Análise hidrológica para barragens na Ilha de Santiago, em Cabo Verde, África Ocidental

Hydrological analysis for dams on Santiago Island, Cape Verde, West Africa

• **Data de entrada:**
08/02/2019

• **Data de aprovação:**
11/02/2020

Francisco Osny E. Silva¹ | Manuel M. Fernandes^{2*}

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.049>

ORCID ID

Silva FOE <https://orcid.org/0000-0003-3849-0095>

Fernandes MM <https://orcid.org/0000-0003-2805-2016>

Resumo

A construção de barragens em Cabo Verde é um fato recente, sendo a primeira barragem construída em 2006, ainda na ausência de uma legislação sobre segurança de barragens. A falta de experiência no projeto de barragens pela engenharia nacional obrigou o governo a contratar empresas de consultoria internacionais para sua elaboração. A contratação em lotes ensejou que os projetos fossem elaborados de forma similar em metodologia de cálculo, de parâmetros de projeto e desenho. Nos projetos analisados, chamou atenção ao fato de se adotar a média dentre cinco fórmulas empíricas de cálculo do tempo de concentração (t_c) em vez de se adotar o menor dos tempos para o dimensionamento hidrológico, que foi sempre dado pela fórmula de Kirpich, uma das mais empregadas na elaboração de tais estudos. Este trabalho investigou o risco hidrológico decorrente do uso do tempo de concentração médio avaliando a folga resultante no vertedouro para uma cheia milenar, concluindo pela insegurança dos projetos.

Palavras-chave: Barragem. Barragens na Ilha de Santiago. Análise hidrológica.

Abstract

The construction of dams in Cape Verde is a recent fact, the first dam being built in 2006, still in the absence of legislation on dam safety. The lack of experience in the design of dams by national engineering, forced the government to hire international consulting firms for its elaboration. The contracting in batches led to the projects being prepared in a similar way in calculation methodology, design parameters and design. In the analyzed projects, attention was drawn to the fact that the average of five empirical formulas of calculation of concentration time (t_c) was adopted, instead of adopting the shortest time for hydrological design, which was always given by Kirpich's formula, one of employed in the preparation of such studies. This work investigated the hydrological risk resulting from the use of the average t_c , evaluating the resulting gap in the spillway for a millenarian flood, concluding for the insecurity of the projects.

Keywords: Dam. Dams on Santiago Island. Hydrological analysis.

¹ Universidade Federal do Ceará - Fortaleza - Ceará - Brasil.

² Hidroportico Ilha de Santiago - Cabo Verde.

* **Autor correspondente:** nunoadelio@hotmail.com.

1 INTRODUÇÃO

A segurança de barragens é um tema que no contexto atual, em virtude dos recentes desastres de rompimento de barragens de rejeito de mineração ocorridos no Brasil, no Estado de Minas Gerais (BODSTEIN, 2019), ultrapassou a fronteira da questão meramente técnica e acadêmica, passando a ser um tema de interesse popular, nacional e internacional. O rompimento da barragem de Brumadinho deixou mais de uma centena de vítimas mortais, quase três centenas de desaparecidos e devastou aproximadamente 125 hectares de floresta, enquanto a barragem de Mariana (MOTA, 2017), fez 19 vítimas mortais, 8 desaparecidos, 600 desabrigados e a destruição por completo da comunidade de Bento Rodrigues. O rompimento da barragem do Fundão em Mariana constituiu-se no maior desastre ambiental do Estado de Minas Gerais e um dos maiores do país. De acordo com o Relatório de Segurança de Barragens - RSB, elaborado pela Agência Nacional de Águas - ANA, referente ao ano de 2017, o Brasil registra em média quatro acidentes com barragens a cada ano (LEITE, 2019).

Fontenelle et al. (2018) afirmam que a segurança foi sempre um tema que mereceu grande atenção por parte de todas as entidades envolvidas na exploração das barragens e com forte apelo do Comitê Internacional das Grandes Barragens (ICOLD). A preocupação se deve à grande altura alcançada pelas barragens, com mais de uma centena ultrapassando os 150 m de altura (ICOLD, 1984; 1988), à deterioração por envelhecimento das barragens construídas na primeira metade do século XX, mormente nos países do continente americano (Estados Unidos, Brasil) e na Europa na segunda metade do século XX, além de acidentes de graves proporções que puseram em evidência o risco associado à construção de barragens, tais como os acidentes de Malpasset (Sul da França), em 1959, de Vajont (Veneza, Itália), em 1963, e de Teton (Estado de Idaho, EUA), em 1976 (ICOLD 1974, 1984).

Tal como dizia o engenheiro francês André Coyne (*apud* CNPGB, 2005), que projetou mais de 70 barragens em 14 países, “em relação às barragens, a segurança é o que conta mais”.

Nos últimos anos a tecnologia e a prática de projetos de engenharia de barragens vêm se aperfeiçoando, exigindo um maior rigor técnico. A evolução científica e tecnológica de métodos e materiais construtivos contribui para a evolução dos conceitos e impacta na necessidade de revisão e avaliação de riscos tanto para barragens novas projetadas como para barragens já construídas e em operação. Operar e manter barragens é parte das ações de gestão de riscos.

Os registros de riscos, falhas e incidentes foram temas e objeto de tratados de vários órgãos e organismos públicos internacionais com responsabilidade na segurança de barragens, sobretudo pelo ICOLD (International Committee on Large Dams) e pelo USCOLD (United States Committee on Large Dams) e pela CMB (Comissão Mundial de Barragens); decretos e leis foram surgindo em vários países, tal como a Lei Federal nº 12.334/2010 (Brasil, 2010).

O controle de segurança e de riscos associados ao elevado número de rupturas de barragens ocorridas, trazendo como consequência a possibilidade de perdas de vidas humanas e a geração de enormes prejuízos materiais, econômicos, sociais e ambientais, implica na necessidade de definição de um quadro normativo prévio, no qual devem ser equacionados inúmeros fatores ligados à qualidade dos projetos, aos requisitos de segurança da obra, à observação e inspeção da execução das obras, e à gestão operacional das barragens (RSB, 2007 e PINTO et al., 2008).

Assim, a segurança das barragens tem sido uma preocupação em nível mundial, incluindo os países africanos continentais e insulares, tal qual Cabo Verde.

Silva (2017) afirma que o risco hidrológico das barragens projetadas em Cabo Verde foi verificado a partir de três condicionantes básicas que afetaram diretamente o dimensionamento do vertedouro das três barragens, objeto da pesquisa:

- a inexistência de estações fluviométricas para estudo das vazões escoadas nas bacias;
- a diminuta extensão das séries históricas de precipitação máxima diária, normalmente inferiores a 30 anos de dados para a maioria dos postos pluviométricos da Ilha de Santiago (de acordo com os dados de precipitação do INMG, (2017);
- a diversidade de fórmulas empregadas para o cálculo do tempo de concentração nas bacias em estudo, na elaboração dos projetos das barragens.

O primeiro fator, inexistência de estações fluviométricas na Ilha de Santiago, condiciona o emprego de modelos chuva-vazão para modelagem da cheia de projeto afluente às barragens para fins de dimensionamento dos vertedouros. O segundo fator, a diminuta extensão das séries históricas, amplia a incerteza associada à precipitação de projeto para geração dos hidrogramas de cheias. O terceiro fator, o cálculo do tempo de concentração das bacias é, entretanto, o que maior incerteza promove na geração dos hidrogramas de projeto e impacta diretamente no dimensionamento dos vertedouros.

O estudo foi realizado com base na análise dos projetos de três barragens (Faveta, Figueira Gorda e Saquinho) construídas na última década em Cabo Verde, sendo as três projetadas por consultoria portuguesa.

Collischonn (2018) define risco hidrológico como produto da probabilidade de falha de uma estrutura hidráulica face à ocorrência de chuva, vazão ou nível da água superior àquela para a qual foi dimensionada e do prejuízo decorrente da falha.

O termo risco é definido como o produto da probabilidade de ocorrência de um evento adverso pela consequência desse evento (USB, 2003). O risco

hidrológico associado ao projeto de barragens é a probabilidade da ocorrência de pelo menos um evento de superação de um determinado nível d'água extremo, da qual poderia resultar a falha de uma estrutura hidráulica, ao longo de sua vida útil.

Lima (2014) aponta que a análise de risco em barragens, associada a causas de natureza hidrológica, requer uma estimativa tanto da probabilidade de um evento hidrológico extremo ocorrer como das prováveis consequências e danos incrementais devidos a tal evento.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o risco hidrológico de que a folga adotada para o vertedouro das três barragens seja insuficiente para passagem da cheia milenar, quando se considerar que essa cheia milenar seja calculada com base no menor tempo de concentração para as bacias, em vez do critério que foi adotado no projeto das três barragens de admitir um tempo de concentração médio com base em cinco fórmulas empíricas para cálculo desse tempo.

3 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A República de Cabo Verde é um arquipélago saheliano, localizado no Oceano Atlântico, constituído por dez ilhas (das quais nove habitadas) e oito ilhéus, situado a cerca de 500 km a oeste da costa ocidental africana. O arquipélago encontra-se entre o trópico de Câncer e o Equador, limitado pelos paralelos 17° 12' 5" e 14° 48' de latitude norte e os meridianos 22° 44' e 25° 22' de longitude a oeste de Greenwich. A superfície do arquipélago é de 4.033 km², e a sua Zona Econômica Exclusiva (ZEE) estende-se por 734.000 km². As ilhas encontram-se divididas em dois grupos: Barlavento (de onde o vento sopra; Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia, São Nicolau, Sal e Boa Vista) e Sotavento (para onde o vento sopra; Maio, San-

tiago, Fogo e Brava). Essa divisão deriva da posição das ilhas face aos ventos dominantes do Nordeste. A altitude máxima é de 2.829 m na ilha do Fogo (pico do vulcão), seguida de 1.979 m na ilha de Santo Antão (Topo da Coroa) e de 1.394m (Pico de Antónia) na ilha de Santiago (ANAS, 2018).

As três barragens estudadas (Faveta, Figueira Gorda de Saquinho) se localizam na Ilha de Santiago, conforme apresentado na Fig. 1, sendo as respectivas características construtivas e do projeto mostradas na Tabela 1.

Figura 1 – Localização geográfica de Cabo Verde, Ilha de Santiago e as barragens de Faveta, Figueira Gorda e Saquinho.
Fonte: Autor, 2019

Tabela 1- Principais características de projeto das barragens em estudo.

Principais Características das Barragens	Barragem		
	Figueira Gorda	Faveta	Saquinho
Ilha	Santiago	Santiago	Santiago
Concelho	Santa Cruz	S.S. do Mundo	S. Catarina
Bacia Hidrográfica	Santa Cruz	Ribeira de Picos	Ribeira de Charco
Tipo de Barragem	Gravidade, alvenaria de pedra argamassada	Gravidade, alvenaria de pedra argamassada	Arco gravidade, concreto
Finalidade	Irrigação	Irrigação	Irrigação
Área da Bacia Hidrográfica (km²)	20,20	7,92	13,76
Cota de Fundação (m)	60,50	199,50	283,10
Cota NME ⁽¹⁾ (m)	78,00	216,00	300,00
Cota NPA ⁽²⁾ (m)	91,00	231,50	312,00
Cota NMC ⁽³⁾ (m)	94,20	234,10	315,25
Cota de Coroamento (m)	95,20	235,20	317,00
Altura da Barragem (m)	32,70	36,70	33,90
Volume Máximo de Acumulação (m³)	1.305.025	705.837	423.000
Área da Bacia Hidráulica (m²)	155.828	70.565	49.115
Período de Retorno do Vertedouro	Milenar	Milenar	Milenar
Vazão de Projeto do Vertedouro (m³/s)	363,00	186,60	55,00
Modelo de Ajuste de Frequência Utilizado	Gumbel	Gumbel	Gumbel
Postos Pluviométricos Utilizados	Toril de Boaventura, Flamengos e Assomada Portãozinho	Assomada Portãozinho, São Jorge Órgãos e Curralinho	Serra Malagueta e Assomada Portãozinho

⁽¹⁾NME = Nível mínimo de exploração; ⁽²⁾ NPA = Nível Pleno de Armazenamento; ⁽³⁾ NMC=Nível de Máxima Cheia (Nível de Máxima Enchente). Nomenclatura utilizada em Cabo Verde.

Fonte: Adaptado de Norvia/Cenor Cabo Verde, 2011 e 2013.

4 METODOLOGIA DO ESTUDO

Os projetos das barragens de Faveta, Figueira Gorda e Saquinho, na ilha de Santiago em Cabo Verde, foram elaborados por consultoras portuguesas que empregaram a mesma metodologia de dimensionamento hidrológico e o mesmo padrão de projeto geométrico, variando-se apenas as características dimensionais das barragens conforme a bacia hidrográfica em que estavam inseridas. A metodologia empregada pelas consultoras portuguesas para estimativa da precipitação de projeto para um período de retorno milenar foi compatível com a técnica usual empregada no Brasil. A geração do hidrogramas da cheia milenar de projeto para os vertedouros também foi similar, exceto pela adoção de média de tempo de concentração para estimativa do “lag time” (tempo de retardamento) na elaboração do hidrograma unitário do SCS, sendo este o método do hidrograma unitário, um dos mais aplicados em simulação de bacias hidrográficas (Campos, 2009).

A questão central do estudo de análise de risco do presente trabalho foi avaliar a possibilidade de subdimensionamento da folga entre a lâmina máxima escoada sobre o vertedouro, para uma cheia de projeto milenar, e a base inferior da viga longarina da estrutura física da ponte de rolamento construída sobre a soleira de cada vertedouro, relativa ao projeto padronizado das três barragens de interesse na Ilha de Santiago. Esse possível subdimensionamento está associado ao emprego de uma cheia milenar de projeto calculada com base na média dos tempos de concentração das respectivas bacias, dentre cinco fórmulas adotadas para estimativa do mesmo, em vez de se ter considerado o menor valor dentre aqueles tempos de concentração que, coincidentemente, correspondeu ao adotado pela Eq. 4, a qual é tradicionalmente adotada no projeto de barragens, mormente no Brasil. A equação apresentada foi retirada de Tomaz (2010), de acordo com a Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica de São Paulo. Kirpich (1940) calibrou

em solo americano duas diferentes equações para computar o tempo de concentração em minutos, uma para o estado de Pensilvânia e outra para o estado de Tennessee, sendo esta última mais utilizada.

No presente trabalho foram empregados os mesmos parâmetros hidrológicos adotados pela consultora na elaboração dos projetos originais das três barragens, com exceção apenas do tempo de concentração, adotando-se aqui, o menor dos tempos, dado pela fórmula de Kirpic, Eq. 4, conforme apresentado na Tabela 2.

Foi empregado o modelo hidrológico HEC-HMS (USACE, 2016). O modelo hidrológico chuva-vazão adotado foi também o mesmo empregado pelas consultoras, correspondendo ao hidrograma unitário do SCS, tendo-se calculado o tempo de retardo (*time lag*) correspondente a $0,6t_{c_{mínimo}}$, em vez de $0,6t_{c_{médio}}$, que foi utilizado na elaboração dos projetos executivos das três barragens.

O método de laminação de cheias utilizado é o puls modificado, sendo que a laminação da cheia sobre cada vertedouro foi calculada em função do hidrograma de projeto da cheia milenar reavaliada com base no menor tempo de concentração e calculada automaticamente e diretamente pelo modelo HEC-HMS.

Para o cálculo da cheia milenar foram utilizados os mesmos dados utilizados pelos projetistas das três barragens, alterando apenas o tempo de concentração (Norvia/Cenor, 2013). Assim gerou-se o hidrograma para o tempo de retorno de 1000 anos, correspondente aos hietogramas já calculados no projeto original por convolução dos hietogramas com hidrograma unitário sintético do SCS, utilizando o modelo HEC-HMS. Essa metodologia influi diretamente no aumento da vazão reavaliada, aumentando também a cota de sangria. Assim compararam-se as vazões de pico obtidas nos hidrogramas do projeto original e nos hidrogramas calculadas com o T_c de Kirpi-

ch. Foi possível, também, obter picos de elevação de nível de água nos respectivos casos, com os quais pôde-se verificar se as cotas adotadas para as soleiras e para as faces inferiores de cada ponte são seguras, permitindo avaliar as folgas.

A análise de risco final constou da comparação entre as folgas resultantes (resultado da diferença entre a cota inferior da ponte e a cota de sangria), para que a lâmina vertente atingisse a longitudinal inferior da ponte de passagem construída sobre os vertedouros das três barragens, uma vez que os projetos geométricos das barragens são semelhantes, conforme aqui foi descrito.

Na modelagem chuva-vazão dos projetos executivos das três barragens, bem como nas análises do presente trabalho, foi adotado o hidrograma unitário do SCS que é caracterizado pelo tempo de atraso ("lag time") dado pela Eq. 1, (WOODWARD, 2008):

$$tp = 0,6t_c \quad (1)$$

Em que:

t_p - é tempo de atraso em min;

t_c - é tempo de concentração em min.

4.1 Tempo de Concentração

Mota e Kobiyama (2014) afirmam que o conceito de tempo de concentração (t_c) foi claramente exposto pela primeira vez em 1851, pelo engenheiro civil Thomas James Mulvaney, criador do tão conhecido e aplicado Método Racional. Afirmam ainda que esse autor definiu t_c como o tempo necessário para a chuva que cai no ponto mais remoto da bacia chegar à exutória, ou ainda, até que toda a área da bacia contribua para a vazão na exutória. Fundamentou ainda que o t_c tem relevância científica, pois revela a interação entre diversas características da bacia hidrográfica, do evento de chuva, das condições climáticas da

região e em estudos sobre mecanismos de geração de vazão.

Silveira (2005) afirma que o tempo de concentração é um parâmetro hidrológico que surge da hipótese de que a bacia hidrográfica responde como sistema linear para o escoamento superficial direto. Decorre dessa hipótese a definição de tempo de concentração como o tempo necessário para que toda a bacia esteja contribuindo na seção de saída. Nessa condição hipotética de resposta linear da bacia, o tempo de concentração é o tempo de equilíbrio quando se estabelece o regime permanente entre uma chuva efetiva de intensidade constante e o escoamento superficial direto dela decorrente. Frequentemente os tempos de concentração são estimados a partir de tempos de retardo. Os tempos de retardo geralmente são definidos como intervalos entre o centro de gravidade temporal da chuva e o respectivo centro de gravidade do hidrograma ou o instante do pico do hidrograma. Com respeito à sua aplicação de ofício, ou seja, aplicação à bacias rurais, as fórmulas rurais tiveram desempenhos variados, mas concluiu-se que a Eq. 4 apresentara bons resultados, para bacias até 12.000 Km², como é o caso de Cabo Verde.

Muitos métodos foram desenvolvidos para a determinação do valor de tempo de concentração; no entanto, foram gerados a partir da observação de bacias em diferentes partes do mundo e ajustados de acordo com as características físicas e hidrológicas dos locais de observação, o que os torna muito particulares e limita a sua aplicabilidade, embora o método de Kirpich (1940) seja um dos mais frequentemente encontrados na literatura e amplamente utilizados nas construções de barragens brasileiras (MELO, 2018).

Para estimar o tempo de concentração das bacias hidrográficas das três barragens de Cabo

Verde, foram utilizadas as fórmulas de NERC, de Témez, de Chow/Kirpich, do Soil Conservation Service e de Giandotti, a seguir indicadas nas Eq. 2 a 6, (Melo, 2018):

Nerc, (Loukas e Quick, 1996):

$$T_c = 2,8(L/s^{0,5})^{0,47} \quad (2)$$

em que:

T_c - tempo de concentração (h);

L - comprimento da linha de água principal (km);

s - declive da linha de água principal, entre 10 e 85% de L (m/km).

Témez, (MARTINS, 2000) :

$$T_c = 0,3(L/J^{0,25})^{0,76} \quad (3)$$

em que:

T_c - tempo de concentração (h);

L - comprimento da linha de água principal (km);

J - declive médio da linha de água principal (m/m).

Chow e Kirpich (TOMAZ, 2010 e CHOW et al., 1998):

$$T_c = 57(L^3/H)^{0,385} \quad (4)$$

em que:

T_c - tempo de concentração (min);

L - comprimento da linha de água principal (km)

H - desnível entre pontos mais alto e mais baixo da bacia (m)

A Eq. 4, atribuída a Chow nos relatórios dos projetos executivos das barragens, na verdade corresponde à conhecida equação de Kirpich, da forma tal como é empregada pelos engenheiros consultores brasileiros e em outros países.

Soil Conservative Service (S.C.S), (CHOW et al., 1998):

$$T_c = (100L^{0,8}(1000/N-9)^{0,7})/(1900\sqrt{s}) \quad (5)$$

em que:

T_c - tempo de concentração (min);

L - comprimento da linha de água principal (ft),

sendo 1ft = 0,3048m;

s - desnível médio (%);

N - Número de escoamento.

Giandotti, (NORVIA CV e CENOR, 2013) :

$$T_c = (4\sqrt{A} + 1,5L) / (0,8\sqrt{h_m}) \quad (6)$$

em que:

T_c - tempo de concentração (h);

L - comprimento da linha de água principal (km);

h_m - altura média da bacia (m).

5 RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta o sumário dos tempos de concentração calculados para cada barragem. Segundo os dados desta tabela, pode-se observar que a fórmula que conduziu ao menor tempo de concentração foi sempre de Kirpich, Eq. 4, que, tal como foi dito anteriormente, é a mais usada pela maioria dos hidrólogos projetistas de barragens brasileiros.

A Eq. 4 se adequa bem a bacias pequenas de relevo acidentado, tal como é o caso do relevo da Ilha de Santiago, em Cabo Verde. Daí decorre que se deveria levar também esse fato em consideração na seleção do tempo de concentração para elaboração dos estudos hidrológicos das barragens.

Tabela 2 - Valores dos tempos de concentração das bacias hidrográficas empregadas nos projetos executivos das barragens de Faveta, Figueira Gorda e Saquinho.

Formulação	Tempo de concentração (h) Barragem		
	Faveta	F. Gorda	Saquinho
NERC	2.63	3.86	2.39
TÉMEZ	1.91	4.57	1.87
CHOW/KIRPICH	0.63	1.85	0.71
S.C.S.	0.66	3.57	0.77
GIANDOTTI	1.62	3.07	2.21
Média	1.49	3.38	1.59
t_c adotado	1.5	3.2	1.6

Fonte: Adaptado de Norvia/Cenor Cabo Verde, 2011.

A Tabela 3 apresenta para cada barragem as diferenças entre as vazões afluentes e laminadas sobre o vertedouro considerando as vazões do projeto original que corresponde ao $tc_{médio}$ e as novas vazões recalculadas com base no tc_{min} .

Analisando somente as afluentes, verifica-se que a diferença entre as vazões afluentes do projeto original e a vazão reavaliada varia entre 54,5%, para a barragem de Figueira Gorda e, 70,7% para barragem de Faveta. Com relação à vazão laminada, a diferença foi de 50 a 57%.

Pelos resultados dos cálculos das vazões afluentes pela formulação de Kirpich, Eq. 4, que corresponde ao tc_{min} , para o tempo de retorno de mil anos, analisou-se que os vertedouros das barragens de Faveta, Figueira Gorda e Saquinho se encontram subdimensionados quando comparados com vazões do projeto original que corresponde ao $tc_{médio}$, apresentando risco hidrológico, isto considerando que em engenharia de barragens se deve optar pelos valores extremos e que a adoção de menor valor entre os tempos de concentração seria uma medida a favor da segurança.

Tabela 3 - Tabela de valores de vazões afluentes e vazões laminadas referente a projeto original e vazão reavaliada.

Barragem	Vazão afluente (m³/s)			Vazão laminada (m³/s)			Tempo de concentração (h)	
	Projeto original	Vazão reavaliada	Diferença (%)	Projeto original	Vazão reavaliada	Diferença (%)	Projeto original	Reavaliado
Saquinho	316,7	538,8	70,1%	308,1	483,9	57%	1,60	0,71
Faveta	192,3	328,4	70,7%	186,6	280,4	50%	1,50	0,63
F. Gorda	369,5	570,7	54,4%	363,0	545,7	50%	3,20	1,85

Fonte: Autor, 2019.

A Tabela 4 apresenta as folgas resultantes da laminação das cheias milenares decorrentes das vazões apresentadas na Tabela 3, para as duas situações, projeto original e vazão reavaliada.

Observando-se os valores das folgas resultantes (resultados da diferença entre a cota inferior da ponte e a cota de sangria), Tabela 4, para as vazões de projeto original verifica-se que a folga para barragem de Figueira Gorda já se encontra subdimensionada, com uma folga negativa de -0,08m, significando que a seção livre entre a cota da soleira do vertedouro e a cota inferior da ponte é insuficiente para passagem da cheia milenar, mesmo para as condições adotadas no projeto original empregando o tempo de concentração médio.

Para as barragens de Faveta e Saquinho, as folgas foram positivas, iguais a 0,12m e 0,62m, respectivamente, sendo porém inferiores a 1m. A recomendação brasileira sobre o valor da borda livre mínima (folga) a ser adotado nos projetos das barragens do ponto de vista da segurança é de 1m acima do nível de enchente de projeto para reservatório de barragem de aterro e 0.5 m acima do nível de enchente de projeto para reservatório de barragem de concreto (ELETROBRÁS,

2003). Define-se como borda livre mínima a distância vertical entre o nível de enchente no reservatório e a cota de galgamento de barragem (ELETROBRÁS, 2003) e (ANA, 2015).

Esse conceito de borda livre (folga) da ELETROBRÁS não leva em consideração a geometria de vertedouros com ponte de rolamento construída sobre os mesmo, tais como os projetos das barragens de Cabo Verde, pois a existência das vigas longarinas de sustentação da ponte cria um vão exclusivo de passagem da água vertente, que, caso seja insuficiente para passagem da cheia de projeto, ocasionará fluxo em regime forçado com consequências imprevisíveis para a estabilidade e segurança da estrutura.

Observando as folgas resultantes para as vazões reavaliada com base no tc_{min} , verifica-se que a situação se torna mais crítica com folgas negativas de -0,58m para barragem de Figueira Gorda, -0,28m para barragem de Faveta e uma folga positiva insignificante de 0,02m para barragem de Saquinho. Assim, para as vazões reavaliadas com base no tempo de concentração mínimo (Kirpich), as três barragens apresentam a borda livre inexistente ou subdimensionada.

Tabela 4 - Dados geométricos das barragens e folgas recalculadas com informações do projeto original e de vazão reavaliada.

Barragem	Dados Geométricos		Projeto original			Vazão reavaliada		
	Cota da soleira do sangradouro (m)	Cota inferior da ponte (m)	Cota de sangria (m)	Lâmina de sangria (m)	Folga	Cota de sangria (m)	Lâmina de sangria (m)	Folga
Saquinho	312,00	316,52	315,90	3,90	0,62	316,50	4,50	0,02
Faveta	231,50	234,72	234,60	3,10	0,12	235,00	3,50	-0,28
F. Gorda	91,00	94,72	94,80	3,80	-0,08	95,30	4,30	-0,58

Fonte: Autor, 2019.

6 CONCLUSÃO

Os estudos hidrológicos que orientaram o dimensionamento das estruturas hidráulicas dos vertedouros das três barragens de interesse construídas na Ilha de Santiago, em Cabo Verde, consideraram a média de cinco fórmulas de cálculo para o tempo de concentração, em vez de considerar o menor dos tempos de concentração resultantes que, em todos os casos, foi dado pela fórmula de Kirpich.

Conforme os resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4, o uso da média dos tempos de concentração é preferível ao uso do menor tempo, que corresponde àquele calculado pelo método de Kirpich. O método usado nos projetos originais de barragens, $0,6tc_{médio}$, em vez do método de Kirpich, $0,6tc_{min.}$, pode induzir a riscos hidrológicos à segurança das barragens relativos à folga mínima que deveria ser mantida entre a cota da lâmina de sangria da cheia de projeto milenar e a cota inferior da viga longarina da ponte sobre o vertedouro das barragens, cujos projetos são semelhantes. A ausência de folga implicaria em risco estrutural para a segurança das respectivas barragens.

De acordo com a bibliografia pesquisada, a fórmula de Kirpich tem sido a mais empregada nos estudos hidrológicos para os projetos de barragens no Brasil e em várias partes do mundo, em função de sua adequação às características fisiográficas das bacias hidrográficas das barragens. Em nenhum caso, seja para as vazões do

projeto original, seja para as vazões reavaliadas, foi atendido o critério da folga mínima recomendada nos manuais de projeto da Eletrobrás e adotadas pela maioria dos projetistas brasileiros.

Considerando que em engenharia de barragens os eventos de falha correspondem a valores extremos e não a valores médios, como se fez ao se adotar um tempo de concentração médio dentro um conjunto de fórmulas selecionadas, seria importante que os Termos de Referência para elaboração de projetos de barragens em Cabo Verde sugerissem uma análise de risco hidrológica para definição dos parâmetros de projeto das barragens, incluindo o tempo de concentração como um dos parâmetros a ser investigado.

Uma das questões primordiais na elaboração dos estudos hidrológicos para definição das estruturas hidráulicas das barragens, tais como o dimensionamento do vertedouro e das folgas em relação ao coroamento, é a maximização da segurança de uma forma parcimoniosa.

Concluindo, nenhuma das três barragens estudadas pode ser considerada segura para a cheia milenar para a qual foram supostamente projetadas, corroborando assim para a necessidade de criação de uma legislação específica de segurança de barragens e normas técnicas que oriente a elaboração dos projetos numa visão conservadora com relação e segurança.

7 AGRADECIMENTOS

Ao Centro Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida.

8 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

9 REFERÊNCIAS

ANA (Agência Nacional de Águas). **Manual do Empreendedor, volume V, guia para a elaboração de projetos de barragens**, Brasília, Fevereiro de 2015.

ANA, Agência Nacional de Águas, Manual do Empreendedor, Volume VI, guia para a elaboração de projetos de barragens, Brasília, ANA, 2016.

ANAS, Agência Nacional de Água e Saneamento, **Plano de Ação Nacional para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos**, Cabo Verde, 2018.

BODSTEIN, A. Os três eixos da prevenção de desastres de Brumadinho. Artigo publicado no site da ABRRD - Associação Brasileira de Redução de Riscos de Desastres, Janeiro de 2019. Acesso em 08 de Janeiro de 2019.

BRASIL, L. S. S. **Lei Federal nº 12.334**, Brasília, 20 de Setembro de 2010.

CAMPOS, J. N. B. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., MAYS, L. W. **Applied Hidrology**. New York: McGraw Hill, 1998.

CMB (WCD), Comissão Mundial de Barragens (World Commission on Dams). **Dams and Development. A new framework for decision-making**. Earthscan Publications. Londres, 2000, 404 p. Disponível em <http://www.dams.org/report/contents.html>. Acesso em Fevereiro de 2018.

CNPG - Comissão Nacional Portuguesa de Grandes Barragens. **1º relatório de progresso**. Grupo de trabalho de análise de risco em barragens, Lisboa, Portugal, Janeiro de 2005.

COLLISCHONN, W. Risco hidrológico e segurança de barragens existentes (Simulação Hidrológica de Eventos Extremos), Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. In: XIV Simpósio de Recursos Hídricos de Nordeste, Maceió, Alagoas, 2018. **Anais...**

ELETOBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas. Outubro de 2003.

FONTENELLE, A. S., FONTENELLE, M. C., MATOS, Y. M. P. De, MONTEIRO, F. F., **Avaliações de risco em barragens: Estudo de caso da**

barragem Malcozinhado no Nordeste Brasileiro. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Vol 14 Nº 1, 25-42, Janeiro de 2018.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA DE SÃO PAULO. **Método Racional**, U.S.P., Brasil, 2018.

HEC - Hydraulic Engineering Center (Org.). **Hydraulic Design of Spillways: EM 1110-2-1603**. Washington: Headquarters Department Of The Army, 1965. 123 p.

ICOLD (International Commission on Large Dams). **Lessons from dam incidents**. Paris. 1974/84.

ICOLD. **World Register of Dams**. Paris. 1984/88.

INMG, Instituto de Meteorologia e Geofísica de Cabo Verde, dados de precipitação dos postos pluviométricos, Delegação da Cidade da Praia, Ilha de Santiago, Outubro de 2017.

KIRPICH, Z.P. Time of concentration of small agricultural watersheds. **Journal of Civil Engineering**, v. 10, p. 362, 1940.

LEITE, R. S., **Modelo para Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens com Associação de Métodos de Análise de Decisão Multicritério e Conjuntos Fuzzy**. Universidade de Brasília, Brasil, 2019.

LIMA, F. N. **Avaliação das probabilidades de falhas em barragens, associadas a eventos de naturezas hidráulicas e hidrológicas: Estudo de caso da PCH Cajuru**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 2014.

LOUKAS, A., QUICK, M. C. Physically-based estimation of lag time for forested mountainous watersheds. **Hidrological Sciences Journal**, v. 41, n. 1, p. 1-19, 1996.

MARTINS, F. J. P. **Dimensionamento hidrológico e hidráulico de passagens inferiores rodoviárias para águas pluviais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra, Março de 2000.

MELO, M. R. **Risco hidrológico associado às incertezas na determinação do tempo de concentração: Caso de estudo: Barragens na Ilha de Santiago - Cabo Verde**. Dissertação (Mestrado). Fortaleza, UFC, 2018.

MOTA, A. A., e KOBIYAMA, M., Reconsiderações sobre a Fórmula de Kirpich para o cálculo de tempo de concentração. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Versão On-line ISSN 2318-0331, RBRH vol. 20 no.1 Porto Alegre jan./mar. 2015 p. 55 – 59.

MOTA, K. R. R. **Rompimento hipotético e delimitação da área de inundação da barragem Salto Moraes em Ituiutaba/MG**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, 2017.

MULVANEY, T. J. **Método Racional**. Irlanda, 1851.

NORVIA, C.V., NORVIA, e CENOR, **Estudos e Construção de três barragens e rede de adução, Salineiro, Faveta e Saquinho**. Ilha de Santiago, Cabo Verde, 2011.

NORVIA, C.V., NORVIA e CENOR, **Estudos e Construção de três barragens e rede de adução, Figueira Gorda, Ilha de Santiago, Cabo Verde**, 2013.

PINTO A. V., et al. Gestão de riscos e segurança de barragens. In: 3º Simpósio de Segurança de Barragens e Riscos Associados – Nov. 2008, LNEC, Lisboa, Portugal. **Anais...**

RSB. **Regulamento para segurança de barragem**, Portugal, 2007.

SILVA, O. E. **Curso de hidrologia para dimensionamento de barragens e análise de riscos em barragens**. Cidade da Praia, Cabo Verde, Julho de 2017.

SILVEIRA, A. L. L., **Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais**, Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS Porto Alegre, RS e RBRH Janeiro/Março 2005.

TOMAZ, P. **Curso de Manejo de Águas Pluviais**. Guarulhos: Plínio Tomaz, 2010.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers, user manual, Washington DC 20314-1000, Department of the army, May 2016.

USBR - United States Bureau of Reclamation. **Guidelines for achieving public protection in dam safety decision making**. Denver: U.S. Department of the Interior, 2003.

USCOLD (U.S. Committee on Large Dams). **Dam safety practices and concerns in the United States**. Denver, 1982.

VICENTE et al. 1996. **Roteiro para projeto de pequenos açudes**. UFC, Centro de Tecnologia, Fortaleza- Ceará 1996.

WOODWARD, D. E. **National Engineering Handbook**. US Department of Agriculture, v. 630, cap. 15, 2008.