

Adequação da Distribuição de Weibull na Avaliação da Segurança de Barragens

Francisco Hiago de Siqueira Gomes

Universidade Estadual Vale do Acaraú, Sobral, Brasil, hiago_eng@hotmail.com

Fernanda de Almeida Furtado

Universidade Estadual Vale do Acaraú, São Benedito, Brasil, fernanda.ecivil@hotmail.com

Vanda Tereza Costa Malveira

Universidade Estadual Vale do Acaraú, Sobral, Brasil, tmalveira@hotmail.com

RESUMO: Devido à importância das barragens na infraestrutura hídrica brasileira e a grande ocorrência de situações geradoras de risco nessas estruturas, é fundamental que haja uma incessante busca por formas de otimizar e validar as análises de risco realizadas. A natureza qualitativa da classificação originada pela simples aplicação da metodologia descrita na Lei 12.334/2010 e na sua Resolução 143 (R143) pode gerar problemas relacionados à correta apreciação da situação de risco do barramento, tendo em vista a dificuldade de estabelecer uma hierarquia de intervenção na estrutura propriamente dita ou na atualização da documentação. Uma forma de tornar essas análises mais robustas, e que vem sendo discutida no meio acadêmico, é estabelecer um valor para o risco através da quantificação. A necessidade de quantificar, ou seja, estabelecer um valor para o risco é proveniente da necessidade de reduzir os efeitos de fatores não técnicos que influenciam diretamente na classificação qualitativa, como a subjetividade. Com a quantificação, além de se obter um valor para o risco, é possível hierarquizá-lo. A alternativa encontrada para considerar os cenários pertinentes ao trabalho ocorreu através da realização de simulações aplicando os conceitos de confiabilidade e a distribuição de Weibull para quantificação do risco. A distribuição de Weibull foi escolhida por sua variabilidade de comportamentos, englobando todos cenários analisados e complementando os conceitos de confiabilidade. Neste trabalho, busca-se validar a adequação da quantificação através da distribuição de Weibull às anomalias que, segundo dados de proprietários, são mais frequentemente geradoras de risco em barragens de terra no estado do Ceará, através da comparação dos resultados encontrados com as situações verificadas nas vistorias em campo. São utilizadas como estudos de caso para análise e validação dos resultados as barragens Forquilha (município de Forquilha) e Premuoca (município de Uruoca), escolhidas por serem barragens de terra de médio porte com ocupação a jusante e enquadrarem-se em períodos críticos distintos de suas vidas úteis. A validação das probabilidades encontradas prova a aplicabilidade e robustez da quantificação de risco através da distribuição de Weibull, assim como alerta para a variabilidade de situações geradoras de risco e a necessidade do comprometimento dos proprietários com o constante monitoramento e manutenção de suas barragens.

PALAVRAS-CHAVE: Distribuição de Weibull, Risco em barragens, Confiabilidade.

1 INTRODUÇÃO

Com a criação da Lei Federal 12.334 em 2010, a Lei de segurança de barragens, foi

implementado o monitoramento para muitas estruturas que não passavam por inspeções de rotina. A partir desse marco, acadêmicos e profissionais da área buscam formas de

aprimorar as avaliações realizadas, para que estas sejam cada vez mais coerentes com a realidade.

Tendo em vista a natureza qualitativa da classificação gerada pela análise de risco proposta pela legislação nacional, uma alternativa para trazer mais representatividade às análises é através da quantificação do risco. A quantificação busca abrandar efeitos indesejados inerentes à avaliação, sendo o principal deles a subjetividade. Através da quantificação, o risco é apresentado como uma grandeza, e não um conceito ou uma característica.

Em termos de quantificação de uma Análise de Risco (AR), é preciso que haja uma adequação da metodologia de quantificação aos cenários que se quer analisar, de forma representativa. A escolha da metodologia deve ser baseada nas limitações inerentes à aplicação, ou seja, a metodologia deve abranger fatores e parâmetros de fácil obtenção. Pensando nisso, esse trabalho busca verificar a adequação da distribuição de Weibull na avaliação de risco em taludes de barragens e, demonstrar sua representatividade através da aplicação da metodologia de quantificação em duas barragens que apresentam anomalias consistentes tanto com a formação de piping como com a deterioração de taludes.

2 ESCOLHA DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

No âmbito geotécnico, onde há ocorrência de desastres originados por falhas, o risco é utilizado como ferramenta de classificação e advertência para falhas ocorridas em estruturas geotécnicas, originadas por atuação de mecanismos naturais ou artificiais. Assim, quando compreendido o conceito de risco e tudo o que lhe é inerente, é essencial que este seja associado a uma avaliação, chamada Análise de Risco (AR) (Gomes, 2016).

Caldeira (2008) apresenta uma divisão da análise de risco em qualitativa e quantitativa. No primeiro tipo se usam formas descritivas ou escalas de ordenação numérica para caracterizar a grandeza dos potenciais eventos adversos e

suas consequências. Já as análises quantitativas são baseadas em valores probabilísticos.

Para quantificar o risco é preciso estabelecer uma Função de Risco (FR), que demonstre o comportamento do modelo característico de um sistema real. Este trabalho utiliza o modelo de confiabilidade para a distribuição de Weibull, onde é possível inserir valores aleatoriamente para os parâmetros de entrada e simular o comportamento do modelo através dos resultados obtidos.

A distribuição de Weibull é uma expressão semiempírica muito utilizada em engenharia de manutenção, que modela adequadamente uma ampla variedade de situações, em que unidades apresentam funções de risco distintas (Carnaúba e Sellitto, 2013). Foi desenvolvida por Waloddi Weibull (1939) nos estudos sobre resistência mecânica dos aços, sendo apropriada à identificação do tempo inicial de falha, apresentando FR constante estritamente crescente ou estritamente decrescente. Dentre as funções de densidade de probabilidade existentes, a distribuição Weibull é a mais utilizada em estudos de confiabilidade, análise de sobrevivência e em outras áreas devido a sua versatilidade (Simonetti et al., 2009).

O modelo de confiabilidade baseado na distribuição de Weibull é descrito por Mengue e Sellitto (2013) através das expressões:

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\theta}\right) \left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^{\beta}} \quad (1)$$

$$h(t) = \left(\frac{\beta}{\theta}\right) \left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^{\beta-1} \quad (2)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\theta}\right)^{\beta}} \quad (3)$$

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (4)$$

Em que: β – Parâmetro de forma; θ – Parâmetro de escala; t – tempo até a falha; t_0 – tempo isento de falha; $f(t)$ – função densidade probabilidade da distribuição de Weibull; $h(t)$ –

taxa de falha da distribuição de Weibull; $R(t)$ – função de confiabilidade da distribuição de Weibull; $F(t)$ – função densidade acumulada da distribuição de Weibull;

Segundo Devore (2006), em algumas situações, há justificativas teóricas para a utilização da distribuição de Weibull, mas em muitas aplicações ela simplesmente fornece uma boa aproximação dos dados observados para valores específicos de β e θ .

De acordo com Meyer (1983), a distribuição de Weibull representa um modelo adequado para uma lei de falhas, sempre que o sistema for composto de vários componentes e a falha seja essencialmente devida à "mais grave" imperfeição ou irregularidade dentre um grande número de imperfeições do sistema. Também, empregando uma distribuição de Weibull, poderemos obter tanto uma taxa de falhas crescente como uma decrescente, pela simples escolha apropriada do parâmetro β .

O parâmetro β define o comportamento da função, portanto a escolha de seus valores determina a representatividade do modelo proposto. A variação dos valores de β gera diferentes comportamentos na função densidade probabilidade ($f(x)$) da distribuição de Weibull. Neste trabalho, a escolha da distribuição de Weibull propicia a versatilidade requerida na análise de diferentes cenários de falha em taludes, bem como a adequação para quantificação da avaliação proposta na legislação nacional.

3 ESTUDO DE CASO

Para ilustrar a adequação da metodologia de quantificação de risco através da distribuição de Weibull foram selecionados dois casos de barragens de médio porte, segundo classificação da Resolução 143 (R143), com ocupação a jusante e que enquadram-se em períodos críticos distintos de suas vidas úteis. Estão localizadas nos sistemas hidrográficos das bacias do Rio Acaraú (Forquilha) e Coreau (Premuoca), região Norte do estado do Ceará (Figura 1). As características técnicas das barragens são resumidas na Tabela 1.



Figura 1. Localização da área do trabalho com as 2 barragens selecionadas. (Fonte: Gomes, 2016)

Tabela 1. Características técnicas das barragens selecionadas.

Barragem	Altura Máxima (m)	Acumulação (hm³)	Idade (anos)
Forquilha	26,3	51,2	95
Premuoca	15,4	5,2	35

As Figuras 2 e 3 apresentam as situações das mesmas quando da visita técnica ao local enquanto as Figuras 4 e 5 apresentam suas respectivas seções geométricas.



Figura 2. Barragem Forquilha, vista do talude de montante. (Fonte: Gomes, 2016)



Figura 3. Barragem Premuoca, vista do talude de montante. (Fonte: Gomes, 2016)



Figura 4. Seção geométrica da barragem Forquilha.
(Fonte: DNOCS)

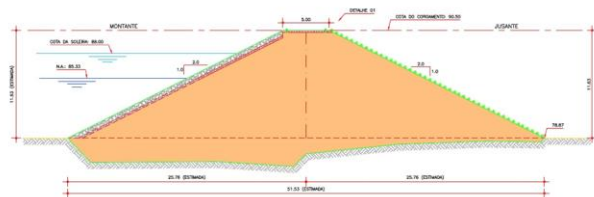


Figura 5. Seção geométrica da barragem Premuoca.
(Fonte: DNOCS)

Para a barragem Forquilha (Figura 2), considerando a situação estrutural do barramento quando da vistoria, constatou-se que a grande quantidade de buracos e tocas de animais do talude de montante. Esta anomalia é mais significativa em barragens que estão a longo período em operação e seria mitigada pela simples ação de programas de manutenção periódica. Já no talude de jusante, a grande presença de vegetação de grande porte ao longo do pé da barragem e no próprio talude. Estas anomalias possibilitam estão associadas ao surgimento de piping pelo maciço.

Para a barragem Premuoca (Figura 3), as grandes deformações presentes no talude de montante, inclusive com trechos de talude vertical, e a ausência de sinais que comprovassem a existência de um sistema de drenagem interna também estão associadas a piping através do maciço. A situação é agravada pela presença de população imediatamente a jusante da barragem (município de Uruoca).

4 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

Considerando que a probabilidade de ruptura e suas consequências podem variar ao longo da vida útil da estrutura, é possível discretizar o campo de variação das ações em intervalos estabelecidos, de modo que, em cada intervalo, se possa admitir a homogeneidade do tipo de resposta da estrutura. A compartimentação a ser

adotada deve ter em conta o tipo de análise, a resposta do sistema ao carregamento, as consequências e as medidas de redução de risco. Assim sendo, o critério de homogeneidade na resposta estrutural é utilizado para estabelecimento dos intervalos de análise (Gomes, 2016).

Estabelecendo que a anomalia mais crítica e geradora de risco para as duas barragens é o *piping* e, assumindo que não existe sistema de drenagem interna nas barragens selecionadas, foram realizadas simulações para três períodos críticos de operação, quais sejam, de 0 a 7 anos, de 8 a 50 anos e acima de 50 anos.

A utilização da distribuição de Weibull na análise de risco em barragens consiste na associação do parâmetro de forma β com as falhas pertinentes a cada período crítico da vida útil do barramento.

Quando β assume valores menores que 1, associa-se a função encontrada com o período inicial de operação da barragem (0 a 7 anos), onde a probabilidade de falha aumenta conforme o valor de β aproxima-se de 1.

Quando β é igual a 2, associa-se a função encontrada com o período intermediário de operação da barragem (8 a 50 anos), onde as falhas ocorrem principalmente pela falta de manutenção ou por eventos randômicos. Nesse período intermediário, percebe-se uma estabilização das probabilidades de falha a partir de um determinado tempo.

Quando β assume valores maiores que 1, associa-se a função encontrada com o período onde a barragem começa a dar sinais de envelhecimento (acima de 50 anos), onde a probabilidade de falha diminui conforme o valor de β afasta-se de 1.

Para as simulações deste trabalho, os parâmetros foram definidos buscando analisar os piores cenários, sendo apresentados na Tabela 2. A avaliação para o período de 0 a 7 anos é importante para validar a metodologia a partir das informações de surgência de *piping* no terceiro ano de operação da barragem Premuoca.

Tabela 2. Valores estabelecidos para as variáveis da

distribuição de Weibull

Parâmetro	0 a 7 anos	8 a 50 anos	Acima de 50 nos
β	0,9	2,0	1,2
θ	1	12	60
t	3	8-50	55-100
t_0	0,25	5	50

Os parâmetros listados são inseridos nas equações (1) a (4) para gerar os gráficos com os valores das probabilidades de ocorrência de anomalias relacionadas a formação de *piping* (risco).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores encontrados nas simulações realizadas para os diversos cenários permitiram a elaboração dos gráficos de função densidade acumulada ($F(t)$) apresentados das Figuras 6, 7 e 8. O resumo das probabilidades é apresentado na Tabela 3.

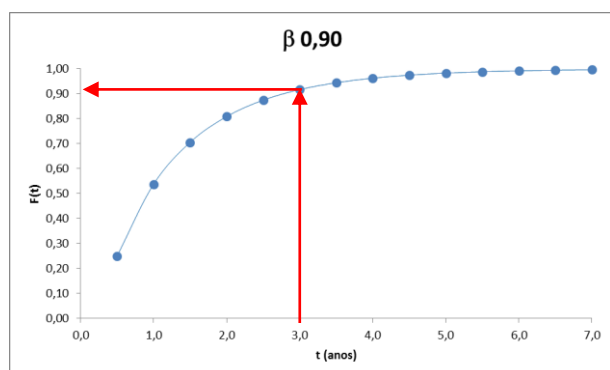


Figura 6. $F(t)$ para $\beta = 0,90$; t de 0 a 7 anos.

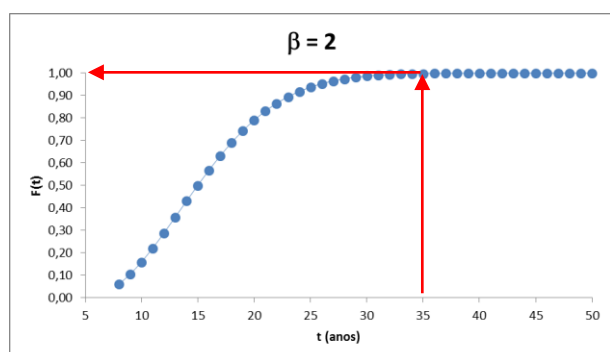


Figura 7. $F(t)$ para $\beta = 2,00$; t de 8 a 50 anos.

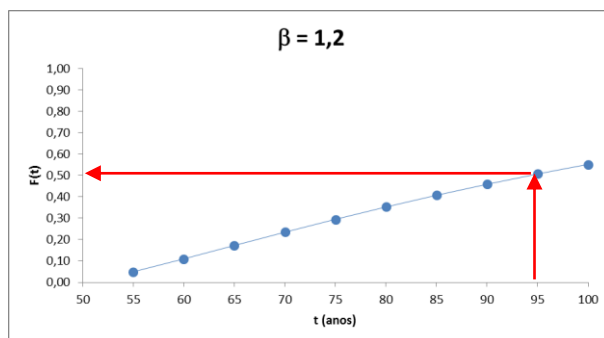


Figura 8. $F(t)$ para $\beta = 1,20$; t acima de 50 anos.

Tabela 3. Resumo das probabilidades de ocorrência de anomalias relacionadas a formação de *piping* através do maciço.

Barragem	Idade (anos)	Risco (%)
Premuoca	3	92
Premuoca	35	100
Forquilha	95	51

Como constatado na simulação, a barragem Premuoca possuía, no terceiro ano de operação, uma probabilidade de apresentar anomalias relacionadas ao *piping* de 92%, validada com o evento que realmente ocorreu.

Analisando a situação atual, a barragem Premuoca encontra-se com probabilidade de surgimento de anomalias relacionadas a formação de *piping* através do maciço de praticamente 100%, enquanto para a barragem Forquilha atinge um valor máximo na faixa de 51%.

A barragem Forquilha, apesar de estar a mais tempo em operação encontra-se em situação menos alarmante que a barragem Premuoca. Vários fatores podem ser listados como condicionantes desta situação, entre eles estão o não cumprimento do programa de manutenção, que também se aplica a Forquilha, mas em menor intensidade, e a maior suscetibilidade do solo usado na construção. A barragem Premuoca é constituída predominantemente por um solo SM, sendo esse considerado mais vulnerável que o solo que constitui a barragem Forquilha, um solo SC.

Os resultados encontrados, além de permitir o estabelecimento das prioridades de intervenções nas estruturas, possibilitam uma apreciação do risco não como uma característica e sim como um parâmetro.

6 CONCLUSÃO

Para este trabalho, a definição da distribuição de probabilidade deveria abranger o grande campo de oscilação das variáveis pertinentes, já que o intuito da quantificação é reduzir os efeitos de fatores não intrínsecos a avaliação de risco do barramento, como a subjetividade do avaliador. Portanto, a distribuição de Weibull enquadra-se como uma alternativa interessante do ponto de vista da adequação a variabilidade de comportamentos que ela pode apresentar.

A validação das probabilidades encontradas prova a aplicabilidade e robustez da quantificação de risco através da distribuição de Weibull, assim como alerta para a variabilidade de situações geradoras de risco e a necessidade do comprometimento dos proprietários com o constante monitoramento e manutenção de suas barragens.

A busca do aprimoramento das metodologias de quantificação deve manter-se como tema frequente nas discussões relacionadas à segurança de barragens, tendo em vista sua importância para o gerenciamento dos recursos dos proprietários de barragens e para elaboração dos planos e gerenciamento dos danos dado uma possível ruptura.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e a Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA) pelo suporte no desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Brasil. (2010). Lei Federal nº 12.334. Presidência da República. Brasília: D.O.U. 09.20.2010.
- Brasil. (2012). Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de recursos Hídricos. Resolução Nº 143. Brasília: D.O.U. 11.17.2012.
- Caldeira, L.M.M.S. (2008). Análises de riscos em geotecnia: aplicação a barragens de aterro. 248 f. Tese (Doutorado) - Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Carnaúba, E.R.; Sellitto, M.A. (2013). Análise de

confiabilidade e evolução de uma máquina de envase de leite UHT ao longo da curva da banheira. Revista Liberato, Novo Hamburgo, vol. 14, nº 22, pp. 171-185, jul./dez.

Devore, J.L. (2006). Probabilidade e estatística para engenharia e ciências.

Gomes, F.H.S. (2016). Desempenho e segurança em barragens do semiárido utilizando a distribuição de Weibull. Monografia do curso de Engenharia Civil – Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA), Sobral, Ceará.

Meyer, P.L. (1983). Probabilidade: Aplicações à Estatística, 2ª ed, LTC, Rio de Janeiro.

Simonetti, M.J. Souza, A.L. Silveira, L.F.S. Arruda, J.P.S. (2009). A importância da engenharia da confiabilidade e os conceitos básicos de distribuição de Weibull. Revista Sapere, Tatuí, vol. 1, nº 1, jul./dez.