

SEGURANÇA CONTRA O RISCO DE PIPING EM BARRAGENS DE TERRA ATRAVÉS DA DISTRIBUIÇÃO WEIBULL

SAFETY AGAINST THE RISK OF PIPING IN EARTH DAMS THROUGH WEIBULL DISTRIBUTION

 10.36977/ercct.v21i2.373

Artigo Original

José Paulo Rocha Soares¹

 <https://orcid.org/0000-0003-0725-8947>

Vanda Tereza Costa Malveira²

 <https://orcid.org/0000-0002-7002-1240>

RESUMO

Um dos problemas pertinentes na Segurança de Barragens é o fenômeno de erosão interna, *piping*. Compreendendo-se as características que envolvem este fenômeno com o objetivo de analisar sua probabilidade de ocorrência, coletou-se os Relatórios Anuais de Segurança de Barragens (RASB), de 2006 a 2019, avaliando-se as anomalias presentes nos maciços de 82 barragens do estado do Ceará, de modo que indicasse um estado de conservação relacionado com as características do *piping*. Analisou-se a evolução do *piping*, traduzida pelo estado de conservação, por meio de um modelo probabilístico, de modo a mensurar o risco de ruptura da barragem em um tempo pré-determinado, utilizando a distribuição Weibull. Levou-se em consideração na análise, como características importantes na evolução do *piping*, a idade da barragem, tipo de solo presente no maciço, e o nível d'água dos reservatórios no período do estudo. Estratificou-se a amostra coletada em três grupos separados por idade da barragem e um grupo para as barragens com um estado de conservação mais crítico. Estimou-se parâmetros aplicáveis à distribuição Weibull, por meio do estimador de Máxima Verossimilhança, permitindo quantificar o risco que as barragens do Ceará têm de desenvolver a anomalia *piping*, contabilizando 10 barragens com Risco de *Piping* maior que 75%.

Palavras-chave: Barragens de Terra. *Piping*. Risco. Weibull.



www.uvanet.br/essentia

Recebido em: 15/09/2020

Aprovado em: 30/11/2020

Autor para correspondência:

José Paulo Rocha Soares

Rua 2, nº 363, Boa Vista, Ipu, CE, Brasil. CEP: 62250-000.

E-mail: josepaulo.rsoares@gmail.com



Copyright (c) 2020 Essentia - Revista de Cultura, Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Vale do Acaraú
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

¹Acadêmico do Curso de Engenharia Civil. Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA). Sobral, Ceará, Brasil. E-mail: josepaulo.rsoares@gmail.com

²Docente do Curso de Engenharia Civil. Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará. Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA). Sobral, Ceará, Brasil. E-mail: tmalveira@hotmail.com

ABSTRACT

One of the relevant problems in Dam Safety is the phenomenon of internal erosion, piping. Understanding the characteristics that involve this phenomenon in order to analyze its probability of occurrence, collected the Annual Dam Safety Reports (RASB), from 2006 to 2019, evaluating the anomalies present in the massifs of 82 dams of the state of Ceará, so that it indicates a state of conservation related to the characteristics of the piping. The evolution of piping was analyzed, translated by the state of conservation, through a probabilistic model, to measure the risk of dam rupture in a predetermined time, using the Weibull distribution. The analysis considered, as important characteristics in the piping evolution, the age of the dam, the type of soil present in the massif, and the level of water in the reservoirs during the study period. The sample collected was stratified into three groups separated by age of the dam and one group for dams with a more critical state of conservation. Parameters applicable to the Weibull distribution were estimated using the Maximum Likelihood estimator, allowing to quantify the risk that the dams in Ceará have to develop the piping anomaly, accounting for 10 dams with a Piping Risk greater than 75%.

Keywords: Earth Dams. Piping. Risk. Weibull

INTRODUÇÃO

O fenômeno *piping*, de acordo com Berrones e Acosta (2011), trata-se de um processo no qual partículas de solo são carregadas no interior do maciço, na fundação, ou entre os dois, através de saídas livres ou caminhos abertos, como fissuras. Essa migração de partículas forma uma pequena tubulação que altera a estrutura da barragem e torna-se um caminho preferencial para a passagem de água, causando instabilidade no maciço e podendo levá-lo à ruptura. Foster, Fell e Spannagle (2000), relatam que após os anos 1950, as falhas em barragens ocasionadas por problemas relacionados ao *piping* obtiveram um aumento de 43% para 54%.

As barragens de terra, foco da análise deste artigo, apesar de serem um tipo específico, mantêm características diferentes entre si que podem agravar ou amenizar o fenômeno *piping*. Uma dessas características é o tipo de solo presente no maciço. A resistência do solo aos processos de erosão pode ser estimada através do Índice de Taxa de Erosão Representativo (I_{HET}) que, conforme Fell (2013), é representativo de um solo com taxa de compactação de 95% da umidade ótima, e pode relacionar-se aproximadamente às propriedades do solo. Conforme a Resolução Nº 143/2012, do Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2012), uma barragem é mais susceptível a problemas nos seus primeiros 10 anos de operação e depois dos 50 anos. Desse modo, espera-se que barragens entre 10 e 50 anos de operação tenham um comportamento diferente de barragens com idades menores que 10 ou maiores que 50. Um dos fatores cruciais que gera o arraste de partículas de solo é a ação da água. Conforme Pinto (2006), a ação da

água é representada pela força de percolação no solo. Essa força é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico que, por sua vez, é diretamente proporcional à carga hidráulica. Nas barragens, a carga hidráulica é representada pelo nível de água do reservatório, medição fundamental na análise do *piping*.

A Análise de Risco tornou-se uma das áreas da estatística que mais cresceu nas últimas décadas, sendo aplicada em variadas áreas do conhecimento. Este estudo tem como análise o tempo estimado que um determinado evento leva para ocorrer. O evento de estudo pode representar a falha de um sistema, ou, pode também ser definido por um conjunto de condições que determinam o evento de interesse (COLOSIMO, 2006). Para a realização dos cálculos necessários desta análise, pode-se recorrer à distribuição de Weibull. Conforme a Portal Action, sua função Taxa de Risco é definida como monótona, ou seja, ela pode ser crescente, decrescente ou constante. A variabilidade de comportamento da Taxa de risco de Weibull traduz significados importantes. Quando a curva é decrescente ela indica falhas prematuras, quando constante indica falhas aleatórias (representativas da vida útil do sistema), e quando crescente indica falhas por desgaste.

A existência de dados censurados é recorrente em análise de risco. Tais dados são informações parciais do problema, pois o tempo de observação do estudo é menor que o tempo até a falha do sistema (PORTAL ACTION, 2005?). A possibilidade de acrescentar covariáveis na análise de risco que mantenham alguma correlação com o tempo de evolução do problema pode ser calculada a partir do conceito de regressão linear. Os parâmetros associados à distribuição são calculados a partir de um estimador, por meio de uma amostra, que retornará os valores que melhor expliquem a amostra observada. (COLOSIMO, 2006). Um exemplo de estimador extremamente confiável em estudos de análise de risco é o estimador de Máxima Verossimilhança que, como sugerido pelo nome, encontrará valores para os parâmetros que maximizem a função verossimilhança (MONTGOMERY, 2012).

Frequentemente, busca-se calcular intervalos de confiança nas respostas das funções de distribuição paramétrica. Para estimar estas quantidades utiliza-se os parâmetros encontrados no estimador de Máxima Verossimilhança, aplicando-os na função, com o objetivo de calcular seu erro padrão. Para os cálculos utiliza-se o método delta, expandindo a função em uma série de Taylor, de modo a calcular sua variância (PORTAL ACTION, 2005?).

Objetiva-se nesta pesquisa a análise do risco de ruptura por *piping* em barragens de terra, quantificando a probabilidade deste evento ocorrer, de maneira a auxiliar os processos de decisão nas intervenções e mitigações de problemas destas

estruturas, que exercem papel fundamental no abastecimento de água para o semiárido nordestino.

METODOLOGIA

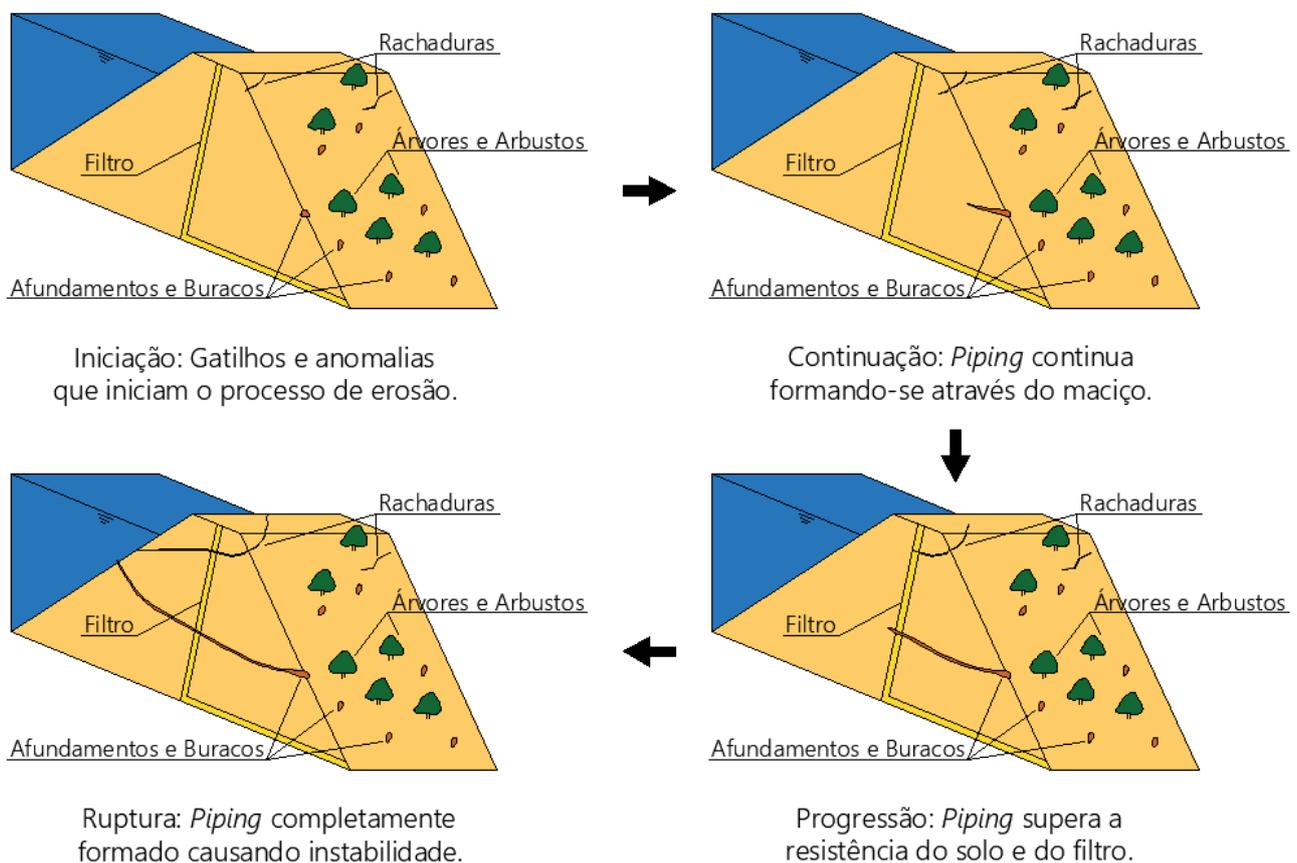
Os passos seguidos na análise deste artigo iniciaram-se com a coleta de dados dos Relatórios Anuais de Segurança de Barragens (RASB), os quais são elaborados e executados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). Tais relatórios listam as anomalias presentes em barragens, além dos seus níveis de perigo. Esses dados possibilitam uma análise geral do estado de conservação do maciço que permitiram a avaliação de 82 barragens com idades variando entre 1 e 119 anos de operação, no decorrer dos anos de 2006 a 2019. Com os dados obtidos, associou-se as anomalias presentes nos maciços às anomalias características do *piping*. Conforme Fell (2003), é usual atribuir ao processo de desenvolvimento do *piping* uma divisão em quatro etapas: Iniciação, Continuação, Progressão e Ruptura. Uma ilustração desse desenvolvimento é apresentada na Figura 1.

A etapa "Iniciação" é caracterizada pela existência de anomalias ou condições que facilitem o processo de erosão ocorrer. Conforme a *Intergency Committee on Dam Safety (ICODS)*, não

há a necessidade de uma anomalia ser evidente para essa etapa surgir, basta que haja um material susceptível à erosão ou uma região de contato entre materiais diferentes. Conforme Hunter (2012), a etapa "Continuação" determinará se o tubo continuará se formando no maciço, o que dependerá da distribuição granulométrica entre os materiais do maciço compactado e do filtro da barragem. O fato anterior evidencia que uma barragem sem filtro ou com um filtro mal projetado condicionará maior risco para o *piping* desenvolver-se. Quando a proteção do filtro falha surge a etapa da "Progressão", esta evolui em direção a montante completando o tubo. Conforme Fell (2003), o tempo entre a completa formação do tubo e a ruptura da barragem pode ocorrer em horas.

A partir do entendimento das etapas de desenvolvimento do *piping*, associou-se cada etapa a um estado de conservação das barragens, de acordo com o RASB. Definiu-se o estado de conservação das barragens em 4 níveis. O primeiro nível (N1) faz referência à etapa de "Iniciação" do fenômeno *piping*, por conseguinte, o segundo (N2) à fase "Continuação", o terceiro (N3) à "Progressão" e o quarto, "nível crítico" (NC), à "Ruptura". Os critérios para esta qualificação dependem das anomalias e do seu nível de perigo (NPA), conforme o RASB, e apresentam-se na Tabela 1.

Figura 1 – Etapas de desenvolvimento do fenômeno *piping*. 2020.



Fonte: Própria.

Tabela 1 – Classificação dos níveis do *piping* conforme o nível de perigo (NPA) da anomalia registrada no RASB. 2020.

Anomalias	Local	N1	N2	N3	NC
Rip-rap incompleto, destruído ou deslocado	TM	2	3		
Canaletas quebradas ou obstruídas	TM e TJ	2	3		
Falta de pavimentação / Falha na pavimentação	CO	2	3		
Defeitos na drenagem	CO	2	3		
Defeitos no meio-fio / Desalinhamento do meio-fio	CO	2	3		
Falha na proteção granular / Falha na proteção vegetal	TJ	2	3		
Erosões / Rachaduras / Afundamentos e buracos	TB	1	2	3	
Árvores e arbustos / Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais	TB	1	2	3	
Erosão nas ombreiras / Cavernas e buracos nas ombreiras	TB	1	2	3	
Escorregamentos / Sinais de Movimento	TM	1	2	3	
Escorregamentos / Sinais de Movimento	CO e TJ	0	1	2	3
Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas / Fuga d'água	TJ e RJ	0	1	2	3
Carreamento de material na água dos drenos	TJ	0	1	2	3

Obs.: TM = Talude de Montante; TJ = Talude de Jusante; CO = Coroamento; TB = Toda a Barragem; RJ = Região a Jusante.

Fonte: Própria.

Tabela 2 – Classificação da barragem Desterro após análise do critério de quantidade de anomalias. 2020.

Nível de Classificação "Piping"	Peso (P)	Quantidade de Anomalias (QA)	Pontuação (P x QA)
N1 – "Iniciação"	1	1	1
N2 – "Continuação"	4	1	4
N3 – "Progressão"	9	2	18
Pontuação Total (PT)			23

Obs.: PT > 12; logo, Classificação = N3 + 1 nível = NC

Fonte: Própria.

Tabela 3 – Amostras do estudo. 2020.

Amostra	Idade da Barragem (IB)	Evolução	Elementos
1	Jovens (IB \leq 10)	N1/N2 até NC	32
2	Consolidadas (10 < IB \leq 50)	N1/N2 até NC	71
3	Envelhecidas (IB > 50)	N1/N2 até NC	14
4	Todas as Idades	N3 até NC	20

Fonte: Própria.

Observou-se que o acúmulo de anomalias em uma barragem pode oferecer tanto perigo quanto uma anomalia isolada em estado avançado. De tal modo, acrescentou-se um critério na análise do estado de conservação, análogo ao sistema de pesos adotados pela COGERH e propostos por Fontenelle (2007) na prioridade de intervenção em

barragens. A Tabela 2 exemplifica tal critério informando os pesos relativos às anomalias de acordo com a classificação da tabela 1. A soma da quantidade de anomalias multiplicada pelo seu peso retorna um valor numérico que, sendo maior que 12, eleva o nível atual da barragem para um nível superior.

Após a coleta dos dados estratificou-se a amostra em 4 grupos, conforme a Tabela 3. Classificou-se as barragens com idades menores ou iguais a 10 anos de operação como "Jovens". Do mesmo modo, classificou-se as barragens com idades maiores que 10 e menores ou iguais a 50 anos de operação como "Consolidadas", e as barragens com idades maiores que 50 anos de operação como "Envelhecidas". Formou-se a amostra 4 sem levar em consideração a idade das barragens, no intuito de verificar o comportamento das barragens em um estado de conservação mais deteriorado.

As etapas de cálculos iniciaram-se com a identificação das funções da distribuição de Weibull. Função Densidade de Probabilidade na equação 1, Função de Confiabilidade na equação 2 e Função Taxa de Risco na equação 3.

$$f(t) = \frac{\gamma}{\alpha^\gamma} t^{\gamma-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\gamma\right\} \quad (1)$$

$$C(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\gamma\right\} \quad (2)$$

$$\lambda(t) = \frac{\gamma}{\alpha^\gamma} t^{\gamma-1} \quad (3)$$

Em seguida substituiu-se os tempos de falha por seus logaritmos naturais, $z = \ln(t)$, gerando assim, a distribuição de Gumbel, equações 4, 5 e 6, onde o parâmetro de forma σ é igual a $1/\gamma$, e o parâmetro de escala μ é igual a $\ln(\alpha)$.

$$f(z) = \frac{1}{\sigma} \exp\left\{\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right) - \exp\left\{\frac{z-\mu}{\sigma}\right\}\right\} \quad (4)$$

$$C(z) = \exp\left\{-\exp\left\{\frac{z-\mu}{\sigma}\right\}\right\} \quad (5)$$

$$\lambda(z) = \frac{1}{\sigma} \exp\left\{\frac{z-\mu}{\sigma}\right\} \quad (6)$$

Aplicou-se uma covariável x na análise, conforme apresentado na introdução, sobre o parâmetro de escala μ , a partir do conceito de regressão linear, como observado na equação 7. O valor da covariável x é representado pelo quociente A/S. A variável "A" representa a média dos níveis de água do reservatório no período de registro dos relatórios (RASB), expressa em unidades por dezena. Já a variável "S" é o valor representativo do tipo de solo, conforme I_{HET} , conferidos pela Tabela 4, considerando os valores da coluna de "melhor estimativa".

$$\mu = \beta_0 + \beta_1 x \quad (7)$$

A variável que contempla os dados censurados é demonstrada nas equações pelo símbolo δ e é igual a 0 para dados censurados e 1 para dados não censurados. O formato da função verossimilhança apresenta-se na equação 8, onde θ representa o conjunto dos parâmetros a serem estimados (σ, β_0 e β_1).

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n \left[\frac{1}{\sigma} \exp\left\{\left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma}\right) - \exp\left\{\frac{z_i - \mu_i}{\sigma}\right\}\right\} \right]^{\delta_i} \cdot \left[\exp\left\{-\exp\left\{\frac{z_i - \mu_i}{\sigma}\right\}\right\} \right]^{1-\delta_i} \quad (8)$$

A sequência dos cálculos deu-se pela extração do logaritmo natural da função Verossimilhança. Em seguida, derivou-se a função em relação aos parâmetros. Por fim, igualou-se as derivadas a 0 gerando um sistema de equações que, devido às exponenciais não pôde ser resolvido analiticamente. Como solução do sistema, utilizou-se o método numérico de Newton-Raphson que obteve a função iterativa representada pela equação 9. Conforme Brasil, Balthazar e Góis (2015), em sistemas de n dimensões utiliza-se a matriz jacobiana, $n \times n$, que é formada pelas derivadas parciais em relação às variáveis. As iterações são encerradas com um erro de escolha do analista e representa-se tal erro como o produto da matriz das funções pela inversa da matriz jacobiana.

$$\begin{pmatrix} \sigma^{(1)} \\ \beta_0^{(1)} \\ \beta_1^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma^{(0)} \\ \beta_0^{(0)} \\ \beta_1^{(0)} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{\partial \ln(L(\theta))}{\partial \sigma} \\ \frac{\partial \ln(L(\theta))}{\partial \beta_0} \\ \frac{\partial \ln(L(\theta))}{\partial \beta_1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \ln(L(\theta))}{\partial \sigma^2} & \frac{\partial^2 \ln(L(\theta))}{\partial \sigma \partial \beta_0} & \frac{\partial^2 \ln(L(\theta))}{\partial \sigma \partial \beta_1} \\ \frac{\partial^2 \ln(L(\theta))}{\partial \sigma \partial \beta_0} & \frac{\partial^2 \ln(L(\theta))}{\partial \beta_0^2} & \frac{\partial^2 \ln(L(\theta))}{\partial \beta_0 \partial \beta_1} \\ \frac{\partial^2 \ln(L(\theta))}{\partial \sigma \partial \beta_1} & \frac{\partial^2 \ln(L(\theta))}{\partial \beta_0 \partial \beta_1} & \frac{\partial^2 \ln(L(\theta))}{\partial \beta_1^2} \end{pmatrix}^{-1} \quad (9)$$

Calculou-se os intervalos de confiança, conforme apresentado na introdução, utilizando a função paramétrica Confiabilidade (Equação 2), com variância apresentada na equação 10. Conforme Colosimo (2006), os elementos da diagonal principal da inversa da matriz jacobiana (equação 9) representam as variâncias dos parâmetros, sendo os demais elementos as covariâncias entre eles. Por fim, calculou-se o erro padrão pela equação 11, com um nível de significância de 5% (nível de confiança de 95%), onde n representa o tamanho da amostra.

$$\begin{aligned} \text{Var}(g(\theta)) \approx & \text{Var}(\sigma) \left(\frac{\partial C(\theta)}{\partial \sigma}\right)^2 + \text{Var}(\beta_0) \left(\frac{\partial C(\theta)}{\partial \beta_0}\right)^2 + \text{Var}(\beta_1) \left(\frac{\partial C(\theta)}{\partial \beta_1}\right)^2 \\ & + 2 \cdot \text{Cov}(\sigma\beta_0) \left(\frac{\partial C(\theta)}{\partial \sigma}\right) \left(\frac{\partial C(\theta)}{\partial \beta_0}\right) + 2 \cdot \text{Cov}(\sigma\beta_1) \left(\frac{\partial C(\theta)}{\partial \sigma}\right) \left(\frac{\partial C(\theta)}{\partial \beta_1}\right) \\ & + 2 \cdot \text{Cov}(\beta_0\beta_1) \left(\frac{\partial C(\theta)}{\partial \beta_0}\right) \left(\frac{\partial C(\theta)}{\partial \beta_1}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

Tabela 4 – Índice de Taxa de Erosão Representativo (I_{HET}) pela classificação de solos para solos não dispersivos baseado nos estudos de Wan e Fell (2002). 2020.

Classificação Unificada de Solos	Índice de Taxa de Erosão Representativo (I_{HET})		
	Estimativa Mínima	Melhor Estimativa	Estimativa Máxima
SM com < 30% de finos	1	< 2	2.5
SM com > 30% de finos	< 2	2 – 3	3.5
SC com < 30% de finos	< 2	2 – 3	3.5
SC com > 30% de finos	2	3	4
ML	2	2 – 3	3
CL-ML	2	3	4
CL	3	3 – 4	4.5
CL-CH	3	4	5
MH	3	3 – 4	4.5
CH com limite de liquidez < 65%	3	4	5
CH com limite de liquidez > 65%	4	5	6

Fonte: Fell (2013).

$$EP = \pm 1,96 \cdot \sqrt{\frac{\text{Var}(g(\theta))}{n}} \quad (11)$$

RESULTADOS

A realização dos cálculos prescritos na metodologia obteve a estimação dos parâmetros, conforme as amostras apresentadas na tabela 5, com erro da ordem de 10^{-5} .

As curvas das taxas de risco de cada amostra, considerando um valor igual a 2 para a covariável x , apresentam-se na Figura 2.

Com os parâmetros estimados, relatórios das barragens disponíveis, além dos dados adicionais, idade, tipo de solo e nível d'água, calculou-se a probabilidade de falha por *piping* de 82 barragens do estado do Ceará, desde a data do seu relatório mais recente até o dia 15/08/2020. Os resultados apresentam-se através do mapa da Figura 3.

Apresentam-se na Tabela 6 a quantidade de meses (variável "t" na distribuição de Weibull) que corresponde aos valores limites, para um intervalo de confiabilidade de 5% para mais ou para menos, sobre o resultado do Risco de *Piping*, em função do valor da covariável x .

DISCUSSÃO

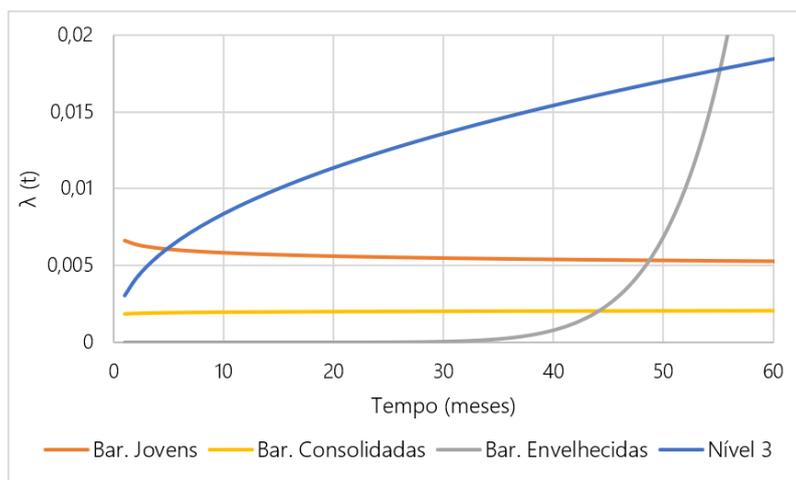
O parâmetro γ obtido pela amostra das barragens Jovens resultou em um valor menor que 1. Pelo gráfico da figura 2, observa-se que o risco associado a essas barragens tem uma leve regressão no decorrer do tempo. Obteve-se, para as barragens Consolidadas, um parâmetro γ muito próximo de 1, mantendo sua Taxa de Risco praticamente constante no decorrer do tempo. Esses resultados justificam uma coerência em relação ao formato da função Taxa de Risco, ao passo que para as barragens Jovens essa taxa indica falhas prematuras e para as barragens Consolidadas, indica falhas aleatórias. Pela análise do gráfico da figura 2, considerando o valor da

Tabela 5 – Resultado da estimativa dos parâmetros para cada amostra. 2020.

Amostra	Idade da Barragem	Evolução	$\gamma = 1/\sigma$	β_0	β_1
1	Jovens	N1/N2 até NC	0,8906	6,9691	-0,7862
2	Consolidadas	N1/N2 até NC	1,0831	10,2556	-2,1172
3	Envelhecidas	N1/N2 até NC	10,6952	4,9937	-0,3800
4	Qualquer idade	N3 até NC	1,4476	5,1299	-0,4143

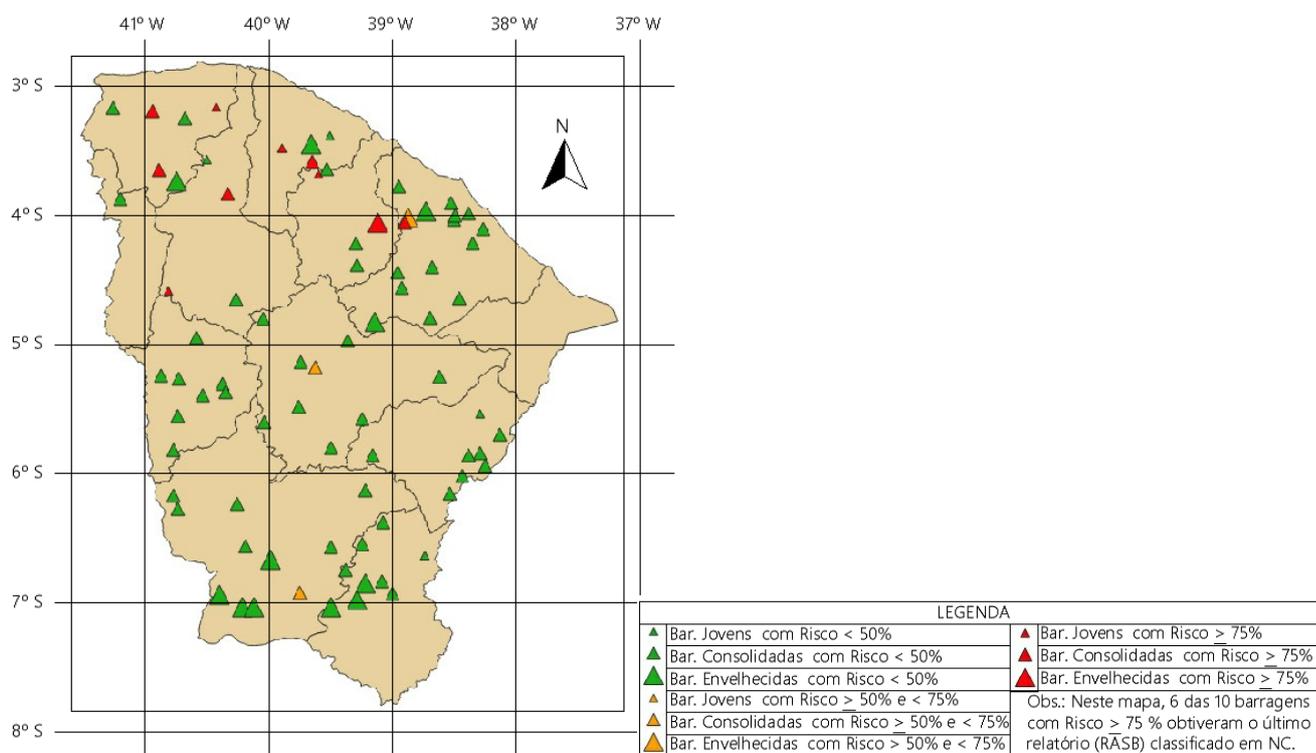
Fonte: Própria.

Figura 2 – Curvas das Taxas de Risco de cada amostra. 2020.



Fonte: Própria

Figura 3 – Mapa de Risco das barragens do estado do Ceará.



Fonte: Própria.

Tabela 6 – Limite da variável “t” da distribuição de Weibull, de acordo com o valor da covariável x, para um resultado de Risco de Piping com variação de \pm 5%. 2020.

Covariável x = A/S	Amostra 1 Jovens	Amostra 2 Consolidadas	Amostra 3 Envelhecidas	Amostra 4 Saindo de N3
0	129	5290	90	23
1	97	960	64	20
2	86	206	44	20
3	37	27	29	14
4	7	1	19	5
5	2	0	12	2

Fonte: Própria.

covariável x igual a 2, a Taxa de Risco das barragens Jovens é cerca de 2,6 vezes maior que a taxa das barragens Consolidadas, coerente com a tratativa da resolução nº 143/2012 já citada, onde nos 10 primeiros anos de operação as barragens apresentam um risco maior de desenvolver problemas. Contudo, destaca-se que para valores de covariáveis x maiores que 2,85, a Taxa de Risco associada às barragens Consolidadas passa a ser maior que a taxa das barragens Jovens. As amostras das barragens Envelhecidas e das que se encontravam inicialmente em N3 apresentaram valores de γ maiores que 1, indicando uma Taxa de Risco crescente no decorrer do tempo, representando falhas por desgaste. Reforça-se novamente a resolução nº 143/2012, que atribui às barragens Envelhecidas um grau de risco mais acentuado que as barragens Consolidadas. O mesmo raciocínio estende-se para as barragens que se encontravam em N3, indicando que quanto mais deteriorado o estado de conservação da barragem, maior o risco de ruptura no decorrer do tempo.

O parâmetro β_1 , em todas as amostras, resultou em um valor negativo, implicando que quanto maior o valor da covariável x , igual a A/S , maior a probabilidade de uma barragem chegar à NC. O valor de A , representado pelo nível de água no reservatório, indica que quanto maior o seu valor, maior a probabilidade de uma barragem atingir NC. Logo, níveis de água elevados atribuem maior risco. Já o valor de S , representado pelo tipo de solo no maciço, indica que quanto maior o seu valor, menor a probabilidade de atingir NC. Conforme a tabela 1, os maiores valores de I_{HET} representam os solos com maior resistência à erosão, logo, observa-se que solos mais susceptíveis à erosão atribuem, pela análise deste artigo, uma maior probabilidade de desenvolver *piping*.

Pela análise do mapa da figura 3, verifica-se que as barragens com maiores riscos de *piping* (cor vermelha) apresentam idades variando entre os grupos Jovens, Consolidadas e Envelhecidas. Isso evidencia que a idade das barragens, por si só, não é determinística sobre a probabilidade de ocorrência de *piping*. O mesmo raciocínio estende-se para o nível de água do reservatório e o tipo de solo do maciço, mostrando que uma variável isolada não determina o problema, mas sim a combinação entre elas. Exemplificando, uma barragem com nível d'água elevado no reservatório pode ter um risco de *piping* pequeno, dependendo do seu estado de conservação, tipo de solo do maciço e a idade da barragem.

Conforme observado na Tabela 6, para não haver um desvio maior que 5% sobre o resultado do risco de *piping* (intervalo de confiança), há um limite de meses permitidos na análise de risco, de acordo com os valores da covariável x . Percebe-se que as duas últimas linhas da tabela 6 limitam a análise para um tempo menor que 1 ano, com exceção da amostra das barragens Envelhecidas. Os

valores associados às linhas citadas anteriormente representam as piores combinações de variáveis do reservatório, ou seja, um nível d'água muito elevado combinado com um solo de menor resistência à erosão. Observa-se também que a amostra 4, das barragens mais deterioradas, limita sua análise a até 2 anos, dependendo do valor da covariável x . Entende-se como aceitável tal resultado, pois a atenção necessária para mitigar os problemas em barragens exige um tempo menor de resposta quando as condições que envolvem o problema são críticas, neste caso, nível d'água do reservatório elevado e/ou deterioração elevada da barragem.

CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos na análise deste artigo, percebeu-se que apesar do *piping* ser um problema de essencial atenção na segurança de barragens, seu desenvolvimento é lento e os órgãos responsáveis dispõem de tempo para mitigar os problemas que venham a ocorrer. Porém, a fiscalização nas barragens deve ser constante e assertiva, pois ao passo que o problema está evoluído ou a barragem já é envelhecida, a Taxa de Risco de *piping* tem um aumento considerável com o tempo, tornando as medidas de controle cada vez mais complicadas.

Ressalta-se que a análise deste artigo se baseia nos dados obtidos do RASB, porém, uma fiscalização completa do estado de conservação das barragens também faz uso de sua instrumentalização. Isso evidencia a importância de utilizar o maior número possível de dados que auxiliem na correção e mitigação de problemas.

REFERÊNCIAS

- BERRONES, R. F.; ACOSTA, N. P. L. *Internal erosion due to water flow through earth dams and earth structures. Soil erosion studies*. Chapter 14. InTech. 2011.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. *Resolução N° 143*. Brasília. 2012.
- BRASIL, R. M. L. R. F.; BALHAZAR, J. M.; GÓIS, W. *Métodos Numéricos e Computacionais na Prática de Engenharias e Ciências*. São Paulo: Blucher, 2015. 185 p.
- COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (COGERH). *Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2006*. 441 p. COGERH, Fortaleza, 2006.
- _____. *Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2007/2008*. 332 p. COGERH, Fortaleza, 2008.
- _____. *Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2009*. 192 p. COGERH, Fortaleza, 2009.

- _____. *Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2010*. 355 p. COGERH, Fortaleza, 2010.
- _____. *Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2011*. 367 p. COGERH, Fortaleza, 2011.
- _____. *Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2012*. 355 p. COGERH, Fortaleza, 2012.
- _____. *Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2013*. 298 p. COGERH, Fortaleza, 2014.
- _____. *Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2014*. 428 p. COGERH, Fortaleza, 2014.
- _____. *Relatório Anual de Segurança de Barragens – Risco e Inspeções – 2015*. 487 p. COGERH, Fortaleza, 2015.
- COLOSIMO, E.A., GIOLO, S.R. *Análise de Sobrevivência Aplicada*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2006. 370 p.
- FELL, R.; WAN, C. F.; CYGANIEWICZ, J.; FOSTER, M. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. v. 129, p. 307-314. 2003.
- FELL, R. et al. *Relationship between the erosion properties of soils and other parameters*. Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees, 2013.
- FONTENELLE, A. S. *Proposta Metodológica de Avaliação de Riscos em Barragens no Nordeste Brasileiro – Estudo de Caso: Barragens do Estado do Ceará*. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, 2007.
- FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*. v. 37, p. 1000-1024. 2000.
- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). *Portal Hidrológico do Ceará*. Disponível em: <http://funceme.br/hidro-ce-app/reservatorios/volume> Acesso em: 15/08/2020.
- HUNTER, R. P. *Development of transparent soil testing using planar laser induced fluorescence in the study of internal erosion of filters in embankment dams*. Masters Thesis - Master of Science in Engineering Geology, University of Canterbury. 2012.
- INTERAGENCY COMMITTEE ON DAM SAFETY (ICODS). *Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion*. FEMA P-1032, p. 576. 2015.
- MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- PINTO, C. S. *Curso básico de mecânica dos solos*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.
- PORTAL ACTION. *Análise de Tempo de Falha*. Disponível em: <http://www.portalaction.com.br/confiabilidade/analise-do-tempo-de-falha> Acesso em: 15/08/2020
- PORTAL ACTION. *Distribuição de Weibull*. Disponível em: <http://www.portalaction.com.br/confiabilidade/412-distribuicao-de-weibull> Acesso em: 15/08/2020
- PORTAL ACTION. *Método Delta*. Disponível em: <http://www.portalaction.com.br/confiabilidade/44-metodo-delta>. Acesso em: 15/08/2020.