



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Segurança de Barragens e a Borda Livre: Uma Revisão Sistemática das Abordagens e Evoluções Metodológicas

Rute Cavalcante Pereira¹, Ticiane Marinho de Carvalho Studart²

¹Universidade Federal do Ceará, Bolsista CAPES no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (POSDEHA), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: rutecavalcante98@hotmail.com (<https://orcid.org/0009-0008-1073-9462>).

²Universidade Federal do Ceará, Professora titular no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (POSDEHA), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Pesquisadora CNPq, Bolsista de Inovação Tecnológica FUNCAP, Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: ticiane@ufc.br (<https://orcid.org/0000-0001-9317-3645>).

Artigo recebido em 14/06/2024 e aceito em 05/02/2025

RESUMO

A correta estimativa da borda livre da barragem é crucial para prevenir o galgamento e garantir a segurança estrutural. Este artigo revisa sistematicamente a literatura sobre a conceituação e as metodologias de determinação da borda livre, destacando sua importância na segurança de barragens. Alguns métodos tradicionais baseiam-se em aproximações que podem aumentar os custos ou comprometer a segurança. A pesquisa utilizou termos-chave em português e inglês para encontrar artigos e documentos relevantes sobre segurança de barragens e borda livre. Foram incluídas diversas fontes, como artigos científicos, diretrizes governamentais e literatura cinza, sem restrições quanto ao tipo de material, mas focando principalmente em estudos relacionados ao Brasil e em inglês. As bases de dados utilizadas incluíram Google Scholar, CAPES, Web of Science, a biblioteca do USACE e boletins da ICOLD. Os critérios de inclusão focaram na relevância e qualidade metodológica, enquanto os de exclusão removeram estudos irrelevantes ou metodologicamente deficientes. A análise dos resultados incluiu a origem do conceito, definições, fatores de influência e metodologias de cálculo, com foco em barragens de terra. A pesquisa aponta que a definição da borda livre evoluiu ao longo do tempo para águas interiores, considerando fatores como vento e inundações máximas. Identificam-se lacunas, especialmente na falta de especificações para barragens de contenção de rejeitos e na quantificação adequada dos efeitos hidrológicos e climáticos. Apesar do uso de modelos numéricos avançados, as fórmulas tradicionais ainda prevalecem, observando-se uma tendência em seguir padrões de cálculo do USACE e USBR.

Palavras-chave: Borda livre; segurança de barragens; metodologias de cálculo.

Dam Safety and Freeboard: A Systematic Review of Approaches and Methodological Evolutions

ABSTRACT

The accurate estimation of the freeboard of dams is crucial to prevent overtopping and ensure structural safety. This article systematically reviews the literature on the conceptualization and methodologies for determining freeboard, highlighting its importance in dam safety. Some traditional methods rely on approximations that can increase costs or compromise safety. The research utilized key terms in both Portuguese and English to locate relevant articles and documents on dam safety and freeboard. Various sources were included, such as scientific articles, government guidelines, and grey literature, without restrictions on the type of material, but primarily focusing on studies related to Brazil and those published in English. The databases used included Google Scholar, CAPES, Web of Science, the USACE library, and ICOLD bulletins. Inclusion criteria focused on relevance and methodological quality, while exclusion criteria removed irrelevant or methodologically deficient studies. The analysis of the results included the origin of the concept, definitions, influencing factors, and calculation methodologies, with a focus on earth dams. The research indicates that the definition of freeboard has evolved over time for inland waters, considering factors such as wind and maximum floods. Gaps were identified, particularly in the lack of specifications for tailings dams and the adequate quantification of hydrological and climatic effects. Despite the use of advanced numerical models, traditional formulas still prevail, with a tendency to follow calculation standards from USACE and USBR.

Keywords: Freeboard; dam safety; calculation methodologies.

Introdução

As barragens são estruturas construídas para conter água em grandes quantidades, permitindo que sejam regulados o fluxo e a distribuição de água. Mas, apesar das melhorias nas práticas de projeto e construção, sempre existe a possibilidade de situações adversas comprometerem sua segurança (Perini, 2009).

Um dos parâmetros essenciais para a segurança dessas estruturas é a borda livre, que ajuda a reduzir o risco de transbordamento e é determinante na classificação de risco de uma barragem (Tessema, 2020). No entanto, diante do cenário atual de mudanças climáticas, as variações extremas e imprevisíveis aumentam os riscos associados à segurança das barragens, impactando o nível dos reservatórios, o desempenho dos vertedouros e a operação da barragem como um todo (Herbozo et al., 2022).

A maioria das barragens foi projetada com base em condições climáticas históricas, o que pode resultar em vulnerabilidades diante das mudanças climáticas, aumentando o risco de falhas graves (Carneiro et al., 2022). Nesse contexto, é necessário aprimorar as abordagens de avaliação de segurança de barragens, integrando cenários climáticos atuais e futuros para otimizar os parâmetros de projeto e reduzir riscos estruturais (Furtado, 2024).

A borda livre da barragem é definida como a diferença entre a cota do topo da barragem e o nível máximo de cheia do reservatório, proporcionando uma margem de segurança contra falhas por transbordamento (galgamento). Essa distância vertical é condicionada não só pelos aspectos hidrológicos da barragem, mas também pelos ventos incidentes na área de interesse. Por isso, outro fenômeno climatológico importante a ser considerado é o vento, pois a ação do vento tem influência sobre aspectos fundamentais nos reservatórios (Marques, 2013).

A análise e previsão do comportamento variável e os padrões não lineares do vento é um dos problemas de pesquisa mais relevantes da atualidade (Assunção et al., 2022), pois o regime de vento está sofrendo alterações sob os efeitos das mudanças climáticas (Lima, 2024; Miranda et al., 2022; Raphaldini et al., 2020).

O estudo de Raphaldini et al. (2020) encontrou uma anomalia na oscilação dos ventos associada a mudanças climáticas extremas com tendência a se repetir, dificultando a previsão dos fenômenos meteorológicos associados ao ciclo de ventos. Portanto, torna-se essencial estar atento às diferentes metodologias existentes para lidar com essa problemática, pois cada abordagem pode influenciar significativamente a precisão e a eficácia das previsões relacionadas ao comportamento dos ventos em cenários climáticos em transformação.

Os Relatórios de Segurança de Barragem (RSB) elaborados pela ANA apontam um aumento significativo nos acidentes e incidentes em barragens brasileiras nos últimos 5 anos (2019-2023) em comparação com períodos anteriores, destacando a influência de eventos climáticos intensos em diferentes meses. Em 2023 foram registrados 25 acidentes em barragens, dos quais nove tiveram o galgamento como mecanismo de falha principal (ANA, 2024). Os recentes acidentes no Brasil evidenciam a necessidade de ação mais eficaz por parte de empreendedores e do poder público (Nietsche, 2022). Portanto, há uma necessidade de aprimorar o conhecimento e as técnicas vinculadas ao processo de concepção e monitoramento de barragens.

De acordo com o International Commission on Large Dams (ICOLD, 2019), o galgamento é um dos modos de falha mais comuns em barragens, frequentemente causado por uma capacidade insuficiente dos vertedouros e por borda livre inadequada. A taxa de falhas aumentou quase 50% desde 2000, especialmente nos primeiros 10 anos de operação de barragens de terra. Outros estudos corroboram esse fato, pois Zhang et al. (2009) concluíram que a causa mais comum de falhas em barragens é o galgamento, que ocorre quando a altura da água de uma enchente ou de uma onda ultrapassa a altura do topo da barragem.

Além disso, um estudo realizado por Mello et al. (2021) confirma que o galgamento é uma das causas mais frequentes de acidentes em estruturas de barragens. A situação é ainda mais crítica em barragens de contenção de rejeitos, que têm falhado com grande frequência e causado impactos ambientais e sociais significativos (Morrill et al., 2022). O International Council on Mining and Metals (ICMM, 2021) explica que

instalações de rejeitos não devem ser projetadas para suportar galgamentos, e, por isso, manter os requisitos de borda livre é um objetivo crítico de desempenho nessas instalações.

A correta estimativa da borda livre é, portanto, um parâmetro estrutural essencial para a prevenção do galgamento (Ozbahceci & Bilyay, 2018; Tessema, 2020), e encontrar a borda livre apropriada é um tema de pesquisa fundamental para barragens construídas com diferentes finalidades, sob diferentes condições (Tessema et al., 2017).

O USACE (1962) explicitou que muitos métodos de cálculo e critérios básicos de borda livre consideram aproximações e incertezas, e o estabelecimento de um valor fixo para a borda livre pode causar problemas de segurança e aumentar os custos em projetos de barragens. Embora o aumento da borda livre seja fundamental para a segurança das barragens, ele também gera consideráveis custos de construção, uma vez que incrementos na altura da borda exigem camadas adicionais na base da barragem (USACE, 1962; Tessema, et al., 2017). Assim, o desafio é evitar tanto o excesso de conservadorismo quanto alturas insuficientes, equilibrando segurança e custo.

Diante desse cenário, e constatada a importância da borda livre na segurança de barragens, observou-se uma necessidade de fazer um estudo aprofundado sobre os aspectos que envolvem o dimensionamento da borda livre. O ponto de partida deste estudo foi observar os principais órgãos nacionais e internacionais que apresentam diretrizes sobre dimensionamento de barragens.

No Brasil, o dimensionamento de barragens é regulamentado por diferentes órgãos de acordo com a finalidade da estrutura: a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a Agência Nacional de Mineração (ANM) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Cabe investigar se esses órgãos apresentam divergências nos critérios para o cálculo da borda livre ou se adotam referências comuns, independentemente do tipo de barragem. Em âmbito internacional, diretrizes importantes são fornecidas pelo U.S. Army Corps of Engineers (USACE) e pelo U.S. Bureau of Reclamation (USBR), que oferecem parâmetros amplamente

utilizados na construção de barragens. Além disso, a International Commission on Large Dams (ICOLD) é uma referência essencial, por ser uma organização global que define diretrizes e padrões técnicos, influenciando práticas de segurança e dimensionamento de barragens em diversos países.

Questões como a origem dos estudos sobre borda livre, os principais fatores que influenciam sua definição em barragens de terra e a evolução dessas práticas ao longo do tempo tornam-se fundamentais para um entendimento mais amplo da área. Além disso, é essencial identificar as metodologias de cálculo de borda livre mais utilizadas atualmente e compreender como essas metodologias variam conforme o tipo de barragem e o cenário climático. Essas perguntas visam esclarecer se as práticas tradicionais de cálculo de borda livre são adequadas para os novos padrões climáticos, e guiam esta revisão sistemática que busca sintetizar e analisar criticamente o conhecimento existente.

Até o presente, nenhuma revisão sistemática foi feita com a finalidade de analisar os estudos sobre borda livre de barragem com as metodologias de cálculo e os principais fatores que influenciam na sua definição. Com o intuito de preencher esta lacuna do conhecimento, o objetivo deste estudo foi reunir, sintetizar e avaliar criticamente todas as evidências relevantes sobre borda livre de barragem encontradas na literatura nacional e internacional. Reunindo o conhecimento existente é possível identificar lacunas, destacar tendências, e assim apresentar diferentes perspectivas, contribuindo para o avanço do campo de pesquisa.

Material e Métodos

Este estudo foi conduzido como uma revisão sistemática, buscando consolidar e analisar criticamente as evidências existentes sobre o dimensionamento da borda livre em barragens. A escolha pela revisão sistemática foi motivada pela necessidade de reunir estudos fragmentados sobre o tema e identificar padrões, lacunas e diretrizes aplicáveis ao dimensionamento de borda livre em diferentes contextos.

Esta revisão foi conduzida com base nas diretrizes PRISMA (Preferred Reporting Items for

Systematic Reviews and Meta-Analyses), especificamente o diagrama de fluxo PRISMA 2020 (Page et al., 2021) para novas revisões sistemáticas, que incluem pesquisas em bancos de dados, registros e outras fontes. Este método garante transparência e rigor na seleção, extração e análise dos dados.

Definição das palavras-chave

A fim de certificar-se de que todos os artigos e documentos importantes, ou que possam ter algum impacto na conclusão sejam incluídos, a busca teve início com a definição de termos ou palavras-chave. Os termos gerais mais importantes usados nas buscas foram “segurança de barragem” e “diretrizes para dimensionamento de barragens”. Essas palavras-chave foram inseridas na busca separadamente, não houve a combinação de termos através de operadores booleanos.

A partir dos resultados dessas buscas, foi pesquisada a palavra-chave “borda livre” dentro de cada documento encontrado, com a ferramenta “localizar e editar” do Google Chrome, para que as informações relevantes a este estudo fossem identificadas. Da mesma maneira que a busca foi conduzida em português, ela também foi realizada usando os termos respectivos em inglês: “dam safety”, “guidelines for dam design” e “freeboard”.

Para encontrar informações sobre borda livre em barragens de mineração, os termos utilizados para a busca foram “construção de barragem de mineração”, e os termos em inglês “mining dam” e “mining tailings dam”. Essa abordagem resultou em uma investigação mais minuciosa e abrangente do tema.

Estratégias de busca

Em seguida foram estabelecidas as estratégias de pesquisa, incluindo a definição das bases de dados e de outras fontes de informações a serem consultadas. Dentro dessas estratégias, o estudo procurou informações sobre diferentes aspectos da borda livre, abrangendo as diversas finalidades da barragem, como armazenamento de água, geração hidrelétrica e contenção de rejeitos.

Não houve restrições quanto ao tipo de material, ou seja, foram considerados tanto artigos

científicos como livros, diretrizes governamentais, leis, instrumentos normativos, teses, dissertações, monografias, entre outros estudos que abordassem o tema em questão. Quanto à localização, a prioridade do estudo foi encontrar o máximo de informações possíveis sobre o dimensionamento da borda livre no Brasil, e logo em seguida a busca foi expandida para o âmbito internacional, restringindo apenas o idioma às línguas inglês e português.

Busca Geral

A busca foi feita em maior parte no motor de pesquisa livre do Google.

Repositórios de literatura científica

Foi utilizado o mecanismo Google Scholar, por possuir dados da literatura acadêmica em uma extensa variedade de formatos de publicação. Ainda, a busca foi feita no portal de periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), e na base de dados multidisciplinar Web of Science.

Documentos de instituições relevantes

Outra base de dados utilizada no estudo foi a biblioteca do USACE, pela sua longa trajetória de expertise e conhecimento aprofundado em engenharia. Também foi feita uma busca na biblioteca de boletins da ICOLD, pela sua grande influência nos requisitos para construção de barragens.

Avaliação da qualidade dos estudos

A avaliação da qualidade dos estudos inclui elementos tais como o processo de seleção dos estudos, a definição dos critérios de inclusão e exclusão, e a justificativa das bases de dados selecionadas. Os estudos foram selecionados pela leitura de títulos e resumos, e os artigos pré-selecionados foram avaliados na íntegra através da leitura completa dos seus escopos. Esse processo de triagem foi realizado manualmente sem auxílio de softwares.

Os critérios utilizados para selecionar os estudos foram: o tipo de barragem, o tipo de documento e a relevância temática. Quanto ao tipo de barragem, foram considerados estudos apenas sobre as barragens de terra, visto que as

tolerâncias de borda livre para barragens de concreto podem ser menos conservadoras devido à sua maior resistência. Quanto ao tipo de documento, aplicou-se o mesmo critério das estratégias de busca, ou seja, foram considerados tanto artigos científicos como livros, diretrizes governamentais, leis, instrumentos normativos, teses, dissertações, monografias, entre outros estudos que abordassem o tema em questão. Quanto à relevância do tema, foram incluídos estudos que abordam o cálculo da borda livre em barragens, ou pelo menos apresentam uma definição completa e detalhada.

Por outro lado, foram excluídos estudos irrelevantes ou incompletos, estudos com metodologia deficiente (que não apresentam nenhuma das questões desta pesquisa), documentos com acesso restrito, e duplicatas identificadas em diferentes bases de dados. As bases de dados selecionadas foram preferidas pois são reconhecidas pela comunidade científica, com boa cobertura temática e atualização regular.

Síntese dos resultados

Os resultados da pesquisa estão estruturados de acordo com os critérios de análise considerados importantes, constando os estudos encontrados que foram selecionados. Desses, são apresentadas as definições encontradas e a síntese das principais metodologias de cálculo. Assim, a partir da análise dos materiais pesquisados, a discussão será feita sobre os seguintes aspectos:

1. Origem do conceito;
2. O conceito de borda livre;
3. Fatores de influência considerados no dimensionamento; e
4. Metodologias de cálculo.

Resultados

Estudos encontrados

Foram incluídos neste artigo 29 trabalhos entre artigos científicos, memoriais técnicos, normas e diretrizes governamentais. Devido à pouca publicação sobre o tema específico, a maioria dos estudos selecionados pertencem à literatura cinza, ou seja, são informações geradas e divulgadas fora dos canais convencionais de publicação e divulgação acadêmica.

Literatura cinza

A tabela 1 abaixo apresenta os trabalhos selecionados para o estudo que fazem parte da literatura cinza, isto é, são manuais, diretrizes, normas técnicas, e memoriais técnicos que tratam da conceituação e/ou dimensionamento da borda livre da barragem. São fontes nacionais e internacionais, e estão organizadas em ordem crescente por ano de publicação.

Tabela 1 – Trabalhos encontrados na literatura cinzenta.

Título do documento	Publicado por	País	Ano de Publicação
Waves in inland reservoirs	U.S Army Corps of Engineers	EUA	1962
Technical Dictionary on Dams	International Commission on Large Dams	França	1978
Recommended guidelines for safety inspection of dams	U.S Army Corps of Engineers	EUA	1979
Freeboard criteria and guidelines for computing freeboard allowances for storage dams	U.S. Bureau of Reclamation	EUA	1981
Bulletin nº 45 – Manual on tailing dams and dumps	International Commission on Large Dams	França	1982
Guidelines on freeboard for dams	South African National Committee on Large Dams	África do Sul	1990
Inflow design floods for dams and	U.S Army Corps of Engineers	EUA	1991

reservoirs			
Freeboard criteria and guidelines for computing freeboard allowances for storage dams	U.S. Bureau of Reclamation	EUA	1992
Freeboard requirements in embankment dams – Guidelines	Bureau of Indian Standards	Índia	1993
Hydrologic Engineering Requirements for reservoirs	U.S Army Corps of Engineers	EUA	1997
Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas	Eletrobras	Brasil	1999
Guidelines on the safe design and operating standards for tailings storage	Department of Minerals and Energy	Austrália	1999
Crêterios de projeto civil de usinas hidrelétricas	Eletrobras	Brasil	2003
Guidelines on acceptable flood capacity for dams	Department of Natural Resources and Water	Austrália	2007
Bulletin nº 157 – Small dams: design, surveillance and rehabilitation	International Commission on Large Dams	França	2011
Guidelines on freeboard for dams	South African National Committee on Large Dams	África do Sul	2011
Design standards nº 13 – Embankment dams	U.S. Bureau of Reclamation	EUA	2012
Diretrizes para a elaboração de projetos de barragens	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico	Brasil	2016
Guia prático de pequenas barragens	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico	Brasil	2016
NBR 13.028 – Mineração: elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos	Associação Brasileira de Normas Técnicas	Brasil	2017
Hydrologic Engineering Requirements for reservoirs	U.S Army Corps of Engineers	EUA	2018
Guidelines on Tailing Dams	Australian National Committee on Large Dams	Austrália	2019
Analysis and Design Aspects of Embankment Dams	Central Water Commission	Índia	2019
Resolução ANM nº 95	Agência Nacional de Mineração	Brasil	2022

Literatura acadêmica

A busca feita no portal de periódicos da CAPES revelou que o termo “freeboard” relacionado à barragem apareceu em 9 títulos de artigos, mas apenas 2 desses possuem acesso aberto. A busca também foi feita com o termo em português. Repetindo a mesma busca no banco de dados Web of Science, 4 artigos foram encontrados contendo “freeboard” no título, entretanto, todos com acesso restrito.

Dos artigos acessíveis, nenhum foi incluído neste estudo, pois seus conteúdos não correspondem ao foco principal. O objetivo deste trabalho é explorar as definições e metodologias de cálculo da borda livre, e os artigos encontrados não abordam essas questões de maneira explícita.

A literatura acadêmica que foi incluída nesse estudo foi encontrada através do motor de pesquisa livre do Google e na base de dados Google Scholar. A tabela 2 abaixo apresenta os trabalhos acadêmicos que foram selecionados.

Tabela 2 – Trabalhos encontrados dentro da literatura acadêmica.

Título	Autor(es)	Origem	Ano de publicação
Am I underestimating or overestimating my dam freeboard design?	Carmen E. Bernedo; Lori L. Hadley; John C. Haapala	EUA	2008
Barragem de rejeitos	Soares, Lindolfo	Brasil	2010
Freeboard Allowance at rivers – experiences from Germany	Pohl, R.	Alemanha	2014
A definition of freeboard	Quelopana, Hugo; Barrera, Sergio	Chile	2015
Physical modelling of dam overtopping from landslide generated waves	Tessema, Netsanet Nigatu	Etiópia	2020

Definições encontradas

A partir dos resultados encontrados, as definições mais relevantes de borda livre estão

expostas na tabela 3 a seguir. A relevância é dada pela completude da definição, sintetizada para cada fonte encontrada.

Tabela 3 – Síntese das definições mais relevantes encontradas.

Fontes relevantes	Definição de borda livre
U.S Army Corps of Engineers	distância vertical entre a crista de uma barragem e algum nível específico do reservatório, geralmente o nível normal de operação ou o nível máximo de inundação.
U.S. Bureau of Reclamation	borda livre normal: diferença de cota entre o topo da barragem sem curvatura e o nível de água de armazenamento normal; e borda livre mínima: aquela calculada entre o topo da barragem e a superfície máxima de água do reservatório que resultaria da IDF.
International Commission on Large Dams	borda livre normal: distância vertical da elevação da crista da barragem à elevação normal da superfície da água do reservatório em operação; e borda livre mínima: distância vertical da elevação da crista da barragem à elevação máxima da superfície da água do reservatório durante a cheia de projeto com operação do vertedor.
South African National Committee on Large Dams	distância vertical entre o nível normal máximo de abastecimento e o topo da barragem sem extravasamento, excluindo a curvatura, mas incluindo parapeitos adequadamente projetados e barreiras contra ondas que se elevam acima do topo.
Bureau of Indian Standards	distância vertical entre a crista do aterro (excluindo a curvatura) e a superfície da água parada do reservatório, onde a borda livre normal considera o nível cheio do reservatório, e a borda livre mínima considera o nível máximo de água calculado para a enchente projetada.
Eletrobras	borda livre normal: distância vertical entre o nível máximo normal no reservatório e a cota de galgamento da barragem; e borda livre mínima: distância vertical entre o nível de máxima enchente no reservatório e a cota de galgamento da barragem.
Agência Nacional de Águas e	borda livre normal: tem sido definida como a diferença entre a

Saneamento Básico	cota da crista e o nível máximo normal do reservatório borda livre mínima: diferença entre a cota da crista e o nível de máxima cheia, ou nível maximum maximorum.
Associação Brasileira de Normas Técnicas	altura livre entre o nível de água maximum maximorum calculado pelo modelo hidrológico e a elevação de coroamento da barragem, durante a cheia de projeto.”
Australian National Committee on Large Dams	borda livre total em uma barragem de rejeitos: distância vertical entre o nível máximo operacional da lagoa de rejeitos e a crista da barragem, considerando armazenamento para tempestades extremas, descarga do vertedouro, borda livre para ondas e bordas livres de contingência.
Pohl, R.	distância medida verticalmente entre o nível de água projetado e o topo do dique ou muro de contenção.
Quelopana, Hugo; Barrera, Sergio	A borda livre total em uma barragem de rejeitos deve ser distinguida quanto ao projeto e a operação em: borda livre de projeto hidráulico, de projeto de rejeitos, a borda livre de operação hidráulica e de operação de rejeitos.
Carmen E. Bernedo; Lori L. Hadley; John C. Haapala	borda livre normal: diferença de elevação entre o topo da barragem e a elevação máxima normal do nível da água. borda livre mínima: diferença na elevação entre o topo da barragem e a superfície máxima da água no reservatório que resultaria da IDF.
Tessema, Netsanet Nigatu	distância vertical entre a superfície da água e o topo da barragem.
Soares, Lindolfo	distância vertical entre o topo do aterro e o nível d'água.

Principais metodologias de dimensionamento

A tabela 4 a seguir apresenta a síntese das metodologias de cálculo da borda livre segundo as diferentes fontes encontradas neste estudo. É importante destacar que as fontes internacionais mais relevantes sobre o tema, segundo o que foi observado neste estudo, são o USACE e o USBR, ambas americanas. Nacionalmente, as fontes relevantes são a agência reguladora ANA e a empresa de capital aberto Eletrobras. A ANEEL e a ANM desempenham um papel fundamental na segurança de barragens nacional, entretanto não

foram encontradas informações suficientes sobre a borda livre nessas fontes.

Como algumas fontes possuem mais de um estudo publicado, a tabela mostra apenas o que foi consolidado, em síntese, no estudo mais atualizado da fonte em relação a este artigo. Na tabela estão expostos os fatores que influenciam no cálculo da borda livre com as respectivas referências adotadas por cada autor, os valores mínimos de referência que eles consideram, e o cálculo utilizado.

Tabela 4 – Síntese das metodologias de cálculo da borda livre (BL).

Fonte	Fatores de influência	Referências	Borda livre mínima recomendada	Metodologia de cálculo
USACE (2018)	S^1 , F^1 , R^2 , D^3 , relação entre $t_{\min}^3$ e H_s^3 .	¹ Saville (1954) ² USACE EM 1110-2-1100 (2008) ³ Ábacos USACE (1989)	-	$BL = R_{2\%} + S$
USBR (2012)	S^1 , F^1 , H_s^3 , R^2 , D^2 , $t_{\min}^3$, e T^3 .	¹ Saville (1954) ² USBR (1981); USACE (1976) ³ USBR (1992)	$BL \geq 1,0m$ ou o calculado, o que for maior	$BL = R + S_{10\%}$
ICOLD (2011)	S^1 , F^1 , H_s^2 , R^2 , D^2 , e $t_{\min}^2$.	¹ USACE EM 1110-2-1100 (2006) ² USBR (1992)	$BL \geq 1,0m$	$BL = R + S$
SANCOLD (2011)	S^{12} , F^2 , H_s^2 , R^2 , $t_{\min}^2$, T^2 , seiches e surtos devido a terremotos ³ e a deslizamentos de terra ⁴ .	¹ USACE EM 1110-2-1100 (2006) ² The Rock Manual (2007) ³ Dean e Dalrymple (1992) ⁴ Huber e Hager (1997)	$0,5 \leq BL \leq 1,5m$, depende da categoria de risco	-
ANA (2016)	S^1 , F^1 , H_s^3 , R^2 , T^3 , ondas geradas por sismos ⁴ .	¹ USBR (1992) ² MEER e JANSSEN (1994) ³ MARTINS (2002) ⁴ CINS (1968)	$BL \geq 1,0m$	-
ANM (2022)	-	-	$BL \geq 1,0m$ ou o calculado, o que for maior	-
Eletrobras (2003)	S, F e D. ¹²	¹ Saville, McClendon e Cochran (1962) ² USBR (1992)	$BL \geq 1,0m$	-
Legenda: BL = borda livre S = elevação do vento $S_{10\%}$ = elevação do vento excedido por 10% dos ventos incidentes F = fetch H_s = altura significativa da onda		R = avanço das ondas $R_{2\%}$ = elevação máxima da onda excedido por 2% das ondas incidentes D = profundidade do reservatório ao longo da linha do fetch $t_{\min}$ = duração mínima dos ventos T = período (-) informação não encontrada na bibliografia consultada.		

Discussão

A partir dos resultados apresentados, pode-se analisar os estudos encontrados de acordo com os critérios definidos a princípio. Nas tabelas 1 e 2, que reúnem os trabalhos selecionados, observa-se que a quantidade de estudos não é tão significativa, apesar da importância do estudo da borda livre para a segurança de barragem. De todos os 29 estudos encontrados na literatura cinza e na literatura acadêmica, 5 desses foram publicados pelo U.S. Army Corps of Engineers e

3 pelo U.S. Bureau of Reclamation, evidenciando o protagonismo dos dois órgãos no tempo.

Em relação à definição, na tabela 3 é possível observar que o conceito de borda livre mínima estabelecido pelo USBR influenciou o ICOLD, e no Brasil, ANA e Eletrobras. Contudo, há algumas diferenças na conceituação das outras fontes em relação ao nível da água ao qual deve ser adotada como referência. Em relação à metodologia, a grande maioria adota USACE e USBR como fontes de conhecimento. A tabela 4

aborda, de forma concisa, a consolidação dos estudos mais relevantes para este artigo.

Apesar de o USACE não recomendar valores mínimos de referência, o USBR recomenda como borda livre mínima 3 pés (aproximadamente 1,0 metro), outras fontes utilizam a mesma recomendação. Inclusive no Brasil, o valor de 1,0 m para borda livre mínima é adotado pela ANA, ANM e Eletrobrás. As fórmulas apresentadas diferem em algumas fontes, mas a maioria segue as diretrizes do manual USACE EM 1110-2-1100, que foi atualizado ao longo dos anos, e do USBR (1981, 1992). O modelo de cálculo para encontrar o fetch efetivo dado por Saville (1954) foi considerado pelas fontes relevantes, ou modificado, mas mantendo o princípio original.

Os tópicos a seguir apresentam uma discussão detalhada sobre os resultados encontrados na pesquisa, desde a origem do conceito datada na literatura, as definições, até os modelos de cálculo encontrados na literatura mais atualizada.

A origem do conceito de borda livre

A definição da borda livre de uma barragem surgiu a partir dos estudos de ondas em reservatórios, isto é, em águas com limites definidos. Entretanto, os primeiros estudos e recomendações na determinação da altura de ondas surgiram da necessidade de prever as ondas do mar em invasões de guerra planejadas pelos Estados Unidos a partir de 1942 (Sverdrup e Munk, 1947). Com o passar dos anos, reconheceu-se que as relações estabelecidas para ondas, ação das ondas e configuração do vento desenvolvidas a partir de estudos oceânicos em grande escala não necessariamente poderiam ser aplicáveis para corpos d'água interiores (USACE, 1962).

Em um artigo elaborado para o USACE, Saville (1952) desenvolveu o primeiro estudo da configuração do vento e da ação das ondas em águas interiores, para um programa geral de controle de enchentes. Em Saville (1954), foi introduzido um método para avaliar o efeito da largura do fetch na previsão de ondas em águas de reservatórios interiores. De acordo com os estudos de Saville (1952, 1954), fetch se refere à extensão da superfície da água sobre a qual o vento atua para gerar ondas, sem obstruções significativas.

A partir desses estudos, a estimativa da altura máxima das ondas, relacionada à intensidade dos ventos, foi sendo aplicada no dimensionamento da borda livre da barragem para uso nos projetos de reservatórios. Assim, o conceito de borda livre surgiu nos estudos do Beach Erosion Board nº 132 para o USACE (1962) como “cota de referência de borda livre”, e se referia à distância vertical do nível normal de operação da barragem até seu topo, enquanto outros casos consideravam a borda livre sendo medida a partir da cota máxima de água que pode ser atingida pela enchente projetada para o vertedouro (Saville; McClendon; Cochran, 1962). Em todos os casos, a “cota de referência de borda livre” se aplicaria ao nível da água que existiria se não houvesse ação das ondas, mas a magnitude desse comprimento necessário para garantir uma estrutura segura depende das características das ondas esperadas coincidentemente com o nível máximo ou quase máximo do reservatório (USACE, 1962).

A partir desse conceito primordialmente definido, o USACE (1979) publicou as diretrizes para inspeção de segurança de barragens, onde defende que cada projeto específico deve avaliar os parâmetros críticos necessários para a determinação do limite mínimo da borda livre, pois existem muitos fatores envolvidos em tais determinações. Posteriormente, foram desenvolvidos critérios e procedimentos para cada aspecto envolvido nas diretrizes da borda livre (USACE, 1997). O manual USACE (1986) fornece orientações para previsão de ventos associados a tempestades e estimativa do aumento total do nível da água em áreas costeiras, e no manual USACE (1989) são fornecidas as diretrizes para obter, interpretar e aplicar informações sobre o nível da água e as ondas.

O conceito de borda livre

De acordo com os estudos analisados, pode-se assumir que o conceito de borda livre original foi definido pelo USACE, e mantido ao longo dos anos como sendo a distância vertical entre a crista de uma barragem e algum nível específico do reservatório, geralmente o nível normal de operação ou o nível máximo de inundação (USACE, 1979, 1991, 1997, 2018). O U.S. Bureau of Reclamation (USBR), agência federal que se concentra na gestão dos recursos hídricos dos EUA, aplica o mesmo conceito de

borda livre definido pelo USACE. Entretanto, no USBR (1981) a definição é dividida entre borda livre normal como sendo a diferença de cota entre o topo da barragem sem curvatura e o nível de água de armazenamento normal, e a borda livre mínima, aquela calculada entre o topo da barragem e a superfície máxima de água do reservatório que resultaria da IDF (enchente crítica de projeto).

Analizando a biblioteca de boletins do ICOLD disponível no site oficial, desde o início das publicações na década de 60, o primeiro boletim sobre segurança de barragem foi o nº 59 (1987), e nele não há definição de borda livre. Entretanto, o dicionário técnico de barragens de 1978 definia borda livre como a distância vertical entre o nível de água medido e o topo da própria barragem (ICOLD, 1978). De acordo com ICOLD (1978), havia tipos diferentes de borda livre: borda livre líquida (ou seca, ou de inundação), que considerava o máximo nível da água, e a borda livre bruta (ou total), que levava em conta o nível de retenção da água. Já no boletim nº 157, o ICOLD (2011) fornece a mesma definição de borda livre dada pelo USBR (1981).

No Brasil, a Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobras) foi pioneira na segurança de barragens nacional (Eletrobras, 2022). Nos manuais e diretrizes de estudos e projetos da Eletrobrás (1999), é apresentado o conceito brasileiro de borda livre como sendo uma “folga” entre a crista da barragem e o nível de água prevista para ser liberada pelo vertedouro. Seu estudo sobre critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas define a borda livre mínima e a borda livre normal, assim como na definição do USBR (1981), entretanto a cota limite da barragem é nomeada cota de galgamento (Eletrobras, 2003).

A Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA), criada em 2000, é uma agência reguladora vinculada ao Governo Federal que é responsável pela fiscalização da segurança de barragens em rios nacionais. A ANA possui um conjunto de oito manuais com orientações úteis aos empreendedores de barragens, onde define a borda livre mínima como a distância vertical entre o nível máximo maximorum da água e o coroamento da barragem, não considerando o parapeito (ANA, 2016a). O termo máximo maximorum indica o máximo nível do reservatório a partir do qual abrem-se os

vertedouros para a passagem de cheias. Em ANA (2016b) a borda livre normal é definida de acordo com o ICOLD (1978).

A Agência Nacional de Mineração (ANM) publicou em 2022 a resolução nº 95 que cita a falta da borda livre da barragem como um dos critérios que enquadra uma barragem na categoria de risco alta. Não foi encontrada nenhuma definição de borda livre ou critérios de dimensionamento relativos à ANM. A ANEEL é a entidade responsável por realizar a fiscalização da segurança de barragens destinadas a geração hidrelétrica. A busca feita nesta pesquisa não encontrou nenhuma resolução normativa ou diretriz da ANEEL que abordasse a borda livre da barragem.

Analizando os resultados encontrados de outros países, o South African Committee on Large Dams (SANCOLD, 1990) define a borda livre total de uma barragem como a distância vertical entre o nível normal máximo de abastecimento e o topo da barragem sem extravasamento, excluindo a curvatura, mas incluindo parapeitos adequadamente projetados e barreiras contra ondas que se elevam acima do topo. Esse conceito foi revisto em SANCOLD (2011) e a definição permaneceu a mesma.

O Bureau of Indian Standards (1993) define a borda livre como a distância vertical entre a crista do aterro (excluindo a curvatura) e a superfície da água parada do reservatório, onde a normal considera o nível cheio do reservatório, e a mínima considera o nível máximo de água calculado para a enchente projetada. Nos aspectos de análises e projetos de barragens de aterro, o conceito de borda livre permanece o mesmo (Central Water Commission, 2019). Na Alemanha, considera-se a distância vertical entre o topo da estrutura de contenção e o nível máximo de armazenamento (Pohl, 2014). A Austrália, em geral, considera o mesmo conceito definido pelo ICOLD (1978) (NRW, 2007).

Na segurança de barragens de contenção de rejeitos de mineração, o ICOLD (1982) e o ICOLD (1989) foram os primeiros documentos a citar a borda livre nesse contexto. A especificação do conceito apresentada em ICOLD (1982) definiu-a apenas como a altura entre o nível da água e a crista do aterro. A Austrália Ocidental foi pioneira nesse quesito por definir bordas livres

específicas para barragens de rejeito, estabelecendo três tipos de borda livre: total, operacional, e de praia (DME, 1999). Como afirmado por Szymanski e Davies (2004), até então a maioria das diretrizes de segurança de barragem disponíveis não levava em conta as especificidades das barragens de rejeito.

O ANCOLD (2019) apresenta a borda livre total em uma barragem de rejeitos como a distância vertical entre o nível máximo operacional da lagoa de rejeitos e a crista da barragem, considerando armazenamento para tempestades extremas, descarga do vertedouro, borda livre para ondas e bordas livres de contingência. Quelopana e Barrera (2015) definiram em seu trabalho que a borda livre focada na operação de um reservatório de rejeitos é mais importante que uma definição na fase de projeto, com isso eles estabeleceram a borda livre de projeto hidráulico, de projeto de rejeitos, a borda livre de operação hidráulica e de operação de rejeitos.

No Brasil, a primeira edição da NBR 13028 não apresenta o conceito de borda livre (ABNT, 1993), porém, na sua terceira edição com os requisitos de elaboração e apresentação de projetos de barragens para contenção de rejeitos, a borda livre é estabelecida pelo mesmo conceito dado pela ANA (2016a) (ABNT, 2017). A Vale S.A. é uma mineradora multinacional brasileira e uma das maiores empresas de mineração do mundo, e não cita a borda livre de barragem em seu manual de barragens e estrutura de armazenamento de rejeitos (Vale, 2024).

A Agência Nacional de Mineração (ANM), responsável pela fiscalização de barragens de mineração no Brasil, não apresenta definição de borda livre de barragens, apenas apresentou a falta da borda livre como um dos critérios que enquadram uma barragem na categoria de risco alta (ANM, 2022). Como requisito, a ANM (2022) diz que a borda livre mínima deve ser maior ou igual a 1,0m, ou conforme projeto, o que for maior.

Outros autores também estabeleceram suas definições de borda livre, como Soares (2010) em seu livro sobre barragem de rejeitos descreveu a borda livre simplesmente como a distância vertical entre o nível da água e o topo do aterro. Bernedo et al. (2008) apresentam as

definições dadas pelo USACE (1991,1997) e USBR (1992). Em um estudo sobre a relação entre a borda livre e o volume galgado pela barragem, Tesema (2020) dá a mesma definição simples que Soares (2010) e estabelece a borda livre como um dos parâmetros dominantes que influencia no volume de galgamento.

Fatores de influência considerados no dimensionamento

O EM 1110-2-1420 (USACE, 1997, 2018) fornece informações sobre estudos de engenharia hidrológica para projetos de reservatórios. De acordo com o USACE (1997), a determinação da borda livre geralmente se baseia nas condições máximas prováveis de vento e no nível normal de operação do reservatório, pois é considerado improvável que o nível máximo provável do reservatório seja atingido simultaneamente a condições máximas de vento. Entretanto, na versão mais atual do manual a determinação se baseia nas características prováveis do vento suscetíveis de acontecer simultaneamente a um evento de cheia máxima (USACE, 2018). Em ambas as edições, os fatores considerados são a característica das ondas, a configuração do vento e o avanço das ondas, entre outros aspectos como fetch efetivo, e as relações entre a duração dos ventos e altura das ondas (USACE, 1997, 2018).

Os fatores considerados pelo USBR (1981) são a altura, configuração e avanço das ondas geradas pelo vento e geradas por terremotos, e deslizamentos de terra; assentamento do aterro e da fundação; incerteza hidrológica e mau funcionamento dos vertedouros. A revisão de 1992 ainda considera os mesmos fatores (USBR, 1992). Apesar de abordar as incertezas hidrológicas (cálculo da cheia máxima), o USBR (1981, 1992) assim como USACE (1997) considera improvável que ocorram ventos máximos quando houver eventos de cheia máxima. Portanto, segundo essas fontes, a borda livre deve ser calculada de acordo com o conjunto dos fatores que tenham probabilidade de ocorrer simultaneamente.

O ICOLD (2011) assume que o projeto da borda livre resulta da mesma combinação de fatores citados pelo USBR (1992), e concorda que quando a borda livre for dimensionada considerando o nível máximo de cheia do

reservatório, condições de vento menores podem ser adotadas. A Eletrobrás (1999) considera os mesmos fatores. A ANA (2016b) por sua vez divide os fatores de influência para o cálculo da borda livre entre quantificáveis (regime de ventos, fetch, tipo de barragem, sismicidade da região) e não quantificáveis (grau de conhecimento das condições hidrológicas, por exemplo).

A SANCOLD (1990) define que a borda livre é composta por dois componentes, sendo a sobrecarga de inundação acima do nível máximo de abastecimento o componente primário, e o componente secundário que aborda os efeitos de ventos e ondas. As diretrizes de borda livre de barragem da SANCOLD (2011) mantêm os componentes de contribuição de borda livre definidos em SANCOLD (1990), mas explica os mecanismos de condução de cada componente, isto é, os processos físicos ou fatores que influenciam cada componente. Os principais componentes, não cumulativos, para o cálculo da borda livre total são: sobrecarga de inundação, configuração do vento, avanço das ondas, seiches sísmicos, ondas induzidas por terremotos e deslizamentos de terra, abertura ou fechamento de vertedouros (SANCOLD, 2011).

Os fatores considerados na estimativa de borda livre do Indian Standart (1993) são as características das ondas (altura e comprimento), configuração do vento acima do nível de água adotado como cota de referência, inclinação do talude da barragem e rugosidade do revestimento. Esta norma indiana não leva em conta os efeitos de terremoto, assentamento, ou seiches sísmicos. Nos aspectos de análises e projetos de barragens de aterro, os fatores permanecem os mesmos (Government of India, 2019).

As diretrizes australianas dizem que a magnitude da borda livre depende da resistência da barragem às ondas e galgamento, da direção e magnitude dos ventos, fetch efetivo das ondas geradas pelo vento, profundidade do armazenamento, da probabilidade da coincidência de altos níveis de inundação com ventos fortes, e do potencial recalque da crista da barragem (NRW, 2007).

Nas diretrizes de barragens de mineração pesquisadas, não foram encontradas especificações sobre fatores de influência no cálculo de borda livre para barragem de contenção

de rejeitos. As normas internacionais de borda livre priorizam os aspectos hidráulicos, mas subestimam o nível dos rejeitos, assumindo que seu depósito segue um padrão de crescimento sem grandes variações impactantes, tanto no aspecto de design quanto operacional (Quelopana e Barrera, 2015).

Metodologias de cálculo da borda livre

Os estudos do Beach Erosion Board nº 132 (USACE, 1962) foram precursores no desenvolvimento de metodologias para cálculo da borda livre. O método aplicado pelo corpo de engenheiros utiliza as relações de previsão de onda de Sverdrup–Munk com as revisões de Bretschneider, através de gráficos adimensionais que relacionam altura e períodos de ondas com a velocidade do vento e os comprimentos de fetch. Esse método foi desenvolvido a partir de um estudo de campo realizado nos reservatórios de Fort Peck e Denison, e os dados da análise consistiram em registros da superfície da água, e registros contínuos de velocidade e direção do vento.

Foi considerado que as velocidades do vento medidas são aumentadas à medida que o vento sai da área terrestre e atravessa a água, pois as velocidades de vento sobre a água são maiores (em 130% de acordo com o estudo). O método desenvolvido para obter os comprimentos de fetch consiste em construir 15 radiais a partir da estação de ondas em intervalos de 6° (até um ângulo de 45° em ambos os lados da direção do vento) e estender essas radiais até intersectarem a linha costeira. O componente de comprimento de cada radial em direção paralela à direção do vento é medido e multiplicado pelo cosseno do ângulo entre a radial respectiva e a direção do vento. Os valores resultantes para cada radial são somados e divididos pela soma dos cossenos de todos os ângulos individuais, conforme a equação:

$$F = \frac{\sum x_i \cos \alpha_i}{\sum \cos \alpha_i} \quad (1)$$

Esse método de cálculo do fetch foi apresentado a primeira vez no Beach Erosion Board nº 70 por Saville (1954). Outra grande contribuição feita por esse estudo foi a aceitação geral da fórmula da elevação do vento (wind setup), que é o acúmulo de água na extremidade da

direção do vento causada pelo estresse horizontal que o vento exerce sobre a superfície da água. Na equação 2 abaixo, S é a elevação do vento, U é a velocidade do vento, D é a profundidade média do lago, e F é o fetch.

$$S = K \frac{U^2 F}{D} N \cos \theta \quad (2)$$

N é um coeficiente de forma do reservatório que pode ser aproximado como 1,0. θ é o ângulo entre o vento e o fetch e o $\cos \theta$ pode ser considerado como 1,0. K é uma constante, um valor de $K=1/1400$ pode ser aceito como um bom valor médio baseado na faixa de valores propostos por diversos pesquisadores (USACE, 1962). A equação pode ser simplificada por:

$$S = \frac{U^2 F}{1400 D} \quad (3)$$

Os valores obtidos pelos cálculos e considerações anteriores são comparados com os ábacos que relacionam altura e período das ondas com a profundidade do reservatório, o valor do fetch com a elevação do vento, e a elevação do vento com a declividade do talude da barragem. Para a análise, foram considerados dois níveis de água no reservatório: o nível normal operacional combinado com ventos máximos, e o nível máximo do reservatório que poderia ser alcançado durante a enchente projetada para a comporta combinado com ventos normais.

Para todos os efeitos, no estudo é considerado improvável que ventos maiores ocorram simultaneamente à enchente máxima. Um ábaco final entrega os valores de elevação da onda de acordo com os dados interpolados pelos ábacos anteriores. De acordo com essas elevações finais do avanço das ondas obtidas, compara-se

com o nível de elevação de referência do reservatório tomado inicialmente. A partir disso, os engenheiros projetistas podem definir qual altura de borda livre seria necessária para garantir a segurança da estrutura e evitar o transbordamento.

As considerações sobre o vento e análise de ondas feitas pelo Beach Erosion Board nº 132 (USACE, 1962) foram replicadas em diversos outros estudos, assim como o cálculo do fetch e da elevação do vento (equação 3). O EM 1110-2-1414 (USACE, 1989) aborda todas essas considerações e foi utilizado como referência para o manual do USACE (1997). Entretanto, a edição atualizada do USACE (2018) apresenta outra metodologia de cálculo do fetch efetivo a partir de nove radiais, separadas por 3 graus e abrangendo 12 graus de cada lado da linha central, criando um leque total de 24 graus. Nesse método, é necessário considerar vários fetches efetivos e suas velocidades do vento na análise para determinar a altura de onda mais crítica.

Para o cálculo da estimativa de borda livre, o EM 1110-2-1420 (USACE, 2018) apresenta um exemplo completo para a barragem de Fort Peck para ventos com frequência de 4, 2 e 1%, contendo 25, 50 e 100 anos de período de retorno. Os dados de velocidade e duração dos ventos para a análise são específicos do local, e são escolhidas as velocidades que se encontram na direção do maior fetch encontrado. Depois de selecionadas as velocidades do vento, calcula-se a profundidade média do reservatório ao longo do fetch efetivo, determinada a partir de várias seções transversais medidas.

A elevação do vento é calculada conforme a equação 3 e a altura significativa da onda (4) e seu período (5) são calculados de acordo com as equações do EM 1110-2-1100 (USACE, 2008). Também é definida a inclinação do talude do aterro por onde a onda passará.

$$H_s = \frac{4,13 \times 10^{-2}}{g} [0,001 U^2 (1,1 + 0,035 U)] \times \left[\frac{g F_e}{(0,001 U^2 (1,1 + 0,035 U))} \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$T_s = \frac{0,651}{g} [0,001 (1,1 + 0,035 U) U^2]^{1/2} \times \left[\frac{g F_e}{(0,001 (1,1 + 0,035 U) U^2)} \right]^{1/3} \quad (5)$$

O avanço das ondas (wave run-up) também é calculado a partir das equações do EM 1110-2-1100, como descrita na equação 7 abaixo. Na equação 6, ξ é um parâmetro de quebra de ondas, chamado surf-similarity. Na equação 7, A e C são coeficientes dependentes de ξ e $i\%$ (USACE, 2008). Os parâmetros γ são fatores de redução que podem ser assumidos como 1. A borda livre necessária é encontrada somando a elevação máxima da onda (nível excedido por $i=2\%$ das ondas incidentes) com a elevação do vento (S).

$$\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{g T_s^2}}} \quad (6)$$

$$\frac{R_{i\%}}{H_s} = (A\xi + C)\gamma_r\gamma_b\gamma_h\gamma_\beta \quad (7)$$

A metodologia apresentada pelo USBR (1981) segue os mesmos procedimentos do USACE (1962) com algumas modificações. No caso da falta de ventos específicos do local, o USBR apresenta mapas de isolinhas que conectam pontos de velocidades de vento iguais em intervalos de tempo específicos. Em todos os métodos apresentados, as velocidades do vento terrestre foram ajustadas para 10 metros (25 pés) acima do nível do solo. O USBR também considera um fator de majoração de 1,3 para a velocidade do vento sobre a água.

O cálculo do fetch efetivo é o mesmo trabalhado pelo USACE (1962), assim como as relações entre a velocidade do vento sobre a água e a duração do vento, a altura significativa da onda e o período da onda, são obtidas pelos mesmos ábacos apresentados pelo documento. Para todos os casos, a altura significativa das ondas é a média do terço mais alto das ondas no espectro de ondas. A fórmula utilizada para cálculo da elevação do vento também é igual a equação 3 explicitada anteriormente, e o cálculo do avanço da onda é feito através da fórmula simplificada a seguir:

$$R_s = \frac{H_s}{0,4 + (H_s/L)^{0,5} \cot \theta} \quad (8)$$

Em que: H_s é a altura da onda significativa, L é o comprimento da onda, e θ é o ângulo da face à montante da barragem com a linha do horizonte.

O procedimento apresentado pelo USBR (1981) calcula a borda livre mínima e a borda livre normal seguindo o mesmo método, entretanto a borda livre normal utiliza a altura significativa das ondas majorada em 1,27 e as velocidades do vento consideradas são as máximas esperadas (a milha mais rápida com 1 minuto de duração, e a velocidade de vento de verão máxima em 1 hora de duração). Por fim, a borda livre é a soma da elevação do vento com o avanço da onda.

O memorial técnico do USBR (1992) apresenta um método probabilístico, além do método convencional de 1981, para análise da borda livre em novas barragens. Esse método envolve duas etapas principais, primeiro a derivação da distribuição de probabilidade acumulada da soma de duas variáveis aleatórias independentes ($Z=X+Y$), sendo X a elevação da água durante uma enchente e Y o incremento de altura causado pelo vento. A probabilidade de excedência de uma determinada elevação da crista é expressa para um intervalo de 1 hora dentro de um ano. A segunda etapa consiste na conversão dessa probabilidade horária de excedência em uma probabilidade anual. A probabilidade é calculada usando dados de vento locais e transposta para o reservatório com fatores de ponderação para cada estação.

O fetch é calculado pelo somatório dos comprimentos das radiais, espaçados em 3° , dividido pelo número de radiais escolhido. As durações mínimas para que a velocidade do vento gere as maiores ondas são obtidas por um ábaco utilizado no EM 1110-2-1414 (USACE, 1989), assim como a altura significativa da onda. Os dados relacionados a avanço da onda e elevação do vento são calculados conforme USBR (1981). Os dados de inundação são divididos em intervalos entre a capacidade de conservação e o nível máximo de armazenamento, considerando diferentes eventos de inundação com durações relacionadas graficamente à probabilidade anual.

Diversas probabilidades são calculadas para cada intervalo de elevação da água, combinando a probabilidade horária do vento com

a do intervalo da água. A probabilidade anual do projeto é determinada para cada elevação-alvo da crista, levando em conta runup e setup gerados pelo vento, e representada graficamente. A elevação da crista que satisfaz os requisitos de borda livre é escolhida com uma probabilidade de 0,0001 recomendada para segurança.

O método probabilístico utilizado no USBR (1992) ensejou a criação de um programa computacional próprio para seus cálculos, o PFARA (Probabilistic Freeboard and Riprap Analysis), entretanto este programa não foi utilizado nos seus 20 anos de existência porque o método apresentado no USBR (2012) é mais simples e dá bons resultados segundo o autor. O USBR (2012) calcula as probabilidades de ocorrência dos ventos segundo o USBR (1992), porém a duração mínima do vento (9), altura significativa da onda (10) e o período (11) são calculados pelas fórmulas dadas.

$$t_{\min} = 1,87(F^{0,67}/V^{0,34}) \quad (9)$$

Sendo F o fetch efetivo e V a velocidade do vento sobre a água.

$$H_s = 0,0245 \times F^{\frac{1}{2}} \times V(1,1 + 0,0156V)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$T = 0,464 \times F^{\frac{1}{3}} \times V^{\frac{1}{3}}(1,1 + 0,0156V)^{\frac{1}{6}} \quad (11)$$

O cálculo do avanço da onda é feito através da mesma equação 5 utilizada no USBR (1981).

Entre os boletins do ICOLD analisados, o boletim nº 157 do ICOLD (2011), que trata sobre projeto de pequenas barragens, foi o único documento que abordou o dimensionamento da borda livre. Na metodologia apresentada, o comitê concorda com os cálculos utilizados pelo USACE (1997) e USBR (1992) para elevação do vento e avanço de ondas.

O método de dimensionamento da borda livre apresentado pela SANCOLD (1990) tratava-se de uma combinação do pior cenário possível entre todos os fatores de influência considerados. Os cálculos de fetch, altura significativa da onda, duração mínima do vento, período, elevação de

vento e avanço de ondas são feitos de acordo com Saville, McClendon e Cochran (1962). Na atualização das diretrizes, o SANCOLD (2011) utiliza como referência o The Rock Manual (2007) e recomenda o uso de modelos numéricos para previsão de ondas de vento, em especial o modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore).

Os principais dados de entrada necessários para o modelo numérico SWAN de acordo com o SANCOLD (2011) são a configuração da superfície da água do reservatório, a topografia do fundo do reservatório e a velocidade e direção do vento sobre o reservatório. Os principais resultados obtidos a partir do modelo inclui altura significativa da onda, período de pico da onda, período médio da onda e direção média da onda sobre a superfície do reservatório. A borda livre é obtida pela mesma combinação de pior cenário abordada no SANCOLD (1990).

A Eletrobrás (1999) recomenda a metodologia de cálculo do USBR para barragens com altura maior que 10 metros. A Eletrobras (2003) não apresenta metodologia de cálculo, apenas requisitos mínimos de referência baseados no trabalho de Saville, McClendon e Cochran (1962), que foi utilizado no USACE (1962).

A ANA (2016b) apresenta uma metodologia de cálculo baseada no método convencional do USBR (1992) para encontrar o fetch e a maré gerada pela ação do vento (equação 3). Para estimar a altura significativa das ondas e o seu período, a ANA recomenda as fórmulas de Martins (2002) (equação 12 e 13, respectivamente).

$$H_s = \frac{V^{1,23} F_e^{0,5}}{422} \quad (12)$$

$$T = 0,33V^{0,41} F_e^{0,33} \quad (13)$$

A elevação das ondas é dada como o espraiamento por Meer e Janssen (1994) (equação 14) onde K é um fator de rugosidade da superfície do talude.

$$S_1 = 1,6K \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s/L}} H_s \quad (14)$$

Mesmo deixando claro que considerar a sismicidade da região no Brasil é algo irrelevante, a ANA apresenta uma forma para calcular a altura da onda gerada por um sismo. Por fim, a ANA não deixa expresso qual o cálculo final para obtenção da borda livre. Com as fórmulas apresentadas, subentende-se que seria a soma de todos os fatores.

Ambas as diretrizes indianas (Indian Standart, 1993; Government of India, 2019) utilizam a mesma metodologia de cálculo do USACE (1962) combinadas com as diretrizes do USACE (1997) e USBR (1981). As demais fontes encontradas não apresentam informações suficientes sobre metodologias de cálculo da borda livre, portanto seus resultados não foram abordados neste tópico.

Conclusão

O estudo aprofundado sobre os aspectos que envolvem o dimensionamento da borda livre possibilitou esclarecer as questões levantadas inicialmente sobre a origem dos estudos, os principais fatores de influência e as metodologias de cálculo da borda livre. É possível concluir que houve evolução na definição da borda livre de uma barragem desde suas primeiras concepções baseadas em estudos oceânicos durante a Segunda Guerra Mundial até as práticas contemporâneas adaptadas para reservatórios interiores.

Dos trabalhos encontrados, percebe-se de antemão que há poucos estudos nacionais abordando o tema em questão, o que já indica uma lacuna do conhecimento a ser preenchida no Brasil. Uma parte significativa foi publicada por órgãos norte-americanos, destacando o protagonismo do U.S. Army Corps of Engineers e do U.S. Bureau of Reclamation. As orientações estabelecidas pelo USACE e USBR ao longo dos anos consolidaram o conceito de borda livre, destacando a importância de considerar tanto a ação do vento quanto as condições máximas de inundação.

No Brasil, das três agências responsáveis pela fiscalização da segurança de barragens ANA, ANM e ANEEL, apenas a ANA estabeleceu o conceito de borda livre, adaptando os conceitos internacionais às realidades locais. A Eletrobras, que é uma empresa de capital aberto líder em geração e transmissão de energia elétrica,

apresenta definições e recomendações de borda livre. Com isso, a ausência de definições específicas da ANM e ANEEL, evidencia a necessidade de padronização e detalhamento nos critérios de segurança.

Quanto aos fatores de influência, os métodos consideram improváveis a ocorrência simultânea de níveis máximos de vento e cheias, porém esta suposição está sendo repensada nos manuais mais atuais. Isso pode ser devido às mudanças climáticas que causam eventos extremos mais frequentes. Ademais, todas as fontes convergem para a consideração dos mesmos fatores no geral: caracterização das ondas e configurações do vento. É interessante observar que os estudos de países específicos, como Índia, Austrália e Brasil, contribuem com diretrizes adaptadas às realidades regionais, bem como particularidades locais como sismicidade e potenciais recalques.

No entanto, uma lacuna evidente é a ausência de especificações detalhadas sobre a borda livre para barragens de contenção de rejeitos nas diretrizes de mineração. Estudos como os de Quelopana e Barrera (2015) apontam para a necessidade de integrar mais fatores operacionais e de design específicos dessas estruturas, uma vez que os padrões de crescimento e depósito dos rejeitos podem variar significativamente, impactando a segurança da barragem.

Ao observar as metodologias de cálculo encontradas, percebe-se uma tendência a considerar o mesmo padrão de cálculo das configurações do vento definidos pelo USACE. No cálculo da caracterização das ondas, o USBR apresenta um modelo que foi referenciado pela maioria dos estudos analisados. Apesar de existir novas formas de calcular os ventos e as ondas, como modelos numéricos computacionais, as fórmulas de entrada continuam com as mesmas considerações do século XX.

Outra lacuna significativa é a consideração dos efeitos da sobrecarga de inundação e dos fenômenos climáticos no cálculo da borda livre. Embora a maioria dos estudos reconheça a importância do fator hidrológico na definição da borda livre, os modelos de cálculo atuais não quantificam adequadamente esses efeitos, nem fornecem uma metodologia precisa

para calcular a cheia de projeto que seria considerada na borda livre.

Conclui-se que apesar da evolução dos estudos sobre os cálculos da borda livre em relação ao desenvolvimento e aplicação de fórmulas matemáticas e cálculo numérico, faltam estudos recentes que incluam as mudanças do cenário climático observadas nos últimos anos como fatores de influência para o cálculo da altura da borda livre.

Agradecimentos

A autora Rute Cavalcante Pereira agradece à CAPES pela bolsa de mestrado do Programa de Excelência Acadêmica.

Referências

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1993). NBR 13028: Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração. Rio de Janeiro, RJ.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). NBR 13028 – Mineração: elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos (3th ed.). Rio de Janeiro, RJ.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2016a). Guia Prático de Pequenas Barragens (8th ed.). Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Brasília, DF.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2016b). Diretrizes Para Elaboração de Projetos de Barragens (5th ed.). Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Brasília, DF.

ANCOLD, Australian National Committee on Large Dams. (2019). Guidelines on Planning, Design, Construction, Operation and Closure of Tailings Dams (revision 1). Australia.

ANM, Agência Nacional de Mineração (2022). Resolução ANM nº 95, de 07 de fevereiro de

2022. Ministério de Minas e Energia. Brasília, DF.

Bernedo, C. E., Hadley, L. L., & Haapala, J. C. (2008). Am I Underestimating or Overestimating My Dam Freeboard Design? in World Environmental and Water Resources Congress 2008. Ahupua'a, Honolulu, Hawaii, United States.

Bureau of Indian Standards. (1993). Freeboard requirements in embankment dams – Guidelines (IS 10635). Indian Standards. New Delhi, India.

Carneiro, B. L. D. S., Souza Filho, F. d. A. d., Carvalho, T. M. N., & Raulino, J. B. S. (2022). Hydrological risk of dam failure under climate change. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 27(19). <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220017>

Central Water Commission. (2019). Analysis and Design Aspects of Embankment Dams. Government of India. Pune, India.

CINS. (1968). Boletim Oficial del Estudio, Comision Interministerial de Normas Sismorresistentes. P.G., S-1, Instituto Geografico y Cadastral.

Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1992). Water wave mechanics for engineers and scientists: Vol. 2. Advanced series on ocean engineering. World Scientific. <https://doi.org/10.1142/1232>

DME, Department of Minerals and Energy. (1999). Guidelines on the safe design and operating standards for tailings storage. Government of Western Australia. Australia.

DNRW, Department of Natural Resources and Water. (2007). Guidelines on acceptable flood capacity for dams. Queensland Government's. Australia.

Eletrobras. (1999). Diretrizes para projetos de pequenas centrais hidrelétricas. Brasília, DF. Disponível: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>. Acesso: 27 abr. 2024.

- Eletrobras. (2003). Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. Brasília, DF. Disponível: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>. Acesso: 27 abr. 2024.
- Eletrobras. (2022, 11 de junho). Segurança de Barragens Hidrelétricas (no. 2) [Audio podcast]. In Série Especial 60 anos Eletrobras. Adriana de Broux. <https://eletrobras.com/pt/paginas/historia.aspx>. Acesso: 27 abr. 2024.
- Huber A. & Hager W.H. (1997). Forecasting Impulse Waves in Reservoirs. 18th ICOLD Congress. Florence, C31: 993-1005.
- ICMM, International Council on Mining and Metals. (2021). Tailings management: Good practice guide. Disponível: <https://www.icmm.com/en-gb/guidance/innovation/2021/tailings-management-good-practice>. Acesso: 07 maio 2024.
- ICOLD, International Commission on Large Dams. (1978). Technical Dictionary on Dams. Paris, France.
- ICOLD, International Committee on Large Dams (1982). Manual on tailings dams and dumps (Bulletin nº 45). Paris, France.
- ICOLD, International Committee on Large Dams (1987). Dam Safety: Guidelines (Bulletin nº 59). Paris, France.
- ICOLD, International Committee on Large Dams (1989). Tailings dam safety: Guidelines (Bulletin nº 74). Paris, France.
- ICOLD, International Committee on Large Dams (2011). Small Dams: Design, Surveillance and Rehabilitation (Bulletin nº 157). Paris, France.
- ICOLD, International Committee on Large Dams (2019). Statistical Analysis of Dam Failures (Bulletin nº 188). Paris, France.
- ICOLD, International Committee on Large Dams. (1982). Manual on tailing dams and dumps (Bulletin no. 45). Paris, France.
- ICOLD, International Committee on Large Dams. (2019). Statistical Analysis of Dam Failures (Bulletin nº 188). Paris, France.
- Martins, R. (2002). A folga em barragens: memória no. 828. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC. Lisboa, Portugal.
- Meer, J. W. van der, & Janssen, J. P. (1994). Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments. Delft hydraulics, 485. Emmeloord, Netherlands.
- Mello, Flavio M. de; Sandroni, Sandro S.; Guidicini, Guido. (2021). Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragem e obras anexas no Brasil. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2021. ISBN 978-65-990860-1-4.
- Morrill, J., Chambers, D., Emerman, S., Harkinson, R., Kneen, J., Lapointe, U., Maest, A., Milanez, B., Personius, P., Sampat, P., and Turgeon, R. (2022). Safety First: Guidelines for Responsible Mine Tailings Management, Earthworks, MiningWatch Canada and London Mining Network, XY pages.
- PERINI, Daniel Sosti. (2009). Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. Brasília, DF.
- Pohl, R. (2014). Freeboard allowance at rivers – experiences from Germany. In River Flow 2014. CRC press.
- Quelopana, H., & Barrera, S. (2015). A definition of freeboard. In 3rd International Seminar on Tailings Management- Tailings 2015. Santiago, Chile.
- SANCOLD, South African National Committee on Large Dams. (1990). Guidelines on Freeboard for Dams (Report no. 3). South Africa.
- SANCOLD, South African National Committee on Large Dams. (2011). Guidelines on Freeboard for Dams (2). Water Research Commission. South Africa.

- Saville, T. (1952). Wind set-up and waves in shallow water (technical memorandum no. 27). Beach Erosion Board, Corps of Engineers. Denver, Colorado.
- Saville, T. (1954). The effect of fetch width on wave generation (technical memorandum no. 70). Beach Erosion Board, Corps of Engineers. Denver, Colorado.
- Saville, T., McClendon, E. W., & Cochran, A. L. (1962). Freeboard allowances for wave in inland reservoirs. Journal of the Waterways and Harbors Division, 88(2). <https://doi.org/10.1061/JWHEAU.0000281>
- Soares, L. (2010). Barragem de Rejeitos. In Tratamento de Minérios (5ª ed., pp. 831–896). Rio de Janeiro, RJ.
- Sverdrup, H., & Munk, W. (1947). Wind, sea, and swell: Theory of relations for forecasting (Technical report number 1). U.S. Hydrographic Office. California, U.S.
- Szymanski, M. B., & Davies, M. P. (2004). Tailings dams: Design criteria and safety evaluations at closure. In British columbia mine reclamation symposium. University of British Columbia. <https://doi.org/10.14288/1.0042456>
- Tessema, N. N. (2020). Physical modelling of dam overtopping from landslide generated waves. Addis Ababa University. Addis Ababa, Ethiopia.
- Tessema, N. N., Lia, L., Jabir, A. K., & Sigtryggdottir, F. G. (2017). The impact of freeboard on embankment dams. In HydroAfrica 2017. Marrakesh, Morocco.
- The Rock Manual. (2007). The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). CIRIA; CUR; CETMEF. C683, CIRIA, London.
- USACE, U.S. Army Corps of Engineers. (1962). Waves in Inland reservoirs (no. 132). Beach Erosion Board. Washington, DC.
- USACE, U.S. Army Corps of Engineers. (1976). Wave runoff and wind setup on reservoir embankments (EM 1110-2-221). Engineering Technical Letter. Washington, DC.
- USACE, U.S. Army Corps of Engineers. (1979). Recommended guidelines for safety inspection of dams (ER 1110-2-106). Office of the Chief of Engineers. Washington, DC.
- USACE, U.S. Army Corps of Engineers. (1986). Storm surge analysis and design water level determinations (EM 1110-2-1412). Office of the Chief of Engineers. Washington, DC.
- USACE, U.S. Army Corps of Engineers. (1989). Water levels and wave heights for coastal engineering design (EM 1110-2-1414). Office of the Chief of Engineers. Washington, DC.
- USACE, U.S. Army Corps of Engineers. (1991). Inflow Design Floods for Dams and Reservoirs (ER 1110-8-2). Washington, DC.
- USACE, U.S. Army Corps of Engineers. (1997). Hydrologic Engineering Requirements for reservoirs (EM 1110-2-1420). Office of the Chief of Engineers. Washington, DC.
- USACE, U.S. Army Corps of Engineers. (2006). Coastal Engineering Manual (EM 1110-2-1100). Office of the Chief of Engineers. Washington, DC.
- USACE, U.S. Army Corps of Engineers. (2008). Coastal Engineering Manual (EM 1110-2-1100). Office of the Chief of Engineers. Washington, DC.
- USACE, U.S. Army Corps of Engineers. (2018). Hydrologic Engineering Requirements for reservoirs (EM 1110-2-1420). Office of the Chief of Engineers. Washington, DC.
- USBR, U.S. Bureau of Reclamation. (1981). Freeboard criteria and guidelines for computing freeboard allowances for storage dams (no. 2). Assistant Commissioner - Engineering and Research. Denver, Colorado.
- USBR, U.S. Bureau of Reclamation. (1992). Freeboard criteria and guidelines for

- computing freeboard allowances for storage dams (no. 2 revised). Assistant Commissioner - Engineering and Research. Denver, Colorado.
- USBR, U.S. Bureau of Reclamation. (2012). Design standards nº 13 – Embankment dams (DS-13(6)-2). Technical Service Center. Denver, Colorado.
- Vale (2024). Manual de barragens e estrutura de armazenamento de rejeitos (EARs) da Vale. Disponível: <https://vale.com/pt/biblioteca-de-documentos>. Acesso: 07 maio 2024.
- Water Research Commission. (2011). Guidelines on Freeboard for Dams: Literature Review and Case Studies (1). University of Stellenbosch. South Africa.
- Zhang, L. M., Xu, Y., & Jia, J. S. (2009). Analysis of earth dam failures: a database approach. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 3(3), 184-189. <https://doi.org/10.1080/17499510902831759>.
- Assunção, A., Mattos Neto, P. S. G. de, & Vasconcelos, E. (2022). Um Sistema Baseado Em Combinação de Modelos para Previsão de Velocidade do Vento. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, 7(2), 1–11. <https://doi.org/10.25286/rep.v7i2.2206>
- Furtado, F. de A. (2024). Avaliação do Impacto das Mudanças Climáticas na Segurança de Barragens: Estudo de Caso da Barragem Banabuiú [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, UFC.]. <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/76985>
- Herbozo, J. E., Muñoz, L. E., Guerra, M. J., Minaya, V., Haro, P., Carrillo, V., Manciat, C., & Campozano, L. (2022). Non-Stationary Hydrological Regimes Due to Climate Change: The Impact of Future Precipitation in the Spillway Design of a Reservoir, Case Study: Sube Y Baja Dam, in Ecuador. In *Atmosphere* (Vol. 13, Issue 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/atmos13050828>
- Lima, G. C. (2024). Explorando as tendências climáticas da velocidade do vento no Brasil (1961-2020) e propondo um modelo híbrido para previsões [Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte]. <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/58235>
- Marques, M. (2013). Modelagem paramétrica bidimensional para simulação do campo de ondas em águas continentais [Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná]. <https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/handle/1884/41806>
- Miranda, V. C. P., Silva, S. de O., Silva Junior, M. M., & Souza, K. do N. (2022). Análise de Dados na Flutuação Horária da Velocidade do Vento na Região Nordeste. *Proceedings Do XXIV Congresso Brasileiro de Automática*. <https://doi.org/10.20906/cba2022/3195>
- Nietsche, M. L. (2022). Avaliação das condições de manutenção e segurança das barragens e eclusas do Fandango, Anel de Dom Marco, Amarópolis e Bom Retiro no Estado do Rio Grande do Sul [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Santa Cruz do Sul]. <http://hdl.handle.net/11624/3386>
- Oztunali Ozbahceci, B., & Bilyay, E. (2018). Effect of the armor crest freeboard relative to the crown wall freeboard on wave overtopping for simple rubble mound slopes. *Ocean Engineering*, 169, 511–528. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.09.043>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. In *The BMJ* (Vol. 372). BMJ Publishing Group. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Raphaldini, B., Wakate Teruya, A. S., Silva Dias, P. L., Chavez Mayta, V. R., & Takara, V. J. (2020). Normal Mode Perspective on the 2016 QBO Disruption: Evidence for a Basic State Regime Transition. *Geophysical Research Letters*, 47(14). <https://doi.org/10.1029/2020GL087274>