sendo as primeiras associadas às linhas e as últimas associadas às colunas. Nessas matrizes a criticidade cresce diagonalmente, ou seja, as causas que se localizam nas células superiores mais à direita apresentam maior criticidade. Além disso, para que fosse possível organizar a matriz de criticidade, adicionou-se ao formulário do FMEA/FMECA uma coluna chamada “ID Causa” que apresenta um código para identificação de cada causa nas células da matriz.

Tabela 1 – Classes de ocorrência. Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2008).

Classe de ocorrência	Índice de ocorrência	Intervalos de probabilidade	Classificação	Descrição
A	1	< 0,1%	Improvável	Muito baixa probabilidade
B	2	0,1 – 1%	Remota	Possível, mas de baixa probabilidade
C	4	1 – 10%	Ocasional	Ocorrência ocasional
D	7	10 – 20%	Provável	Ocorrência possível e provável
E	10	> 20%	Frequente	Ocorrência regular

Tabela 2 – Classes de severidade. Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2008).

Classe de severidade	Índice de severidade	Áreas de interesse			
		Saúde e segurança	Ambiente	Econômicos	Censura da opinião pública
I	1	Negligenciável	Sem impacto mensurável	Impacto baixo	Nenhuma
II	2	Pequenos primeiros socorros	Pequenos impactos na região	Impacto médio	Baixa
III	4	Pequenos ferimentos	Violação legal ou permitida	Impacto médio/alto	Média/Baixa
IV	6	Incapacidade temporária	Prejuízo local	Impacto alto	Média
V	9	Incapacidade permanente/fatalidade	Impacto significativo (grande, mas reversível)	Impacto muito alto	Média/Alta
VI	10	Várias fatalidades	Impacto catastrófico (grande e irreversível)	Impacto massivo	Alta

Tabela 3 – Índice de detecção. Fonte: Espósito e Palmier (2003).

Índice de detecção	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Descrição	Quase certo	Muito Alto	Alto	Moderadamente alto	Moderado	Baixo	Muito baixo	Remoto	Muito remoto	Quase impossível

Subsistema	Função	Modo de falha	Efeito final	S	Causa	O	D	Controle	Tipo de controle	NPR

Figura 1 – Formulário FMEA/FMECA utilizado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Barragem Jaburu I encontra-se em plena exploração, dessa forma, a análise realizada incidiu sobre a fase de operação da estrutura. Assim, a partir do estudo das informações relativas à barragem, com o intuito de aprofundar o conhecimento acerca do funcionamento da obra e seu comportamento, deu-se início a aplicação do método com a identificação do sistema e dos subsistemas a serem desenvolvidos (Figura 2). Optou-se, neste trabalho, por dar maior ênfase à análise do corpo da

barragem, assim, outros subsistemas, como o vertedouro e o reservatório, não foram incluídos no sistema a ser analisado.

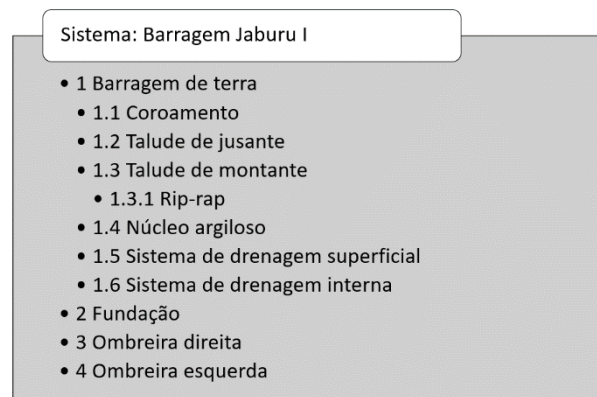


Figura 2 – Sistema definido para a aplicação do FMEA/FMECA.

O desenvolvimento do FMEA/FMECA, desde o preenchimento do formulário, com a determinação dos modos de falha, efeitos finais e possíveis causas, até a definição dos índices de severidade, ocorrência e detecção, foram baseados em informações consistentes contidas nos documentos disponibilizados pelo empreendedor da barragem e em outros estudos desenvolvidos. Ressalta-se que, em consequência da grande extensão do formulário final, este foi disponibilizado no QR code (Apêndice A), sendo incluídas neste tópico as discussões acerca dos resultados da análise de criticidade. Dessa forma, os valores obtidos de número de prioridade de risco (NPR) para o sistema da Barragem Jaburu I analisado variaram entre 2 e 350. Tal faixa de valores foi superior a encontrada nos estudos de Melo (2014) e Vianna (2015), que aplicaram o FMECA para barragens de usinas hidrelétricas, se aproximando mais dos valores advindos de estudos em barragens de rejeitos (Pereira, 2009), porém, tal fato pode ser explicado devido ao extenso histórico de problemas enfrentados pela Barragem Jaburu I.

Sabendo-se que os valores mais altos de NPR devem ser tratados prioritariamente, optou-se por dar destaque às causas dos modos de falha que apresentaram NPR superior a 150, sendo elas:

- i. Elevada carga hidráulica com aumento da linha freática podendo causar percolação excessiva pelo núcleo argiloso (NPR = 200);
- ii. Falha de projeto em relação aos critérios de filtro podendo causar erosão interna/*piping* devido a falha no sistema de drenagem interna (NPR = 240);
- iii. Colmatação do filtro podendo causar instabilidade global da barragem pela falha no sistema de drenagem interna (NPR = 240);
- iv. Recalques diferenciais com trincas internas podendo causar instabilidade global da barragem pela falha no sistema de drenagem interna (NPR = 160);
- v. Falha no dimensionamento do filtro podendo causar instabilidade global da barragem pela

- falha no sistema de drenagem interna (NPR = 160);
- vi. Tratamento de fundação deficiente ou inadequado podendo causar instabilidade global da barragem (NPR = 200), percolação excessiva (NPR = 180) ou *piping* (NPR = 180) pela fundação;
 - vii. Fraturas geológicas não detectadas podendo causar instabilidade global da barragem (NPR = 350) ou percolação excessiva (NPR = 315) pela fundação;
 - viii. Remoção insuficiente de materiais de baixa resistência podendo causar percolação excessiva (NPR = 216) ou *piping* (NPR = 216) pela fundação;
 - ix. Fraturas geológicas não detectadas podendo causar *piping* pelas ombreiras (NPR = 180).

Com base nesses resultados é possível observar que os pontos mais críticos do sistema estão localizados nos subsistemas de drenagem interna da barragem, de fundação e das ombreiras.

No primeiro, seus elementos têm como modo de falha principal a incapacidade de coletar e conduzir a água de percolação do reservatório através do maciço. Seu alto valor de NPR se justifica devido à alta severidade envolvida nos processos de *piping* ou da geração de uma instabilidade global do barramento. Além disso, outro índice que contribuiu para o resultado foi a baixa probabilidade de detecção, tendo em vista que, apesar da barragem apresentar um sistema instalado de instrumentação, esta não possui um estudo de avaliação dos limites de performance que possibilite a interpretação rápida dos dados e auxilie numa tomada de decisão (Fernandes *et al.*, 2018).

Em relação ao subsistema de fundação, os modos de falha determinados foram movimentação de massa, percolação excessiva ou *piping*. Nesse caso, as severidades admitidas para as falhas por percolação excessiva e por *piping* foram consideradas menores que a admitida para a falha por instabilidade global da barragem, ainda que o valor continue sendo alto. Esta determinação buscou admitir que as falhas por percolação excessiva ou por *piping* envolvem fenômenos progressivos, que possibilitam, se identificados precocemente, a tomada das devidas providências na tentativa de minimizar seus efeitos. Outro índice que contribuiu para os altos valores de NPR no subsistema de fundação foi o índice de ocorrência, sendo, para a maioria das causas, classificado como classe E, ou seja, de ocorrência regular. O histórico de eventos de percolação excessiva e de início/desenvolvimento de processos de *piping* já enfrentados pela Barragem Jaburu I, em conjunto com a consciência da complexidade das feições geológicas da rocha de fundação e das investigações deficientes no período de desenvolvimento do projeto e de implantação das obras, conforme apresentado nos estudos de Sousa (2013), justificam essa classificação.

Finalmente, acerca dos subsistemas das ombreiras, os modos de falha admitidos foram, também, movimentação de massa e *piping*. Este último apresentou, tanto para a ombreira direita

quanto para a esquerda, valores de NPR iguais a 180, considerando como uma possível causa a existência de fraturas geológicas não detectadas, visto que as rochas das ombreiras apresentam as mesmas características da rocha sedimentar de fundação (Sousa, 2013). Assim, além da alta severidade envolvida no processo, a ocorrência foi considerada ocasional e detecção moderada.

A matriz de criticidade resultante está apresentada na Figura 3. É possível observar que as causas dos modos de falha que foram classificados como tendo maior criticidade na matriz (células vermelhas), ou seja, que representam os pontos mais críticos da estrutura, são, de forma majoritária, relativos ao subsistema de fundação e também aos subsistemas das ombreiras, o que converge com os resultados obtidos a partir do NPR.

OCORRÊNCIA	E		1.3.1;2/ 1.5;2			2;3/ 2;4/ 2;5/ 2;6/ 2;9/ 2;10/ 3;4/ 4;4	2;1
	D		1.3.1;3/ 1.5;1			2;7/ 3;2/ 4;2	2;2
	C			1.2;4	1.3;10	1.2;1/ 1.6;2/ 1.6;4/ 2;8/ 2;11/ 3;3/ 4;3	1.1;2/ 1.2;11/ 1.4;2/ 1.6;1
	B	1.1;1	1.3;11/ 1.3;12/ 1.3;13/ 1.3.1;1/ 1.3.1;4/ 1.3.1;5/ 1.3.1;6/ 1.3.1;7	1.2;5/ 1.2;6/ 1.2;9/ 1.2;10/ 1.3;4/ 1.3;5/ 1.3;8/ 1.3;9/ 3;1/ 4;1		1.2;2/ 1.2;3/ 1.2;7/ 1.2;8/ 1.3;1/ 1.3;2/ 1.3;6/ 1.3;7/ 1.6;3/ 1.6;5	1;2/ 1;3/ 1;5/ 1;7/ 1.1;3/ 1.1;4/ 1.1;5/ 1.2;12/ 1.2;13
	A					1.3;3	1;1/ 1;4/ 1;6/ 1.4;1
		I	II	III	IV	V	VI
	SEVERIDADE						

Figura 3 – Matriz de criticidade para a Barragem Jaburu I (Ocorrência x Severidade).

Já as causas das falhas do subsistema de drenagem interna, que apresentaram valores altos de NPR, foram, na matriz, classificados com uma de criticidade mediana (células amarelas e laranjas). Tal fato é explicado tendo em vista que um dos índices que mais contribuiu para os altos resultados de NPR nesse subsistema são relativos à detecção, que não é considerada na estruturação da matriz.

Salienta-se que os resultados obtidos com a aplicação do FMEA/FMECA, principalmente relacionados à ocorrência das causas modos de falha, não possuem interdependência direta com as probabilidades reais de ruptura da barragem (Melo, 2014).

4 CONCLUSÃO

Este trabalho pretendeu, a partir de uma análise de riscos preliminar e com base nas particularidades da Barragem Jaburu I – nomeadamente, a natureza geológica de sua rocha de fundação e seu histórico de anomalias –, avaliar as vulnerabilidades a que a obra em questão está susceptível e entender de que forma esses riscos podem ser detectados ou controlados, utilizando, para tanto, o método FMEA/FMECA.

Além disso, no contexto das exigências da PNSB e da necessidade do desenvolvidos dos PSBs, este trabalho buscou contribuir para a gestão de situações emergenciais, tendo em vista que o FMEA/FMECA proporciona um melhor entendimento das características do sistema, obtendo uma análise global, lógica e sistemática que pode auxiliar em uma tomada de decisão e também nos estudos e processos a serem desenvolvidos como parte do PSB.

No entanto, apesar da metodologia aplicada possibilitar um conhecimento estruturado das funções e dos modos de falha, com seus efeitos e possíveis causas, para cada subsistema, esta apresenta limitações principalmente devido ao fato de não considerar a ocorrência de eventos combinados e a interação entre os subsistemas, complexidades estas inerentes aos sistemas geotécnicos. Além disso, a análise de risco por meio do FMEA/FMECA também não inclui a ação do tempo nos processos de falha, o que influencia fortemente a análise, podendo majorar a criticidade de alguns eventos por considera-los instantâneos e não progressivos, como ocorre na realidade. Por exemplo, no caso da Barragem Jaburu I, os acidentes que apresentam maior probabilidade de ocorrência se relacionam com fugas d'água e eventuais fenômenos subsequentes de erosão interna, conforme apresentado ao longo do trabalho, e que têm, de forma geral, evolução inicialmente lenta e possibilitam a realização de intervenções que mitiguem seus efeitos.

A aplicação do método em questão é influenciada, também, pela subjetividade envolvida na determinação dos índices de severidade, ocorrência e detecção, assim, reforça-se o caráter preliminar da análise, devendo ser complementada com metodologias de análise de risco mais completas.

Assim, conclui-se que o FMEA/FMECA, sendo um método bastante difundido em diversos campos de conhecimento, apresenta um resultado satisfatório para identificação e priorização de riscos, devendo fazer parte dos processos de gestão de segurança de barragens, visto que indica para onde os esforços de segurança devem ser direcionados, distinguindo os pontos do sistema com maior potencial de causar danos à população e ao ambiente.

Por fim, como sugestões para trabalhos futuros podem ser feitas, para a Barragem Jaburu I, análises do FMEA/FMECA com a contribuição de um grupo de especialistas, de forma a buscar diminuir a subjetividade envolvida na determinação da criticidade. Sugere-se também a aplicação do método considerando como sistema analisado o vertedouro da barragem, que também apresenta particularidades interessantes para analisar o risco envolvido. E, finalmente, sugere-se a aplicação de outras metodologias de análise de risco, por exemplo, uma Análise de Árvore de Falhas, tendo como evento base a falha através da fundação da barragem, um dos pontos mais críticos de acordo com os resultados obtidos neste trabalho.



APÊNDICE A - Formulário FMEA/FMECA para a Barragem Jaburu I

AGRADECIMENTOS – Os autores agradecem à Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) por disponibilizar a documentação da Barragem Jaburu I e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pela bolsa de mestrado concedida à primeira autora.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, D. N. *Relatório de Encerramento da Emergência: Barragem Jaburu I*. Fortaleza: Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH), Governo do Estado do Ceará, 2020. 17 p.
- BAMBARA, G., *et al.* Developing a functional model for cities impacted by a natural hazard: application to a city affected by flooding. *Natural Hazards And Earth System Sciences*, [s.l.], v. 15, n. 3, p. 603-615, 16 mar. 2015. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-15-603-2015>.
- BAPTISTA, Maria de Lurdes Pimenta. *Abordagens de risco em barragens de aterro*. 2009. 573 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.
- BIEDERMANN, R. *Safety concept for dams: Development of the Swiss concept since 1980*. *Wasser, Energie, Luft*, 89: 55-72, 1997.
- BRASIL. *Lei nº 12334, de 20 de setembro de 2010*. Brasília, DF, 2010.
- CARNEIRO, H. *Impactos das intervenções de segurança da Barragem Jaburu I*. 2019. 66 f. TCC - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Vale do Acaraú, Sobral, 2019.
- CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). Governo do Estado do Ceará. *Termo de Referência dos serviços emergenciais de injeções na região a jusante da Barragem Jaburu I*. Fortaleza: COGERH, 2019. 58 p.
- ESPÓSITO, T.; PALMIER, L. Application of Risk Analysis Methods on Tailings Dams. *Soils And Rocks: An International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Brazil; Portugal, p. 97-117. 2013.
- FERNANDES, T. A., *et al.* Analysis of the dams security methodology of the Water Resources Management Company of the State of Ceará. In: *International Dam World Conference*, 3., 2018, Foz do Iguaçu, 2018.
- FUSARO, T. C. *Gestão e Desempenho de Barragens: Análise e Gestão de Riscos*. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2011.
- MELO, A. V. *Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: Estudo de caso de barragens da CEMIG GT*. 2014. 244 f. Dissertação – Mestrado em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- PAIVA, R. L.; PINHEIRO, V. K. *Aplicação de metodologia FMEA e FMECA para análise de risco em barragens*. 2015. 64 f. TCC - Curso de Engenharia de Minas, Universidade do Estado de Minas Gerais, João Monlevade, 2015.
- PEREIRA, F. M. S. *Gestão de riscos e plano de ações emergenciais aplicado à barragem de contenção de rejeitos Casa de Pedra/CSN*. 2009. 180 f. Dissertação – Mestrado em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
- PORTES, A. M. C. *Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta*. 2013, 155 f. Dissertação – Mestrado em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- SANTOS, R. N. C. *et al.* Aplicação da FMEA/FMECA a uma barragem de retenção de rejeitados. *Revista Luso-brasileira de Geotecnia*, Portugal, 114, p. 113-142, 2008.
- SOUSA, L. N. *Avaliação do comportamento da fundação de barragem em rocha arenítica: Estudo de caso da barragem Jaburu I*. 2013. 79 f. Dissertação - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- 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 em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.