
Contribuição ao estudo do índice de segurança de barragens – ISB

Contribution to the study of the dam safety index (DSI)

Daniel Prenda de Oliveira Aguiar¹; Laura Maria Canno Ferreira Fais²; Ana Inés Borri Genovez³ e José Gilberto Dalfré Filho⁴

¹ Mestre em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil
daniel.prenda@gmail.com

² Pós-doutoranda na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil
laura.canno77@yahoo.com.br

³ Professora Livre docente na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil
abgenovez@gmail.com

⁴ Professor Assistente Doutor na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil
dalfré@fec.unicamp.br

Recebido: 15/01/14 - Revisado: 28/10/14 - Aceito: 01/12/15

RESUMO

O Brasil emprega como fonte principal a energia provinda dos aproveitamentos hidráulicos. Isto requer um conjunto de estruturas e equipamentos funcionando adequadamente e em segurança. Historicamente, alguns países se preocupam com a utilização de longo prazo destas estruturas e possuem implantada legislação que norteia a questão da segurança de barragens. No Brasil, recentemente, em 2010, foi sancionada a Lei Federal nº 12.334, que dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens. Em 2012, a Resolução nº 143 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos estabeleceu critérios gerais de classificação de barragens e as Resoluções nº 742/11 e nº 91/12 da Agência Nacional de Águas estabeleceram critérios para o Plano de Segurança de Barragens e das inspeções regulares de segurança. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é estabelecer um método abrangente para ser utilizado pelos gestores dos barramentos, a partir de modificações no Índice de Segurança de Barragens (ISB) proposto por Zuffo (2005). O ISB modificado é composto por critérios tecnológicos em que foram incorporadas as recomendações das regulamentações recentes. Aos critérios técnicos são atribuídos pesos que compõem um índice produtivo global, indicando o estado de segurança de uma barragem. O ISB modificado é de fácil aplicação e uma ferramenta útil para o gestor da estrutura, órgãos governamentais e agências de fiscalização na análise da segurança das barragens. Sua aplicação permite tanto uma visão global da segurança do empreendimento, bem como uma visão pontual da segurança. Este fato auxilia a priorização de ações de manutenção periódica e preditiva na estrutura.

Palavras Chave: Estruturas hidráulicas. Política Nacional de Segurança de Barragens. Índice de Segurança de Barragens

ABSTRACT:

In Brazil, the main source of energy is hydroelectric plants. This requires an ensemble of hydraulic structures and equipment functioning properly and safely. Historically, some countries have been concerned about the long-term use of these structures and have implemented Legislation that guides the dam safety policy. In Brazil, only recently, in 2010, Federal Law No. 12.334 was enacted, which establishes the National Policy on Safety of Dams. In 2012, Resolution No. 143 of the National Water Resources Council established general criteria for the classification of safety for dams and the Resolutions No. 742/11 and No. 91/12 of the National Water Agency established criteria for the Dam Safety Planning as well as the Regular Safety Inspections. In this context, the objective of this work was to establish a comprehensive method to be used by dam managers, by modifying the Dam Safety Index – DSI proposed by Zuffo (2005). The DSI consists of a series of technological criteria, including those from recent Brazilian Regulations. The weights of the technological criteria make up a global multiplicand index, indicating the security status of a dam. This modified DSI is easy to apply and useful for managing the safety of the structure. Its application allows both a long-term general analysis, as well as short-term evaluation of the safety of the dam, prioritizing actions for periodic and predictive maintenance.

Keywords: Hydraulic Structures. National Policy on Safety of Dams. Dam Safety Index

INTRODUÇÃO

A geração de energia hidrelétrica requer um conjunto de estruturas e equipamentos hidráulicos funcionando adequadamente e garantindo, assim, a segurança da estrutura. Na produção hidroenergética, vários tipos de riscos podem ser considerados, entre eles os tecnológicos, que são decorrentes de falhas nas estruturas propriamente ditas.

Muitos acidentes que ocorreram em território nacional continuam sem investigação científica, prejudicando o avanço do conhecimento na área. Medeiros (2013) aponta que, segundo instituições e organizações, tais como o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), a International Commission on Large Dams (ICOLD), o Banco Mundial (World Bank) e a Comissão Mundial de Barragens (World Commission on Dams) uma barragem é considerada segura quando possui integridade estrutural, não induz sentimento de ameaça à população afetada e não causa dano ambiental. Estes requisitos básicos podem ser desdobrados em diversos critérios, dada a complexidade de análise de cada um.

Visando nortear a questão de segurança de barragens no Brasil o governo sancionou, em 2010, a Lei nº 12.334 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB, destinada à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens – SNISB. O SNISB tem como objetivo o registro informatizado das condições de segurança de barragens em todo o território nacional e compreende um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de suas informações, devendo contemplar barragens em construção, em operação e desativadas. O SNISB é regido pela Resolução nº 144, de 10 de Julho de 2012, que estabelece diretrizes para implantar a PNSB e o SNISB. A responsabilidade de organizar, implantar e gerir as informações do Sistema é da Agência Nacional de Águas – ANA.

Para a regulamentação da PNSB, os principais documentos existentes são a Resolução CNRH nº 143/12 e as Resoluções ANA nº 742/11 e nº 91/12. Outro dispositivo que merece destaque é a Portaria Normativa nº 416 de 2012 do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, a qual cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração. Atualmente, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL se mobiliza para elaborar o Plano Nacional de Segurança de Barragens do Setor Elétrico.

No Brasil, atualmente, acontece uma ampliação do parque hidroenergético, com a construção de novas barragens. Ao mesmo tempo, as barragens existentes estão envelhecendo. Desta forma, avaliações periódicas e sistematizadas de segurança de barragens são necessárias, à luz das novas regulamentações e das atuais tecnologias de construção.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estabelecer um método

abrangente para ser utilizado pelos gestores dos barramentos, incorporando as diretrizes das Resoluções nº 143/2012 e nº 144/2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos e as Resoluções nº 742/2011 e nº 91/2012 da Agência Nacional de Águas ao Índice de Segurança de Barragens-ISB, proposto por ZUFFO (2005).

SEGURANÇA DE BARRAGENS

Comumente, um barramento é dito seguro quando atende aos critérios técnicos de segurança estrutural, ou seja, possui adequação entre projeto, execução e manutenção, de tal forma que possa garantir o seu correto funcionamento. Porém, também deve ser levado em conta o potencial de danos que uma hipotética ruptura do barramento possa provocar. Isso reflete diretamente na sensação de segurança passada pela estrutura. O potencial de dano, então, é avaliado levando-se em conta as áreas de influência a montante e a jusante do barramento. Assim, a segurança de um barramento deve ser avaliada por sua qualidade tecnológica e sua inserção no espaço.

Ademais, a segurança de barragens deve abranger a qualidade da equipe técnica gestora da estrutura. Segundo Peck (1984), 9 entre 10 rupturas de barragens não ocorrem por deficiências no estado da arte, mas sim por negligências, falta de comunicação entre o executor da obra e o projetista ou por previsões otimistas das condições geológicas da região. A história mostra que somente após acidentes fatais envolvendo barragens foram desenvolvidos estudos com o objetivo de avaliar a segurança, propor melhorias e gerenciar o risco. Muitos problemas poderiam ter sido evitados caso fossem elaborados e seguidos planos de monitoramento das condições do barramento e planos de ação em situações emergenciais.

Diversos países adotam regulamentos específicos que passaram por revisões na última década, o que destaca a importância do tema e a sua atualidade. Em Portugal, a segurança de barragens é regulamentada pelo Decreto Lei nº 344/2007 que se aplica a todas as barragens com altura superior a 15,0 m ou com capacidade do reservatório superior a 1.000.000 m³ quando a altura estiver entre 10,0 m e 15,0 m. Também, são incluídas barragens com altura inferior a 15,0 m e reservatório com volume superior a 100.000 m³. Outras barragens ainda podem ser incluídas após avaliação de segurança. O Regulamento de Segurança de Barragens de Portugal tem como principal mérito o detalhamento técnico e a atribuição de responsabilidades às entidades envolvidas na aprovação, gestão e fiscalização de barragens.

No Canadá, destaca-se o British Columbia Dam Safety Regulation nº 44/2000-2011 que inclui as obras com mais de 1,0 m de altura, desde que possuam volume de reservatório igual ou superior a 1.000.000 m³; com mais de 2,5 m de altura, desde que possuam volume de reservatório acima de 30.000 m³ e aquelas com mais de 7,5 m de altura ou de acordo com as consequências de uma ruptura hipotética. Este regulamento possui caráter técnico e envolve o proprietário da estrutura nas responsabilidades de segurança da barragem. O regulamento também fornece diretrizes de operação, inspeção e do plano

de segurança.

Na Inglaterra, País de Gales e Escócia existe o Reservoirs Act 1975, também adotado por alguns proprietários da Irlanda do Norte. O decreto determina quatro principais atores na segurança de barragens, a saber, Proprietário, Autoridade de fiscalização, Engenheiros qualificados e Secretaria de Estado. Este regulamento dispõe que a classificação de risco de uma barragem é função do potencial de perdas de vidas humanas.

No Brasil a Lei nº 12334/10 aplica-se a barragens com altura do maciço maior ou igual a 15,0 m; capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³; reservatório com resíduos perigosos e categoria de Dano Potencial Associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas. A classificação de acordo com o Dano Potencial Associado é dada pela Resolução nº 143 publicada pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos em 2012, que traz um método para classificação das barragens conforme a Categoria de Risco, o Dano Potencial Associado e o Volume. O Dano Potencial Associado da legislação nacional se assemelha ao conceito de consequências da ruptura hipotética adotado pelo British Columbia Dam Safety Regulation (Canadá). No Brasil, as consequências da ruptura são caracterizadas pela população sob risco, pelos danos ao ambiente e ao patrimônio cultural; pelas perdas econômicas e pelos danos à infraestrutura. Um dos principais avanços proporcionados pela Lei nº 12.334/10 foi a definição dos responsáveis legais pela gestão e fiscalização da segurança dos empreendimentos. O empreendedor é o responsável pela segurança e deve tomar as medidas necessárias para garanti-la, sendo a responsabilidade da fiscalização da segurança atribuída conforme o tipo do empreendimento.

Estes regulamentos apresentam em comum a definição dos responsáveis pela gestão da segurança, a sistematização das inspeções periódicas de segurança e a apresentação de um consenso sobre a importância de danos à vida humana em casos de rompimento. Para tanto, um método eficaz e de fácil aplicação para os gestores destas obras deve ser desenvolvido.

Andersen (2001) apresenta um método para determinar um índice de risco de ruptura, a partir da avaliação das condições físicas do barramento. A importância da barragem é medida em termos de fatores intrínsecos à estrutura (altura, tipo de barragem, tipo de fundação e capacidade do reservatório), fatores externos (idade e sismo) e características de projeto (condições do vertedor e fatores de segurança). Outra variável utilizada na determinação da importância do barramento é o Perigo Potencial, que é dado em uma escala de 1 a 10, sendo 10 quando há potencial de perdas de vidas humanas, 5 quando não há perigo de perdas de vidas humanas e 1 quando as barragens causam apenas danos materiais ao proprietário, caso ocorra um rompimento.

No Brasil, Menescal et al. (2001), Zuffo (2005), Duarte (2008), Espósito e Duarte (2010) apresentaram métodos para determinar um índice de risco de ruptura. Nos modelos, primordialmente, foram consideradas características como altura, volume, tipo de barragem, tipo de fundação e vazão de projeto.

O trabalho de Menescal et al. (2001) foca a segurança estrutural e objetiva hierarquizar as barragens para proporcionar um meio eficaz de alocar os recursos necessários para a manu-

tenção das mesmas. O índice gerado pelo modelo é baseado em atributos da estrutura distribuídos em três fatores que compõem o Potencial de Risco – PR. São estes, a Periculosidade (P), que traz informações técnicas de projeto e de construção; a Importância Estratégica (I), baseada em critérios técnicos, econômicos, ambientais e sociais e a Vulnerabilidade (V), baseada em dados de inspeções de campo e leituras de instrumentação.

Zuffo (2005) desenvolveu um índice geral de classificação da segurança de uma barragem, ISB, através do qual é possível avaliar diversas características da estrutura. O resultado do ISB determina a condição de segurança da barragem, através da classificação baseada nas recomendações do USBR (1995), desde condição boa, quando não há potenciais deficiências de segurança até condição insatisfatória, quando há deficiências de segurança em condições normais de carregamento, com a necessidade imediata de ações corretivas.

Outro método brasileiro é apresentado por Duarte (2008) que desenvolveu um modelo de classificação de barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais, baseado no trabalho de Menescal (2001). O modelo resultante é denominado “Modelo Potencial de Risco Modificado”. Critérios como “tomada d’água” foram excluídos por não serem aplicados a barragens para contenção de rejeitos; por outro lado, critérios como “alteamento” e “instrumentação e monitoramento” foram incluídos por serem significativos nesta categoria de empreendimento.

A determinação da segurança de uma barragem e a elaboração de planos de segurança e de ações emergenciais não é uma tarefa trivial e torna-se um desafio estabelecer um método abrangente, para uso pelos gestores dos barramentos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Considerando-se a Lei nº 12.334/10, as Resoluções do CNRH e da ANA, os trabalhos de Menescal et al. (2001), Zuffo (2005) e Duarte (2008) foram incorporadas modificações ao índice de Segurança de Barragens (ISB) proposto por Zuffo (2005).

O ISB é calculado pelo produtório das notas dos critérios, garantindo assim que todos os critérios sejam verificados. O uso do produtório também garante que todos os critérios tenham significância na nota final.

O ISB é expresso pela Equação (1):

$$ISB = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (1)$$

sendo:

q_i : nota do i -ésimo critério, um número entre 1 e 100, obtido na respectiva curva da função de valor, em função do conceito obtido no critério;

w_i : peso correspondente ao i -ésimo critério, um número entre 0 e 1, atribuído em função da sua importância para a conformação global de segurança.

Os pesos (w_i) padronizados foram estabelecidos a partir de opiniões técnicas de diversos profissionais da área, obtidas a partir da resposta do questionário.

Sendo assim, tem-se a Equação (2):

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (2)$$

sendo:

n: número de critérios que entram no cálculo do ISB.

Para isso, foram propostos critérios tecnológicos (ou de engenharia) considerados importantes, além do envio de questionários a um grupo de técnicos. Os critérios foram obtidos com base na literatura e a partir da legislação sobre segurança de barragens, que não estavam em vigor na época da realização do trabalho de ZUFFO (2005).

A Tabela 1 evidencia os critérios que compõem o ISB modificado ressaltando que não foram misturados critérios econômicos ou ambientais.

Tabela 1 – Critérios que compõem o ISB modificado

Critério	
1.	Altura da barragem
2.	Comprimento da barragem
3.	Tipo de barragem (material)
4.	Tipo de vertedor
5.	Período de Retorno da vazão de projeto dos vertedores
6.	Idade da barragem
7.	Presença de percolação/vazamento
8.	Presença de deformações e recalques
9.	Deterioração dos taludes
10.	Conservação das estruturas vertedoras
11.	Evidências de erosão a jusante
12.	Volume do reservatório
13.	Vazão de projetos dos vertedores
14.	Conservação das estruturas de captação
15.	Instrumentação e monitoramento dos registros
16.	Existência de barragens em série no mesmo curso d'água (Efeito Cascata)
17.	Tipo de turbina hidráulica
18.	Tipo de comporta do vertedor
19.	Maquinário de operação das comportas
20.	Nível de automação
21.	Capacidade instalada ou de operação
22.	Existência de documentação de projeto, incluindo o projeto <i>as-built</i>
23.	Estrutura organizacional e qualificação dos profissionais da equipe técnica de segurança da barragem
24.	Existência de planos de ações de emergência
25.	Procedimentos de inspeções de segurança e monitoramento
26.	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação
27.	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem
28.	Existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas
29.	Existência de instalações de infraestrutura ou serviços e de equipamentos de serviços públicos essenciais

As dimensões de uma barragem sempre foram consideradas importantes parâmetros de classificação, tanto pela legislação quanto por especialistas da área. Dentre as dimensões de uma barragem, destacaram-se a altura da barragem e o comprimento da barragem medido entre as ombreiras. A altura e o comprimento da barragem guardam relação com a energia armazenada, uma vez que a queda e a vazão d'água são fundamentais à geração de energia. Assim, quanto maiores as dimensões do barramento, maiores os danos ocasionados por sua ruptura. A Resolução CNRH n.º 143/12 emprega a altura da barragem para se determinar a Categoria de Risco.

O tipo de barragem deve ser levado em conta durante a avaliação da segurança, uma vez que cada tipo de barragem possui sua susceptibilidade particular a determinadas falhas. Em barragens de terra, o maior problema concentra-se na possibilidade da ocorrência de erosão interna por piping, descrito por Ladeira (2007) como uma erosão interna regressiva (de jusante para montante). Quando se trata de barragens de concreto, a ocorrência de percolação pelo maciço é menor, porém esse tipo de estrutura requer um controle tecnológico constante do concreto usado na construção e das condições de cura térmica do mesmo. Coelho et al. (2013) indicam que, em obras que utilizam grande volume de concreto, podem ocorrer fissurações na estrutura devido às tensões geradas pelo gradiente de temperatura, durante o processo de cura.

A idade da barragem constitui um fator importante na determinação da segurança devido à deterioração inerente ao envelhecimento da estrutura. Além disso, o reservatório sofre assoreamento ao longo de sua vida útil, reduzindo a capacidade de amortecimento de cheias e provocando outros problemas relacionados ao acúmulo de sedimentos. Ademais, a bacia hidrográfica onde se insere um barramento é um sistema em equilíbrio dinâmico, ao passo que a barragem compõe um elemento praticamente imutável no tempo, podendo não se adequar às características hidrológicas futuras, que podem se alterar devido à sua ocupação e às mudanças climáticas.

O vertedor de um barramento é, em essência, um dispositivo de segurança, já que ele é o órgão responsável por descarregar as vazões de cheia que chegam até a barragem. O mau dimensionamento do vertedor ou a operação inadequada pode fazer com que o nível de água no reservatório se eleve além do previsto em projeto, ocasionando o galgamento e até o rompimento da estrutura. Assim, este critério foi mantido ao ISB modificado da forma como foi concebido anteriormente, uma vez que a existência de vertedores de múltiplos canais com descarga livre contribui para a segurança da estrutura. A importância deste critério é corroborada pelo histórico de falhas de diversas barragens que romperam quando não houve capacidade suficiente para escoar o volume excedente do reservatório ou baixar o nível d'água para níveis seguros em tempo hábil.

Um dos itens fundamentais para o correto dimensionamento de obras hidráulicas é a adoção de períodos de retorno adequados. Adotar elevados períodos de retorno pode conferir maior proteção à população, porém acarreta também maior custo da obra, pois o porte da mesma será tanto maior quanto maior for a vazão para a qual é dimensionada. Neste sentido, busca-se sempre um equilíbrio entre viabilidade técnica-eco-

nômica e segurança.

Os critérios referentes aos equipamentos hidromecânicos (tipo de turbina hidráulica, tipo de comporta do vertedor, maquinário de operação das comportas, nível de automação e capacidade instalada ou de operação em MW) foram incorporados para que o método fosse abrangente em relação às barragens de grande porte, em que a existência e a caracterização desses elementos podem contribuir para a segurança. Embora os critérios “tipo de turbina hidráulica” e “capacidade instalada” não interfiram na estrutura da barragem e, a princípio, seu mau funcionamento não diminua a segurança do barramento do ponto de vista de estabilidade, eles foram incluídos, pois, são indicadores da importância estratégica do barramento. Os critérios “tipo de comporta do vertedor”, “maquinário de operação das comportas” e “nível de automação” foram incluídos para mensurarem o quanto a automatização pode induzir a uma maior segurança para o barramento, ao passo que visam reduzir o risco de falha humana.

Em barragens menores, esses dispositivos podem não existir e, neste caso, assumem valor unitário, para que não haja influência no cálculo final do ISB. Outra preocupação recorrente nos trabalhos acadêmicos e na legislação é o estado de conservação das estruturas. O artigo 4º da Resolução CNRH nº 143 informa que as barragens devem ser classificadas de acordo com aspectos que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente. Esses aspectos incluem o estado de conservação da barragem, e que foram determinados neste trabalho pelos critérios “presença de percolação ou vazamento”, “presença de deformações e recalques”, “deterioração dos taludes”, “conservação das estruturas vertedoras”, “conservação das estruturas de captação” e “evidências de erosão a jusante”.

Outros critérios adotados a partir da Resolução CNRH nº 143 são a “existência de documentação de projeto (incluindo o projeto “as built””, “estrutura organizacional e qualificação dos profissionais da equipe técnica de segurança da barragem”, “procedimentos de inspeções de segurança e monitoramento”, “relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação” e “regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem”. Estes itens visam contemplar a legislação promulgada e em vigor, na análise de segurança de uma barragem. A existência de documentação de projeto auxilia o gestor da estrutura na tomada de decisões, tanto em momentos de emergência quanto em manutenções preventivas programadas ou corretivas e também quando o barramento precisar passar por alguma reforma ou ampliação. Os outros itens citados neste parágrafo interferem na segurança, pois representam a preparação que a equipe possui para operar a barragem, com todos os equipamentos hidromecânicos e elétricos, em condições normais ou excepcionais.

A cobrança da existência de planos de ações de emergência é uma questão tratada na Lei Federal nº 12.334/10 e também por autores como Balbi (2008). O referido autor afirma que o Plano de Ações Emergenciais – PAE é uma medida não estrutural de mitigação do risco e que deve ser elaborado em fase anterior à emergência. Considerando que o PAE engloba basicamente os componentes de detecção, tomada de decisões, notificação, alerta/aviso e evacuação, a existência dele representa um fator de segurança adicional, por esse motivo foi incluído

entre os critérios para o cálculo do ISB modificado.

Os dois últimos critérios comentados são “existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas” e “existência de instalações de infraestrutura ou serviços e de equipamentos de serviços públicos essenciais”. Estes itens também são advindos da Resolução CNRH nº 143, quando trata do Dano Potencial Associado, ou seja, o potencial de devastação frente a um rompimento hipotético. Estes critérios foram considerados de suma importância por caracterizarem a ocupação do solo a jusante do reservatório, podendo quantificar o impacto socioeconômico, sendo inclusive fatores para determinação de alternativas locais, no caso de estruturas ainda em fase de concepção.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a definição dos critérios que compõem o ISB modificado, foi elaborado um questionário e este foi enviado para especialistas da área, os quais atribuíram pesos de 0 (zero) a 10 (dez) a cada um dos critérios, sendo 0 (zero) pouco importante e 10 (dez) muito importante.

Com o resultado dos questionários, pôde-se calcular o peso de cada critério a partir de um tratamento estatístico dos dados coletados. Para cada critério foi calculada a média (M) e o desvio padrão (DP). Em seguida, foi somado/subtraído o desvio padrão à média ($M \pm DP$). Com esses valores foi possível estabelecer um intervalo em que devem constar os pesos dos critérios. Os valores que se apresentaram fora deste intervalo não foram considerados.

A média de cada critério foi calculada pela Equação (3):

$$M = \frac{\sum_{i=1}^m a_i}{m} \quad (3)$$

sendo:

m : número de pesos obtidos para cada critério;

a_i : i -ésimo peso do mesmo critério atribuído pelos especialistas.

O desvio padrão foi obtido pela Equação (4):

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (a_i - M)^2}{m - 1}} \quad (4)$$

Assim, os valores obtidos pelos questionários para cada peso não excedem o desvio padrão da amostra. Isto reduz a influência de avaliações tendenciosas na média final, caso algum técnico atribua pesos muito acima ou muito abaixo do praticado pela maioria.

Os questionários foram enviados aos profissionais da área, dentre eles, engenheiros civis, mecânicos, hidrólogos, hidráulicos, geólogos, geotécnicos, técnicos em segurança envolvidos em caráter decisório no projeto, instalação, operação e manutenção de barragens, além de profissionais da área acadêmica que possuem experiência e conhecimento sobre o assunto, tanto do Brasil como de outros países. O questionário foi confeccionado para respostas on-line e foram acessados pelos links: <https://docs>.

google.com/forms/d/14OpizKYg_yP4QIZYz3hN9AbRjyzTq-T_h6YfoKPZmpI/viewform (em português) e https://docs.google.com/forms/d/1Rwm_U3pjkWriEz5CriI2P57vUeLBSix-NA7KdQii26Gc/viewform (em inglês). O índice de retorno dos questionários foi de 33,3%, ou seja, 45 questionários respondidos dentre 135 questionários enviados.

A Tabela A do Anexo apresenta um resumo dos valores encontrados, indicando os máximos e mínimos pesos dentro do intervalo.

O critério que obteve a maior média final foi “presença de percolação ou vazamentos”, que, após o tratamento estatístico recebeu peso 10,00 de todos os técnicos. Em oposição, o critério que recebeu a menor média final foi o “tipo de turbina hidráulica” com 4,32 após a aplicação do método. Outro ponto importante a ser destacado é que o critério que obteve o maior desvio padrão, indicando, portanto, uma possível falta de consenso entre as opiniões foi “Capacidade Instalada ou de Operação” com valor de 3,05.

A aplicação do tratamento estatístico implicou na exclusão de dados que não estavam dentro do intervalo definido pelo desvio padrão. Assim, dependendo do critério, houve mais ou menos pesos desconsiderados. Neste sentido, o critério “existência de documentação de projeto” recebeu apenas 21 avaliações válidas das 45 obtidas. Os critérios “altura da barragem”, “evidência de erosão a jusante” e “existência de barragens em série no mesmo curso d’água” foram os que obtiveram maior regularidade nas avaliações, com um total de 41 consideradas em cada.

O critério “tipo de turbina hidráulica” se mostrou muito abaixo da média dos demais critérios. Desta forma, é possível detectar a queda nos pesos na ordem crescente de apresentação dos dados da Tabela A. Esse comportamento indicou aos autores uma nota de corte a ser aplicada, justificando a exclusão de determinados critérios do cálculo do ISB modificado. Assim, foi calculada a média entre as médias finais obtidas e obteve-se o valor de corte de 8,62. A Tabela 2 indica os critérios cujas médias finais estão abaixo da nota de corte estabelecida.

Tabela 2 – Seleção de critérios com médias finais abaixo da nota de corte

Critério	Média Final
Tipo de turbina hidráulica	4,32
Capacidade instalada ou de operação	5,92
Comprimento da barragem	6,93
Tipo de comporta do vertedor	7,00
Nível de automação	7,26
Conservação das estruturas de captação	7,68
Maquinário de operação das comportas	7,71
Tipo de vertedor	8,14
Existência de instalações de infraestrutura ou equipamentos de serviços públicos essenciais	8,15
Existência de documentação de projeto (incluindo projeto <i>as built</i>)	8,33

Porém, a nota de corte não foi a única condição para exclusão de critérios na composição do ISB modificado. Também, foi considerada a opinião dos técnicos e as exigências das regulamentações vigentes. Os técnicos consultados puderam contribuir com suas opiniões, ressaltando critérios que poderiam ser excluídos ou incluídos. A maioria dos técnicos que responderam ao questionário também deixou contribuições. Entre os critérios sugeridos destacam-se a “existência de eclusas”, “onda de cheia a jusante” e “tipo e qualidade das fundações”. 20 técnicos não sugeriram nenhum critério adicional, 18 técnicos acharam não ser necessária a remoção de nenhum critério e 28 não opinaram.

Os pesos obtidos foram comparados com os encontrados por Zuffo (2005) para avaliar se as modificações propostas geraram benefícios. A Tabela B do Anexo traz um comparativo entre as médias obtidas nos critérios utilizados por Zuffo (2005) com os avaliados neste trabalho. Neste caso, foram comparados os critérios mantidos do trabalho anterior, indicados na Tabela 1. Salienta-se que Zuffo (2005) utilizou o critério “Dimensões”, o qual neste trabalho foi desmembrado em “Altura da barragem” e “Comprimento da barragem” para avaliação mais específica. Com os dados da Tabela B foi elaborada a Figura 1, que ilustra o comportamento das médias obtidas nos critérios comuns aos dois trabalhos.

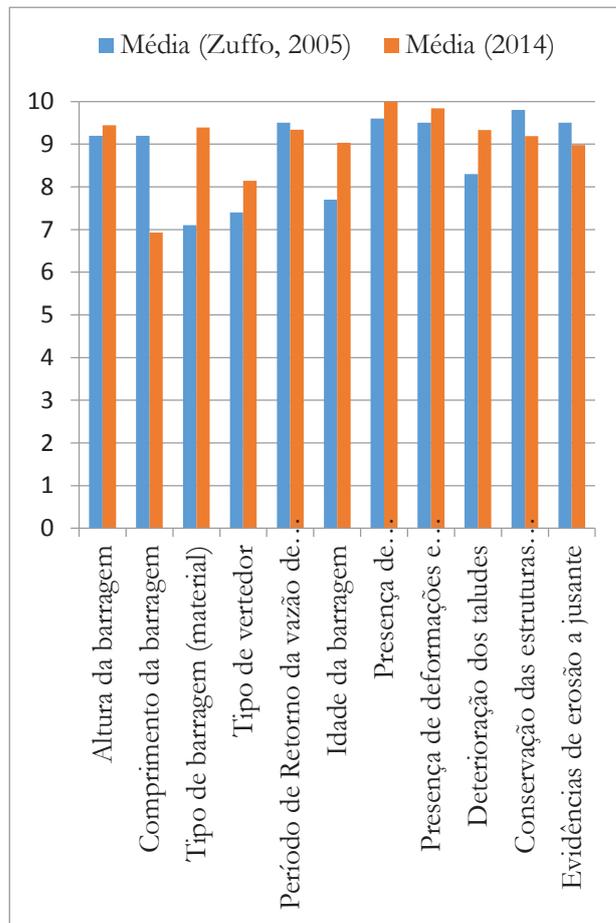


Figura 1 - Comparativo entre as médias dos critérios do ISB e ISB modificado

A partir da Tabela B (do Anexo), percebe-se que o critério correspondente à altura da barragem pouco se alterou em relação à média, apresentando média ligeiramente maior, ao passo que a avaliação quanto ao comprimento da barragem foi muito menor em relação ao ISB (ZUFFO, 2005). Este fato indica que, possivelmente, quando os técnicos atribuíam pesos para o critério dimensão da barragem, se atribuiu a nota à altura da barragem, sendo o comprimento menos relevante. Outro critério que obteve grande variação nas médias foi o “Tipo de barragem (material)” que obteve um aumento de 32,3%. Os demais critérios não apresentaram variação apreciável (menores que 10%), com exceção de “Deterioração dos taludes” que aumentou em 12,4%.

Considerando os pesos obtidos para cada critério e comparando-os com a nota de corte, excluiram-se os critérios irrelevantes para a segurança de barragens. A Tabela 3 apresenta os 22 critérios remanescentes que compõem o Índice de Segurança de Barragens modificado, ISB modificado, e seus respectivos pesos calculados pela equação (2).

Tabela 3 – Critérios e pesos do ISB modificado.

Critério	Peso
Conservação das estruturas de captação	0,0379
Existência de instalações de infraestrutura ou equipamentos de serviços públicos essenciais	0,0402
Existência de documentação de projeto (incluindo projeto <i>as built</i>)	0,0411
Evidências de erosão a jusante	0,0443
Regra operacional dos dispositivos de descarga	0,0445
Idade da barragem	0,0445
Vazão de projeto do vertedor	0,0450
Existência de barragens em série no mesmo curso d'água (efeito cascata)	0,0452
Conservação das estruturas vertedoras	0,0453
Existência de planos de ações emergenciais	0,0456
Estrutura organizacional e qualificação dos profissionais da equipe técnica de segurança da barragem	0,0459
Volume do reservatório	0,0460
Deterioração dos taludes	0,0460
Período de retorno da vazão de projeto do vertedor	0,0461
Tipo de material da barragem	0,0463
Altura da barragem	0,0466
Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação	0,0475
Instrumentação e monitoramento dos registros	0,0475
Procedimentos de inspeção de segurança e monitoramento	0,0481
Existência de população a jusante com potencial de perdas de vidas humanas	0,0484
Presença de deformações ou recalques	0,0485
Presença de percolação ou vazamentos	0,0493

Desta forma, os novos critérios para levar em conta a regulamentação do Brasil sobre segurança de barragens e os respectivos pesos foram obtidos e incorporados ao ISB.

De acordo com Zuffo e Genovez (2008), o valor do ISB pode ser relacionado com a classificação de segurança recomendada pelo USBR (1995) e cada condição classificatória pode adotar valores mínimos aceitáveis, sempre a favor da segurança. A Tabela 4 indica os intervalos de valores sugeridos e a respectiva classificação.

Tabela 4 – Classificação de acordo com o ISB

Condição	Intervalo
Boa	91-100
Satisfatória	81-90
Regular	61-80
Deficiente	31-60
Insatisfatória	0-30

Fonte: adaptado de Zuffo e Genovez (2008)

Para as condições Boas e Satisfatórias, recomenda-se a inspeção de reavaliação após um ano.

Para a condição Regular, após a investigação do(s) parâmetro(s) problemático(s), sugere-se a reavaliação após 6 meses e para as condições Deficiente e Insatisfatória, após 3 meses de sanados os problemas apontados.

Finalmente, a aplicação do ISB e o consequente resultado obtido permitirá adotar ações corretivas imediatas para a solução dos problemas encontrados.

CONCLUSÕES

No Brasil, as construções de novas barragens e as avaliações das barragens existentes devem obedecer a regulamentação de segurança imposta pela Lei Federal nº 12.334/10. Contudo, para se determinar a segurança de uma barragem, elaborar planos de segurança e determinar ações emergenciais é necessário um método abrangente, para ser utilizado pelos gestores dos barramentos. A aplicação da legislação brasileira de segurança de barragens pelos empreendedores públicos e privados é recente. Assim, as exigências impostas pela recente lei levam ao surgimento de novos métodos de avaliação de segurança de barragens.

O ISB modificado é um índice geral de classificação da segurança de uma barragem e inclui critérios comuns presentes em pequenos barramentos rurais até usinas hidrelétricas de grande porte, diferenciando-se apenas a escala de grandeza entre as estruturas, o que possibilita sua aplicação a uma ampla gama de barragens.

O ISB modificado conforme desenvolvido neste trabalho tem como principal vantagem focar os critérios tecnológicos da barragem, não os misturando com critérios de outras naturezas. Sua aplicação permite obter tanto uma visão global da segurança do empreendimento, bem como uma visão pontual da segurança. Este fato é muito útil, pois auxilia a priorização de ações de manutenção periódica e preditiva na estrutura. Como trabalho futuro, as funções de valor referentes a cada critério que compõe o ISB modificado estão em desenvolvimento. Desta forma sugere-se o uso do ISB modificado.

AGRADECIMENTOS

Aos Revisores do artigo e aos Professores Jorge Matos (IST de Lisboa) e Tiago Zenker Gireli (FEC-UNICAMP) pelas valiosas sugestões que fortaleceram o trabalho.

REFERÊNCIAS

ANDERSEN, G. R. Risk Indexing Tool to Assist in Prioritizing Improvements to Embankment Dam Inventories. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Apr. , p. 325-334, 2001.

BALBI, D. A. F. *Metodologias para a Elaboração de Planos de Ações Emergenciais para Inundações Induzidas por Barragens. Estudo de Caso: Barragem de Peti* – MG. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG, 2008.

BRASIL. *Lei Federal nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010*. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei 9433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei 9984, de 17 de julho de 2000. Disponível em: www.leidireto.com.br/lei-12334.html. Acessado em: março de 2013.

BRASIL. ANA – *Agência Nacional de Águas. Resolução nº 91, de 02 de Abril de 2012*. Estabelece a Periodicidade de Atualização, a Qualificação do Responsável Técnico, o Conteúdo Mínimo e o Nível de Detalhamento do Plano de Segurança de Barragens e da Revisão Periódica da Segurança de Barragens, Conforme Artigo 8º, 10 e 19 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010.

BRASIL. ANA – *Agência Nacional de Águas. Resolução nº 742, de 17 de Outubro de 2011*. Estabelece a Periodicidade, Qualificação da Equipe Responsável, Conteúdo Mínimo e Nível de Detalhamento das Inspeções de Segurança Regulares de Barragem, Conforme Artigo 9º da Lei nº 12.334 de 20 de Setembro de 2010. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2011/742-2011.pdf>. Acesso em março de 2013.

BRASIL. CNRH – *Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 143, de 10 de Julho de 2012*. Estabelece Critérios Gerais de Classificação de Barragens por Categoria de Risco, Dano Potencial Associado e pelo Volume do Reservatório, em Atendimento ao Artigo 7º da Lei nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010. Disponível em: <http://www.cnrh.gov.br>. Acessado em março de 2013.

CANADÁ. Water Act. Regulamento 44, de 10 de Fevereiro de 2000. British Columbia Dam Safety Regulation.

COELHO, N. A.; PEDROSO, L. J.; RÉGO, J. H. S.; NEPOMUCENO, A. A. *A Influência das Propriedades Térmicas do Concreto na Construção de Barragens de Gravidade*. Comitê Brasileiro

de Barragens. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, XXIX., Porto de Galinhas, PE, 2013.

DUARTE, A. P. *Classificação das Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração e de Resíduos Industriais no Estado de Minas Gerais em Relação ao Potencial de Risco*. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG, 2008.

ESPÓSITO, T. J.; DUARTE, A. P. Classificação de Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração e de Resíduos Industriais em Relação a Fatores de Risco. *Revista Escola de Minas. Ouro Preto - MG*, p. 393 - 398, abril – junho, 2010.

LADEIRA, J. E. R. *Avaliação de Segurança em Barragem de Terra, sob o Cenário de Erosão Tubular Regressiva, por Métodos Probabilísticos. O Caso UHE – São Simão*. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG, 2007.

MEDEIROS, C. H. *Regulamentação da Lei de Segurança de Barragens e seus Desafios: Relato de uma Experiência*. Comitê Brasileiro de Barragens – CBDB. SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, XXIX., Porto de Galinhas - PE, 2013.

MENESCAL, R. A.; CRUZ, P. T.; CARVALHO, R. V.; FONTENELLE, A. S.; OLIVEIRA, S. K. *Uma Metodologia para Avaliação do Potencial de Risco em Barragens no Semi-Árido*. SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, XXIV., Fortaleza – CE, 2001.

PECK, R. B. *Judgement in Geotechnical Engineering – The Professional Legacy of Ralph B. Peck*. New York: John Wiley & Sons, 1984. 332p.

PORTUGAL. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. *Decreto Lei nº 344, de 15 de Outubro de 2007*. Regulamento de Segurança de Barragens.

REINO UNIDO. *Reservoirs Act 1975*. Disponível em: http://www.legislation.gov.uk/ukpga/1975/23/pdfs/ukpga_19750023_en.pdf. Acessado em junho de 2014.

USBR. Safety Evaluation of Existing Dams. EUA, 1995

ZUFFO, M. S. R. *Metodologia para avaliação da segurança de barragens*. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2005.

ZUFFO, M. S. R.; GENOVEZ, A. I. B. Dam Safety Legislation: a focus on the different approaches. Proceedings of the 16th IAHR-ADP Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering. Nanjing, China, 2008.

ANEXO:
Tabela A - Resultados obtidos através do tratamento estatístico dos dados de resposta dos questionários

<i>Critério</i>	<i>Média</i>	<i>DP</i>	<i>M+DP</i>	<i>M-DP</i>	<i>Média</i>	<i>Peso</i>
Presença de percolação ou vazamentos	9,67	0,63	10,30	9,03	10,00	0,040
Presença de deformações ou recalques	9,47	0,98	10,45	8,49	9,84	0,039
Existência de população a jusante com potencial de perdas de vidas	9,42	1,06	10,49	8,36	9,82	0,039
Procedimentos de inspeção de segurança e monitoramento	9,42	0,83	10,25	8,59	9,76	0,039
Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação	9,11	1,02	10,13	8,10	9,64	0,039
Instrumentação e monitoramento dos registros	9,11	0,99	10,10	8,12	9,64	0,039
Altura da barragem	9,11	1,32	10,43	7,79	9,44	0,038
Tipo de material da barragem	8,82	1,34	10,16	7,48	9,39	0,038
Período de retorno da vazão de projeto do vertedor	8,78	1,55	10,33	7,23	9,34	0,037
Deterioração dos taludes	8,91	1,36	10,27	7,55	9,33	0,037
Volume do reservatório	8,69	1,71	10,40	6,98	9,32	0,037
Estrutura organizacional e qualificação dos profissionais da equipe técnica de segurança da barragem	8,84	1,50	10,35	7,34	9,30	0,037
Existência de planos de ações emergenciais	8,76	1,37	10,12	7,39	9,24	0,037
Conservação das estruturas vertedoras	8,60	1,57	10,17	7,03	9,19	0,037
Existência de barragens em série no mesmo curso d'água (efeito cascata)	8,71	1,85	10,56	6,87	9,17	0,037
Vazão de projeto do vertedor	8,53	1,68	10,21	6,85	9,13	0,037
Idade da barragem	8,09	2,09	10,17	6,00	9,03	0,036
Regra operacional dos dispositivos de descarga	8,56	1,61	10,17	6,94	9,03	0,036
Evidências de erosão a jusante	8,58	1,67	10,24	6,91	8,98	0,036
Existência de documentação de projeto (incluindo projeto <i>as built</i>)	8,53	1,45	9,99	7,08	8,33	0,033
Existência de instalações de infraestrutura ou equipamentos de serviços públicos essenciais	8,36	1,64	9,99	6,72	8,15	0,033
Tipo de vertedor	7,84	1,84	9,68	6,01	8,14	0,033
Maquinário de operação das comportas	7,69	2,00	9,69	5,69	7,71	0,031
Conservação das estruturas de captação	7,02	2,58	9,60	4,44	7,68	0,031
Nível de automação	7,11	2,31	9,42	4,80	7,26	0,029
Tipo de comporta do vertedor	7,20	2,31	9,51	4,89	7,00	0,028
Comprimento da barragem	6,93	2,30	9,24	4,63	6,93	0,028
Capacidade instalada ou de operação	5,78	3,05	8,82	2,73	5,92	0,024
Tipo de turbina hidráulica	4,82	2,82	7,65	2,00	4,32	0,017
<i>Média</i>	8,29	1,67	9,96	6,62	8,62	0,03

Tabela B - Comparação entre as médias finais obtidas neste trabalho e em Zuffo (2005)

Critério	Média (Zuffo, 2005)	Média (2014)	Diferença (%)
Altura da barragem	Dimensões: 9,2	9,44	2,6
Comprimento da barragem		6,93	-24,7
Tipo de barragem (material)	7,1	9,39	32,3
Tipo de vertedor	7,4	8,14	10,0
Período de Retorno da vazão de projeto dos vertedores	9,5	9,34	-1,7
Idade da barragem	7,7	9,03	17,3
Presença de percolação/vazamento	9,6	10,00	4,2
Presença de deformações e recalques	9,5	9,84	3,6
Deterioração dos taludes	8,3	9,33	12,4
Conservação das estruturas vertedoras	9,8	9,19	-6,2
Evidências de erosão a jusante	9,5	8,98	-5,5