

Proposta metodológica para a análise do risco socioambiental de barragens de rejeito de mineração do estado de Goiás (Brasil)

Marcelo Bernardi Valerius ^{1*}, Eraldo Henriques de Carvalho ²

¹Mestre em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasil. (*Autor correspondente: mbvalerius@gmail.com)

²Doutor em Engenharia Civil, Professor da Universidade Federal de Goiás, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 20/08/2020 – Revisado em: 01/10/2020 – Aceito em: 19/11/2020

RESUMO

A gestão adequada das barragens de rejeitos diminui os impactos ambientais da operação destas estruturas e, sobretudo, evita acidentes catastróficos. Neste artigo é proposta uma ferramenta, baseada na metodologia utilizada para a obtenção do Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos (IQR), para avaliação do risco socioambiental causado por barragens de rejeitos. O Índice de Gestão do Risco Socioambiental de Barragens de Rejeitos (IGERIS-BR) proposto neste artigo, considera as características do rejeito e da área escolhida para a implantação da barragem, os danos potenciais em caso de ruptura, os critérios adotados no projeto, na execução e na definição do sistema de monitoramento geotécnico e ambiental da barragem, os procedimentos de operação, manutenção e controle geotécnico, por fim, os aspectos inerentes à gestão ambiental da barragem. A metodologia foi aplicada a quatro barragens existentes no estado de Goiás, dentre as quais duas tiveram a gestão do risco socioambiental avaliada como satisfatória, uma como insuficiente e uma como inadequada. Os resultados obtidos foram comparados com a classificação utilizada no Brasil pela Agência Nacional da Mineração (ANM), mostrando que a metodologia brasileira deve passar por adequações e ser atualizada. A ferramenta proposta revelou-se simples e útil, podendo ser utilizada por órgãos fiscalizadores e empresas para a gestão do risco socioambiental.

Palavras-Chaves: Barragens de rejeito, avaliação de risco socioambiental, mineração.

Methodological proposal for the analysis of socio-environmental risk of tailing dams in the state of Goiás (Brazil)

ABSTRACT

Proper management of tailings dams reduces the environmental impacts of the operation and prevents catastrophic accidents. In this paper, a method is proposed, based on the methodology used to obtain the Quality Waste Landfills Index (IQR), for evaluation of the socio-environmental risk caused by tailings dams. The Management Index of Socio-Environmental Risk of Tailings Dams (IGERIS-BR) proposed in this paper, considers the characteristics of the tailings and the area chosen for the dam implementation, the potential damage in a failure, the design, and execution basis, the geotechnical and environmental monitoring system, the operation characteristics, maintenance, and monitoring procedures and aspects related to the environmental management of the dam. The method was applied to evaluate four dams in the state of Goiás and two had socio-environmental risk management assessed as satisfactory, one as insufficient and one as inadequate. The results were compared with a method used in Brazil by the National Mining Agency (ANM), showing that the Brazilian methodology must go through adjustments and need to be updated. The proposed method turned out to be simple and useful and can be used by inspection agencies and companies to manage socio-environmental risk.

Keywords: Tailing dams, socio-environmental risk evaluation, mining

Valerius, M. B., Carvalho, E. H. (2020). Proposta metodológica para a análise do risco socioambiental de barragens de rejeito de mineração do estado de Goiás (Brasil). *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.8, n.4, 298-313.



1. Introdução

O crescente aumento populacional aliado aos avanços tecnológicos e à crescente necessidade de consumo das pessoas aumenta a demanda por recursos minerais, setor de extrema importância para a economia do estado de Goiás, Brasil, que atualmente é o terceiro polo extrativista mineral do país, ficando atrás apenas do Pará e de Minas Gerais (MME, 2020).

A mineração é destaque positivo no cenário econômico, mas tem chamado a atenção da sociedade por ser uma atividade extremamente impactante, principalmente pela degradação de ambientes naturais e pela alta geração de resíduos. No ano de 2019, por exemplo, das 9.338.800 toneladas de minério de nióbio extraídas e beneficiadas em Goiás, 99,73% foi considerado rejeito (MME, 2020). Estes valores não consideram os estéreis, que são solos e rochas sem valor econômico retirados com o objetivo de se ter acesso ao minério a ser explorado.

Os rejeitos, que são os resíduos gerados no processo de beneficiamento mineral, são dispostos em barragens utilizando a técnica de aterro hidráulico. Esta técnica é vantajosa para as mineradoras por uma série de fatores como a baixa necessidade de mão de obra, a simplicidade tecnológica e o baixo custo, que está relacionado ao fato de que em determinadas etapas do beneficiamento o minério é transportado e beneficiado em via úmida (Ribeiro et al., 2009).

Como são investimentos que não trazem retornos financeiros diretos para as mineradoras, alguns empreendimentos negligenciam a construção, operação e manutenção dessas barragens, formando estruturas com baixos fatores de segurança e que, muitas vezes, representam um alto risco para a população situada à jusante. Diante disso, rupturas têm ocorrido ao longo dos anos, causando desastres ambientais e matando cinco pessoas em Nova Lima/MG em 2001, três pessoas em Itabirito/MG em 2014, 19 pessoas em Mariana/MG em 2015 e mais de 300 pessoas em Brumadinho/MG. Além de ser considerado o maior acidente do mundo envolvendo barragens de rejeitos, a devastação de Bento Rodrigues, distrito de Mariana/MG, deixou mais de 200 famílias desabitadas e comprometeu o abastecimento de água em várias cidades. Já o acidente de Brumadinho/MG é considerado o maior acidente de trabalho da história do Brasil.

Em 2010 foi publicada no Brasil a política nacional de segurança de barragens (Lei federal nº 12.334/2010), estabelecendo procedimentos e práticas com a função de melhorar a segurança dessas estruturas. A referida lei atribui a fiscalização das barragens de rejeitos à Agência Nacional de Mineração (ANM), que estabeleceu procedimentos para a classificação do risco e do dano potencial associado dessas estruturas e, a partir desta metodologia, define a periodicidade de auditorias internas e externas, bem como da revisão de projetos e estudos, determina os métodos de monitoramento, entre outras medidas. Contudo, após a publicação da referida lei, três acidentes aconteceram matando mais de 300 pessoas e evidenciando a necessidade de atualização e melhoria dos procedimentos legais, sobretudo porque, em Mariana e Brumadinho, o risco das barragens que romperam foi classificado pela ANM como baixo, evidenciando uma falha no sistema de classificação e fiscalização dessas estruturas.

Diante disso, o objetivo deste artigo é propor uma metodologia de classificação baseada em um índice que avalia a gestão do risco socioambiental dessas estruturas e considera dados de projeto, de operação e manutenção, dados da gestão socioambiental e dados inerentes ao gerenciamento do risco.

2. Materiais e Métodos

Com relação à metodologia aplicada na avaliação socioambiental, foi proposto o Índice de Gestão do Risco Socioambiental de Barragens de Rejeitos (IGERIS-BR) que foi baseado na metodologia utilizada para a obtenção do Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos (IQR), utilizado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para a classificação e apresentação dos dados nos inventários de resíduos sólidos do estado de São Paulo.

O IQR é obtido por meio do preenchimento de uma tabela onde constam todos os itens relevantes a serem observados na operação de um aterro de resíduos. Cada item remete a uma pontuação que possui peso variando de 1 a 10, sendo que, quanto mais alto, mais importante é o item na operação. No final, é feito o somatório de todos os pontos obtidos e a divisão por 10 para a obtenção do IQR. Caso o valor do IQR fique entre 7,0 e 10, o aterro é tido como adequado. Se ficar com pontuação entre 0 e 7 o aterro é classificado como inadequado (SIMA, 2018).

O IGERIS-BR foi calculado seguindo os mesmos princípios da metodologia da CETESB, porém elencando os itens considerados mais importantes a serem observados na instalação, na operação e na gestão socioambiental e de segurança das barragens de rejeito.

Para cada critério foi atribuído um peso variando de 0 a 10 de acordo com sua importância. Desta forma, tendo em vista a complexidade tanto dos projetos de uma barragem de rejeito como do contexto social e ambiental que sua gestão envolve, alguns critérios possuem várias formas de avaliação, procurando representar todas as alternativas que podem ser encontradas nas barragens de rejeitos instaladas no Brasil. Ao final, é feita a soma da pontuação obtida e divisão por 10 para se obter o IGERIS-BR. O resultado obtido é enquadrado em uma das seis categorias de classificação de avaliação da gestão do risco socioambiental, conforme tabela 1.

Após a definição da metodologia, dentre as sete grandes barragens de rejeitos existentes no estado de Goiás, foram avaliadas quatro para a definição dos respectivos índices IGERIS-BR, estando elas situadas nos municípios de Catalão, Ouidor, Crixás e Alto Horizonte. As barragens foram selecionadas levando em consideração a disponibilidade de estudos e informações necessárias para a determinação do índice. Os dados de projeto das barragens, bem como relatórios de revisões periódicas de segurança, o plano de segurança da barragem e relatórios de vistoria e/ou fiscalização, foram obtidos nos processos de licenciamento ambiental dessas estruturas na Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Goiás (Semad), com dados apresentados entre os anos de 2014 e 2018.

Tabela 1 - Avaliação da gestão do risco socioambiental associada ao índice IGERIS-BR

Avaliação da gestão do risco socioambiental	Faixas de valores do IGERIS-BR
Excelente	IGERIS-BR > 9
Adequada	$7,5 < \text{IGERIS-BR} \leq 9$
Satisfatória	$6 < \text{IGERIS-BR} \leq 7,5$
Insuficiente	$4,5 < \text{IGERIS-BR} \leq 6$
Inadequada	$3 < \text{IGERIS-BR} \leq 4,5$
Inexistente	$\text{IGERIS-BR} \leq 3$

3. Resultados e Discussões

Este item está dividido em três partes: a primeira trata da definição dos critérios de avaliação das barragens de rejeitos para a obtenção do índice IGERIS-BR, a segunda demonstra a consolidação dos critérios e a determinação da pontuação de cada um e, finalmente, a terceira mostra os resultados obtidos quando da aplicação da metodologia em quatro barragens de rejeitos do estado de Goiás, bem como é feita uma comparação com os resultados obtidos pela metodologia utilizada pela ANM.

3.1 Critérios técnicos considerados na avaliação do índice IGERIS-BR

Os quesitos considerados na análise do IGERIS-BR foram divididos nos quatro grupos:

- a) Características do rejeito, da área escolhida para a implantação da barragem e dos danos potenciais em caso de ruptura;
- b) Critérios adotados no projeto, na execução e na definição do sistema de monitoramento geotécnico e ambiental;
- c) Procedimentos de operação, manutenção e controle geotécnico;
- d) Aspectos inerentes à gestão ambiental.

As informações observadas e relacionadas a cada um dos quatro grupos são detalhadas nos próximos itens. É importante mencionar que alguns fatores avaliados na análise da ANM conforme portaria nº 70389 (BRASIL, 2017), também são considerados na metodologia proposta, pois são de extrema importância e indispensáveis na avaliação da gestão do risco de uma barragem de rejeitos.

3.1.1 Características do rejeito, da área escolhida para a implantação da barragem e os danos potenciais em caso de ruptura.

De um modo geral, este item buscou avaliar a configuração do represamento de rejeitos e o risco que ele oferece devido à sua localização e às características do rejeito armazenado. As informações utilizadas para subsidiar esta etapa da avaliação foram as seguintes:

a) Área ocupada segundo a configuração do represamento: foram considerados os represamentos em vale, em meia encosta, em depressão no terreno e em cava exaurida. O represamento em vales de rios ou córregos foi considerado o mais danoso, uma vez que ocorre um impacto direto no curso de água. O represamento em meia encosta não afeta diretamente um curso de água, mas é mais propenso a processos erosivos colocando em risco pessoas, cursos de água e estruturas a jusante. O método de disposição em cavas exauridas foi considerado o menos danoso por utilizar uma área já degradada pela mineração. Neste caso, foram consideradas as situações em que o rejeito extrapola a cava exaurida e se faz necessária a construção de diques e sucessivos alteamentos para armazenar mais rejeitos;

b) Características dos rejeitos: foi considerada a classificação dos rejeitos conforme a norma ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004) em classe I, classe IIA e classe IIB, o potencial de geração de radionuclídeos e o potencial de geração de acidez do rejeito armazenado. Os rejeitos considerados perigosos ou com potencial de geração de radionuclídeos foram considerados os mais degradantes. Os rejeitos com potencial de geração de acidez e os não-inertes possuem potencial de contaminar o solo e os corpos de água, porém com menos intensidade que os anteriores fazendo com que o controle se torne menos complexo. Os rejeitos inertes foram considerados dentre todos os menos danosos;

c) Danos a unidades de conservação, patrimônios e monumentos históricos localizados a jusante;

d) Existência de pessoas em risco, tanto trabalhadores da mineradora como pessoas que possuem residência permanente na área potencialmente afetada em caso de ruptura;

e) Existência, na área potencialmente afetada, de uma das seguintes estruturas importantes para população como pontes, estradas, rodovias, ferrovias, reservatórios de hidrelétricas, redes de energia, sistema de abastecimento de água, entre outras;

f) Tempo de chegada da onda de inundação na primeira residência a jusante da barragem: este tempo é determinado no estudo de ruptura hipotética (*dambreak*) e, quanto menor, mais difícil é a evacuação da população em risco. Quanto menor o tempo, menor foi a pontuação obtida.

3.1.2 Critérios adotados no projeto, na execução e na definição do sistema de monitoramento geotécnico e ambiental

O objetivo deste item foi avaliar se os critérios adotados nos projetos da barragem estão de acordo com as normas vigentes e as boas práticas adotadas na engenharia, bem como verificar se as informações concernentes aos projetos foram apresentadas ao órgão ambiental de forma satisfatória. Os itens considerados nesta etapa foram os seguintes:

a) Existência e disponibilização de estudos, projetos e documentos que demonstrem a evolução da estrutura ao longo dos anos: como a maior parte das barragens de rejeitos são alteadas sucessivamente, é muito comum que essas estruturas sejam projetadas para operarem durante vários anos, sendo que em Goiás existem barragens que foram instaladas no início da década de 80 e estão em operação até hoje. Diante disso, a falta de normatização e legislação específica que exigisse um maior controle dessas estruturas aliada às mudanças de gestão que ocorreram ao longo dos anos nas mineradoras, fizeram com que os projetos de algumas estruturas se perdessem ou simplesmente nunca existissem, considerando que era prática comum a instalação de estruturas sem nenhum projeto. O que se observa é que, mesmo com a publicação da política nacional de segurança de barragens e de normas regulamentadoras da Agência Nacional de Mineração (ANM), foi possível perceber que algumas mineradoras não disponibilizam aos órgãos públicos todos os registros existentes relacionados às mudanças de projeto, dificuldades encontradas, intervenções emergenciais, anomalias corrigidas, e entre outras informações importantes e que devem ser consideradas na avaliação de uma barragem. É importante ressaltar que, para o órgão ambiental, os projetos são fundamentais para subsidiar a tomada de decisões de licenciamento e a realização de fiscalizações. Na metodologia utilizada pela ANM também é feito esse tipo de verificação;

b) Impermeabilização: nos casos em que os rejeitos possuem potencial de gerar contaminação foi considerada a existência ou não de impermeabilização no fundo do depósito de rejeito, conforme recomenda a NBR 13028 (ABNT, 2017);

c) Poços de monitoramento do lençol freático: são necessários para monitorar a qualidade da água subterrânea quando os rejeitos apresentam potencial de contaminar o aquífero. Neste caso, foi avaliada a quantidade e a localização dos poços;

d) Gerenciamento do efluente da barragem: o efluente de uma barragem de rejeitos pode ser recirculado e reaproveitado novamente no beneficiamento ou pode ser descartado com ou sem tratamento. Nos casos em que há descarte de efluente em cursos de água, foi avaliado, por meio de laudos laboratoriais apresentados, se as características do efluente estão de acordo com os padrões de descarte e se a classe dos cursos hídricos está sendo alterada conforme disposto nas resoluções CONAMA nº 357 e 430 (BRASIL, 2005, 2011);

e) Obtenção de parâmetros geotécnicos: foi avaliado se os parâmetros geotécnicos foram obtidos por meio de ensaios de campo e/ou laboratório. Em alguns casos os projetistas adotam parâmetros fazendo correlações com materiais similares ou obtêm valores aproximados na literatura, o que é inadequado conforme a NBR 13028 (ABNT, 2017).

f) Monitoramento geotécnico: devem ser instalados instrumentos de monitoramento na barragem, mas não existem normas especificando os tipos e a quantidade necessária. Geralmente são instalados sistemas para monitoramento da superfície piezométrica (medidores de nível de água), piezômetros para medir a poropressão, inclinômetros e/ou marcos superficiais para medir deslocamentos, e medidores de vazão para controlar a vazão descartada pelos drenos. O monitoramento da sismicidade é importante em algumas regiões e fundamental quando existem cavas próximas onde a sismicidade induzida pelo plano de fogo pode afetar a barragem. Desta forma, o critério “*monitoramento geotécnico*” foi considerado adequado para as barragens que possuem monitoramento da poropressão, da superfície freática, de deformações e de sismicidade. Foi

considerado como suficiente para as barragens que possuem todos os monitoramentos, exceto o de sismicidade. Na metodologia utilizada pela ANM o monitoramento geotécnico também é avaliado, porém é verificado apenas se foram instalados os instrumentos conforme o projeto ou não;

g) Componentes da barragem conforme os projetos: este é um problema muito comum quando se tem diferentes empresas responsáveis pelas etapas de projeto e execução. Frequentemente a execução é diferente dos projetos, o que pode alterar os fatores de segurança da barragem. Foi avaliado se o empreendimento possui ou não o projeto “as built” ou “as is”. Este item também é considerado na avaliação feita pela ANM;

h) Fatores de segurança: conforme a ABNT (2017), no projeto de barragens de rejeito deve-se observar os fatores de segurança de 1,5 para operação com rede de fluxo em condição normal e nível máximo do reservatório, 1,3 com rede de fluxo em condição extrema e nível máximo do reservatório, e 1,1 para solicitação sísmica com nível máximo do reservatório. Para as análises de estabilidade e estudos de susceptibilidade à liquefação na condição não drenada, é exigido o fator de segurança mínimo de 1,3 conforme a resolução nº 13 de 2019 da Agência Nacional de Mineração (BRASIL, 2019). É importante ressaltar que a resolução ANM nº 13 de 2019 foi publicada após o desastre de Brumadinho pois não havia até então parâmetros de referência para problemas de liquefação. Para a classificação IGERIS-BR os fatores de segurança mínimos foram definidos considerando o risco associado à ruptura, ou seja, quando bens socioambientais e pessoas correm o risco de serem afetadas, entende-se que os fatores de segurança devem ser mais restritivos do que nos casos em que uma ruptura afeta áreas já degradadas e resulta apenas em perdas para a mineradora. É importante frisar que os fatores de segurança definidos na NBR 13028 devem ser considerados como o limite mínimo, e, estando alguma barragem com fator de segurança abaixo da referida norma, planos de ação emergenciais devem ser executados com a finalidade de estabilizar a barragem. A avaliação dos fatores de segurança foi feita conforme a tabela 2. Quanto ao potencial de liquefação das barragens de rejeito, como ainda não existe norma no Brasil definindo um fator de segurança mínimo, foi considerado fator de segurança mínimo de 1,3 para a análise da estabilidade pós-gatilho da liquefação.

Tabela 2 - Fatores de segurança mínimos associados ao risco

Risco associado	Fatores de segurança (FS)	Classificação no IGERIS-BR
Existência de pessoas em risco ou de patrimônios e monumentos históricos, corpos de água, unidades de conservação, parques e demais bens considerados de relevante interesse social e ambiental.	Operação normal: $\geq 2,5$ Red. Fluxo cond. extrema: ≥ 2 Solicitação sísmica: $\geq 1,8$ Fator de segurança pós-gatilho da liquefação: $\geq 1,5$ ou não susceptível à liquefação	Satisfatório
	Caso não atenda qualquer um dos critérios anteriores	Inadequado
Degradação de um corpo de água	Operação normal: ≥ 2 Red. Fluxo cond. extrema: $\geq 1,8$ Solicitação sísmica: $\geq 1,5$ Fator de segurança pós-gatilho da liquefação: $\geq 1,5$ ou não susceptível à liquefação	Adequado
	Operação normal: $\geq 1,8$ Red. Fluxo cond. extrema: $\geq 1,5$ Solicitação sísmica: $\geq 1,3$ Fator de segurança pós-gatilho da liquefação: $\geq 1,3$ ou não susceptível à liquefação	Satisfatório
	Não atende um dos requisitos anteriores ou não apresentou análise de estabilidade	Inadequado

Nenhum. A área utilizada encontra-se degradada e uma possível ruptura não afetará nenhuma forma de vida	Operação normal: $\geq 1,5$ Red. Fluxo cond. extrema: $\geq 1,3$ Solicitação sísmica: $\geq 1,1$ Fator de segurança pós-gatilho da liquefação: $\geq 1,1$ ou não susceptível à liquefação	Adequado
	Não atende um dos requisitos anteriores ou não apresentou análise de estabilidade	Inadequado

i) Método de alteamento utilizado: no método de montante, além dos alteamentos serem executados em cima dos rejeitos não consolidados, a instalação do sistema de drenagem interno é prejudicada, fazendo com que essas estruturas sejam mais vulneráveis ao fenômeno de liquefação. No método de linha de centro, a compactação do aterro e a drenagem interna são controlados mais facilmente, mas ainda existe a possibilidade de liquefação na pequena porção do aterro que é colocada sobre os rejeitos. O método de jusante é, teoricamente, o método mais seguro porque permite controlar a compactação e a instalação do sistema de drenagem interno durante a elevação do aterro, proporcionando uma maior resistência à liquefação (Vick, 1983). Existe também a possibilidade de combinar dois ou mais métodos de alteamento e, neste caso, foi considerado na classificação o método de mais difícil controle. Por exemplo, a barragem que iniciou seus alteamentos a montante e depois passou a ser alteada por linha de centro, para efeitos de classificação nessa metodologia, a barragem foi considerada de montante.

Dessa forma, a classificação das barragens para posterior pontuação no IGERIS-BR foi feita conforme a tabela 3, seguindo o mesmo princípio utilizado para os fatores de segurança, ou seja, quanto maior o risco, mais seguro deve ser o método construtivo.

Tabela 3: Métodos de alteamento associados ao risco

Risco associado	Método de alteamento	Classificação no IGERIS-BR
Existência de pessoas em risco ou de patrimônios e monumentos históricos, corpos de água, unidades de conservação, parques e demais bens considerados de relevante interesse social e ambiental.	Montante	Inadequado
	Linha de centro	Inadequado
	Jusante	Adequado
Degradação de um corpo de água	Montante	Inadequado
	Linha de centro	Aceitável
	Jusante	Adequado
Nenhum. A área utilizada encontra-se degradada e uma possível ruptura não afetará nenhuma forma de vida	Montante	Aceitável
	Linha de centro	Adequado
	Jusante	Adequado

3.1.3 Procedimentos de operação, manutenção e controle geotécnico

Foram inclusos na análise os seguintes aspectos considerados importantes na operação de uma barragem de rejeitos.

- a) Nível de perigo das anomalias: esta verificação foi feita analisando relatórios de vistorias e fiscalizações feitas pela secretaria de meio ambiente, relatórios de inspeção dos responsáveis pela operação da estrutura e relatórios dos responsáveis por atestar a estabilidade da barragem. Conforme legislação em vigor, os laudos de estabilidade de barragens de rejeitos devem ser emitidos por profissionais que não tenham vínculo com o empreendimento. Esses profissionais elaboram os chamados relatórios de inspeção de segurança regular (RISR) onde são apontadas as anomalias, o nível de perigo e o tempo para a correção das mesmas (BRASIL, 2017).

A classificação será feita conforme a Tabela 4, segundo os níveis de perigo estabelecidos no manual de segurança de barragens do Ministério da Integração Nacional (MI, 2002).

Tabela 4 - Avaliação baseada no nível de perigo

Nível de perigo	Avaliação
Nenhum: anomalia que não afeta a segurança da barragem e é classificada como má conservação e/ou descaso	2
Atenção: a curto prazo a anomalia não afeta a segurança da barragem, mas precisa ser monitorada e controlada a longo prazo	6
Alerta: a anomalia afeta a segurança da barragem	9

b) Manutenções rotineiras: consistem em procedimentos, executados pelos funcionários da mineradora, importantes para o bom funcionamento de todas as estruturas da barragem, como poda de vegetação dos taludes, combate a pragas como cupins e formigas, inspeção de tubulações, verificação da integridade dos instrumentos de monitoramento, desobstrução de canaletas e vertedor, entre outras atividades (MI, 2002). A avaliação das manutenções rotineiras foi feita com base nos relatórios de vistoria e fiscalização e nos relatórios de inspeção de segurança regular, onde os engenheiros responsáveis apontam as falhas neste tipo de manutenção;

c) Monitoramento da linha piezométrica: é feito com a instalação de medidores do nível de água nos taludes e devem possuir níveis de alerta preestabelecidos com base nos estudos de estabilidade (BRASIL, 2017). Este monitoramento foi considerado adequado quando a quantidade de medidores é representativa tendo em vista o tamanho da barragem, e quando as medições são acompanhadas eletronicamente e em tempo integral. O sistema de monitoramento da linha piezométrica foi considerado aceitável quando a quantidade de medidores é representativa, e quando as medições são feitas diariamente e de forma manual. Os casos diferentes dessas situações foram considerados inadequados;

d) Equipe de segurança de barragem: foi possível verificar que algumas mineradoras possuem, em suas estruturas organizacionais, setores compostos por profissionais capacitados e responsáveis apenas pela segurança das barragens, reportando diretamente à alta direção da companhia. Em contrapartida, em algumas empresas, além de não possuírem essa preocupação e dependerem apenas de auditores externos, os funcionários responsáveis por barragens reportam aos gerentes operacionais que costumam focar na produção da empresa e em eventuais prêmios por produtividade;

e) Manual de procedimentos de operação, manutenção e inspeção: foi avaliado o nível de detalhamento do manual em adequado, satisfatório e inadequado.

3.1.4 Aspectos inerentes à gestão ambiental

O objetivo deste item foi verificar se os critérios empregados nos programas de monitoramento ambiental e nos planos de ações emergenciais estavam suficientes e de acordo com a legislação vigente. Os itens considerados foram os seguintes:

a) Planejamento e monitoramento dos rios a jusante: foi avaliado se o plano de monitoramento contempla todos os parâmetros que podem ser alterados devido à influência dos rejeitos. Também foi verificado o tamanho da malha amostral, a frequência de amostragem e se a seleção dos parâmetros foi feita considerando a caracterização dos rejeitos;

b) Planejamento e monitoramento da água subterrânea: avaliou-se a quantidade de parâmetros analisados tendo como base a caracterização dos rejeitos, o tamanho da malha amostral e a frequência da amostragem;

c) Plano de ação de emergência: foi verificado se foram apresentados os requisitos mínimos conforme a portaria do DNPM nº 70389 como detecção, avaliação e classificação das situações de emergência, recursos materiais e logísticos disponíveis para uso em situação de emergência, procedimentos de notificação e sistemas de alerta, mapas de inundação resultados do estudo de *dambreak*, registros dos treinamentos realizados internamente e com a comunidade, entre outros (BRASIL, 2017);

d) Plano de desativação: primeiramente foi verificado se existe projeto para desativação da barragem. Depois, verificou-se a compatibilidade entre a metodologia a ser empregada para a desativação e as características da área potencialmente afetada em casos de ruptura da barragem.

3.2 Considerações feitas para a atribuição dos pesos e consolidação dos critérios técnicos do índice IGERIS-BR

Analisando os critérios de avaliação apresentados anteriormente para a obtenção do IGERIS-BR, é possível verificar que alguns itens são mais importantes que outros na determinação do índice de qualidade socioambiental de barragens de rejeitos, pois contribuem diretamente para ocorrência de falhas na barragem e a consequente perda de vidas ou degradação do meio ambiente.

Desta forma, a atribuição correta do peso de cada critério é de extrema importância para equilibrar a análise e ter como resultado um número que represente corretamente o que o índice propõe.

Tendo em vista esta necessidade, foi utilizado o modelo de Loureiro (2005) da Matriz de Avaliação Funcional conforme metodologia apresentada por Csillag em seu livro *Análise do Valor* (Csillag, 1995). Este modelo consiste na comparação das funções de cada critério e a determinação, com base no método apresentado a seguir, de sua necessidade e importância:

- 3 pontos: função muito mais importante ou necessária que a outra;
- 2 pontos: função significativamente mais importante ou necessária que a outra;
- 1 ponto: função pouco mais importante ou necessária que a outra;
- 0 pontos: função de igual importância ou necessidade que a outra.

Todos os critérios foram comparados entre si e, após cada uma das comparações foi atribuída a pontuação de 0 a 3 para o critério mais importante. Após concluir as comparações, determinou-se o somatório dos pontos obtidos por cada critério e, a seguir, a pontuação total atribuída. A partir da pontuação total determinou-se a porcentagem de pontos que cada critério obteve e, a partir disto, foi feita a distribuição dos pesos tendo como pontuação máxima o valor 100. Todos os critérios e seus respectivos pesos são apresentados na tabela 5.

Conforme pode-se verificar na tabela 5, quanto mais adequada a alternativa adotada por determinada barragem, maior a pontuação atribuída e, conseqüentemente, maior será a pontuação do IGERIS-BR.

Após a avaliação de cada critério inerente à barragem de rejeito é feita a soma da pontuação obtida e divisão por 10 para se obter o IGERIS-BR e, assim, a avaliação da gestão socioambiental conforme a tabela 1.

Tabela 5 - Critérios avaliados e os respectivos pesos atribuídos

Atributos socioambientais e de segurança	Critérios	Avaliação	Peso
Características do rejeito, da área escolhida para a implantação da barragem e dos danos potenciais em caso de ruptura.	Área ocupada	Barragem em vale ou bacia de rio ou córrego	0
		Barragem em meia encosta	2
		Barragem em depressão no terreno	3
		Barragem em cava exaurida	6
	Danos a unidades de conservação, patrimônios e monumentos históricos localizados a jusante	Sim	0
		Não	5
	População em risco	Nenhuma	10
		≤ 15 pessoas	8
		15 < pessoas ≤ 30	6
		30 < pessoas ≤ 60	4
		> 60 pessoas	0
	Existência de estruturas atingidas pela onda de inundação como pontes, estradas, rodovias, ferrovias, reservatórios de hidrelétricas etc.	Sim	0
		Não	5
	Tempo de chegada da onda de inundação na primeira residência	> 60 minutos ou não há residências em risco	2
		30 < minutos ≤ 60	1
≤ 30 minutos		0	
Características do rejeito	Classe I ou com potencial de geração de radionuclídeos	0	
	Classe IIA/rejeito não classificado/Potencial de geração de acidez	2	
	Classe IIB	4	
Critérios adotados no projeto, na execução e na definição do sistema de monitoramento geotécnico e ambiental	Existência e disponibilização de estudos, projetos e documentos que demonstrem a evolução da estrutura ao longo dos anos	Suficiente	1
		Aceitável	0,5
		Insuficiente	0
	Impermeabilização	Sim/Desnecessária	4
		Não	0
	Existência de poços de monitoramento	Sim/Desnecessário	2
		Não	0
	Gerenciamento do efluente da barragem	Adequado/Sem descarte	4
		Aceitável	2

		Inadequado	0
	Obtenção dos parâmetros geotécnicos	Ensaio de campo e laboratório	4
		Ensaio/Empiricamente	2
		Empiricamente	0
	Monitoramento geotécnico	Adequado	6
		Aceitável	3
		Inadequado	0
	Fatores de segurança (ver tabela 3)	Adequado	6
		Satisfatório	4
		Inadequado	0
	Estrutura conforme os projetos	Sim	1
		Parcialmente	0,5
		Não	0
	Método de alteamento (ver tabela 4)	Adequado	4
		Satisfatório	2
		Inadequado	0
Procedimentos de operação, manutenção e controle geotécnico	Nível de perigo das anomalias (ver tabela 5)	Isento de anomalia	9
		Nenhum	7
		Atenção	2
		Alerta	0
	Manutenções rotineiras	Adequadas	3
		Aceitáveis	1,5
		Inadequadas	0
	Equipe de segurança de barragem	Departamento de barragens vinculado à direção.	2
		Departamento de barragens vinculado à operação.	0
	Manuais de procedimento de operação, manutenção e inspeção	Adequados	1
Aceitáveis		0,5	
Inadequados		0	
Monitoramento da linha piezométrica	Adequado	6	
	Aceitável	4	
	Desnecessário	0	
Aspectos inerentes à gestão ambiental	Planejamento e monitoramento dos rios a jusante	Adequado/Desn.	4
		Aceitável	2
		Inadequado	0
	Planejamento e monitoramento da água subterrânea	Adequado/Desn.	3
		Aceitável	1,5
		Inadequado	0
	Plano de ação emergencial (PAE)	Adequado	7
		Aceitável	5
		Inadequado	0
	Plano de desativação	Adequado	1
Aceitável		0,5	
Inadequado/Inexistente		0	

3.2 Resultados da aplicação da metodologia IGERIS-BR em barragens do estado de Goiás

A Tabela 6 mostra os resultados dos índices IGERIS-BR de 4 barragens de rejeitos existentes no estado de Goiás e suas respectivas avaliações do risco socioambiental. Como pode ser observado, a barragem 2 e a barragem 3 encontram-se avaliadas quanto à gestão do risco socioambiental como, respectivamente, inadequada e insuficiente. É importante destacar que esse índice também considera o estado atual da barragem e os projetos e resultados de monitoramentos encaminhados ao órgão ambiental. Portanto, nada impede que, com algumas melhorias, esse índice aumente.

Os resultados do IGERIS-BR foram comparados com a classificação feita pela Agência Nacional de Mineração (ANM), conforme é mostrado na tabela 6. A metodologia utilizada pela ANM foi proposta após a publicação da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), Lei nº 12.334 de 2010. Em sua classificação a ANM enquadra todas as barragens de rejeitos na categoria de risco baixa, média ou alta e na categoria de dano potencial associado baixo, médio ou alto. Para a avaliação da categoria de risco, o método considera as características técnicas da barragem, seu estado de conservação e o nível de detalhe do plano de segurança da barragem. Para a obtenção do dano potencial associado, se verifica características como volume total do reservatório, existência de população a jusante e impacto socioeconômico.

Tabela 6 - Índice IGERIS-BR de 4 barragens existentes no estado de Goiás

Atributos socioambientais e de segurança	Barragens estudadas			
	Barragem 1	Barragem 2	Barragem 3	Barragem 4
Características do rejeito, da área escolhida para a implantação da barragem e dos danos potenciais em caso de ruptura	8	2	10	10
Critérios adotados no projeto, na execução e na definição do sistema de monitoramento geotécnico e ambiental	30	17	26	34
Procedimentos de operação, manutenção e controle geotécnico	10	10	10	8
Aspectos inerentes à gestão ambiental	15	10,5	13	10
IGERIS-BR	6,9	3,95	5,9	7,1
Avaliação da gestão do risco socioambiental	Satisfatória	Inadequada	Insuficiente	Satisfatória
Categoria de risco conforme classificação feita pela ANM de acordo com a Portaria DNPM nº 70389 de 2017	Baixa	Baixa	Média	Baixa
Dano potencial associado conforme classificação feita pela ANM de acordo com a Portaria DNPM nº 70389 de 2017	Alto	Alto	Alto	Alto

Apesar de considerar características que interferem na estabilidade das barragens e que mensuram o dano potencial associado, não se deve utilizar a IGERIS-BR como uma análise de risco quantitativa, pois, para o cálculo do risco, deve-se multiplicar a probabilidade de falha da estrutura pela gravidade das consequências (Robertson & Shaw, 2003). Desta forma, quanto maior a população potencialmente afetada, maior é o risco da barragem, o que impossibilita a definição de um limite de valores. Da mesma forma, entende-se que a classificação feita pela ANM conforme categorias de risco está longe de representar o risco real que as barragens de rejeitos brasileiras oferecem, isto porque o risco não pode possuir valores ou faixas pré-

estabelecidas como baixo, médio e alto. Além disso, a metodologia aplicada pela ANM não considera fatores fundamentais para a avaliação do risco como o tempo de chegada da onda de inundação nas comunidades e a quantidade efetiva de pessoas que seriam afetadas em caso de acidentes.

Diante deste problema, a classificação utilizada pela ANM pode superestimar ou subestimar o risco, dificultando a priorização das estruturas que se encontram em um estado mais crítico. Por exemplo, na determinação do dano potencial associado da classificação da ANM, a existência de população a jusante pode ser classificada como inexistente, pouco frequente, frequente e existente, de forma que, se existir em certo caso uma residência a jusante e em outro caso uma cidade ou bairro, a pontuação recebida na classificação seria a mesma. Seria conveniente que, no caso da barragem que coloca em risco uma cidade inteira, as ações de fiscalização e monitoramento fossem priorizadas, pois a probabilidade de se perder vidas em caso de ruptura é muito maior.

Na prática, das 425 barragens de rejeitos classificadas pela ANM no Brasil conforme *database 02/2019*, 219 possuem dano potencial associado alto, 157 médio e 49 baixo (MME, 2019). Ou seja, 52% das barragens de rejeitos brasileiras estão enquadradas na categoria mais alta de dano potencial associado, contudo não é possível se ter uma ideia das que estão em situação mais crítica. Além disso, é importante ressaltar que a barragem do Fundão em Mariana e a Barragem 1 da mina Córrego do Feijão em Brumadinho, nas respectivas classificações divulgadas pela ANM nos anos de 2014 (MME, 2014) e no final de 2018, estavam classificadas na categoria de risco baixo (Saconi & Ventura, 2019). Tudo isso mostra a necessidade de se refinar melhor esses dados, apontando as estruturas que representam um risco maior para a sociedade, facilitando a fiscalização dos órgãos regulamentadores e, sobretudo, elevando os critérios de segurança para as estruturas consideradas mais precárias.

Considerando este problema, verifica-se que os índices IGERIS-BR das barragens estudadas se mostraram mais variáveis quando comparados com os resultados da classificação feita pela ANM. Duas barragens obtiveram a gestão socioambiental avaliadas como satisfatória, uma como inadequada e outra como insuficiente, enquanto, considerando a classificação feita pela ANM, todas possuem dano potencial associado alto, três possuem categoria de risco baixa e apenas uma possui categoria de risco média.

Outro ponto que demonstra a maior precisão do índice IGERIS-BR é quando compara-se os resultados de ambas metodologias para as barragens 2 e 4. Na metodologia IGERIS-BR a barragem 4 obteve a maior pontuação, pois é a barragem que possui os maiores fatores de segurança, o rejeito armazenado é inerte e a perda de vidas humanas é a menor. Já a barragem 2, que possui rejeitos variando de classe I a Classe IIa, os fatores de segurança estão no limite, o método construtivo é a montante e a barragem está a montante e próxima a uma cidade, recebeu a pior classificação dentre as barragens analisadas. Considerando a metodologia proposta pela ANM, as barragens 2 e 4 obtiveram a mesma classificação baixa para a categoria de risco e alta para o dano potencial associado. A avaliação de duas barragens totalmente diferentes em termos de fatores de segurança e potencial de dano mostra que a metodologia utilizada pela ANM não está devidamente calibrada, podendo estar subestimando barragens que estão em situações críticas.

4. Conclusão

O IGERIS-BR e a metodologia utilizada pela ANM são ferramentas qualitativas e que ajudam na identificação das estruturas que necessitam de uma atenção especial. Entretanto, os resultados apresentados neste artigo mostram que a ferramenta proposta IGERIS-BR obtém resultados mais confiáveis que a metodologia utilizada pela ANM que pode não estar avaliando corretamente as barragens brasileiras.

O índice IGERIS-BR se mostrou uma ferramenta simples e que pode ser utilizada como uma análise inicial do risco socioambiental de barragens de rejeitos, ajudando na tomada de decisões, na priorização de estruturas, na definição de critérios de monitoramento e entre outras medidas que envolvem a gestão dessas estruturas.

Salienta-se que os dois métodos não podem ser considerados como análises de risco quantitativas, isto

porque o risco é calculado procedendo-se o produto entre a probabilidade de falha e a gravidade das consequências. Neste caso, o resultado obtido é um valor que não possui limite pré-estabelecido, ou seja, quanto maior a gravidade das consequências maior será o risco. Desta forma, como as duas metodologias utilizam categorias definidas por faixas de valores, entende-se ser esta a principal limitação dos dois métodos, contudo a ferramenta IGERIS-BR apresentou resultados diferentes e mais precisos que os resultados da metodologia da ANM.

5. Referências bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). **NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). **NBR 13028: Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos**. Rio de Janeiro.

BRASIL. Portaria DNPM nº 70389, de 17 de maio de 2017. **Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB**. Diário Oficial da União, 19 de maio. Disponível em: <http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/20222904/do1-2017-05-19-portaria-n-70-389-de-17-de-maio-de-2017-20222835>. Acessado em outubro de 2019. 2017.

BRASIL. (2010). **Lei Nº 12334, DE 20 DE SETEMBRO DE 2010 que 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 nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000**. Diário Oficial da União, 21 de setembro de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm>. Acessado em: 12 de outubro de 2019.

BRASIL. (2011). **Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011 que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA**. Diário Oficial da União, 16 de maio de 2011. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acessado em 13 de outubro de 2019.

BRASIL. (2005). **Resolução CONAMA nº 357, de 18 de março de 2005 que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Diário Oficial da União, 18 de março de 2005. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acessado em 12 de outubro de 2019.

BRASIL. (2019). **Resolução ANM nº 13 de 8 de agosto de 2019 que estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências.** Diário Oficial da União, 12 de agosto de 2019. Disponível em: <<http://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-13-de-8-de-agosto-de-2019-210037027>>. Acessado em 20 de outubro de 2019.

Csillag, J. M. (1995). **Análise do valor - metodologia do valor** (4ª ed). São Paulo: Atlas.

Loureiro, S. M. (2005). **Índice de Qualidade no Sistema da Gestão Ambiental em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos – IQS.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MI – Ministério da Integração Nacional. (2002) **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens.** Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/inspecao/ManualdeSegurancaeInspecaodeBarragens.pdf>> Acessado em 30 de outubro de 2019.

MME – Ministério de Minas e Energia. (2020). **Anuário Mineral Brasileiro: Principais substâncias metálicas.** Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2020_ano_base_2019_revisada2_28_09.pdf> Acessado em 16 de novembro de 2020.

MME – Ministério de Minas e Energia. (2019). **Classificação das barragens de mineração brasileiras – data base fev/2019.** Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/pasta-cadastro-nacional-de-barragens-de-mineracao/classificacao-oficial-anm>> Acessado em 30 de outubro de 2019.

MME – Ministério de Minas e Energia. (2014). **Classificação das Barragens de Mineração inseridas na PNSB - database 04/2014.** Disponível em: <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/arquivos-barragens/BARRAGENS_PNSB_04_2014.pdf/view> Acessado em 30 de outubro de 2019.

Ribeiro, L. F. M., Assis, A. P., Milonas, J. G. (2009). **Caracterização tecnológica de sistemas de contenção de rejeitos de minério de ferro construídos com a técnica do aterro hidráulico (Livro comemorativo dos vinte anos da Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília).** Brasília: Universidade de Brasília.

Robertson, A. M., Shaw, S. (2003). **Risk management for major geotechnical structures on mines. Proceedings of computer applications in the mineral industries.** Calgary, Canada.

Saconi, J. P., Ventura, M. (2019). **Barragem de Brumadinho tinha baixo risco de acidente, mas alto potencial de danos.** Rio de Janeiro. Disponível em: < <https://oglobo.globo.com/brasil/barragem-de-brumadinho-tinha-baixo-risco-de-acidente-mas-alto-potencial-de-danos-23401587>> Acessado em 15 de outubro de 2019.

SIMA - Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. (2018). **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos.** Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/wp->

content/uploads/sites/26/2019/06/Invent%C3%A1rio-Estadual-de-Res%C3%ADduos-S%C3%B3lidos-Urbanos-2018.pdf>. Acessado em 20 agosto de 2019.

Vick, S. G. (1983). **Planning, Design and Analysis of Tailings Dams**. New York, Wiley Int.