

ÍNDICE DE SEGURANÇA SEMI-QUANTITATIVO APLICADO À BARRAGEM DO CHASQUEIRO – ARROIO GRANDE/RS/BRASIL

Rafaela Cardoso Pereira (FURG) E-mail: rafaela170302@gmail.com

Karina Retzlaff Camargo (FURG) E-mail: karinacamargo@furg.br

Alexandre Felipe Bruch (Universidade Federal de Pelotas - UFPel) E-mail: afbruch@gmail.com

Jeanderson Lima da Silva (FURG) E-mail: jeandersonlima.s@outlook.com

Felipe Martins Marques da Silva (UFPel) E-mail: felipemarquesufpel@gmail.com

Resumo: A segurança de barragens de terra constitui um tema central na engenharia geotécnica, em função do envelhecimento das estruturas, do aumento das consequências potenciais associadas a falhas e da necessidade de métodos objetivos de apoio à gestão. Nesse contexto, este trabalho aplica um Índice de Segurança de Barragens (ISB) à Barragem do Chasqueiro, localizada no município de Arroio Grande, no extremo sul do Brasil, com o objetivo de avaliar, de forma semi-quantitativa, suas condições atuais de segurança e discutir criticamente a aplicabilidade do método. A análise baseou-se em inspeção de campo, registros técnicos disponíveis e informações provenientes de estudos recentes. O valor obtido (ISB = 55,91) enquadra a barragem na classe “Deficiente” segundo os critérios do índice. Contudo, verificou-se que esse resultado é fortemente influenciado por parâmetros associados às características de projeto e ao contexto territorial, especialmente Tipo de Vertedouro e Importância da Barragem, e não pela identificação de falhas estruturais críticas ativas. Simulações de sensibilidade indicaram que, mesmo sob condições idealizadas de gestão global, o ISB permanece abaixo do limiar de “Segurança Adequada”, evidenciando o caráter conservador do método. Conclui-se que o ISB constitui uma ferramenta útil de triagem e apoio à tomada de decisão, devendo seus resultados ser interpretados de forma integrada a inspeções técnicas e programas de monitoramento, evitando interpretações isoladas sobre a condição real de segurança da barragem.

Palavras-chave: Barragem de terra, gestão de barragens, avaliação multicritério

SEMI-QUANTITATIVE SAFETY INDEX APPLIED TO THE CHASQUEIRO DAM – ARROIO GRANDE/RS/BRASIL

Abstract: The safety of earth dams is a central issue in geotechnical engineering due to the aging of structures, the increase in potential consequences associated with failures, and the need for objective methods to support dam management. In this context, this study applies a Dam Safety Index (DSI) to the Chasqueiro Dam, located in the municipality of Arroio Grande, southern Brazil, aiming to evaluate, in a semi-quantitative manner, its current safety conditions and to critically discuss the applicability of the method. The analysis was based on field inspections, available technical records, and information derived from recent studies. The obtained value (DSI = 55.91) classifies the dam as “Deficient” according to the index criteria. However, this result is strongly influenced by parameters associated with design characteristics and territorial context, especially Spillway Type and Dam Importance, rather than by the identification of active critical structural failures. Sensitivity simulations indicated that even under idealized global management conditions, the DSI remains below the “Adequate Safety” threshold, highlighting the conservative nature of the method. It is concluded that the DSI is a useful screening and decision-support tool, and its results should be interpreted in an integrated manner with technical inspections and monitoring programs, avoiding isolated interpretations of the dam’s actual safety condition.

Keywords: Earth dam, dam management, multicriteria evaluation

1. Introdução

A segurança de barragens tem assumido papel central no debate técnico nas últimas décadas em função do envelhecimento de grande parte destas estruturas, do aumento da população a jusante e da recorrência de acidentes e incidentes registrados (ZHOU *et al.*,

2023). Barragens de terra, em particular, demandam atenção contínua devido à sua suscetibilidade a processos de degradação progressiva, como erosão interna, percolação não controlada, instabilidade de taludes e deficiências associadas à operação e manutenção (TANG *et al.*, 2023). Nesse contexto, metodologias que permitam avaliar, de forma sistemática e integrada, as condições de segurança dessas estruturas tornam-se essenciais para subsidiar ações de gestão, monitoramento e tomada de decisão.

Inserida nesse cenário, a Barragem do Chasqueiro, localizada no município de Arroio Grande, extremo sul do estado do Rio Grande do Sul, desempenha papel estratégico no suprimento hídrico para a agricultura irrigada, em especial para a orizicultura desenvolvida na Planície Costeira Sul (SILVA *et al.*, 2024). Construída há aproximadamente cinco décadas, a barragem integra o Distrito de Irrigação da Bacia do Arroio Chasqueiro (DIBAC) e constitui um elemento chave do sistema de gestão hídrica regional (CAMARGO *et al.*, 2024).

Dentre as metodologias disponíveis para a avaliação da segurança de barragens, destacam-se os índices de segurança de caráter semi-quantitativo, que buscam integrar aspectos estruturais, hidráulicos, geotécnicos, operacionais e ambientais em um único indicador sintético. O método proposto por Zuffo (2005) insere-se nesse contexto ao estabelecer um Índice de Segurança de Barragens (ISB) baseado na atribuição de pesos e funções de valor a um conjunto de critérios técnicos previamente definidos.

Diante desse contexto, o presente artigo tem como objetivo aplicar o Índice de Segurança de Barragens proposto por Zuffo (2005) à Barragem do Chasqueiro, analisando criticamente os resultados obtidos à luz das condições atuais da estrutura. Busca-se, assim, demonstrar a aplicabilidade do método como ferramenta de apoio à gestão da segurança de barragens, bem como contribuir para o aprimoramento do conhecimento técnico sobre uma infraestrutura hídrica de relevância regional no sul do Brasil.

2. Materiais e Métodos

O método proposto por Zuffo (2005) fundamenta-se em uma abordagem de avaliação multicritério, inspirada em conceitos da Teoria dos Jogos e da Teoria da Decisão, na qual a segurança da barragem é interpretada como o resultado da interação entre diferentes critérios técnicos que competem entre si na composição do desempenho global da estrutura. Cada critério representa um “jogador” no sistema de decisão, cuja influência relativa é expressa por meio de pesos associados à sua importância para a segurança da barragem. O ISB é calculado por meio de uma combinação ponderada das funções de valor atribuídas a cada critério, conforme a Equação 01.

$$ISB = \sum_{i=1}^n w_i V_i$$

Equação 01

em que w_i corresponde ao peso associado ao critério i , refletindo sua relevância relativa no contexto da segurança da barragem, e V_i representa a função de valor atribuída a esse critério, definida a partir das condições observadas em campo e das informações técnicas disponíveis. O número total de critérios avaliados é representado por n . As funções de valor são definidas de forma discreta, a partir de conceitos qualitativos previamente estabelecidos pelo método, os quais são convertidos em valores numéricos normalizados. Essa estrutura permite transformar informações essencialmente

qualitativas — como estado de conservação, nível de deterioração ou adequação operacional — em parâmetros quantitativos comparáveis, reduzindo a subjetividade do processo avaliativo.

A avaliação da segurança da Barragem do Chasqueiro foi realizada por meio da aplicação do ISB proposto por Zuffo (2005), com base em dados obtidos a partir de inspeção de campo, registros técnicos disponíveis e informações provenientes de estudos recentes desenvolvidos para a estrutura (CAMARGO *et al.*, 2024; SILVA *et al.*, 2024; SILVA *et al.*, 2023a; SILVA *et al.*, 2023b; SONDOTÉCNICA, 1976; SONDOTÉCNICA, 1983). A inspeção de campo teve como objetivo identificar e caracterizar as condições físicas e operacionais da barragem e de suas estruturas associadas, abrangendo o coroamento, os taludes de montante e jusante, o vertedouro, o reservatório, a instrumentação existente e as áreas adjacentes. Durante a inspeção, registraram-se anomalias, manifestações de degradação e aspectos relacionados à operação, manutenção e uso do entorno, subsidiando a avaliação dos critérios do método. Com base nas informações de campo e nos dados documentais disponíveis, a barragem foi enquadrada nos critérios definidos por Zuffo (2005), com atribuição de funções de valor e pontuações específicas, posteriormente ponderadas pelos pesos estabelecidos, permitindo o cálculo dos valores parciais e do Índice de Segurança de Barragens global. A interpretação dos resultados foi realizada a partir do valor final do ISB e da análise individual dos critérios avaliados, permitindo identificar os fatores que mais influenciaram a condição de segurança da Barragem do Chasqueiro e aqueles associados a maiores níveis de vulnerabilidade. Essa abordagem possibilitou discutir a aplicabilidade do método de Zuffo (2005) como ferramenta de apoio à gestão da segurança de barragens de terra em contexto agrícola

3. Resultados e discussões

3.1. Importância da barragem

O critério de importância da barragem reflete o potencial de consequências socioeconômicas associadas a uma eventual falha, partindo da premissa de que estruturas ligadas a grandes contingentes populacionais exigem requisitos de segurança mais rigorosos, o que resulta em notas menores na função de valor. Neste estudo, adotou-se uma abordagem conservadora ao considerar que a estrutura sustenta a base econômica do município de Arroio Grande por meio da orizicultura, definindo-se como contingente dependente a população municipal total de aproximadamente 17.700 habitantes. A aplicação desse valor à metodologia de Zuffo (2005) resultou em uma nota de segurança $q_I = 30$, indicando que a barragem atinge apenas 30% da condição de referência máxima para este critério. Essa baixa pontuação evidencia que a relevância estratégica da Barragem do Chasqueiro atua como um fator limitante para o índice global de segurança, elevando o nível de exigência sobre a integridade da estrutura.

3.2. Dimensões

O critério de dimensões é avaliado pela combinação entre a altura do maciço e o volume total do reservatório, servindo como um indicador da magnitude de energia que seria libertada numa eventual ruptura. Conforme os dados do projeto básico (SONDOTÉCNICA, 1976), a Barragem do Chasqueiro possui uma altura de 22 metros, o que a situaria num nível de risco intermédio. Contudo, o seu volume útil de

armazenamento é considerável, totalizando aproximadamente 117 milhões de metros cúbicos. Devido a esta grande capacidade de acumulação, que excede os limites superiores das categorias padrão para a sua altura, o método de Zuffo (2005) impõe um enquadramento mais rigoroso (conceito 1,5). Esta classificação resulta numa nota de segurança $q_2 = 33$ evidenciando que as proporções da estrutura, especialmente o volume represado, representam um fator de elevada criticidade que reduz o índice de segurança global.

3.3. Tipo de barragem

O critério relativo ao tipo de estrutura avalia a vulnerabilidade conforme o sistema construtivo, considerando que barragens de terra possuem maior suscetibilidade a mecanismos de instabilidade como erosão interna e percolação quando comparadas a obras de concreto. A Barragem do Chasqueiro é caracterizada como uma barragem de terra, pois seu corpo principal é constituído por um maciço de solo compactado. Embora possua revestimento em *rip-rap* para proteção superficial, este não exerce papel estrutural no equilíbrio global. Assim, a estrutura foi enquadrada no conceito 1,0 do método, resultando em uma nota de segurança $q_3 = 40$ o que indica que a barragem atinge cerca de 40% da condição de referência máxima para este parâmetro.

3.4. Tipo de vertedouro

O critério tipo de vertedouro está associado à confiabilidade do sistema de descarga da estrutura. Na Barragem do Chasqueiro, o vertedouro de serviço é do tipo tulipa e possui mecanismo de descarga controlado por comporta, conforme o projeto da Sondotécnica (1976). Para fins de aplicação do método, a estrutura foi enquadrada no conceito 1,0, resultando em uma nota de segurança $q_4 = 16$. A baixa pontuação reflete a maior vulnerabilidade do sistema a falhas de natureza mecânica e operacional, que podem comprometer a capacidade de escoamento em eventos extremos, sendo este critério um dos principais fatores de redução do ISB global. Apesar disso, ressalta-se a presença de um vertedouro de emergência na estrutura.

3.5. Período de retorno de projeto dos órgãos de segurança contra enchentes

O critério Período de Retorno, no método de Zuffo (2005), associa-se à capacidade do sistema de descarga em conduzir eventos hidrológicos extremos de forma satisfatória. Para a Barragem do Chasqueiro, adotou-se um período de retorno de projeto de 500 anos para o vertedouro de serviço, conforme as indicações da Sondotécnica (1976). A aplicação desse valor na função de valor correspondente resultou na nota de segurança $q_5 = 64$. Esse resultado indica um desempenho intermediário da estrutura em relação à condição de referência máxima estabelecida pela metodologia.

3.6. Instalações a jusante

O critério Instalações a jusante, no método de Zuffo (2005), avalia o nível de ocupação e presença de elementos potencialmente vulneráveis a jusante da barragem, considerando que áreas com maior concentração de infraestruturas ou núcleos habitados estão associadas a consequências mais severas em um eventual cenário de falha. Na área situada a jusante da Barragem do Chasqueiro, predomina o uso rural, com ocorrência de

áreas agrícolas e pastagens, características típicas do entorno da estrutura. No entanto, verifica-se também a presença de infraestruturas lineares, como estradas e obras associadas, que podem ser diretamente afetadas por um escoamento não controlado decorrente de uma ruptura. Diante dessa condição e adotando-se uma abordagem conservadora, a barragem foi enquadrada no conceito 1,0 para este critério, resultando na atribuição de uma nota de segurança q_6 igual a 34.

3.7. Instalações a montante

O critério Instalações a Montante, no método de Zuffo (2005), avalia a posição da barragem no curso d'água e a existência de estruturas hidráulicas a montante capazes de gerar efeito cascata em caso de falha. Barragens situadas a montante de outras estruturas apresentam maior vulnerabilidade, enquanto aquelas localizadas na cabeceira da bacia tendem a menor risco associado ao mecanismo. Não foram identificadas para a Barragem do Chasqueiro barragens a montante. A estrutura caracteriza-se, portanto, como a primeira barragem (e única) ao longo do curso d'água. Dessa forma, a barragem foi enquadrada no conceito 3,0, resultando na atribuição de uma nota de segurança q_7 igual a 100.

3.8. Idade da barragem

A idade da barragem é considerada, no método de Zuffo (2005), um fator relevante para a avaliação da segurança estrutural, partindo-se do pressuposto de que estruturas muito recentes ou em avançado estágio de envelhecimento tendem a apresentar maior probabilidade de ocorrência de falhas. No caso da Barragem do Chasqueiro, embora o projeto básico tenha sido elaborado em 1976 (SONDOTÉCNICA, 1976), adotou-se como marco temporal para a avaliação a data de entrada em operação, ocorrida em 1983 (SILVA *et al.*, 2024). Considerando o ano de referência 2026, a barragem apresenta 42 anos de idade. A aplicação desse valor na função de valor correspondente resultou na atribuição de uma nota q_8 igual a 96, indicando desempenho elevado em relação à condição de referência máxima estabelecida para esse critério no método.

3.9. Qualidade geral dos dados técnicos

A qualidade da base documental disponível constitui um elemento central para a avaliação da segurança de barragens, uma vez que condiciona o nível de conhecimento sobre as características construtivas, operacionais e estruturais da obra. No método de Zuffo (2005), esse aspecto é tratado por meio de uma função de valor que considera o grau de detalhamento e a confiabilidade dos dados técnicos existentes. Para a Barragem do Chasqueiro, a avaliação desse critério baseou-se na documentação técnica disponível (SONDOTÉCNICA, 1976; SONDOTÉCNICA, 1983). Diante desse contexto, a barragem foi enquadrada no conceito 3,0, correspondente ao mais elevado nível de detalhamento dos dados técnicos segundo a metodologia adotada. Esse enquadramento resultou na atribuição de uma nota q_9 igual a 100, indicando que, sob o ponto de vista da qualidade geral das informações técnicas disponíveis, a estrutura atinge a condição de referência máxima estabelecida neste critério.

3.10. Presença de vazamentos

O critério Presença de Vazamentos avalia a integridade estrutural e a eficiência do sistema de drenagem interna. Durante as inspeções visuais realizadas para este estudo, não foram identificadas evidências de surgências, infiltrações anômalas ou processos de erosão interna ativa no maciço da Barragem do Chasqueiro. Dessa forma, a estrutura apresenta boas condições de estanqueidade e funcionalidade dos seus dispositivos de drenagem. Com base nessa constatação de campo, atribuiu-se o conceito 3,0 ao parâmetro, resultando na nota de segurança máxima q_{10} igual a 100. Esse resultado indica que, no momento da avaliação, este critério não representa um fator de risco para a segurança da barragem.

3.11. Presença de deformações

O critério Presença de Trincas e Rachaduras é fundamental para diagnosticar possíveis recalques diferenciais ou esforços estruturais excessivos no maciço. Durante as vistorias realizadas para a elaboração deste trabalho, não foram observadas fendas, trincas ou rachaduras aparentes nas superfícies expostas da Barragem do Chasqueiro. A ausência dessas patologias sugere que o corpo da barragem apresenta estabilidade estrutural satisfatória quanto a movimentos de massa ou deformações críticas. Em função dessa avaliação visual favorável, aplicou-se o conceito 3,0 conforme a metodologia de Zuffo (2005), o que conferiu à estrutura a nota de segurança máxima $q_{11} = 100$.

3.12. Nível de deterioração em aspectos gerais e taludes

Este critério avalia o nível de deterioração em aspectos gerais e o estado dos taludes. Durante as inspeções de campo na Barragem do Chasqueiro, embora a estrutura não apresente falhas graves, foram identificados pontos que demandam atenção quanto à conservação, impedindo a atribuição da nota máxima. De acordo com a metodologia aplicada, o estado geral e as condições dos taludes foram classificados com o conceito 2,0, o que resultou em uma nota de segurança $q_{12} = 50$. Esse valor indica uma situação regular, sinalizando que, apesar de a estrutura estar funcional, há processos de deterioração ou necessidades de manutenção que impedem o enquadramento na condição de referência ideal.

3.13. Evidências de erosão a jusante

Este critério analisa a presença de processos erosivos na região imediatamente após a estrutura, os quais podem comprometer a estabilidade do pé do talude ou das fundações. Silva *et al.* (2024) identificaram a ocorrência de sulcos erosivos no talude de jusante, o que representa um ponto de atenção direta para a integridade da face da barragem. Devido à constatação dessa anomalia, o parâmetro foi enquadrado no conceito 2,0, resultando na nota de segurança $q_{13} = 68$. Essa pontuação reflete a necessidade de intervenções para correção desses sulcos e controle da erosão, evitando o agravamento do estado de conservação do maciço.

3.14. Condições dos equipamentos do vertedouro para prevenção de enchentes

Este critério avalia a confiabilidade operacional do sistema de descarga e sua capacidade de resposta a eventos de cheia. Na Barragem do Chasqueiro, a avaliação foi realizada de forma indireta, devido à impossibilidade de inspeção direta dos mecanismos das comportas e à ausência de registros públicos de manutenção. Contudo, observou-se bom estado geral das estruturas associadas e, principalmente, um

desempenho satisfatório do sistema durante os eventos hidrológicos extremos de 2023 e 2024. Diante dessas evidências e considerando as limitações da inspeção, a estrutura foi enquadrada no conceito 2,0 (condição regular), resultando na nota de segurança $q_{14} = 61$, o que indica um desempenho intermediário para este critério.

3.15. Eutrofização do reservatório

A eutrofização do reservatório está associada ao crescimento excessivo de algas e macrófitas aquáticas, geralmente decorrente do aporte elevado de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, podendo comprometer a qualidade da água e a operação de estruturas hidráulicas (FIA *et al.*, 2009). No método de Zuffo (2005), esse critério é avaliado em função da proporção da superfície do reservatório ocupada por macrófitas. A avaliação da eutrofização da Barragem do Chasqueiro foi realizada a partir da análise de imagens de satélite disponíveis no *Google Earth*[®], considerando diferentes datas ao longo dos últimos cinco anos, de modo a contemplar variações sazonais e operacionais do reservatório, a exemplo do realizado por Camargo *et al.* (2025). A interpretação das imagens não indicou a ocorrência de eutrofização significativa no espelho d'água, sendo observada inexistência ou baixa ocorrência de macrófitas. Esse comportamento pode estar associado ao baixo aporte de matéria orgânica e nutrientes provenientes da bacia de contribuição, que apresenta caráter predominantemente rural, sem registros de lançamentos expressivos de esgotos domésticos ou efluentes industriais – principais fontes de nitrogênio e fósforo em ambientes aquáticos. Assim, considerando que menos de 5% da área do reservatório apresenta cobertura por macrófitas, a barragem foi enquadrada no conceito 4,0, correspondente à condição de baixa ou inexistente eutrofização, resultando na atribuição de uma nota de segurança q_{15} igual a 100, o que indica atendimento à condição de referência máxima para este critério.

3.16. Alteração no uso e ocupação do solo

As alterações no uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica constituem um fator relevante para a segurança de barragens, pois mudanças antrópicas significativas podem intensificar o escoamento superficial, a erosão e o assoreamento, afetando o desempenho hidráulico e geotécnico da estrutura. No método de Zuffo (2005), esse critério avalia a intensidade das transformações ocorridas ao longo do tempo na área de contribuição da barragem.

A avaliação para a Barragem do Chasqueiro baseou-se nos resultados de Bonczynski (2024), que realizou um diagnóstico físico-conservacionista multitemporal da bacia do Arroio Chasqueiro entre 1947 e 2020. Para aplicação do método, considerou-se o período de 1985 a 2020, correspondente ao intervalo mais próximo ao início da operação da barragem, em 1983, com dados consistentes. Os resultados indicam transformações expressivas no uso do solo, destacando-se o aumento significativo das áreas agrícolas, que mais que dobraram em relação às áreas campestres historicamente predominantes. Observa-se, ainda, crescimento expressivo da silvicultura ($\approx 530\%$), com predomínio do cultivo de eucalipto voltado à indústria de celulose, além de incrementos pontuais em áreas florestais associados à recuperação de matas ciliares.

Considerando a magnitude, a rapidez e a natureza das transformações observadas, conclui-se que ocorreu uma mudança significativa do uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Arroio Chasqueiro. Dessa forma, a barragem foi enquadrada no

conceito 1,0, resultando na atribuição de uma nota de segurança q_{16} igual a 21, o que indica desempenho reduzido em relação à condição de referência máxima estabelecida para este critério, ressaltando a influência das mudanças antrópicas sobre a segurança global da estrutura.

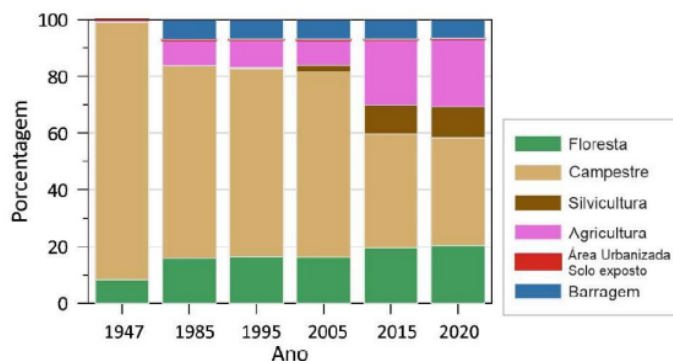


Figura 1 – Percentual, em termos da área da Bacia Hidrográfica do Arroio Chasqueiro, do uso e ocupação do solo de 1947 a 2020 (BONCZYNSKI, 2024).

3.17. Eliminação da vegetação natural ou implantada

A presença de vegetação nos taludes e no coroamento da barragem de terra constitui um fator relevante para a segurança estrutural, uma vez que sistemas radiculares inadequados podem favorecer a formação de caminhos preferenciais de infiltração, intensificar processos erosivos superficiais e comprometer a integridade do maciço. No método de Zuffo (2005), esse aspecto é avaliado em função do grau de eliminação da vegetação natural ou implantada sobre a estrutura.

Na Barragem do Chasqueiro, as inspeções realizadas indicaram a presença de arbustos nos taludes e no coroamento, evidenciando que a remoção da vegetação não ocorre de forma integral. As manifestações observadas são pontuais e de pequena escala, não configurando, no momento, possibilidade de comprometimento estrutural significativo, mas representando, no futuro, um fator de risco potencial, caso não sejam adequadamente controladas. Diante dessas condições, a barragem foi enquadrada no conceito 2,0, correspondente à condição de vegetação parcialmente eliminada segundo o critério de Zuffo (2005). Esse enquadramento resultou na atribuição de uma nota de segurança q_{17} igual a 40.

3.18. Histórico de acidentes relacionados com a barragem

O histórico de acidentes associados a uma barragem constitui um indicador relevante do seu desempenho ao longo do tempo, uma vez que a ocorrência de falhas, incidentes ou comprometimentos estruturais pode refletir fragilidades de projeto, construção, operação ou manutenção. No método de Zuffo (2005), esse critério avalia a segurança da estrutura a partir do registro de eventos adversos previamente associados à barragem.

No caso da Barragem do Chasqueiro, informações fornecidas pelos gestores da estrutura indicam a inexistência de registros de acidentes, falhas estruturais ou episódios de comprometimento da integridade do maciço ao longo do seu período de operação. Não há, portanto, evidências documentadas de ocorrências que tenham afetado a segurança da barragem até o momento da avaliação. Diante da ausência de histórico de acidentes, a barragem foi enquadrada no conceito 5,0, correspondente à inexistência de eventos adversos segundo a classificação proposta por Zuffo (2005). Esse enquadramento

resultou na atribuição de uma nota de segurança q_{18} igual a 100, indicando que, sob o ponto de vista do histórico de acidentes, a estrutura atende à condição de referência máxima estabelecida para este critério no método.

3.19. Resultado ISB

Concluída a avaliação dos dezoito critérios do método de Zuffo (2005), procedeu-se ao cálculo do ISB para a Barragem do Chasqueiro, considerando as condições reais da estrutura (Cenário 1). Os resultados consolidados encontram-se sintetizados na Tabela 1. O valor obtido foi $ISB = 55,91$, enquadrando a barragem na classe “Deficiente”, o que indica a existência de pontos de atenção que demandam monitoramento contínuo e ações preventivas, sem representar comprometimento estrutural imediato.

A análise das contribuições individuais evidencia forte influência de parâmetros associados às características de projeto e ao contexto territorial, destacando-se as baixas pontuações dos critérios Tipo de Vertedouro (nota 16) e Importância da Barragem (nota 30), que atuam como fatores limitantes do índice final, mesmo quando outros parâmetros estruturais e operacionais apresentam desempenho satisfatório.

Para avaliar a sensibilidade do ISB, foram simulados cenários adicionais (Tabela 1). No Cenário 2, considerou-se uma condição idealizada de gestão global, com nota máxima para todos os critérios passíveis de intervenção direta pelo gestor, mantendo-se inalterados apenas os parâmetros intrínsecos de projeto e condicionantes externas. Nessas condições, o ISB elevou-se para 69,04, permanecendo abaixo do limiar de “Segurança Adequada” ($ISB > 80$).

No Cenário 3, manteve-se a gestão ideal do Cenário 2, reinserindo-se o valor real do critério Alteração no Uso e Ocupação do Solo, fator externo à barragem, resultando em $ISB = 64,26$. Esses resultados reforçam que o enquadramento na classe “Deficiente” decorre principalmente da penalização imposta por critérios de projeto, tipologia do vertedouro, importância socioeconômica e condicionantes territoriais, devendo o ISB ser interpretado como indicação de condição global limitada sob a ótica do modelo.

Estudos recentes voltados especificamente à gestão e ao monitoramento da Barragem do Chasqueiro indicam que os problemas mais relevantes atualmente observados concentram-se no entupimento de dois dos sete piezômetros instalados na estrutura e na ocorrência de turbidez na água de drenagem na antiga saída do Arroio Chasqueiro (SILVA *et al.*, 2023b). Esses aspectos estão potencialmente associados a processos químicos de colmatação do filtro da barragem, conforme discutido por Silva (2023), podendo comprometer a eficiência do sistema de drenagem interna e, conseqüentemente, o controle adequado das pressões neutras no maciço. Ressalta-se que tais condições não foram explicitamente identificadas nem capturadas pelos critérios do método de Zuffo (2005), não tendo, portanto, influência direta no valor do ISB obtido. Esse fato reforça que o índice deve ser interpretado como uma ferramenta de triagem e comparação, devendo ser necessariamente complementado por análises geotécnicas específicas e por programas sistemáticos de instrumentação e monitoramento.

Tabela 1 – Avaliação dos ISB de Zuffo (2005) para os diferentes cenários

Critério	Peso	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
		Nota	Pond.	Nota	Pond.	Nota	Pond.

Importância da barragem	0,056	30	1,210	30	1,210	30	1,210
Dimensões	0,063	33	1,246	33	1,246	33	1,246
Tipo de barragem	0,049	40	1,198	40	1,198	40	1,198
Tipo de vertedouro	0,051	16	1,152	16	1,152	16	1,152
Período de retorno de projeto dos órgãos de segurança contra enchentes	0,065	64	1,310	64	1,310	64	1,310
Instalações a jusante	0,059	34	1,231	34	1,231	34	1,231
Instalações a montante	0,044	100	1,225	100	1,225	100	1,225
Idade da barragem	0,053	96	1,274	96	1,274	96	1,274
Qualidade geral dos dados técnicos	0,052	100	1,271	100	1,271	100	1,271
Presença de vazamento	0,066	100	1,355	100	1,355	100	1,355
Presença de deformações	0,065	100	1,349	100	1,349	100	1,349
Nível de deterioração em aspectos gerais e taludes	0,056	50	1,245	100	1,245	100	1,245
Evidências de erosão a jusante	0,065	68	1,316	100	1,316	100	1,316
Condições dos equipamentos do vertedouro para prevenção de enchentes	0,067	61	1,317	100	1,317	100	1,317
Eutrofização do reservatório	0,040	100	1,202	100	1,202	100	1,202
Alteração no uso e ocupação do solo	0,046	21	1,150	100	1,150	100	1,150
Eliminação da vegetação natural ou implantada	0,046	40	1,185	100	1,185	21	1,185
Histórico de acidentes da barragem	0,057	100	1,300	100	1,300	100	1,300
		ISB	55,91		69,04		64,26

4. Conclusões

A aplicação do índice proposto por Zuffo (2005) à Barragem do Chasqueiro resultou em $ISB = 55,91$, enquadrando a estrutura na classe “Deficiente”. Esse resultado foi fortemente influenciado por critérios associados às características de projeto e ao contexto territorial, especialmente *Tipo de Vertedouro* e *Importância da Barragem*, que possuem pesos elevados na composição do índice. As simulações de sensibilidade indicaram que, mesmo sob uma condição idealizada de gestão global da barragem, o ISB atinge valor máximo de 69,04, permanecendo abaixo do limiar de “Segurança Adequada”. Esse comportamento evidencia o caráter conservador do método e sua forte dependência de parâmetros pouco suscetíveis a modificações sem intervenções estruturais de grande porte. Ressalta-se que os problemas atualmente mais relevantes identificados para a Barragem do Chasqueiro — como o entupimento de piezômetros e a turbidez na água de drenagem, potencialmente associados à colmatação do filtro — não são diretamente capturados pelo ISB, reforçando que o método deve ser interpretado como ferramenta de triagem e apoio à gestão, e não como substituto de análises geotécnicas detalhadas e monitoramento. Conclui-se que o método de Zuffo (2005) é útil para fornecer uma visão integrada da segurança da barragem, porém sua aplicação deve ser sempre combinada a outras ferramentas de avaliação e

acompanhamento técnico.

Referências

- BONCZYNSKI, R.G.** *Diagnóstico físico-conservacionista multitemporal da bacia hidrográfica do Arroio Chasqueiro, Arroio Grande (RS)*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Pelotas – UFPel. 2024.
- CAMARGO, K.R.; BRUCH, A.F.; SILVA, J.L.; CARNEIRO, M.; RODRIGUES, M.L.; RETZLAFF, A.S.** *Evaluation of internal erosion potencial due to dispersive fine soil used as construction material in the Chasqueiro Dam - Arroio Grande/RS: Geotechnical and geophysical methods*. RGSA (ANPAD), v. 18, p. 1-17. 2024. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n12-050>
- CAMARGO, K.R.; ALONSO, V.V.; BRUCH, A.F.; RODRIGUES, M.L.; BASTOS, C.A.B.; CARNEIRO, M.** *Uso de cartografia história como ferramenta para a interpretação do comportamento geotécnico dos depósitos tecnogênicos em regiões portuárias de Rio Grande/RS/Brasil*. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 18, p. 2596-2620. 2025. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.4.p2596-2620>
- FIA, R.; MATTOS, A.T.; CORADI, P.C.; RAMIREZ, O.P.** *Estado trófico da água na bacia hidrográfica da Lagoa Mirim, RS, Brasil*. Ambiente e Água – An interdisciplinary Journal of Applied Science, v. 4, n. 1, p. 132-141. 2009.
- LIMA, T.P.; BRUCH, A.F.; CAMARGO, K.R.; ALVES JR., C.S.; SILVA, F.M.M.; CARNEIRO, M.; SILVA, R.M.** *Integration of geodetic methods in dam monitoring: Chasqueiro Dam – Arroio Grande/RS*. RGSA (ANPAD), v. 20, p. E014198. 2026. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v20n1-020>
- SILVA, J.L.** *Uso de métodos geotécnicos e geotecnologias como ferramenta para a auscultação de barragem de terra – estudo de caso Barragem do Chasqueiro (Arroio Grande/RS)*. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Civil Empresarial. Universidade Federal do Rio Grande – FURG. 193 p. 2023.
- SILVA, J.L.; CAMARGO, K.R.; COLLARES, G.L.; BRUCH, A.F.** *Uso de GPR para a identificação de instrumentação em subsuperfície na Barragem do Chasqueiro – Arroio Grande/RS/Brasil*. Revista Prociências, v. 6, p. 2-17. 2023a.
- SILVA, J.L.; CAMARGO, K.R.; BRUCH, A.F.; COLLARES, G.** *Simulação de Inspeção de Segurança Regular de Barragem de Terra: Barragem do Chasqueiro – Arroio Grande/RS*. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 15, n. 1. 2023b.
- SILVA, J.L.; RODRIGUES, M.L.; CAMARGO, K.R.; BRUCH, A.F.; CARNEIRO, M. RETZLAFF, A.S.** *Use of UAV as tool for dam auscultation*. Iberoamerican Journal of Applied Computing, v. 12, p. 1. 2024.
- SONDOTÉCNICA.** *Projeto Básico do Distrito de Irrigação do Arroio Chasqueiro*. Relatório Técnico. 1976.
- SONDOTÉCNICA.** *Relatório de Visita às Obras*. Relatório Técnico. 1983.
- TANG, X.; CHEN, A.; HE, J.** *Optimized variable selection of Bayesian network for dam risk analysis: a case study on earth dams on United States*. Journal of Hydrology, v. 617, p. 129091. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129091>
- ZHOU, Y; BAO, T; SHU, X.; LI, Y.; LI, Y.** *BIM and ontology-based knowledge management for dam safety monitoring*. Automation in Construction, n. 145. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104649>
- ZUFFO, M.S.R.** *Metodologia para avaliação de segurança de barragens*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas-SP. 207 p. 2005.