



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS - DEMIN



HENRIQUE NOGUEIRA SOARES

CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO BASEADA NO RISCO

OURO PRETO – MG
2023

HENRIQUE NOGUEIRA SOARES

CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO BASEADA NO RISCO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
curso de graduação em Engenharia de Minas da
Universidade Federal de Ouro Preto, como
requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S676c Soares, Henrique Nogueira.
Classificação de barragens de rejeitos baseada no risco. [manuscrito]
/ Henrique Nogueira Soares. - 2023.
47 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Barragens de rejeitos. 2. Gestão de riscos. 3. Agência Nacional de
Mineração. I. Lima, Hernani Mota de. II. Universidade Federal de Ouro
Preto. III. Título.

CDU 624.136

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Henrique Nogueira Soares

Classificação de barragens de rejeitos baseada no risco

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 19 de dezembro de 2023

Membros da banca

Dr. - Hernani Mota de Lima - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

Dr. - José Fernando Miranda - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Dra. - Rita de Cássia Pedrosa Santos - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Hernani Mota de Lima, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/01/2024



Documento assinado eletronicamente por **Hernani Mota de Lima, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/01/2024, às 14:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0651778** e o código CRC **D7F0C885**.

Dedico este trabalho ao meu Pai Francisco Nogueira da Silva e minha Mãe Eliza Soares Nogueira. Saudades eternas. Meus melhores amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu orientador científico Professor Doutor Hernani Mota de Lima, pelo acompanhamento e apoio científico durante esta investigação.

Agradeço os professores do DEMIN, nomeadamente aos Professores Doutora Rita de Cássia, Doutora Érica Reis, Doutora Rosa Malena, Doutor José Miranda, Doutor Adilson Curi, Doutor José Margarida, Doutor Elton Destro, Doutor Vladmir Kronemberger, Doutor Carlos Arroyo e Doutor Ivo Cabral.

Agradeço aos meus amigos contemporâneos da UFOP, Professor Doutor Leonardo Martins Graça, Professor Doutor Ricardo Augusto Scholz Cipriano e o Engenheiro Mestre Claudinei Oliveira Cruz.

Agradeço meus amigos e companheiros do curso de Engenharia de Minas, Naara Lemos, Julia Emanuelle, Luisa Faria, Gabriella Soares, Fernando Puperi, Marcelo Silva, Juan Neimerck, Henrique Magalhães, Pedro Resende, Matheus Silva, Paulo Silva, Davi Arantes, Humberto Pereira e Victor de Paula, pela amizade e conversas enriquecedoras sobre engenharia.

Pôr fim agradeço minha irmã Sofia Soares pelo apoio e confiança incondicional durante esses anos que se passaram do período da graduação em Engenharia de Minas.

O meu muito obrigado.

“A melhor maneira de realizar seus sonhos é nunca desistir deles”.

Autor desconhecido

R E S U M O

A segurança de barragens de rejeitos é um tema determinante no setor de mineração, especialmente, após os trágicos desastres ocorridos nos últimos anos. Neste contexto, a gestão de riscos em barragens é um assunto cada vez mais relevante, sendo imperativo entender e mitigar os riscos envolvidos na construção, operação e manutenção dessas estruturas complexas e críticas, que apresentam riscos potenciais para as pessoas e o meio ambiente. Portanto, a análise de risco em barragens de rejeitos é uma etapa importante para identificar, quantificar e mitigar os riscos associados a estas estruturas. No contexto das barragens de rejeitos, a classificação de risco é aplicada para avaliar a probabilidade de ocorrências relacionadas à estabilidade e segurança dessas estruturas. É um processo que envolve a análise de diversos fatores, tais como a geometria da barragem, o método construtivo, as características do rejeito armazenado, as condições operacionais, o sistema de drenagem, entre outros. Desta forma, a classificação de risco busca identificar e categorizar as barragens em diferentes níveis de risco, utilizando uma escala que varia de baixo a muito alto. A gestão de segurança em barragens de rejeitos enfrenta desafios significativos. Os processos envolvidos são complexos, as condições geotécnicas e hidrológicas são variáveis, e os dados disponíveis são limitados. A classificação de risco de barragens de rejeitos é um componente essencial na gestão de segurança dessas estruturas. No entanto, a falta de metodologias padronizadas e abrangentes para classificar o risco em barragens de rejeitos tem resultado em uma abordagem inconsistente e insuficiente para identificar, avaliar e priorizar os riscos associados. Com isso a metodologia proposta neste trabalho tem como principal objetivo realizar uma classificação de risco das barragens de rejeitos utilizando os dados do SIGBM- Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração da ANM. Sendo assim, espera-se proporcionar uma classificação geral das estruturas por meio do risco obtido para cada uma das barragens estudadas, assim como mensurar de forma quantitativa a vulnerabilidade, o potencial de risco e a consequência de um possível evento indesejado para cada estrutura. Neste estudo foram avaliadas 203 barragens inseridas na Política Nacional de Segurança Barragens localizadas no Estado de Minas Gerais.

Palavras-chaves: Barragens de Rejeitos, Gestão de Risco, SIGBM, PNSB, ANM.

A B S T R A C T

Tailings dam safety is a crucial issue in the mining sector, especially after the tragic disasters that have occurred in recent years. In this context, risk management in dams is an increasingly relevant subject, and it is crucial to understand and mitigate the risks involved in the construction, operation and maintenance of these complex and critical structures, which present potential risks to people and the environment. Therefore, risk analysis in tailings dams is a crucial step to identify, quantify and mitigate the risks associated with these structures. In the context of tailings dams, risk classification is applied to assess risks related to the stability and safety of these structures. It is a process that involves an analysis of several factors, such as the geometry of the dam, construction method, characteristics of the stored waste, operational conditions, drainage system, among others. In this way, the risk classification seeks to identify and categorize dams at different risk levels, using a scale that varies from low to very high. Safety management in tailings dams faces important challenges. The processes involved are complex, the geotechnical and hydrological conditions are variable, and the available data is limited. The risk classification of tailings dams is an essential component in the safety management of these structures. However, the lack of standardized and comprehensive methodologies for classifying risk in tailings dams has resulted in an inconsistent and insufficient approach to identifying, assessing and prioritizing associated risks. Therefore, the methodology proposed in this work has as main objective to carry out a risk classification of tailings dams using data from SIGBM - ANM's Integrated Mining Dam Management System. Therefore, it is expected to provide a general classification of structures by risk for each of the scientific dams, as well as quantitatively measure vulnerability, risk potential and the consequence of a possible unwanted event for each structure. In this study, 203 dams included in the National Dam Safety Policy located in the State of Minas Gerais were evaluated.

Keywords: Tailings Dams, Risk Management, SIGBM, PNSB, ANM.

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIASÕES

A	- <i>Auscultation</i>
AHP	- <i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANM	- Agência Nacional de Mineração
Ati	- <i>Attribute, score, assigned to that parameter</i>
CEMIG	- Companhia Energética de Minas Gerais S.A
D	- <i>Design</i>
FMEA	- <i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FS	- Fator de Segurança
iA	- <i>Weight established for each Design parameter</i>
ICOLD	- <i>International Commission on Large Dams</i>
iD	- <i>Weight established for each Design parameter</i>
iS	- <i>Weight established for each Severity parameter</i>
ISO	- <i>International Organization for Standardization</i>
MCDM	- <i>Multi-criteria decision-making</i>
PNSB	- Política Nacional de Segurança de Barragens
S	- <i>Severity</i>
SIGBM	- Sistema Integrado de Gestão de Barragens
UFOP	- Universidade Federal de Ouro Preto

LIST OF FIGURES

<i>Figure 1: Rationale for the proposal.....</i>	20
<i>Figure 2: Result of the AHP methodology for the Design parameters.</i>	22
<i>Figure 3: Result of the AHP methodology for the Auscultation parameters.</i>	23
<i>Figure 4: Result of the AHP methodology for the Severity parameters.....</i>	23
<i>Figure 5: Dam Risk Levels.</i>	28
<i>Figure 6: Risk Level Graph plotted with the Risk Matrix.</i>	29
<i>Figure 7: Contribution of each term in the constitution of probability.</i>	30
<i>Figure 8: Probability of Design standardized.....</i>	31
<i>Figure 9: Probability of Auscultation standardized.....</i>	31
<i>Figure 10: Compacting conditions by dams.</i>	32
<i>Figure 11: Type of foundation conditions by dams.....</i>	32
<i>Figure 12: Foundation investigation conditions by dams.....</i>	33
<i>Figure 13: Internal drainage conditions by dams.....</i>	33
<i>Figure 14: Occurrences by tailings dam.....</i>	34
<i>Figure 15: Auscultation parameters conditions by dams.....</i>	34

LIST OF TABLES

<i>Table 1: Ratio or Fundamental Scale.</i>	21
<i>Table 2: Design parameters and attributes.</i>	24
<i>Table 3: Parameters and attributes relating to Auscultation.</i>	26
<i>Table 4: Severity parameters and attributes.</i>	27
<i>Table 5: Type of occurrence due to tailings dam.</i>	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Formulação do Problema	14
1.2	Justificativa	15
1.3	Objetivos.....	15
1.3.1	Objetivo Geral	15
1.3.2	Objetivos Específicos	15
1.4	Metodologia.....	16
1.5	Estrutura do Trabalho	16
2	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
2.1	<i>Introduction</i>	18
2.2	<i>Materials and Methods.....</i>	19
2.2.1	<i>Methodology used to obtain the parameter weights.....</i>	21
2.2.2	<i>Methodology for defining the tolerability of the risk level</i>	27
2.3	<i>Results and Discussion</i>	28
2.3.1	<i>Design.....</i>	32
2.3.2	<i>Auscultation.....</i>	33
2.4	<i>Classification of the risk level.....</i>	35
2.5	<i>Conclusions.....</i>	36
	<i>References.....</i>	36
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	38
3.1	Sugestões para Pesquisas Futuras	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
	APÊNDICE	42

1 INTRODUÇÃO

A percepção dos riscos inerentes à engenharia geotécnica tem experimentado uma transformação ao longo do tempo, particularmente à luz dos recentes incidentes envolvendo barragens de rejeitos no Brasil. Durante o século passado, a confiança nas obras de engenharia estava primordialmente ancorada nas tecnologias empregadas. (AZAM e QIREN, 2010). No entanto, essa perspectiva tem se modificado em virtude dos graves acidentes ocorridos, o que tem conduzido a sociedade a adotar progressivamente a análise de risco como parte integrante de projetos de engenharia geotécnica (SANTOS, 2006, HUI; CHARLEBOIS e SUN, 2018, BURRITT, 2018).

A segurança das estruturas de engenharia, tais como barragens, taludes e fundações, é comumente considerada adequada quando estas são erigidas em estrita conformidade com os preceitos técnicos e incorporam o estado-da-arte da engenharia. Contudo, tais estruturas também apresentam riscos inerentes que podem ser sistematicamente examinados, avaliados e gerenciados mediante a aplicação de uma análise de risco (SANTOS, 2006, ADAMO *et al.*, 2020a).

A avaliação de risco em obras geotécnicas exerce uma função crucial na salvaguarda da integridade dessas estruturas, incluindo as barragens. Tal procedimento envolve a meticulosa análise das probabilidades de eventos adversos, como deslizamentos, rupturas e colapsos, e de suas respectivas consequências (SILVA, 2008, GUIMARÃES *et al.*, 2022, PICIULLO *et al.*, 2022).

A segurança das barragens de rejeitos adquire particular relevância no contexto da indústria de mineração, especialmente à luz dos trágicos incidentes recentes. Neste âmbito, a gestão de riscos associados a barragens assume uma posição de extrema importância. Torna-se imperativo compreender e mitigar os riscos associados à construção, operação e manutenção dessas estruturas complexas, que representam ameaças potenciais para a segurança humana, o ambiente, a economia local, a reputação da empresa responsável e sua solidez financeira em caso de falhas ou rupturas (KOSSOFF *et al.*, 2014).

Para tanto, é fundamental o uso de instrumentação como técnica suporte para medir os parâmetros de segurança de tais barragens que, juntamente com inspeções visuais e outras medições feitas no local, fornecem ferramentas poderosas para avaliar o desempenho e descobrir sinais precoces de comportamento anormal. O exame cuidadoso dos dados de instrumentação em um processo contínuo pode revelar uma possível condição crítica. Por outro

lado, a instrumentação pode ser um meio de assegurar que uma condição observada não é grave e não requer medidas corretivas imediatas (ADAMO *et al.*, 2020b).

A gestão de riscos em barragens de rejeitos depara-se com diversos desafios, abrangendo a variabilidade das condições geotécnicas e hidrológicas, a ausência de registros históricos e a complexidade dos processos envolvidos (VICK, 1990, SANTOS, CURI e SILVA, 2010). Adicionalmente, eventos climáticos extremos e o aumento da demanda por minerais têm contribuído para a acentuação dos riscos associados a barragens de rejeitos (ICOLD, 2016). As rupturas e falhas em barragens de rejeitos representam riscos substanciais para as comunidades situadas a jusante das estruturas, para o meio ambiente e para a reputação das empresas envolvidas (ICOLD, 2016). Nesse contexto, a análise de risco em barragens de rejeitos desempenha uma função essencial na identificação, quantificação e mitigação desses riscos (FELL *et al.*, 2005).

A abordagem da análise de risco em obras geotécnicas, especialmente em barragens de rejeitos, difere notadamente de outras disciplinas, como finanças, onde eventos de alta frequência e baixa magnitude podem ser tratados por meio de uma avaliação estatística baseada em valores esperados calculados a partir de uma média de ocorrências. Em contrapartida, em obras geotécnicas, os eventos são caracterizados por baixa probabilidade e grande magnitude, tornando inadequado o emprego de uma média de ocorrências como critério de tomada de decisão (SANTOS, 2006).

Uma das metodologias amplamente empregadas para a análise de risco em barragens de rejeitos, particularmente quando se trata de múltiplas estruturas, é a classificação de risco. Este procedimento implica a avaliação e categorização dos riscos associados a uma situação específica, objeto, processo ou evento. A classificação de risco é uma ferramenta utilizada para identificar e categorizar os riscos com base em sua probabilidade de ocorrência e impacto (FUSARO, 2003).

No contexto das barragens de rejeitos, a classificação de risco é aplicada para avaliar os riscos relacionados à estabilidade e segurança dessas estruturas. Ela engloba a análise de diversos fatores, tais como a geometria da barragem, o método construtivo, as características do rejeito armazenado, as condições operacionais e o sistema de drenagem, entre outros. Portanto, a classificação de risco objetiva identificar e categorizar as barragens em diferentes níveis de risco, variando de baixo a alto. Barragens com baixa classificação de risco são consideradas mais seguras, ao passo que aquelas com classificação de risco elevada apresentam maior probabilidade de falha e potencial para causar impactos substanciais em caso de ruptura.

Este processo de classificação de risco permite estabelecer prioridades para a implementação de medidas de mitigação, a elaboração de planos de resposta a emergências e a alocação de recursos. Além disso, constitui a base para a regulação e fiscalização das barragens, contribuindo para a definição de requisitos de segurança e para o monitoramento do cumprimento destas exigências (FUSARO, 1999).

Portanto, a classificação de risco em barragens de rejeitos desempenha um papel crítico na gestão de riscos e na prevenção de falhas. A compreensão das metodologias e dos critérios de classificação de risco, bem como das suas implicações práticas, podem contribuir substancialmente para a melhoria da segurança das estruturas e para a sustentabilidade da indústria de mineração.

1.1 Formulação do Problema

Atualmente, as barragens de rejeitos vêm sendo alvo de inúmeras fiscalizações de vários órgãos e em todas as esferas, municipais, estaduais e federais. A Agência Nacional de Mineração (ANM) é, legalmente, o órgão responsável pelas fiscalizações das barragens de mineração inseridas na PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens, conforme determina a Lei 12.334/2010. O objetivo das referidas fiscalizações é verificar o cumprimento da lei, pela empresa de mineração, com relação a segurança de barragem.

A gestão de segurança em barragens de rejeitos enfrenta desafios significativos. Os processos envolvidos são complexos, as condições geotécnicas e hidrológicas são variáveis, e os dados disponíveis são limitados. Esses desafios tornam a avaliação e a mitigação de riscos uma tarefa difícil, o que pode levar a falhas de barragens com consequências catastróficas para as comunidades locais, o meio ambiente e a reputação das empresas (HAIRI-ARDEBILI, 2018, ADAMO *et al.* 2020c).

A classificação de risco de barragens de rejeitos é um componente essencial na gestão de segurança dessas estruturas. No entanto, a falta de metodologias padronizadas e abrangentes para classificar o risco em barragens de rejeitos tem resultado em uma abordagem inconsistente e insuficiente para identificar, avaliar e priorizar os riscos associados.

Para melhorar a segurança de barragens de rejeitos, é necessário desenvolver e implementar metodologias padronizadas e abrangentes para classificar o risco. Essas metodologias devem ser baseadas em princípios científicos e devem levar em consideração as características específicas de cada barragem. A implementação dessas metodologias deve ser acompanhada de um plano de ação para mitigar os riscos identificados.

Na conjunção dos aspectos apresentados surgi um questionamento inevitável: Como a adoção de medidas de classificação de projeto, monitoramento e consequências pode reduzir o risco de falhas de barragens de rejeitos e proteger as comunidades locais, o meio ambiente e a reputação das empresas?

1.2 Justificativa

A Agência Nacional de Mineração (ANM) possui em seu arcabouço de fiscalização 460 barragens de mineração inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Estas estruturas necessitam de uma classificação em termos de prioridade na fiscalização, dadas as consequências potenciais de um evento indesejado. Portanto, desenvolver uma metodologia de classificação, pelo Sistema de Informações de Barragens de Mineração (SIGBM), de prioridade de fiscalização baseada no risco associado às barragens de rejeitos de modo a ranqueá-las quanto a prioridade de fiscalização por parte da ANM dá importância a esse estudo.

Portanto, com o objetivo de agregar valor ao trabalho das fiscalizações de barragens, esta investigação apresenta uma proposta de classificação das barragens de mineração baseada no risco, utilizando os dados do Sistema de Informações de Barragens de Mineração (SIGBM) e fazendo uma adaptação das metodologias utilizadas pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) proposta por Fusaro (2003) e da metodologia de classificação de Índice de Perigo em barragens de rejeitos proposta por Almeida (2018).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral foi estabelecer uma ferramenta de gestão que utilize a categorização de riscos em barragens de rejeitos. Esta ferramenta foi desenvolvida com base nos dados obtidos do SIGBM - Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração, gerenciado pela ANM.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- classificar as barragens de rejeitos de acordo com os riscos relacionados, utilizando dados do SIGBM;
- estabelecer limites aceitáveis de risco para as barragens categorizadas;
- identificar aspectos do projeto das barragens que influenciam no aumento do risco;
- avaliar quais elementos da monitorização das barragens afetam o aumento do risco.

1.4 Metodologia

A metodologia adotada avaliou a classificação atual da base de dados SIGBM para priorização de fiscalização e propôs melhorias na classificação baseando-se nos riscos. Proporcionando uma classificação geral das estruturas por meio do risco obtido para cada uma das barragens estudadas, assim como mensurou de forma quantitativa a vulnerabilidade, o potencial de risco e a consequência de um possível evento indesejado para cada estrutura.

Foram avaliadas 203 barragens inseridas na Política Nacional de Segurança Barragens localizadas no Estado de Minas Gerais. Ressalta-se, entretanto, que a metodologia proposta poderá ser aplicada para todas as barragens inseridas no SIGBM que atualmente são um total de 460 barragens inseridas na PNSB.

A metodologia adotada para a classificação das barragens de rejeitos no que se refere aos riscos estudados nesta investigação, encontra-se detalhada no Capítulo 2 - Resultados e Discussão especificamente no Tópico 2.2 - *Materials and Methods*.

1.5 Estrutura do Trabalho

No primeiro capítulo fez-se uma breve introdução acerca da percepção dos riscos inerentes à engenharia geotécnica especialmente em barragens de rejeitos e da importância de sua classificação inerente ao risco de acidentes quanto ou design (projeto) e auscultação (monitoramento), dando ênfase na atual preocupação com a segurança a fim de se evitar acidentes catastróficos. Já o segundo capítulo diz respeito aos métodos utilizados e resultados alcançados nesta investigação de classificação de barragens baseada no risco, apresentado em formato de artigo o qual foi submetido em janeiro de 2024 a revista *International Journal of Disaster Risk Reduction* para publicação. Por fim, no terceiro capítulo são feitas as considerações finais do trabalho.

2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste Capítulo é feita a Apresentação e Análise dos Resultados. São apresentados os resultados obtidos no decorrer do trabalho e é feita a sua análise. A metodologia utilizada foi a seguinte: os resultados respeitantes a cada assunto estudado são apresentados e logo depois é feita a sua análise. Os resultados são apresentados em tabelas, gráficos e imagens, de modo a proporcionar uma tal conjunção, que permita uma maior facilidade de leitura e análise.

Os resultados encontram-se em formato de artigo, o qual foi submetido para publicação na revista *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Copyright © 2024 Elsevier Ltd. All rights reserved, Online ISSN: 2212-4209.

TAILINGS DAMS CLASSIFICATION BASED ON RISK USING DATA FROM SIGBM

ABSTRACT

The safety of tailings dams is a crucial issue in the mining sector, especially after the tragic disasters that have occurred in recent years. In this context, risk management in dams is an increasingly relevant subject, and it is crucial to understand and mitigate the risks involved in the construction, operation and maintenance of these complex and critical structures, which present potential risks to people and the environment. Risk analysis of tailings dams is therefore a fundamental step in identifying, quantifying and mitigating the risks associated with these structures. Risk classification for tailings dams is applied to evaluate the risks related to the stability and safety of these structures. It involves the analysis of various factors, such as the geometry of the dam, construction method, characteristics of the stored tailings, operating conditions, drainage system, among others. Therefore, risk classification seeks to identify and categorize dams into different levels of risk, using a scale ranging from low to very high. This paper proposes a methodology for conducting a risk classification of tailings dams using data from the Integrated Mining Dam Management System SIGBM of the ANM. This study evaluated 203 dams included in the National Dam Safety Policy located in the state of Minas Gerais, whose data was extracted from SIGBM in February 2023. This paper provides a general classification of the structures by means of the risk obtained for each of the dams assessed, as well as a quantitatively measure of the vulnerability, risk potential and consequence of a possible unwanted event for each tailings dam.

Keywords: Tailings Dams, Risk Management, SIGBM PNSB, ANM.

2.1 Introduction

Tailings dams have become the subject of extensive inspections conducted by various agencies at multiple levels of governance. The National Mining Agency (ANM) bears the legal responsibility for inspecting mining dams included under the National Dam Safety Policy (PNSB), as stipulated by Law N° 12.334/2010 (Brazil, 2010). These inspections aim to verify compliance with dam safety regulations by mining companies.

The perception of geotechnical engineering-related risks has undergone a transformation over time, particularly considering recent tailings dam accidents in Brazil. While confidence in engineering endeavors was traditionally anchored in technology, this perception has been reshaped by major accidents, leading to a growing societal acceptance of risk analysis in geotechnical engineering projects (Berghe *et al.*, 2011; Hartford, 2008; Hebblewhite, 2019; Taroun, 2014).

Risk evaluation is a critical stage in ensuring the safety of geotechnical structures, including dams, slopes, foundations, and others. This assessment involves analyzing the likelihood of adverse events such as landslides, ruptures, collapses, and their potential consequences (Assis, 2020; Hartford, 2008).

Risk classification of tailings dams is an integral component of their safety management. However, the lack of standardized and comprehensive risk classification methodologies for tailings dams has led to inconsistent and inadequate approaches to identifying, assessing, and prioritizing associated risks.

There is a need for a common methodology for risk identification and quantification in the mining sector for tailings dams. Mara (2007) highlights the advantages of a common methodology for risk assessment in tailings dams. Mei (2012) focuses on the evaluation of social risk in dam-break situations, proposing an index system based on hazard intensity, accident probability, vulnerability, and disaster relief capacity, while Espósito (2013) discusses the application of risk analysis methods, such as the FMEA and LCI MOD-REJ, for evaluating the safety conditions of tailings dams. Famiyeh (2015) focuses on risk management in a tailings re-mining project in Ghana, providing insights into the importance of systematic risk management in the mining sector. Cruz & Rodovalho (2019) highlights the importance of risk management in tailings dam safety and suggests that ISO 31000 provides guidelines and principles for managing risks associated with these structures. Lastly, Owen (2020) highlights the importance of establishing and sharing diverse knowledge about tailings dam disaster risk,

advocating for the assessment and disclosure of situated disaster risk using ESG indicators. Davison (2020) discusses the use of earth observation data to support the reduction of risks associated with tailings dams, including early warning systems and hazard assessment tools. These papers collectively support the need for a standardized approach to risk identification and quantification in the mining sector for tailings dams (Cruz & Rodovalho, 2019; Davison *et al.*, 2020; Espósito & Palmier, 2013; Famiyeh *et al.*, 2015; Mara *et al.*, 2007; Mei & Wu, 2012; Owen *et al.*, 2020).

To enhance the safety of tailings dams, it is imperative to develop and implement standardized and comprehensive risk classification methodologies. These methodologies must be grounded in scientific principles and should consider the unique characteristics of each dam. Their implementation should be accompanied by an action plan to mitigate identified risks.

Accordingly, this study presents a proposal adapted from the methodologies employed by Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) as proposed by Fusaro (2003) and the methodology for classifying the Hazard Index in Tailings Dams proposed by (de Almeida *et al.*, 2019). The proposal utilizes data from 203 dams extracted from the Mining Dams Information System (SIGBM) in February 2023. The aim is to augment the value of dam inspection efforts.

2.2 Materials and Methods

The proposed methodology is an adaptation of the methodology used by CEMIG, proposed by Fusaro (2003), and by Almeida *et al.* (2019). It uses information extracted in February 2023 from SIGBM (Brazil, 2023), where the classification of mining dams will be determined based on the Risk Level represented by these structures. The Risk Level is equal to the multiplication of Probability by Severity, both of which will not be determined by probabilistic methods but calculated using indexes.

These indexes will be obtained from the information collected from SIGBM in the second half of February 2023, which is fed into the system by the entrepreneurs themselves in real time. Therefore, the parameters used here are faithful to the reality of the tailing's dams at the time.

The probability will be obtained from the sum of two parameters: Design (D), based on the peculiarities of the project of the structure, therefore considered constant, and Auscultation (A), linked to the management of the dam such as maintenance and Auscultation, therefore considered variable.

Regarding Severity (S), this index will be obtained by adding up the items that correspond to the possible damage that a rupture could cause. The rationale for the proposal can be seen in figure 1.

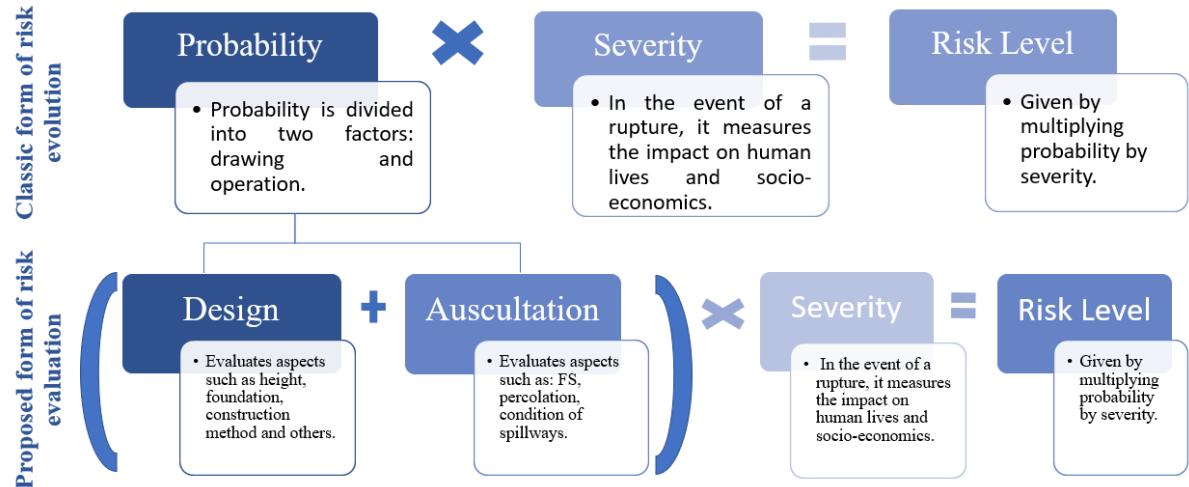


Figure 1: Rationale for the proposal.

(Author, 2023).

The proposed methodology introduces a weight for each parameter that makes up Design (D), Auscultation (A) and Severity (S), and these weights are calculated using the AHP method. According to Almeida (2018), the great advantage of this method is the possibility of alternating between stages of calculation and dialog, in other words, it presupposes continuous and direct intervention by those responsible, and not just in the definition of the problem.

Therefore, Equation 3 proposed for obtaining the Risk Level will be:

$$\text{Risk Level} = \text{Probability} \times \text{Severity} \quad (1)$$

$$\text{Risk Level} = (D + A) \times S \quad (2)$$

$$\text{Risk Level} = \left(\sum_{i=1}^n (iD \times Ati) + \sum_{i=1}^n (iA \times Ati) \right) \times \sum_{i=1}^n (iS \times Ati) \quad (3)$$

Where:

- D = Design;
- A = Auscultation;
- S = Severity;
- iD = weight established for each Design parameter;
- iA = weight established for each Auscultation parameter;
- iS = weight established for each Severity parameter;
- Ati = attribute, score, assigned to that parameter.

This way, the aim is to classify dams into risk levels using a graph ($D + A$) *versus* S together with a risk matrix, which will determine the level of risk as Low, Moderate, High or Very High, thus allowing the dams to be ranked according to their Risk Level.

2.2.1 Methodology used to obtain the parameter weights

According to Saaty (1980), the Analytic Hierarchy Process (AHP) is a structured multi-criteria decision-making (MCDM) approach that decomposes a complex problem into a hierarchy of criteria, sub-criteria, and alternatives to facilitate the identification of the most optimal solution. The AHP method aims to minimize the inherent subjectivity in decision-making processes by systematically evaluating the relative importance of decision criteria and alternatives.

In this study, the AHP method was employed to establish a hierarchy of Design, Auscultation, and Severity parameters, thereby assigning weights to each parameter. To determine the weights using the AHP method, a brainstorming session was conducted with seven dam safety experts from the ANM. Each expert was instructed to complete three comparative square matrices [A] corresponding to the Design, Auscultation, and Severity parameters, comparing pairs of analysis parameters. The comparisons represent the relative importance of a parameter in "Row A" compared to the parameter in "Column A" of the decision matrix.

The Ratio Scale, also known as the Saaty Fundamental Scale (1980), was utilized to quantify the parameters listed in table 1. The intensity variation on this scale ranges from 1 to 9, with a score of 9 indicating the extreme importance of one parameter relative to another.

Table 1: Ratio or Fundamental Scale.

Numerical Scale	Verbal Scale
1	Same importance
3	Moderate importance of one over the other
5	Essential or strong importance of one over the other
7	Very strong importance
9	Extreme importance
2, 4, 6, 8	Intermediate values

(Saaty, 1980).

Pair-by-pair comparisons were made according to the experts' preferences; judgments were made verbally and then converted into numerical values according to Table 1. In this way, it was established that the parameter judgments were based, briefly, on the answer to the

following question: "In view of the main objective, which of these two parameters is more important and how intense is it in relation to the others?".

The result of the brainstorming with the ANM experts was the creation of 3 decision matrices, one for each parameter: Design, Auscultation and Severity. With these decision matrices defined, the next step was to perform the calculations to obtain the weights for each parameter; for this stage the AHP Priority Calculator was used, thus obtaining the hierarchy in figures 2, 3 and 4.

Priorities										
These are results weighted by the chosen criteria in their pairwise comparison:										
	Cat						Priority	Rank	(+)	(-)
1	Current maximum height						5,6%	8	2,9%	2,9%
2	Type of foundation						12,2%	3	5,9%	5,9%
3	Foundation						21,5%	1	9,1%	9,1%
4	Design flow recurrence time						7,2%	6	3,9%	3,9%
5	Internal drainage						11,9%	4	4,8%	4,8%
6	Compaction control						18,7%	2	6,5%	6,5%
7	Average slope inclination in the main section						3,0%	9	1,0%	1,0%
8	Dam construction method						5,8%	7	2,5%	2,5%
9	Instrumentation						11,8%	5	8,0%	8,0%
10	Project documentation						2,3%	10	0,8%	0,8%

Consistency ratio CR = 6,9%

Decision Matrix										
The weighted results are based on the main eigenvector of the decision matrix:										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1	0,33	0,33	2,00	0,33	0,33	2,00	0,50	0,50	2,00
2	3,00	1	0,33	3,00	2,00	0,50	4,00	3,00	0,33	4,00
3	3,00	3,00	1	3,00	3,00	2,00	4,00	3,00	2,00	5,00
4	0,50	0,33	0,33	1	0,50	0,33	4,00	3,00	0,50	4,00
5	3,00	0,33	0,33	2,00	1	0,50	4,00	3,00	2,00	5,00
6	3,00	0,50	0,50	3,00	2,00	1	5,00	4,00	3,00	6,00
7	0,50	0,25	0,25	0,25	0,25	0,20	1	0,33	0,33	2,00
8	2,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,25	3,00	1	0,50	4,00
9	2,00	3,00	0,50	2,00	0,50	0,33	3,00	2,00	1	5,00
10	0,50	0,25	0,20	0,25	0,20	0,17	0,50	0,25	0,20	1

Number of comparisons = 45

Figure 2: Result of the AHP methodology for the Design parameters.

(Author, 2023).

Priorities						
These are results weighted by the chosen criteria in their peer comparison:						
	Cat	Priority	Rank	(+)	(-)	
1	FS drained	24,2%	2	9,7%	9,7%	
2	Undrained FS	28,1%	1	16,0%	16,0%	
3	Overflow structure	16,5%	3	11,0%	11,0%	
4	Percolation	13,7%	4	7,2%	7,2%	
5	Deformation and settlement	7,0%	6	3,8%	3,8%	
6	Slope deterioration	3,2%	7	1,2%	1,2%	
7	Surface drainage	7,4%	5	2,8%	2,8%	

Consistency ratio CR = 9,7%

Decision Matrix

The weighted results are based on the main eigenvector of the decision matrix:

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1,00	3,00	2,00	3,00	5,00	3,00
2	1,00	1	4,00	3,00	2,00	5,00	4,00
3	0,33	0,25	1	3,00	4,00	4,00	2,00
4	0,50	0,33	0,33	1	3,00	5,00	4,00
5	0,33	0,50	0,25	0,33	1	4,00	0,50
6	0,20	0,20	0,25	0,20	0,25	1	0,33
7	0,33	0,25	0,50	0,25	2,00	3,00	1

Number of comparisons = 21

Figure 3: Result of the AHP methodology for the Auscultation parameters.

(Author, 2023).

Priorities						
These are results weighted by the chosen criteria in their pairwise comparison:						
	Cat	Priority	Rank	(+)	(-)	
1	Existence of downstream population	32,8%	2	11,5%	11,5%	
2	Number of people possibly affected downstream	42,8%	1	10,8%	10,8%	
3	Environmental impact	15,1%	3	7,5%	7,5%	
4	Socio-economic impact	9,2%	4	4,5%	4,5%	

Consistency Ratio CR = 9,3%

Decision Matrix

The weighted results are based on the main eigenvector of the decision matrix:

	1	2	3	4
1	1	1,00	3,00	2,00
2	1,00	1	4,00	5,00
3	0,33	0,25	1	3,00
4	0,50	0,20	0,33	1

Number of comparisons = 6

Figure 4: Result of the AHP methodology for the Severity parameters.

(Author, 2023).

The Design (D), Auscultation (A) and Severity (S) parameters are extracted from SIGBM, and consequently the scores for their attributes are also extracted from SIGBM. The

attribute scores correspond to those assigned by the regular inspections carried out by the developer himself or by the ANM inspectorate, which are automatically entered into SIGBM.

Therefore, the scores for the attributes of the Design parameter were taken from the SIGBM database, from the technical characteristics tab, and the same values were adopted as those assigned in the system used by the ANM, as can be seen in table 2.

Table 2: Design parameters and attributes.

Parameters	Attributes	Score
Current maximum height	15m ≤ height < 30m	2
	30m ≤ height < 60m	6
	height ≥ 60m	10
Foundation type	Healthy rock	2
	Altered rock/saprolite	5
	Residual soil/alluvium	8
	Thick sandy alluvium/organic soil/reject/unknown	10
Foundation	Foundation investigated according to plan	1
	Foundation partially investigated	6
	Unknown foundation/unreliable study	10
Recurrence Time of Design Flow	CMP (Probable Maximum Flood) or Decamillennial	1
	Millennial	2
	TR = 500 years	5
Internal drainage	TR less than 500 years or Unknown/unreliable study	10
	Drainage built according to design or no drainage in design	1
	Corrective drainage built after completion	4
Compaction control	Drainage system not in accordance with design or non-existent or unknown or unreliable study or inoperative	10
	There are documents proving compaction control in accordance with the project and proving technological monitoring and control during execution	1
	There are geotechnical studies proving the degree of compaction in accordance with the project	4
Average slope inclination in the main section	No technological control and/or no information and/or compaction not in accordance with the project	10
	Gentle (average slope gradient in the main section ≤ 1V:3H) or Concrete Dam	1
	Intermediate (1V:2H ≥ Average slope gradient in the main section > 1V:3H)	3
Dam construction method	Steep (Average slope gradient in the main section > 1V:2H)	6
	Single stage	1
	Downstream lifting	2
	Centerline lifting	5
Instrumentation	Upstream or unknown elevation	10
	There is instrumentation in accordance with the technical project	1
	There is instrumentation in accordance with the project, but in the process of installing instruments to adapt to the project	2
	There is instrumentation that does not comply with the project, but the instruments are not being installed to comply with the project	6
Project documentation	Dam not instrumented in accordance with the project	8
	Executive design and "as built"	1
	Executive project or "as built"	2
	Project "as it stands"	3
	Basic project	5
	Conceptual project	8
	No project documentation	10

(Adapted from SIGBM, 2023).

With regard to the attributes of the Auscultation parameter, which was based on the scores extracted from the Regular Inspection Extract, taken every 15 days, the scores are not the same as those found in SIGBM. Adaptations had to be made to the value of the scores so that when equation 3 of the methodology is used, there is no inconsistency, since the SIGBM scores for these attributes have a range of 0-10, and when a parameter receives a score of attribute 10, the dam automatically enters emergency level 1, as determined by current ANM dam safety legislation and, consequently, by SIGBM.

The values had to be adapted by means of a parameterization, where score 10 is equivalent to score 40 in the proposed methodology. In this way, consistency was achieved in the calculations, meaning that when there is a score of 40, the structure will already be included in the High-risk Level, as can be seen in equation 3. The exception to this rule was the safety factor (SF) parameter, which is not assigned a score in SIGBM and was therefore adapted to the scores for the safety factors which have a range of 0-80, so the scores are assigned in equation 3 of the proposed methodology, elevating the structures to the High-risk Level if the SF is below the minimum determined by current standards, table 3.

Table 3: Parameters and attributes relating to Auscultation.

Parameters	Attributes	Score
FS drained	FS d $\geq 1,5$	0
	1,3 \leq FS d $< 1,5$	40
	1,1 \leq FS d $< 1,3$	60
	FS d $< 1,1$	80
FS not drained	FS nd $\geq 1,3$	0
	1,2 \leq FS nd $< 1,3$	40
	1,0 \leq FS nd $< 1,2$	60
	FS nd $< 1,0$	80
Spillway reliability	Civil structures well maintained and in normal operation / dam with no need for overflow structures	0
	Structures with problems identified and corrective measures being implemented	10
	Structures with problems identified and corrective measures not being implemented	20
	Structures with identified problems, with a reduction in capacity and without corrective measures	40
Percolation	Percolation totally controlled by the drainage system	0
	Moisture or emergence in downstream areas, parameters, slopes and shoulders stable and monitored	10
	Moisture or emergence in downstream areas, parameters, slopes and shoulders without implementation of the necessary corrective measures	20
	Emergence in downstream areas with material being carried or with increasing flow or infiltration of the contained material, with the potential to compromise the safety of the structure	40
Deformation and settlement	There are no deformations or settlements that could compromise the safety of the structure	0
	Existence of cracks and subsidence with corrective measures	10
	Existence of cracks and subsidence without implementation of the necessary corrective measures	20
	Existence of cracks, subsidence or slippage with the potential to compromise the safety of the structure	40
Deterioration of slopes	No deterioration of slopes and parameters	0
	Failure to protect slopes and parameters, presence of vegetation	10
	Surface erosion, exposed ironwork, presence of vegetation without implementing the necessary corrective measures	20
	Sharp depressions on the slopes, landslides, deep erosion grooves, with the potential to compromise safety	40
Surface drainage	Existing and operational surface drainage	0
	Existence of cracks and/or silting and/or subsidence with corrective measures being implemented	10
	Existence of cracks and/or silting and/or subsidence without corrective measures being implemented	20
	Surface drainage non-existent	30

(Adapted from SIGBM, 2023).

The attribute scores for the Severity parameters were kept the same as those in SIGBM, as can be seen in table 4.

Table 4: Severity parameters and attributes.

Parameters	Attributes	Score
Existence of population downstream	Nonexistent (there are no permanent/resident or temporary/transit people in the affected area downstream of the dam)	1
	Infrequent (There are no people permanently occupying the affected area downstream of the dam, but there is a local road for local use)	3
	Frequent (There are no people permanently occupying the affected area downstream of the dam, but there is a municipal or state or federal highway or other place and/or enterprise where people who may be affected may stay)	5
	Existing (There are people permanently occupying the affected area and downstream of the dam, so human lives could be affected)	10
Number of people possibly affected downstream in the event of dam failure	1 - 100	2
	101 - 500	4
	501 - 1000	6
	1001 - 5000	8
	over 5001	10
Environmental impact	Insignificant (Affected area downstream of the dam has been totally de-characterized from its natural conditions and the structure only stores Class IIB - Inert waste, according to ABNT NBR 10004/2004)	1
	Not Significant (Affected area downstream of the dam does not have an area of relevant environmental interest or areas protected by specific legislation (excluding APPs) and only stores Class IIB - Inert waste, according to NBR 10004/2004)	2
	Significant (Affected area downstream of the dam has an area of relevant environmental interest or relevant environmental interest or areas protected by specific legislation (excluding APPs) and stores only Class IIB waste - Inert, according to NBR 10004/2004 of ABNT)	6
	Very Significant (Dam stores tailings or solid waste classified as Class IIA - Non-Inert, according to ABNT NBR 10004/2004)	8
	Very Significant Aggravated (Dam stores tailings or solid waste Class I - Hazardous according to ABNT NBR 10004/2004)	10
Socio-economic impact	Non-existent (There are no facilities in the affected area downstream of the dam)	1
	LOW (There is a small concentration of residential, agricultural, industrial or infrastructure facilities of socio-economic and cultural importance in the area downstream of the dam)	2
	MEDIUM (There is a moderate concentration of residential, agricultural, industrial or infrastructure facilities of socio-economic and cultural importance in the area downstream of the dam)	3
	HIGH (There is a high concentration of residential, agricultural, industrial or infrastructure facilities of socio-economic and cultural importance in the area downstream of the dam)	5

(Adapted from SIGBM, 2023).

2.2.2 Methodology for defining the tolerability of the risk level

After completing the steps described above, the data obtained is entered into equation 3 to obtain the Probability Versus Severity graph, with the axes standardized from 0-10.

The Risk Level graph can be used to plot the points on the risk matrix in figure 5 to determine the risk level of the dams, which will be Low, Moderate, High and Very High.

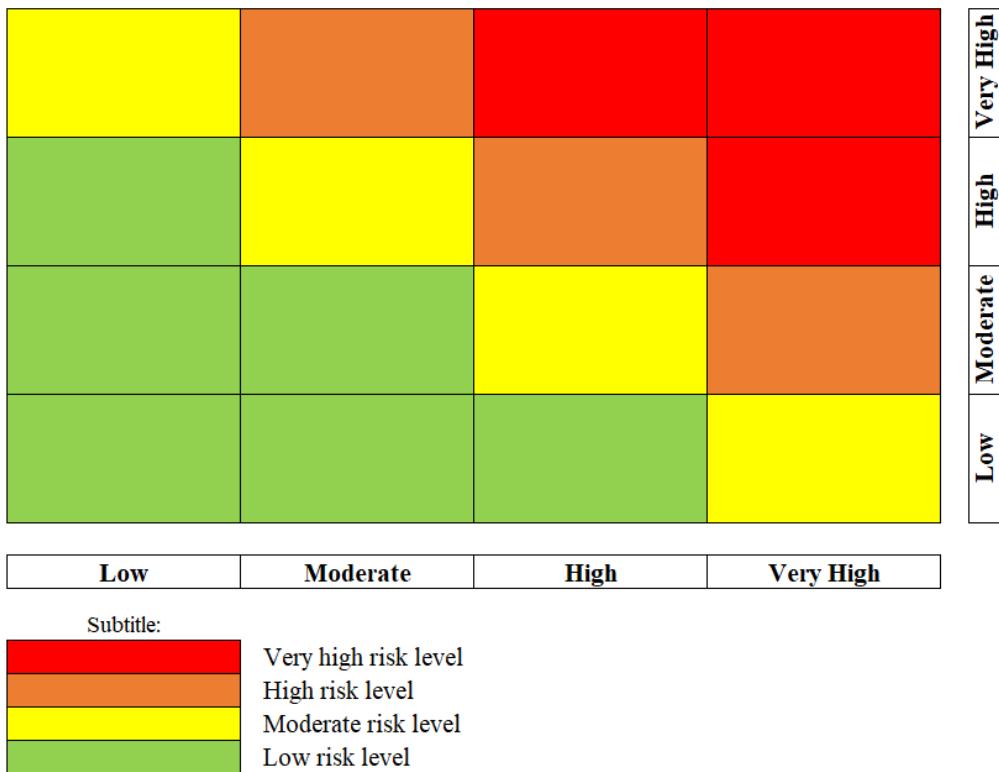


Figure 5: Dam Risk Levels.

(Author, 2023).

2.3 Results and Discussion

Using Google's COLAB compiler and the Python programming language, mining was carried out on the ANM's SIGBM database of the 460 registered dams in Brazil included in the National Dam Safety Policy (PNSB), data extracted in February 2023.

This study only focused on consolidating data from 203 dams located in the state of Minas Gerais. The other dams in Brazil were not considered in this study. Once this method has been validated, the other dams will be included in the study in a future research project.

After mining and consolidating the ANM's SIGBM database, the score for each attribute in the database can be determined using Equation 3.

With the data extracted and processed from SIGBM, a brainstorming session was held with 7 dam safety experts from the ANM, in which the weights of the parameters of the proposed methodology were reached. Calculations were then made to obtain the risk according to Equation 3.

With the Risk Level graph drawn up, the dams can be classified by superimposing the risk matrix on the graph, resulting in the following classification in figure 6.

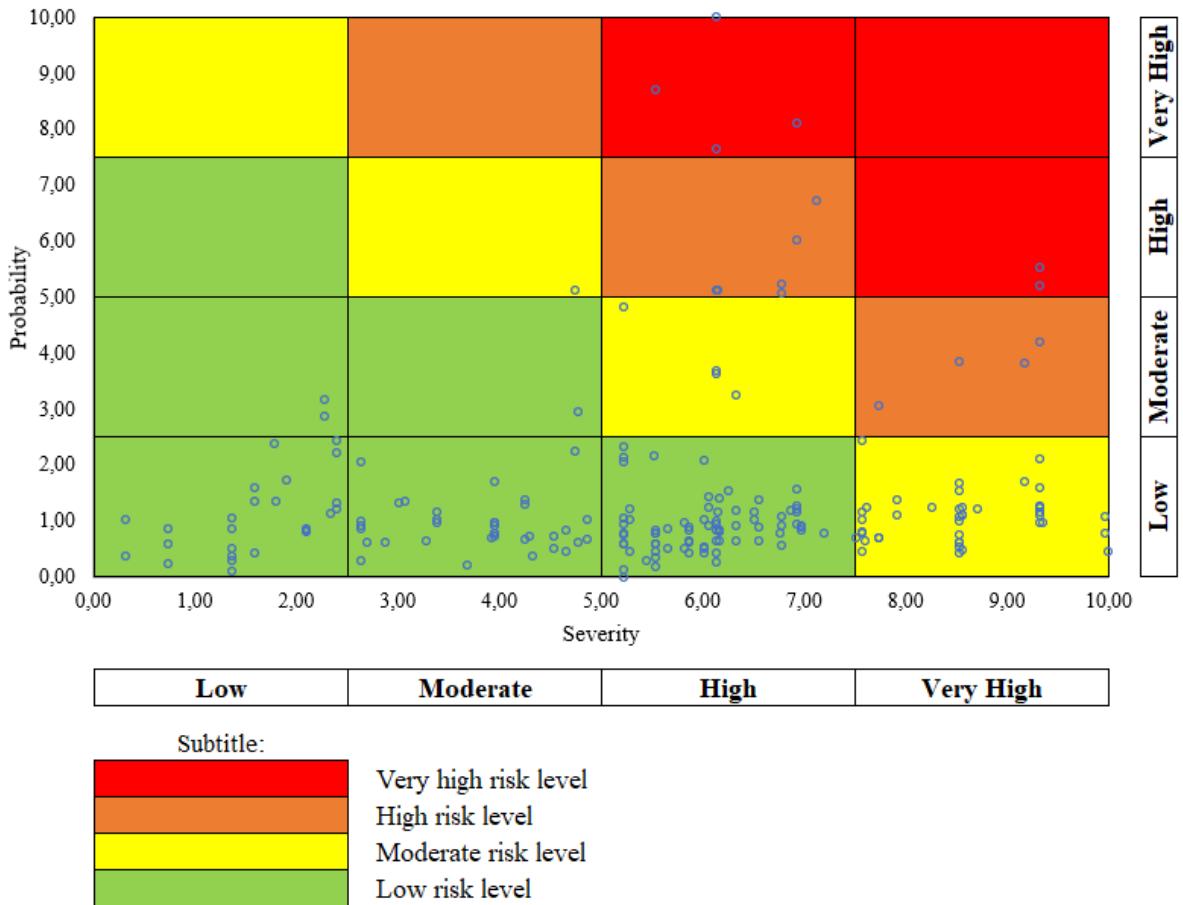


Figure 6: Risk Level Graph plotted with the Risk Matrix.

(Author, 2023).

As can be seen in figure 6, the vast majority of the 161 dams (79,4 %) studied are at a Low risk level, as defined in the methodology; 28 dams (13,8 %) are at a Moderate risk level, which means that around 14 % of the structures studied are in the yellow band of the graph in figure 6. As for the High-risk level, the brown band on the graph in Figure 6, it can be seen that 9 dams (4.4 %) of the structures analysed fall into this risk level. With regard to the Very High-risk level, the red band of the graph in figure 6, there are 5 dams, or 2.4 %.

The graph in figure 8 shows that the dams in the bottom right-hand corner, which have a Moderate risk level, have as their main alternative for improving their risk classification the implementation of actions to reduce Severity. Considering that Severity has as its parameters the existence of people downstream, the number of people possibly affected by an accident, the environmental impact and the socio-environmental impact, actions should be focused on reducing the score in these parameters.

The dams inserted from the centre of the graph towards the top right corner total 19 structures (9.3 % of the dams studied) and should have their dam safety governance geared

towards reducing risk levels to minimize Severity and/or Probability according to the proposed methodology.

It can also be seen in the graph in figure 6 that along the X axis, Severity, there is a uniform distribution of dams indicating varying levels of Severity from low to very high.

When analysing the two terms that make up the probability of Equation 3, Design and Auscultation, each term contributes to defining the total probability (graph in figure 7).

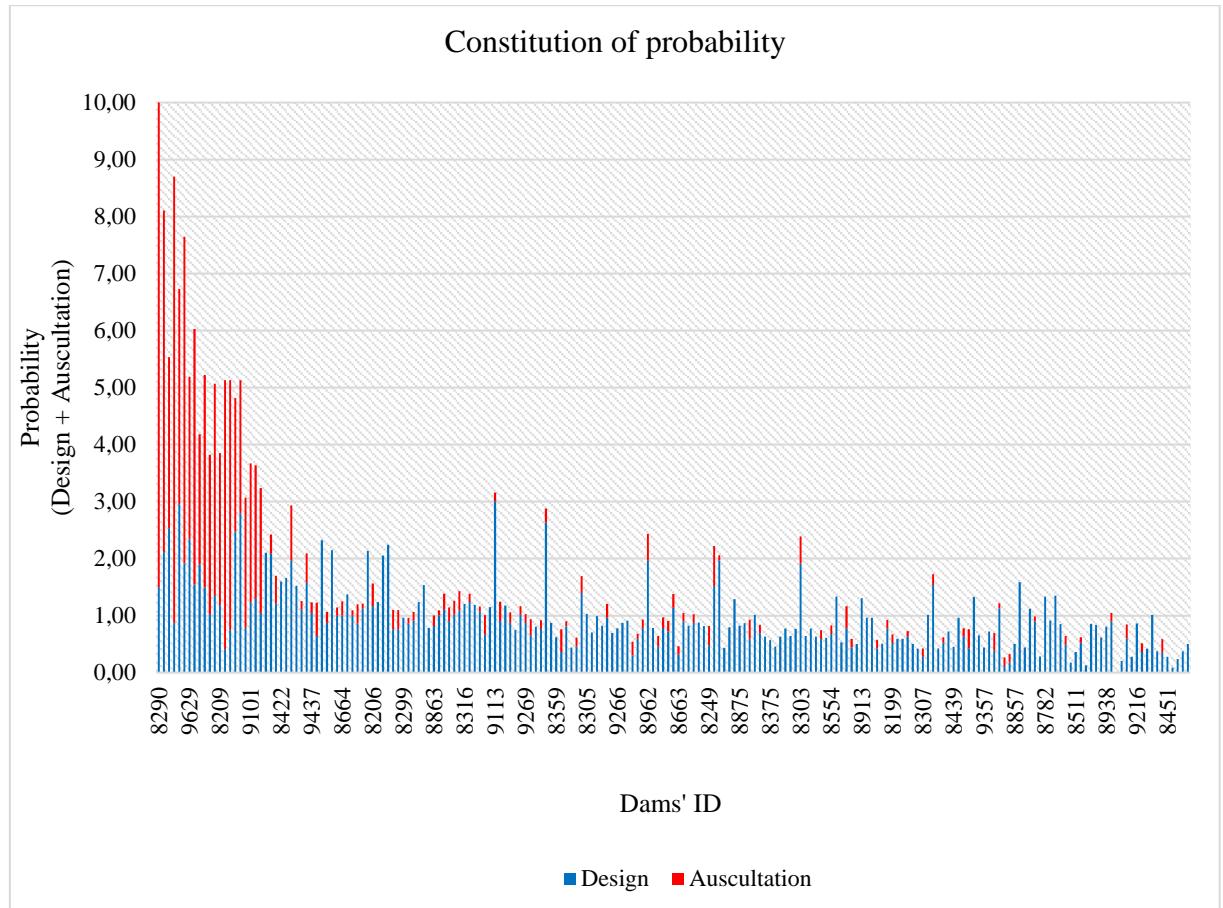


Figure 7: Contribution of each term in the constitution of probability.

(Author, 2023).

Figure 7 shows that among the probabilities found in the dams studied, Design behaves within a range of 0 to 3, with Auscultation being the term that most contributes to increasing the probability of an undesirable event occurring. Figures 8 and 9, which represent the standardized probabilities separately, show the variability of each term, confirming the previous statement that Design has a more uniform distribution, while Auscultation is decisive for increasing the probability, being considerably variable and depending exclusively on the action of the person in charge of the dam.

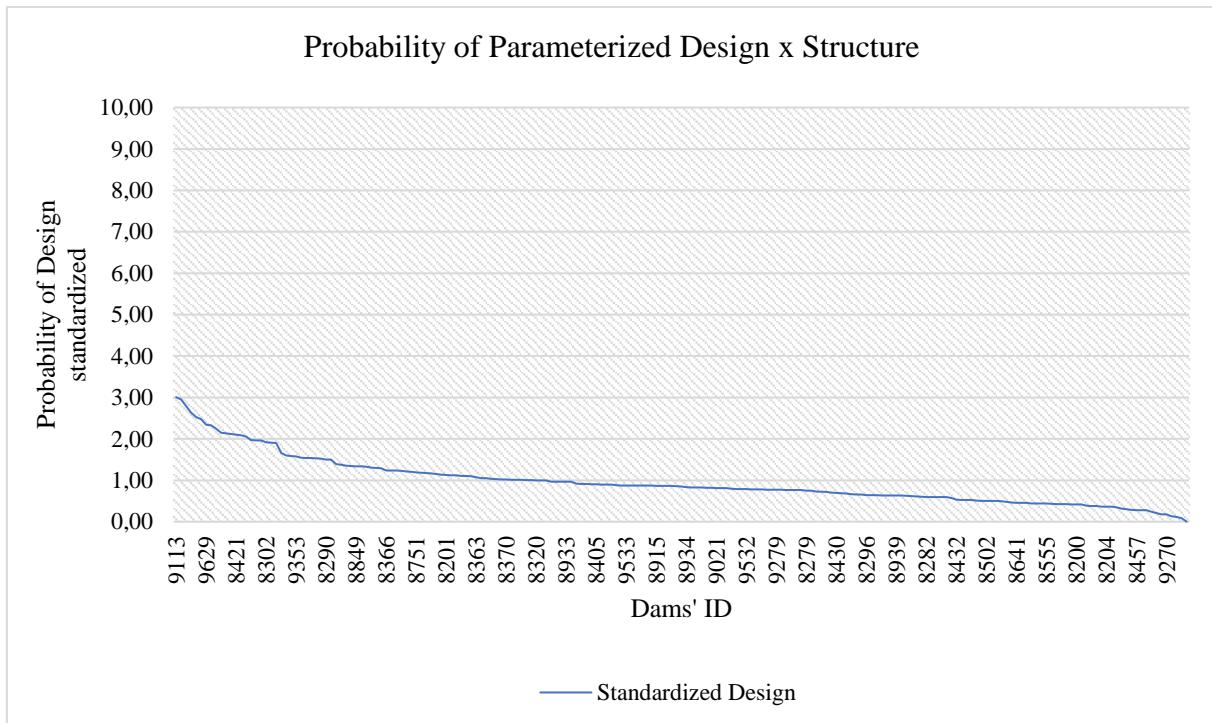


Figure 8: Probability of Design standardized.

(Author, 2023).

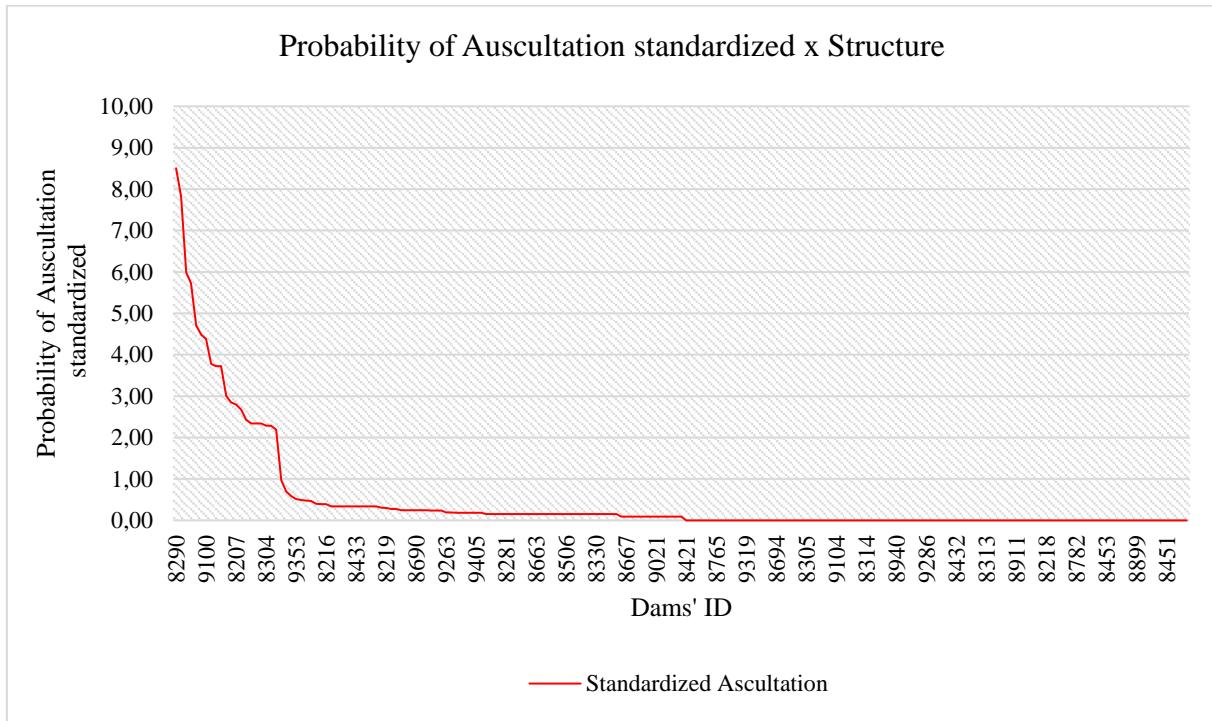


Figure 9: Probability of Auscultation standardized.

(Author, 2023).

In a separate analysis of each Design and Auscultation parameter, we obtain the following graphs.

2.3.1 Design

With regard to the compaction parameter, figure 10 shows that there are 51 structures, or 25 % of the universe of dams surveyed, that do not have information on compaction.

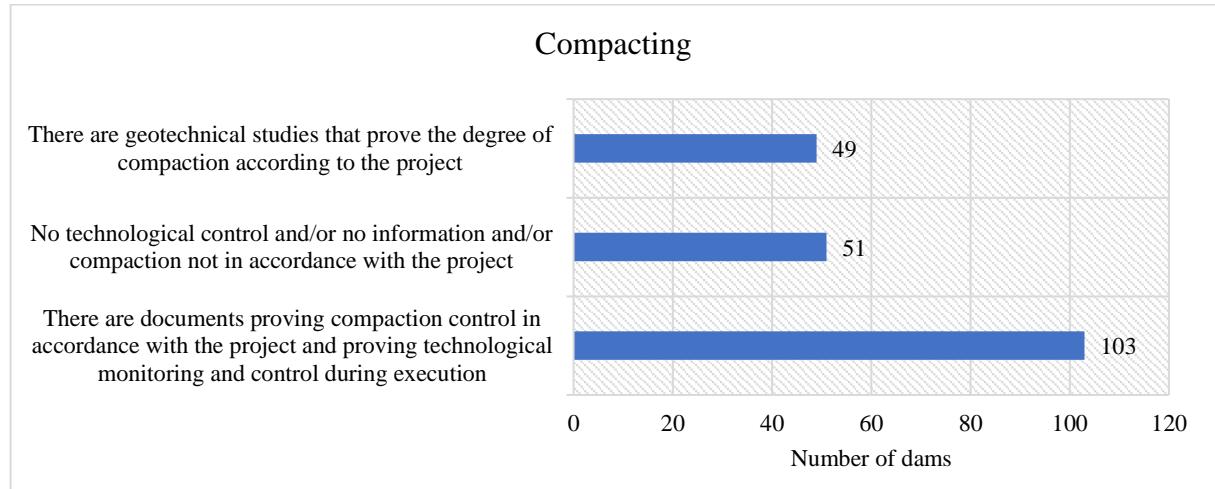


Figure 10: Compacting conditions by dams.

(Author, 2023).

Another parameter that drew attention in the Design item was the type of foundation on which the structures are installed (figure 11). In it, 77 dams (38 %) have their foundations in residual soil or alluvium, and 3 dams in sandy alluvium or organic soil, in addition to 110 structures (54 %) that are installed in altered rock or saprolite.

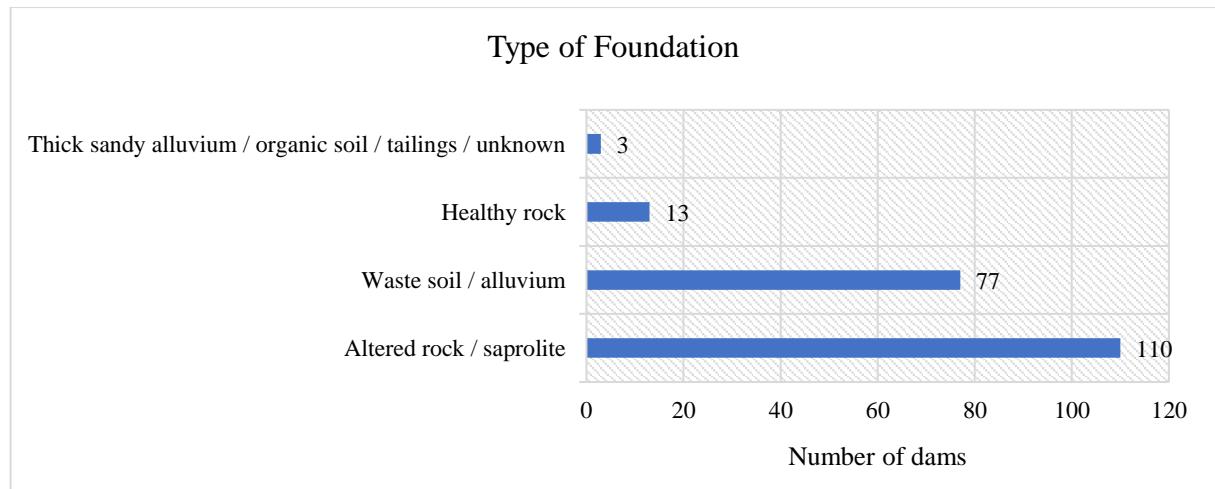


Figure 11: Type of foundation conditions by dams.

(Author, 2023).

With regard to the level of foundation investigation, figure 12 shows that the majority of dams had their foundations investigated (79 %), while 21 % had their foundations partially investigated or not investigated at all.

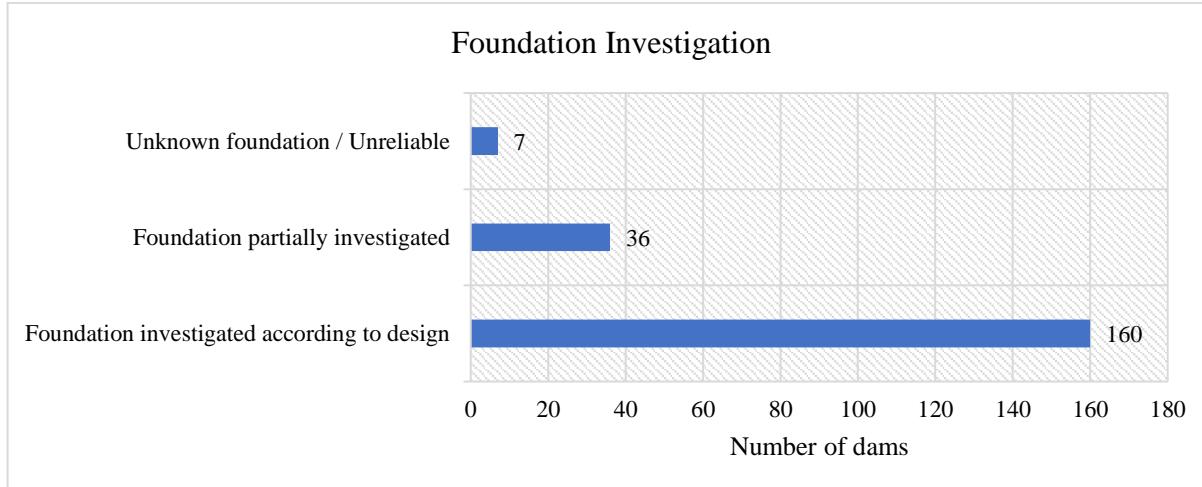


Figure 12: Foundation investigation conditions by dams.
(Author, 2023).

Another parameter that draws attention is internal drainage (figure 13). In 45 structures (22 % of the structures analysed), the internal drainage does not correspond to the design.

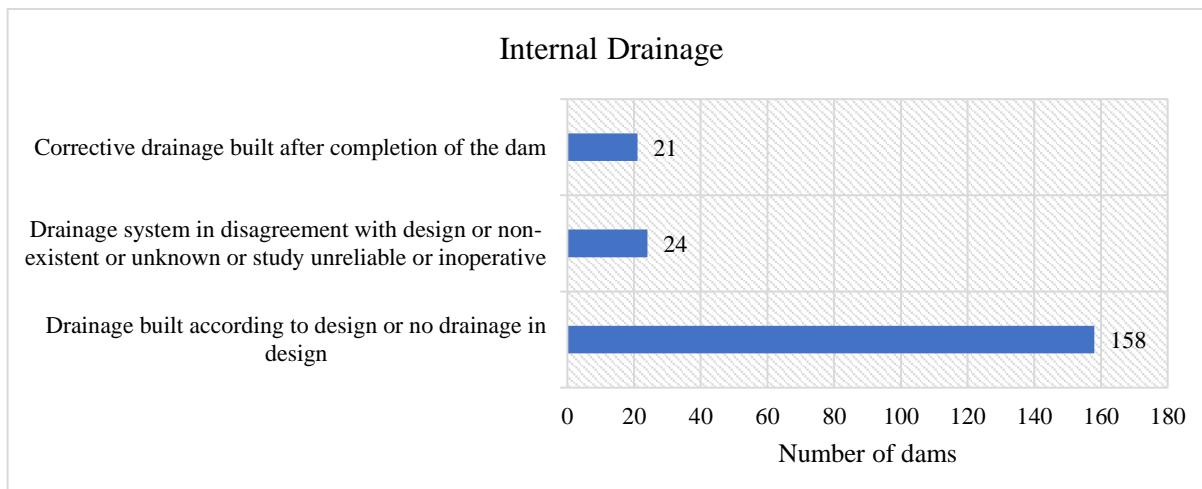


Figure 13: Internal drainage conditions by dams.
(Author, 2023).

2.3.2 Auscultation

According to the SIGBM database, there are 7 possible occurrences of auscultation in which dams may present in their monitoring. Figure 14 show the graph of occurrences by tailings dams. It was observed that 102 of the 203 tailings dams studied (50,24 %) presented some type of occurrence.

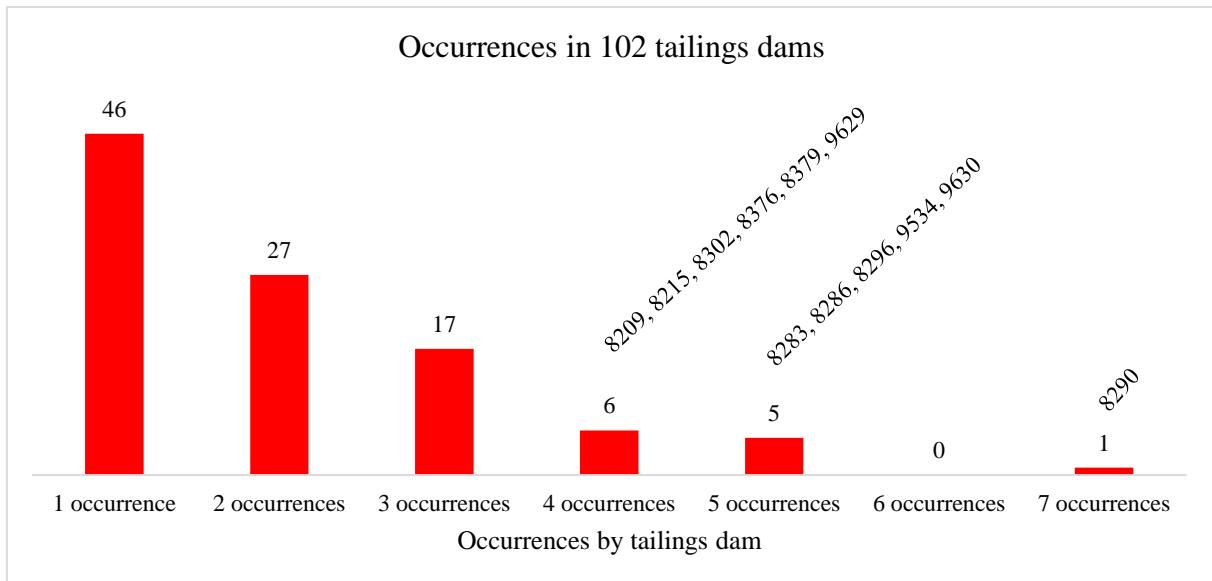


Figure 14: Occurrences by tailings dam.

As for the Auscultation parameters — the same items checked every two weeks by the entrepreneurs — whose inspection information is entered into the SGBM, it can be seen in figure 16 that percolation followed by surface drainage and slope deterioration have the highest frequency of occurrence.

Percolation, which has 58 occurrences (figure 15), can be related to the compaction conditions in figure 10, which shows 51 dams (25 % of those analysed) without proof that compaction has been carried out as determined by the state of the art.

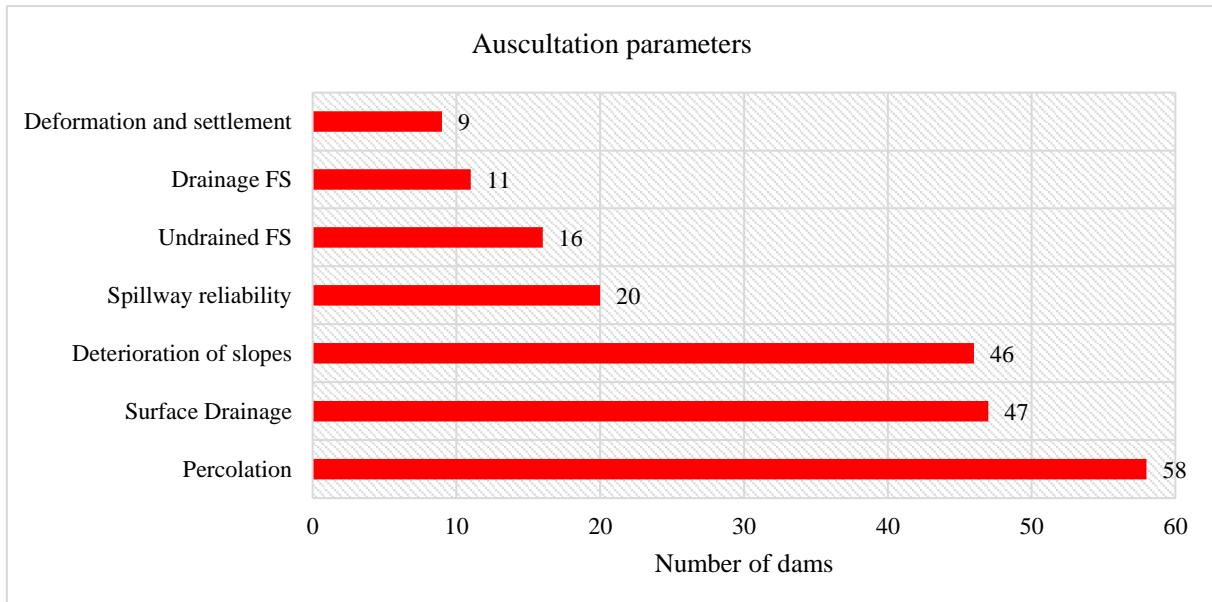


Figure 15: Auscultation parameters conditions by dams.

(Author, 2023).

Table 15 shows the type of auscultation occurrence classified for each tailings dam.

Table 5: Type of occurrence due to tailings dam.

Type of auscultation occurrence	Dams 'ID
Deformation and settlement	8249 8283 8286 8290 8296 8379 8683 8962 9105
Drainage FS	8215 8290 8302 8304 8379 8525 8955 9100 9101 9629 9630
Undrained FS	5863 8207 8209 8215 8283 8286 8290 8302 8332 8379 8389 8693 8955 9100 9534 9800
Spillway reliability	8204 8206 8207 8216 8283 8286 8290 8296 8302 8335 8368 8376 8664 8960 9113 9280 9353 9534 9630 9799
Deterioration of slopes	8201 8206 8207 8209 8215 8282 8283 8286 8290 8296 8303 8304 8317 8332 8363 8368 8376 8431 8433 8434 8436 8437 8438 8443 8552 8564 8580 8641 8664 8692 8699 8700 8863 8960 9021 9352 9404 9405 9437 9533 9534 9629 9630 9632 9799 9818
Surface Drainage	8204 8209 8215 8216 8249 8282 8283 8286 8290 8296 8302 8303 8311 8320 8368 8369 8376 8379 8389 8405 8431 8433 8434 8436 8437 8564 8580 8616 8641 8667 8690 8700 8863 8960 9101 9103 9105 9114 9263 9404 9405 9437 9533 9534 9629 9630 9632
Percolation	5863 8199 8204 8206 8209 8219 8220 8249 8281 8282 8290 8296 8303 8307 8311 8312 8317 8318 8330 8370 8373 8376 8405 8428 8431 8433 8436 8437 8446 8496 8506 8525 8554 8564 8580 8616 8663 8680 8690 8695 8937 8955 8956 9037 9098 9099 9101 9114 9269 9270 9280 9434 9534 9629 9630 9632 9800 9818

(Author, 2023).

2.4 Classification of the risk level

Table 6 show the results of the risk level classification in terms of probability and severity.

Table 6: Classification of risk level.

Probability			Severity			Risk level		
ID	Dam	Score	ID	Dam	Score	ID	Dam	Score
8290	Forquilha III	10,00	8539	Turmalina	10,00	8290	Forquilha III	61
8955	Barragem de Rejeitos	8,70	9263	Barragem do Sabão I	9,97	8215	B3/B4	56
8215	B3/B4	8,11	9532	ED Vale das Cobras	9,97	9630	7a	52
8302	Grupo	7,65	8667	Cuiabá	9,36	8955	Barragem de Rejeitos	48
9534	Xingu	6,73	9630	7a	9,33	9534	Xingu	48
8389	Sul Superior	6,03	9629	6	9,33	8302	Grupo	47
9630	7a	5,53	8304	Maravilhas II	9,33	9629	6	48
8283	Forquilha I	5,22	8421	5 (MAC)	9,33	8389	Sul Superior	42
9629	6	5,19	8422	7B	9,33	8304	Maravilhas II	39
9100	Vargem Grande	5,13	9098	Capão da Serra	9,33	8283	Forquilha I	35

(Author, 2023).

Forquilha III presented the highest probability value (design + auscultation), which when multiplied by severity gave it the highest level of risk, becoming the most critical tailings dam at the time of the measurement carried out in this study.

2.5 Conclusions

The survey results indicate that a significant portion of the dams studied (14 %) fall into the Moderate risk category, while a smaller but still concerning proportion (4.4 %) are classified as High-risk.

The study identified the key criteria and parameters used in risk classification, including geotechnical factors, monitoring practices, and environmental impacts.

Risk classification enables a systematic evaluation of the potential for dam failures and breaches, allowing for the prioritization of dams that require immediate attention and preventive measures.

Risk classification promotes transparency and informed decision-making by providing clear and accessible information about dam safety to affected communities.

Effective risk classification must be complemented by ongoing monitoring, proper maintenance, training for dam personnel, and infrastructure investments to ensure the long-term safety of tailings dams.

References

- Almeida, L. G., Corteletti, R. C., & Dutra, L. F. (2019). *METODOLOGIA PARA CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE PERIGO (iP) EM BARRAGENS DE REJEITO DA MINERAÇÃO*. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v38i3.13776>
- Assis, A. (2020). Risk management for geotechnical structures: consolidating theory into practice (Pacheco Silva Lecture). *Soils and Rocks*, 43, 311–336. <https://doi.org/10.28927/SR.433311>
- Berghe, J.-F. Vanden, Ballard, J.-C., Wintgens, J.-F., & List, B. (2011). *Geotechnical risks related to tailings dam operations*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:110781915>
- Cruz, C. O., & da Cunha Rodovalho, E. (2019). Application of ISO 31000 standard on tailings dam safety. *REM - International Engineering Journal*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134764786>
- Davison, M. J., Roca, M., & Petkovek, G. (2020). *Supporting reduction of risks of tailings dams using earth observation data*. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-7658>
- de Assis, A. P. (2020). *Risk management for geotechnical structures: consolidating theory into practice* (Pacheco Silva Lecture). <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:231660209>
- Espósito, T., & Palmier, L. R. (2013). Application of Risk Analysis Methods on Tailings Dams. *Soils and Rocks*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:249860858>
- Famiyeh, S., Adaku, E., Kissi-Mensah, L., & Amoatey, C. T. (2015). Risk management for a tailings re-mining project in Ghana. *International Journal of Managing Projects in Business*, 8, 241–255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1108/IJMPB-04-2014-0033>

- Hartford, D. N. D. (2008). *Risk Analysis in Geotechnical and Earthquake Engineering: State-Of-The-Art and Practice for Embankment Dams*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:111499035>
- Hebblewhite, B. K. (2019). Geotechnical risk in mining methods and practice: critical issues and pitfalls of risk management. *Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:169901760>
- Mara, S., Tanasescu, M., Ozunu, A., & Vlad, S. N. (2007). Criteria for Identifying the Major Risks Associated with Tailings Ponds in Romania. *Mine Water and the Environment*, 26, 256–263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/S10230-007-0018-0>
- Mei, G. D., & Wu, Z. (2012). Study on Social Risk Evaluation Index System for Tailings Pond Dam-Break Based on the Vulnerability Theory. *Advanced Materials Research*, 594–597, 2301–2308. <https://doi.org/https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.594-597.2301>
- Owen, J. R., Kemp, D., Lèbre, É., Svobodova, K., & Murillo, G. P. (2020). Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 42, 101361. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:210307931>
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process* (Vol. 1). McGraw-Hill International Book Company.
- Taroun, A. (2014). Towards a better modelling and assessment of construction risk: Insights from a literature review. *International Journal of Project Management*, 32, 101–115. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:1099687640>

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados alcançados na investigação, pode-se aferir que:

- 161 barragens (79,4 % das estruturas estudas) estão inseridas no nível de risco Baixo;
- 28 barragens (13,8 % das estruturas estudas) estão inseridas no nível de risco Moderado;
- 9 barragens (4,4 % das estruturas estudadas) estão inseridas no nível Alto;
- 5 barragens (2,4 % das estruturas estudadas) estão inseridas no nível de risco Muito Alto.

A classificação de risco de barragens de rejeitos é crucial para a segurança e gestão adequada dessas estruturas. Esta investigação analisou os principais critérios e parâmetros utilizados na classificação de risco, como características geotécnicas, monitoramento, e impactos ambientais. Estas informações foram obtidas do Sistema Integrado de Gestão de Barragens (SIGBM) da Agência Nacional de Mineração (ANM).

Foram avaliados os principais critérios e indicadores utilizados na classificação de risco. Com base nesta avaliação, foi possível compreender a complexidade e a interdependência dos diversos parâmetros na determinação do nível de risco associado a cada barragem.

A classificação de risco permite uma avaliação sistemática do potencial de falhas e rompimentos de barragens, ajudando a identificar aquelas que apresentam maiores chances de ocorrência de acidentes. Com essa informação em mãos, os responsáveis pela gestão das barragens podem tomar medidas preventivas e corretivas adequadas para reduzir os riscos associados.

Além disso, a classificação de risco também desempenha um papel fundamental na comunicação e transparência com as comunidades afetadas. Ao fornecer informações claras e acessíveis sobre o nível de risco das barragens, é possível promover a conscientização e a participação ativa das partes interessadas na tomada de decisões relacionadas à segurança das estruturas.

No entanto, é importante ressaltar que a classificação de risco por si só não é suficiente para garantir a segurança das barragens de rejeitos. Ela deve ser complementada por ações efetivas de monitoramento contínuo, manutenção adequada, capacitação dos profissionais envolvidos e investimentos em infraestrutura.

Por tanto, a classificação de risco de barragens de rejeitos é uma abordagem essencial para a prevenção de acidentes, proteção das pessoas e do meio ambiente. Com a combinação de avaliação criteriosa, monitoramento constante e ações efetivas, pode-se trabalhar para garantir a segurança dessas estruturas vitais e minimizar os riscos associados.

3.1 Sugestões para Pesquisas Futuras

Como proposta para trabalhos futuros sugere-se dar continuidade ao estudo desenvolvido nesta investigação, de modo a considerar os seguintes tópicos:

- incluir novos parâmetros de análise, pesos ponderais e modelos que melhores se adéquem ao desenvolvimento do estudo para diminuição ainda mais do índice de incerteza;
- um estudo aprofundado sobre tolerabilidade voltada para as barragens de rejeitos considerando a realidade brasileira;
- desenvolvimento e construção de um Dashboard em tempo real alimentado com os parâmetros do SIGBM utilizando a metodologia proposta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMO, N. *et al.* Dam Safety: Monitoring of Tailings Dams and Safety Reviews. **Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering**, p. 249–289, 28 set. 2020c.
- ADAMO, N. *et al.* Dam Safety: Use of Instrumentation in Dams. **Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering**, p. 145–202, 28 set. 2020b.
- ADAMO, Nasrat *et al.* **Dam safety: The question of tailings dams**. Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, v. 11, n. 1, p. 1-26, 2020a. <https://doi.org/10.47260/JESGE/1111>.
- ALMEIDA, L. G. **Classificação do índice de perigo (iP) em barragens de rejeito nas bacias hidrográficas da região do Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais**. 2018. 150 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnologia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- ASSIS, A. (2020). **Risk management for geotechnical structures: consolidating theory into practice** (Pacheco Silva Lecture). **Soils and Rocks**, 43, 311–336. <https://doi.org/10.28927/SR.433311>
- AZAM, Shahid; LI, Qiren. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. **Geotechnical news**, v. 28, n. 4, p. 50-54, 2010.
- BERGHE, J.-F. VANDEN, BALLARD, J.-C., WINTGENS, J.-F., & LIST, B. (2011). **Geotechnical risks related to tailings dam operations**. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:110781915>
- BURRITT, Roger L.; CHRIST, Katherine L. Water risk in mining: Analysis of the Samarco dam failure. **Journal of cleaner production**, v. 178, p. 196-205, 2018.
- CRUZ, C. O., & da Cunha Rodovalho, E. (2019). **Application of ISO 31000 standard on tailings dam safety**. **REM - International Engineering Journal**. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134764786>
- DAVISON, M. J., Roca, M., & Petkovek, G. (2020). **Supporting reduction of risks of tailings dams using earth observation data**. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-7658>
- DE ALMEIDA, L. G., Corteletti, R. C., & Dutra, L. F. (2019). **METODOLOGIA PARA CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE PERIGO (iP) EM BARRAGENS DE REJEITO DA MINERAÇÃO**. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v38i3.13776>
- DE ASSIS, A. P. (2020). **Risk management for geotechnical structures: consolidating theory into practice** (Pacheco Silva Lecture). <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:231660209>
- ESPÓSITO, T., & Palmier, L. R. (2013). **Application of Risk Analysis Methods on Tailings Dams. Soils and Rocks**. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:249860858>
- FAMIYEH, S., ADAKU, E., KISSI-MENSAH, L., & AMOATEY, C. T. (2015). **Risk management for a tailings re-mining project in Ghana**. **International Journal of Managing Projects in Business**, 8, 241–255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1108/IJMPB-04-2014-0033>
- FELL, R. *et al.* (2005). **Geotechnical Engineering of Dams** (1st ed.). CRC Press.
- FUSARO, T. C. **Metodologia de classificação de barragens baseada no risco**. Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig), 12 p. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS (SNGB), 25 out. 2003, Salvador, BA. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens – Anais.
- FUSARO, T.C. **Um programa de segurança de barragens no setor elétrico privatizado**. 23º Seminário Nacional de Grandes Barragens, Rio de Janeiro: v.2, p. 45-56, jan. 1999.

- GUIMARÃES, R. N. et al. **History of tailings dam failure: Impacts on access to safe water and influence on the legislative framework.** Science of the Total EnvironmentElsevier B.V., 15 dez. 2022.
- HARIRI-ARDEBILI, M. (2018). **Risk, Reliability, Resilience (R3) and beyond in dam engineering: A state-of-the-art review.** International Journal of Disaster Risk Reduction. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2018.07.024>.
- HARTFORD, D. N. D. (2008). **Risk Analysis in Geotechnical and Earthquake Engineering: State-Of-The-Art and Practice for Embankment Dams.** <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:111499035>
- HEBBLEWHITE, B. K. (2019). **Geotechnical risk in mining methods and practice: critical issues and pitfalls of risk management.** Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:169901760>
- HUI, S. (ROB); CHARLEBOIS, L.; SUN, C. **Real-time monitoring for structural health, public safety, and risk management of mine tailings dams.** Canadian Journal of Earth Sciences, v. 55, n. 3, p. 221–229, mar. 2018.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations.** Bulletin 164. 2016.
- KOSSOFF, D. et al. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. **Applied Geochemistry**, v. 51, p. 229–245, 1 dez. 2014.
- MARA, S., Tanaescu, M., Ozunu, A., & Vlad, S. N. (2007). **Criteria for Identifying the Major Risks Associated with Tailings Ponds in Romania.** Mine Water and the Environment, 26, 256–263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/S10230-007-0018-0>
- MEI, G. D., & Wu, Z. (2012). **Study on Social Risk Evaluation Index System for Tailings Pond Dam-Break Based on the Vulnerability Theory.** Advanced Materials Research, 594–597, 2301–2308. <https://doi.org/https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.594-597.2301>
- OWEN, J. R., KEMP, D., LÈBRE, É., SVOBODOVA, K., & MURILLO, G. P. (2020). **Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure.** International Journal of Disaster Risk Reduction, 42, 101361. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:210307931>
- PICIULLO, L. et al. A new look at the statistics of tailings dam failures. **Engineering Geology**, v. 303, p. 106657, jun. 2022.
- SAATY, T. L. (1980). **The_Analytic_Hierarchy_Process** (Vol. 1). McGraw-Hill International Book Company.
- SANTOS, DAM dos; CURÍ, A.; SILVA, JM da. **Técnicas para a disposição de rejeitos de minério de ferro.** In: VI Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto (CBMina), Belo Horizonte. 2010.
- SANTOS, R. N. C. **Enquadramento das Análises de Risco em Geotecnica.** Lisboa. LNEC, 2006. 257 p. Dissertação (Mestrado), Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 2006.
- SILVA, Francisco; LAMBE, T. William; MARR, W. Allen. Probability and risk of slope failure. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 134, n. 12, p. 1691-1699, 2008.
- TAROUN, A. (2014). **Towards a better modelling and assessment of construction risk: Insights from a literature review.** International Journal of Project Management, 32, 101–115. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:109968764>
- VICK, S. G. **Planning, Design and Analysis of Tailing Dams.** Vancouver, Canada: Bi Tech Publishers, 1990, 369 p.

APÊNDICE

Código linguagem Python mineração e consolidação dos dados da base SIGBM

```
15/02/2023 23:18 Barragem.curio.ipynb - Colaboratory

import pandas as pd

#importar a planilha do excel
planilha = pd.read_excel('/content/4 - dados a serem tratados SIGBM - Com nota.xlsx', None)

#verificação de abas da planilha excel
planilha.keys()

dict_keys(['Resumo', 'parametros atributos_iP', 'dados extraidos_ iP', 'dados extraidos_iP_filtrados', 'documentos de projeto_iP', 'docs de projeto_ip_filtrados', 'parametros_atributos_iV', 'dados extraidos_iV', 'parametros_atributos_iC', 'dados extraidos_iC_filtrados'])

dados_extraidos_iV = planilha['dados extraidos_iV']
dados_extraidos_iP = planilha['dados extraidos_iP_filtrados']
documentos_de_projetos_iP = planilha['docs de projeto_ip_filtrados']
dados_extraidos_iC = planilha['dados extraidos_iC_filtrados']
dados_extraidos_iC_SIG = planilha['dados extraidos_iC']
dados_extraidos_iP_SIG = planilha['dados extraidos_iP']
documentos_de_projetos_ip_SIG = planilha['documentos de projeto_iP']

drenada = dados_extraidos_iV['FS em condição drenada']
nao_drenada = dados_extraidos_iV['FS em condição não drenada']
altura_maxima = dados_extraidos_iP['Altura máxima atual (m)']
tipo_fundacao = dados_extraidos_iP['Tipo de fundação']
fundacao = dados_extraidos_iP['Fundação']
tempo_de_recorrencia = dados_extraidos_iP['Tempo de Recorrência da Vazão de projeto']
drenagem_interna = dados_extraidos_iP['Drenagem interna']
controle_compactacao = dados_extraidos_iP['Controle de compactação']
inclinacao_media = dados_extraidos_iP['Inclinação média dos taludes na seção principal']
metodo_construtivo = dados_extraidos_iP['Método construtivo da barragem']
instrumentacao = dados_extraidos_iP['Instrumentação']
nome_barragem_iV = dados_extraidos_iV['Nome da Barragem']
nome_barragem_iC = dados_extraidos_iC['Nome da Barragem']
docs_de_projeto_iP = documentos_de_projetos_iP['Documentação de projeto']
populacao_a_jusante_iC = dados_extraidos_iC['Existência de população a jusante']
numero_de_pessoas_afetadas = dados_extraidos_iC['Número de pessoas possivelmente afetadas a jusante em caso de rompimento da barragem']
impacto_ambiental = dados_extraidos_iC['Impacto ambiental']
impacto_socio_economico = dados_extraidos_iC['Impacto sócio-econômico']

Dados da planilha iV e Documentos iP

doc_ip_filtrado = dados_extraidos_iV.merge(documentos_de_projetos_ip_SIG, how = 'left', on = 'Código da Barragem')
doc_ip_filtrado

# saving the excel
dados_doc_ip = doc_ip_filtrado.to_excel('/content/dados_filtrados_doc_ip.xlsx')

Dados da planilha iC e IP

ip_filtrado = dados_extraidos_iV.merge(dados_extraidos_iP_SIG, how = 'left', on = 'Código da Barragem')
ip_filtrado

# saving the excel
dados_ip = ip_filtrado.to_excel('/content/dados_filtrados_ip.xlsx')

Dados da planilha iC e iV

dados_extraidos_iC.columns
dados_extraidos_iV.columns

Nome das Barragens (203 barragens iC)

ic_filtrado = dados_extraidos_iV.merge(dados_extraidos_iC_SIG, how = 'left', on = 'Código da Barragem')
ic_filtrado

# saving the excel
dados_f = ic_filtrado.to_excel('/content/dados_filtrados_iV_iC.xlsx')

https://colab.research.google.com/drive/1prJKEVHxMTEVyJ_kcyZOhhz_kyHUOzSp#printMode=true
```

15/02/2023 23:18

Barragem.curio.ipynb - Colaboratory

nota documentação de projetos em docs de projeto_iP filtrados

Instrumentação em dados extraidos_iP filtrados

```
nota_instrumentacao = []

for n in instrumentacao:
    if(n =='nan'):
        nota_instrumentacao.append("NULL")
    elif(n == "Existe instrumentação de acordo com o projeto técnico"):
        nota_instrumentacao.append(1)
    elif(n == "Existe instrumentação em desacordo com o projeto, porém em processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto"):
        nota_instrumentacao.append(2)
    elif(n == "Existe instrumentação em desacordo com o projeto sem processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto"):
        nota_instrumentacao.append(6)
    elif(n == "Barragem não instrumentada em desacordo com o projeto"):
        nota_instrumentacao.append(10)
    elif(n == "Indefinido"):
        nota_instrumentacao.append(10)
    else:
        nota_instrumentacao.append("NULL")

nota_instrumentacao
```

Método construtivo da barragem dados extraidos_iP filtrados

```
nota_metodo = []

for n in metodo_construtivo:
    if(n =='nan'):
        nota_metodo.append("NULL")
    elif(n == "Etapa única"):
        nota_metodo.append(1)
    elif(n == "Alteamento a jusante"):
        nota_metodo.append(2)
    elif(n == "Alteamento por linha de centro"):
        nota_metodo.append(5)
    elif(n == "Alteamento a montante ou desconhecido"):
        nota_metodo.append(10)
    elif(n == "Indefinido"):
        nota_metodo.append(10)
    else:
        nota_metodo.append("NULL")

nota_metodo
```

Inclinação média dos taludes na seção principal em dados extraidos_iP filtrados

```
nota_inclinacao = []

for n in inclinacao_media:
    if(n =='nan'):
        nota_inclinacao.append("NULL")
    elif(n == "Suave (Inclinação média dos taludes na seção principal <= 1V:3H) Ou Barragem de Concreto"):
        nota_inclinacao.append(1)
    elif(n == "Intermediário (1V:2H >= Inclinação média dos taludes na seção principal > 1V:3H)"):
        nota_inclinacao.append(3)
    elif(n == "Ingrime (Inclinação média dos taludes na seção principal > 1V:2H)"):
        nota_inclinacao.append(6)
    elif(n == "Indefinido"):
        nota_inclinacao.append(10)
    else:
        nota_inclinacao.append("NULL")

nota_inclinacao
```

Controle de compactação em dados extraidos_iP filtrados

```
nota_controle_compactacao = []

for n in controle_compactacao:
    if(n =='nan'):
        nota_controle_compactacao.append("NULL")
    elif(n == "Existem documentos que comprovam o controle de compactação conforme projeto e que comprovam o acompanhamento e controle tecnicamente"):
        nota_controle_compactacao.append(1)

nota_controle_compactacao
```

https://colab.research.google.com/drive/1prJKEVHxMTEVyJ_kcyZOhhz_kyHUOzSp#printMode=true

2/6

15/02/2023 23:18

Barragem.curio.ipynb - Colaboratory

```

        elif(n == "Existem estudos geotécnicos que comprovam o grau de compactação de acordo com projeto"):
            nota_controle_compactacao.append(4)
        elif(n == "Não houve controle tecnológico e/ou não há informação e/ou compactação em desacordo com projeto"):
            nota_controle_compactacao.append(10)
        elif(n == "Indefinido"):
            nota_controle_compactacao.append(10)
        else:
            nota_controle_compactacao.append(10)

nota_controle_compactacao

Drenagem interna dados extraidos_iP filtrados

nota_drenada_interna = []

for n in drenagem_interna:
    if(n =='nan'):
        nota_drenada_interna.append("NULL")
    elif(n == "Drenagem construída conforme projeto ou não existe drenagem em projeto"):
        nota_drenada_interna.append(0)
    elif(n == "Drenagem corretiva construída posteriormente a conclusão da barragem"):
        nota_drenada_interna.append(4)
    elif(n == "Sistema de drenagem em desacordo com projeto ou inexistente ou desconhecida ou estudo não confiável ou inoperante"):
        nota_drenada_interna.append(10)
    elif(n == "Indefinido"):
        nota_drenada_interna.append(10)
    else:
        nota_drenada_interna.append(10)

nota_drenada_interna

Tempo de Recorrência da Vazão de projeto em dados extraidos_iP filtrados

nota_temp_rec = []

for n in tempo_de_recorrencia:
    if(n =="nan"):
        nota_temp_rec.append("NULL")
    elif(n == "CMa (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar"):
        nota_temp_rec.append(1)
    elif(n == "Milenar"):
        nota_temp_rec.append(2)
    elif(n == "TR = 500 anos"):
        nota_temp_rec.append(5)
    elif(n == "TR inferior a 500 anos ou Desconhecida/ Estudo não confiável"):
        nota_temp_rec.append(10)
    elif(n == "Indefinido"):
        nota_temp_rec.append(10)
    else:
        nota_temp_rec.append(10)

nota_temp_rec

Fundação em dados extraidos_iP filtrados

nota_fundacao = []

for n in fundacao:
    if(n =='nan'):
        nota_fundacao.append("NULL")
    elif(n == "Fundação investigada conforme projeto"):
        nota_fundacao.append(1)
    elif(n == "Fundação parcialmente investigada"):
        nota_fundacao.append(6)
    elif(n == "Fundação desconhecida/ Estudo não confiável"):
        nota_fundacao.append(10)
    elif(n == "Indefinido"):
        nota_fundacao.append(10)
    else:
        nota_fundacao.append(10)

nota_fundacao

Tipo Fundação em dados extraidos_iP filtrados

```

https://colab.research.google.com/drive/1prJKEVHxMTEVJ_kcyZOhhz_kyHUOzSp#printMode=true

3/6

15/02/2023 23:18

Barragem.curio.ipynb - Colaboratory

```
nota_tipo_fundacao = []

for n in tipo_fundacao:
    if(n =='nan'):
        nota_tipo_fundacao.append("NULL")
    elif(n == "Rocha sá"):
        nota_tipo_fundacao.append(2)
    elif(n == "Rocha alterada / Saprolito"):
        nota_tipo_fundacao.append(5)
    elif(n == "Solo residual / Aluvião"):
        nota_tipo_fundacao.append(8)
    elif(n == "Aluvião arenoso espesso / Solo orgânico / Rejeito / Desconhecido"):
        nota_tipo_fundacao.append(10)
    elif(n == "Indefinido"):
        nota_tipo_fundacao.append(10)
    else:
        nota_tipo_fundacao.append(10)

nota_tipo_fundacao
```

Altura máxima em dados extraidos_iP filtrados

```
nota_altura_max = []
altura_m = [float(i) for i in altura_maxima]

for n in altura_m:
    if(n =='nan'):
        nota_altura_max.append("NULL")
    elif(15 <= n < 30):
        nota_altura_max.append(2)
    elif(30 <= n < 60):
        nota_altura_max.append(6)
    elif(n >= 60):
        nota_altura_max.append(10)
    elif(n == "Indefinido"):
        nota_altura_max.append(10)
    else:
        nota_altura_max.append(10)
```

nota_altura_max

FS em condição drenada em dados extraidos_iV

```
nota_drenada = []
nota = [float(i) for i in drenada]

for n in nota:
    if(n =='nan'):
        nota_drenada.append("NULL")
    elif(n >= 1.5):
        nota_drenada.append(0)
    elif(1.5 <= n < 1.5):
        nota_drenada.append(40)
    elif(1.1 <= n < 1.3):
        nota_drenada.append(60)
    elif(n < 1.1):
        nota_drenada.append(80)
    elif(n == "Indefinido"):
        nota_drenada.append(80)
    else:
        nota_drenada.append(80)
```

nota_drenada

FS em condição não drenada em dados extraidos_iV

```
nota_nao_drenada = []
nota_nao = [float(i) for i in nao_drenada]

for n in nota_nao:
    if(n =='nan'):
        nota_nao_drenada.append("NULL")
    elif(n >= 1.3):
        nota_nao_drenada.append(0)
    elif(1.2 <= n < 1.3):
        nota_nao_drenada.append(40)
```

https://colab.research.google.com/drive/1prJKEVHxMTEVyJ_kcyZOhhz_kyHUOzSp#printMode=true

4/6

15/02/2023 23:18

Barragem.curio.ipynb - Colaboratory

```
elif(1.0 <= n < 1.2):
    nota_nao_drenada.append(60)
elif(n < 1.0):
    nota_nao_drenada.append(80)
else:
    nota_nao_drenada.append(80)

nota_nao_drenada

Documentação de projeto em docs de projeto_iP_filtrados

nota_documentos_de_projetos_iP = []

for n in docs_de_projeto_iP:
    if(n =='nan'):
        nota_documentos_de_projetos_iP.append("NULL")
    elif(n == 'Projeto executivo e "como construído")':
        nota_documentos_de_projetos_iP.append(1)
    elif(n == 'Projeto executivo ou \"como construído\')'):
        nota_documentos_de_projetos_iP.append(2)
    elif(n == 'Projeto \"como está"'):
        nota_documentos_de_projetos_iP.append(3)
    elif(n == 'Projeto básico'):
        nota_documentos_de_projetos_iP.append(5)
    elif(n == 'Projeto conceitual'):
        nota_documentos_de_projetos_iP.append(8)
    elif(n == 'Não há documentação de projeto'):
        nota_documentos_de_projetos_iP.append(10)
    else:
        nota_documentos_de_projetos_iP.append(10)

nota_documentos_de_projetos_iP
```

Existência de população a jusante em dados extraidos_iC_filtrados

```
nota_existencia_de_populacao_a_jusante = []

for n in populacao_a_jusante:
    if(n =='nan'):
        nota_existencia_de_populacao_a_jusante.append("NULL")
    elif(n == 'Inexistente (Não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem)'):
        nota_existencia_de_populacao_a_jusante.append(1)
    elif(n == 'Pouco Frequente (Não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal ou rodovia municipal)'):
        nota_existencia_de_populacao_a_jusante.append(3)
    elif(n == 'Frequente (Não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal com acesso ao local)'):
        nota_existencia_de_populacao_a_jusante.append(5)
    elif(n == 'Existente (Existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser prejudicadas)'):
        nota_existencia_de_populacao_a_jusante.append(10)
    else:
        nota_existencia_de_populacao_a_jusante.append(10)

nota_existencia_de_populacao_a_jusante
```

Número de pessoas possivelmente afetadas a jusante em caso de rompimento da barragem em dados extraidos_iC_filtrados

```
nota_numero_de_pessoas_iP = []

for n in numero_de_pessoas_afetadas:
    if(n =='nan'):
        nota_numero_de_pessoas_iP.append("NULL")
    elif(n == '1-100'):
        nota_numero_de_pessoas_iP.append(2)
    elif(n == '101-500'):
        nota_numero_de_pessoas_iP.append(4)
    elif(n == '501-1000'):
        nota_numero_de_pessoas_iP.append(6)
    elif(n == '1001-5000'):
        nota_numero_de_pessoas_iP.append(8)
    elif(n == 'acima de 50001'):
        nota_numero_de_pessoas_iP.append(10)
    else:
        nota_numero_de_pessoas_iP.append(10)

nota_numero_de_pessoas_iP
```

Impacto ambiental em dados extraidos_iC_filtrados

https://colab.research.google.com/drive/1prJKEVHxMTEVyJ_kcyZOhhz_kyHUOzSp#printMode=true

5/6

15/02/2023 23:18

Barragem.curio.ipynb - Colaboratory

```
nota_impacto_ambiental = []

for n in impacto_ambiental:
    if(n =='nan'):
        nota_impacto_ambiental.append("NULL")
    elif(n == 'Insignificante (Área afetada a jusante da barragem encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais e a es-
        nota_impacto_ambiental.append(1)
    elif(n == 'Pouco Significativo (Área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegi-
        nota_impacto_ambiental.append(2)
    elif(n == 'Significativo (Área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em leg-
        nota_impacto_ambiental.append(6)
    elif(n == 'Muito Significativo (Barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II A - Não Inertes, segundo a NE-
        nota_impacto_ambiental.append(8)
    elif(n == 'Muito Significativo Agravado (Barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe I - Perigosos segundo a NE-
        nota_impacto_ambiental.append(10)
    else:
        nota_impacto_ambiental.append(10)

nota_impacto_ambiental

Impacto sócio-econômico em dados extraidos_iC_filtrados

nota_impacto_socio_economico = []

for n in impacto_socio_economico:
    if(n =='nan'):
        nota_impacto_socio_economico.append("NULL")
    elif(n == 'Inexistente (Não existem quaisquer instalações na área afetada a jusante da barragem)':
        nota_impacto_socio_economico.append(1)
    elif(n == 'BAIXO (Existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância sócio-económica)':
        nota_impacto_socio_economico.append(2)
    elif(n == 'MÉDIO (Existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância sócio-económica)':
        nota_impacto_socio_economico.append(3)
    elif(n == 'ALTO (Existe alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância sócio-económica)':
        nota_impacto_socio_economico.append(5)
    else:
        nota_impacto_socio_economico.append(10)

nota_impacto_socio_economico
```



https://colab.research.google.com/drive/1prJKEVHxMTEVyJ_kcyZOhhz_kyHUOzSp#printMode=true

6/6