



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

IGOR BERNARDINO BORGES

**HIERARQUIZAÇÃO DE FATORES DE RISCO RELEVANTES NO
MONITORAMENTO GEOTÉCNICO DE ATERROS SANITÁRIOS**

Recife
2025

IGOR BERNARDINO BORGES

**HIERARQUIZAÇÃO DE FATORES DE RISCO RELEVANTES NO
MONITORAMENTO GEOTÉCNICO DE ATERROS SANITÁRIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia/Geotecnia Ambiental.

Orientador: Dr. José Fernando Thomé Jucá

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Borges, Igor Bernardino.

Hierarquização de fatores de risco relevantes no monitoramento geotécnico de aterros sanitários / Igor Bernardino Borges. - Recife, 2025.

82f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

Orientação: José Fernando Thomé Jucá.

Inclui referências e apêndices.

1. Aterros sanitários; 2. Monitoramento geotécnico; 3. Riscos. I. Jucá, José Fernando Thomé. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

IGOR BERNARDINO BORGES

**HIERARQUIZAÇÃO DE FATORES DE RISCO RELEVANTES NO
MONITORAMENTO GEOTÉCNICO DE ATERROS SANITÁRIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Área de Geotecnia.

Aprovada em 25/02/2025

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá – UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Gustavo Ferreira Simões (examinador externo)
Universidade Federal de Minas Gerais

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Soraya Giovanetti El-Deir (examinadora externa)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Ao fim desta etapa tão significativa, não posso deixar de expressar minha profunda gratidão a Deus por me conceder forças e inspiração para concluir esta dissertação. Agradeço a todos os meus familiares e de forma especial aos meus pais, Iane e Inácio, cuja fé inabalável e suporte transformaram cada desafio em uma valiosa lição de perseverança, mesmo nos momentos mais difíceis.

Estendo meus agradecimentos ao meu orientador e mentor, José Fernando Thomé Jucá, cuja paciência, dedicação e orientação foram fundamentais para a concretização deste trabalho, ampliando meus horizontes e despertando em mim uma busca constante pelo conhecimento em aterros sanitários.

Também sou imensamente grato ao meu melhor amigo Josivan e aos amigos João Marcos, Isadora, Elivan, Selton, Alinny e Carlos cujos gestos de apoio, palavras encorajadoras e carinho fizeram toda a diferença, trazendo leveza e inspiração nos dias mais desafiadores.

Agradeço a todos os integrantes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, que me proporcionou um ambiente enriquecedor e os recursos necessários para o desenvolvimento desta pesquisa. Aos colegas e colaboradores, cujas ideias e debates contribuíram de forma significativa para o aprimoramento deste projeto, deixo meu sincero obrigado.

Cada gesto e palavra de incentivo foram essenciais para transformar este projeto em realidade. A todos os outros que caminharam comigo, meu profundo e sincero agradecimento.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O monitoramento geotécnico de aterros sanitários apresenta-se como um processo fundamental para acompanhar o comportamento mecânico dos maciços. É composto por uma série de instrumentos e procedimentos complexos. Todavia, quando mal desenvolvido, esse processo pode estar sujeito a uma série de riscos capazes de mascarar a ocorrência de feições indicativas de instabilidade. Nesse contexto, a identificação de fatores que impactam a efetividade do monitoramento geotécnico, juntamente com seus riscos relevantes, é essencial para fornecer um suporte eficiente na diminuição da probabilidade de sua ocorrência. Assim, este estudo criou uma hierarquização dos fatores mais influentes no comprometimento da estabilidade dos maciços de resíduos, utilizando abordagens multicritério para tratar incertezas e subjetividades. Os resultados indicaram que a coleta de dados é o fator mais crítico. Os achados reforçam a importância de investimentos em treinamentos especializados, controle de qualidade e desenvolvimento de sistemas inteligentes de monitoramento geotécnico, alinhando-se às exigências de segurança e sustentabilidade. Por fim, apesar das limitações, os resultados alcançados oferecem uma ferramenta estratégica para apoiar decisões mais assertivas e mitigar os riscos relevantes no contexto do monitoramento geotécnico de aterros sanitários.

Palavras-chave: Aterros Sanitários; Fatores, Monitoramento Geotécnico; Riscos Relevantes.

ABSTRACT

The geotechnical monitoring of non-hazardous waste landfills is a fundamental process for tracking the mechanical behavior of waste masses. It consists of a series of complex instruments and procedures. However, when poorly executed, this process can be affected by several risks that may obscure the occurrence of features indicative of instability. In this context, identifying the factors that impact the effectiveness of geotechnical monitoring, along with their associated risks, is essential for providing effective support to risk management. Thus, this study developed a hierarchical classification of the most influential factors affecting the stability of waste masses, using multi-criteria approaches to address uncertainties and subjectivities. The results indicate that data collection is the most critical factor. The findings highlight the importance of investments in specialized training, quality control, and the development of intelligent geotechnical monitoring systems, aligning with safety and sustainability requirements. Finally, despite its limitations, the results obtained provide a strategic tool to support more assertive decision-making and reduce the risks associated with geotechnical monitoring of landfills.

Keywords: Factors; Geotechnical Monitoring; Landfill; Relevant Risks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comparativo entre a Lógica Clássica e a Logica <i>Fuzzy</i>	31
Figura 2 – Número <i>Fuzzy</i> triangular.	33
Figura 3 – Comparação entre dois números <i>Fuzzy</i> $M1$ e $M2$	37
Figura 4 – Ciclo FMEA.	40
Figura 5 – Diagrama de espinha de peixe adaptado.....	14
Figura 6 – Árvore de decisões dos fatores (FAHP).	20
Figura 7 – Árvore de decisões dos riscos (FMEA).	24
Figura 8 – Árvore de decisões dos fatores e riscos (Método híbrido).	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de comparações <i>fuzzy</i>	34
Tabela 2 – Matriz <i>fuzzy</i> de comparação agregada.....	18
Tabela 3 – Soma das linhas e colunas dos diferentes critérios.....	18
Tabela 4 – Índices de prioridade.	23
Tabela 5 – Influência relativa de cada método estudado.	25

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Números Fuzzys Triangulares utilizados.....	35
Quadro 2 – Exemplo de classificação da probabilidade de ocorrência de uma falha.	39
Quadro 3 – Números Fuzzys Triangulares utilizados.....	14
Quadro 4 – Classificação de severidade, ocorrência e detecção das falhas.	14
Quadro 5 – Qualificação dos entrevistados.....	15
Quadro 6 – Efeitos e causas das falhas estudadas.	Erro! Indicador não definido.
Quadro 7 – Médias geométricas de severidade, ocorrência e detecção.....	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP. *Analytic Hierarchy Process*

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

D. Detecção

ETA. *Event Tree Analysis*

FAHP. *Fuzzy Analytic Hierarchy Process*

FMEA. *Failure Mode and Effect Analysis*

FTA. *Fault Tree Analysis*

NASA. *National Aeronautics and Space Administration*

O. Ocorrência

PNRS. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Política Nacional de Resíduos Sólidos

RPN. *Risk Priority Number*

RSU. Resíduos Sólidos Urbanos

S. Severidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. JUSTIFICATIVA.....	20
3. OBJETIVOS.....	21
3.1. Objetivo Geral.....	21
3.2. Objetivos específicos.....	21
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
4.1. Contextualização	22
4.2. Principais sistemas que compõem um maciço de resíduos	23
4.2.1. Camada de base.....	24
4.2.2. Drenagem de líquidos e gases	24
4.2.3. Monitoramento superficial	25
4.2.4. Drenagem superficial e camada de cobertura	25
4.3. Monitoramento geotécnico de aterros sanitários	26
4.4. Riscos e gerenciamento de riscos.....	27
4.5. Riscos geotécnico em aterros sanitários	28
4.6. Metodologias de análise de risco	29
4.7. Métodos aplicados a gestão de riscos geotécnicos em aterros sanitários	30
4.7.1. Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP).....	30
4.7.1.1. Analytic Hierarchy Process (AHP).....	30
4.7.1.2. Lógica <i>Fuzzy</i>	30
4.7.1.3. O método.....	31
4.7.2. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA).....	38
5. METODOLOGIA	41
5.1. Identificação de fatores e riscos influentes na efetividade do monitoramento geotécnico	41
5.2. Padronização de respostas	14
5.3. Coleta de dados	15
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	17
6.1. Resultados obtidos	17
6.1.1. Método FAHP	17
6.1.2. Método FMEA	21
6.1.3. Método híbrido	24
6.2. Discussões	25

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	30
8. REFERÊNCIAS	33
APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO	49

1. INTRODUÇÃO

Devido ao aumento populacional, crescentes volumes de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são gerados diariamente, os quais podem causar impactos ambientais negativos. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2020), entre 2010 e 2019, a geração de RSU no Brasil apresentou um aumento estimado em 12,4 milhões de toneladas, passando de 67 milhões para 79 milhões de toneladas, sendo tal incremento classificado como um desafio ambiental (Silva *et al.*, 2024). Vale ressaltar que avanços em relação a gestão dos mesmos não têm evoluído de maneira tão significativa (Strauch & Albuquerque, 2008; Dias, 2009). Além disso, a literatura apresentada neste trabalho mostra que o gerenciamento de riscos, no âmbito do monitoramento geotécnico, pode potencializar a identificação precoce de feições indicativas de instabilidade. Diante disso, argumenta-se que a abordagem para o mapeamento destes perigos pode ser estruturada em três principais frentes de pesquisa, cada uma contribuindo para a otimização da segurança e da eficiência no monitoramento de aterros sanitários.

A primeira refere-se ao gerenciamento e acompanhamento das condições geomecânicas de aterros sanitários – uma das formas mais utilizadas para disposição final de RSU (Medeiros *et al.*, 2023), principalmente devido aos benefícios que oferecem, com destaque para minimização de impactos ambientais e sociais (Portella & Ribeiro, 2014; Ahluwalia & Patel, 2018; Paul *et al.*, 2019; Yousefian *et al.*, 2020).

Os aterros sanitários caracterizam-se como uma obra geotécnica e são compostos por sistemas como: drenagem de lixiviados, captação e aproveitamento de gases, drenagem pluvial e camadas de cobertura (Silva, 2022).

O monitoramento geotécnico desses é resultado de diversas etapas, muitas vezes complexas, voltadas para a avaliação contínua de suas condições geomecânicas, incluindo avaliação de recalques verticais e horizontais, medição das pressões internas, estimativas de fatores de segurança, entre outros. Vale destacar que esse processo apresenta desafios significativos, especialmente em regiões menos desenvolvidas, devido a restrições orçamentárias, infraestrutura precária e escassez de mão de obra qualificada (Bezerra *et al.*, 2024).

O monitoramento dos recalques verticais e horizontais, normalmente é realizado por meio de marcos superficiais – elementos pré-moldados de concreto,

equipados com pinos topográficos metálicos fixados na parte superior. Estes são instalados estrategicamente na superfície do aterro, abrangendo pontos como cristas, bermas e a base, permitem detectar recalques excessivos que, se não forem controlados, podem ocasionar trincas na cobertura e nas bermas, aumentando significativamente o risco de deslizamentos ou rupturas.

Outro aspecto monitorado refere-se à medição das pressões internas, tanto de líquidos, quanto de gases, cujo acúmulo pode reduzir as tensões efetivas, contribuindo para a instabilidade do maciço. Além disso, existe a possibilidade de que haja a formação de lençóis suspensos de lixiviados favorecendo o acúmulo de gás, em função dos diferentes coeficientes de permeabilidade, agravando ainda mais a condição de instabilidade.

Destaca-se que a degradação dos resíduos ao longo do tempo altera suas propriedades mecânicas e hidráulicas – como compressibilidade, permeabilidade e resistência – e, dessa forma, tende a aumentar as incertezas na avaliação do comportamento geotécnico do aterro (Simões *et al.*, 2010).

Um monitoramento contínuo e integrado dos aspectos geomecânicos e ambientais de um aterro sanitário resulta na detecção precoce de alterações nos padrões de comportamento, permitindo a proposição de medidas preventivas e corretivas que orientem de forma assertiva os trabalhos de conservação e manutenção (Recesa, 2008).

A segunda frente de pesquisa refere-se a busca pela melhoria contínua dos procedimentos operacionais associados ao monitoramento geotécnico, tendo em vista sua importância para assegurar uma operação segura e eficiente. Neste âmbito, a gestão de riscos desempenha um papel essencial pois permite a identificação, avaliação e mitigação de ameaças que possam comprometer o acompanhamento das condições internas de um maciço.

Risco, por sua vez, definido como a probabilidade de ocorrência de um evento capaz de gerar impactos negativos ou positivos, resultante da incerteza quanto ao alcance de um determinado objetivo (ABNT, 2018). Este geralmente é medido em termos de impactos e probabilidades, sendo este a possibilidade de ocorrência de uma ameaça e aquele o efeito de tal ameaça.

No contexto de aterros sanitários, o risco mais significativo, tendo em vista o acompanhamento das condições geomecânicas, está vinculado à ocorrência de

deslizamento de resíduos, evento que pode gerar consequências negativas de ordem ambiental, social e econômica. Ressalta-se que diversos incidentes deste tipo foram registrados em diferentes partes do mundo, muitos associados a práticas de engenharia inadequadas, especialmente no campo da geotecnia (Reddy & Basha, 2014). No Brasil foram muito mais de 20 casos, merece destaque o deslizamento ocorrido no Aterro Sanitário Bandeirantes, no município de São Paulo, em 1991, quando aproximadamente 65.000m³ de material deslizou. Esse caso intensificou estudos sobre a estabilidade e o monitoramento de aterros no país, evitando ocorrências semelhantes (Benvenuto & Cunha, 1991).

Em 2022, um deslizamento no aterro sanitário de Fazenda Rio Grande/Paraná resultou na morte de um trabalhador. Esse incidente expôs falhas significativas na gestão do aterro, impulsionando intensos debates sobre a necessidade de aprimorar as práticas operacionais e revisar as políticas públicas relativas à disposição final dos resíduos (Rugenski & Pinto, 2024).

Para prevenir a ocorrência de desastres semelhantes, o desenvolvimento e a implementação de estudos direcionados ao gerenciamento de riscos mostram-se importantes principalmente tendo em vista sua complexidade. Fatores decorrentes da biodegradação da matéria orgânica presente nos RSU, como o aumento da temperatura, podem reduzir a resistência ao cisalhamento e alterar a compressibilidade das partículas dos resíduos (Yazdanpour *et al.*, 2024), resultando no aumento de riscos.

Segundo Rodrigues (2014), embora diversos estudos comprovem os riscos associados aos resíduos e aos aterros sanitários, ainda há uma carência de estudos associados à sua gestão.

A gestão de riscos, em contínua evolução, envolve um conjunto de procedimentos planejados com antecedência, focados em identificar, avaliar e mitigar os riscos associados a operações (Rovai, 2005), de forma a aumentar o alcance de objetivos, seja por meio de abordagens indiretas, seja com mecanismos altamente estruturados (Brasil, 2018).

Por fim, a terceira linha de pesquisa foca numa abordagem quantitativa para a análise de riscos potenciais no monitoramento geotécnico de aterros sanitários, possibilitando uma avaliação mais precisa, embasada em seus impactos. Administrar um risco consiste em mensurar e controlar sua incerteza de maneira planejada e

específica, antecipando possíveis impactos (Sardinha & Claro, 2009). Para tal, pode-se utilizar de métodos qualitativos, quantitativos e/ou híbridos. Onde dois são mais utilizados: o *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) que analisa os modos de falhas, assim como, seus efeitos (Li *et al.*, 2021); e o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) utilizado para auxílio na tomada de decisões (Marins *et al.*, 2009), o qual estipula pesos para cada índice estudado (Skibniewski & Chao, 1992).

O método *Analytic Hierarchy Process*, introduzido por Saaty em 1980, tem como objetivo determinar o grau de prioridade de um conjunto de alternativas num problema de tomada de decisão multicritério (Saaty, 1980; Wei *et al.*, 2005), sendo utilizado em contextos como: gerenciamento de resíduos sólidos (Parekh *et al.*, 2015), suscetibilidade de deslizamentos de solo (Myronidis *et al.*, 2016), mapeamento de suscetibilidade a inundações (Hammami *et al.*, 2019), entre outros.

Paralelamente, embora que o AHP apresente diversas vantagens, a abordagem tradicional enfrenta desafios ao lidar com as incertezas inerentes ao processo decisório, que podem impactar a precisão e a confiabilidade das análises (Pant *et al.*, 2022; Sorourkhah & Edalatpanah, 2022). Diante disto, versões alternativas com o objetivo de melhoramento foram desenvolvidas, como o *Fuzzy AHP* (FAHP), uma variação que combina o AHP com a Teoria dos conjuntos *Fuzzy*, permitindo escalas mais flexíveis e o uso de funções de associação variáveis, além da utilização de variáveis linguísticas, em vez de valores exatos, para capturar de forma mais eficaz a incerteza (Varshney *et al.*, 2024).

Por sua vez, o *Failure Mode and Effect Analysis* surgiu a partir de estudos realizados pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) em 1963 (Hu *et al.*, 2009). Atualmente, apresenta-se como uma ferramenta muito utilizada nas indústrias, a fim de identificar, priorizar e reduzir possíveis falhas detectadas, problemas e erros, desde a etapa de projeto ao lançamento de um produto (Fakhravar, 2021). Para isso é calculado o *Risk Priority Number* (RPN), que é determinado pelo produto de três indicadores: Ocorrência (O), Severidade (S) e Detecção (D). Assim, quanto maior for um RPN, maior será o impacto da falha no processo analisado.

Dessa forma, no contexto geotécnico de aterros sanitários, a aplicação combinada dos métodos FAHP e FMEA num estudo exploratório pode proporcionar benefícios significativos. Entre estes, destaca-se a capacidade de identificar e priorizar o impacto de potenciais riscos associados a fatores relevantes no monitoramento

geotécnico, favorecendo um acompanhamento mais preciso da estabilidade geomecânica e permitindo uma alocação mais eficiente de recursos e investimentos.

Vale mencionar que aterros sanitários, devido à grande heterogeneidade dos resíduos, elevado potencial de poluição, diversidade de operações e processos envolvidos no aterramento, demandam um controle de riscos altamente complexo, especialmente no âmbito geotécnico. Esse controle deve ser continuamente aprimorado para assegurar o monitoramento de todos os fatores inter-relacionados à biodegradação da matéria orgânica.

Dada essa complexidade, o processo abordado neste estudo (monitoramento geotécnico) é, particularmente, muito suscetível a falhas pois exige um alto nível de conhecimento especializado, o uso de tecnologias avançadas e uma gestão eficiente de dados. Em uma conjuntura global esta pesquisa contribui para a literatura ao estabelecer uma hierarquização de fatores relevantes e suas possíveis falhas relacionadas.

Esta dissertação, conduzida com o auxílio dos métodos FAHP e FMEA, teve critérios estabelecidos a partir de uma adaptação do modelo de aprimoramento da eficiência no monitoramento de aterros, originalmente proposto pelo Grupo Técnico de Questões Globais da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – Cetesb (Silva, 2006). Foi desenvolvida em 2024, com a participação de dezoito especialistas atuantes em aterros sanitários nas regiões Nordeste e Sudeste do Brasil.

Apesar das limitações identificadas, os resultados servem como arcabouço para o direcionamento de recursos, representando uma ferramenta estratégica para embasar decisões mais assertivas na gestão de maciços de resíduos. Ao identificar fatores relevantes e seus riscos associados, é possível aprofundar a compreensão de seus impactos, contribuindo significativamente para a mitigação de falhas. No futuro, esses resultados poderão ser explorados para desenvolver continuamente mecanismos mais eficientes relacionados à sua gestão.

Por fim, este estudo foi desenvolvido em sete capítulos, sendo estes: Capítulo 1 – Introdução, apresenta o contexto do estudo, sua relevância científica e prática, bem como um panorama geral da pesquisa; no Capítulo 2 – Justificativa, é destacada a importância do tema abordado e suas contribuições para o avanço do conhecimento técnico e científico; o Capítulo 3 – Objetivos, detalha o objetivo geral e os objetivos específicos que sustentam a abordagem metodológica adotada; para o Capítulo 4 –

Fundamentação Teórica, sendo discutidos os conceitos-chave para o entendimento do tema, abordando o gerenciamento de riscos e os riscos geotécnicos específicos de aterros sanitários, assim como os métodos empregados, FAHP e FMEA; no Capítulo 5 – Metodologia, além do processo de identificação dos fatores e riscos estudados, são detalhados os procedimentos de coleta de dados; o Capítulo 6 – Resultados e Discussões, apresentação dos achados obtidos, incluindo as análises individuais dos métodos FAHP e FMEA, bem como a proposição e aplicação de um método híbrido, acompanhados de uma discussão crítica fundamentada no referencial teórico; finalmente, o Capítulo 7 – Considerações Finais, sintetização das contribuições do estudo, apontamento das limitações encontradas e proposição de direções para futuras pesquisas, buscando consolidar o conhecimento na área e apoiar práticas mais seguras e eficazes no monitoramento geotécnico de aterros sanitários.

2. JUSTIFICATIVA

Aterros sanitários podem ser caracterizados como estruturas geotécnicas propensas a diversas falhas que não são estudadas (Athanasopoulos *et al.*, 2013), podendo estas serem caracterizadas como complexas (Jayaweera *et al.*, 2019) e em alguns casos resultaram em grandes deslizamentos de massa (Yang *et al.*, 2017).

É válido enfatizar que o comportamento geomecânico de um maciço composto por RSU depende de vários fatores, tais como: ângulo e altura de taludes, geometria, pressão exercida pela parcela fluida, efeitos sísmicos ou detonações próximas, resistência ao cisalhamento interno, entre outros (Ohio, 2004), os quais dificultam seu acompanhamento geotécnico.

Para Thomazoni (2014), a crescente produção de lixo, resultado do desenvolvimento das atividades humanas junto ao crescimento populacional, resulta em aumento na preocupação acerca dos riscos potenciais de sua destinação, principalmente em aterros sanitários. Segundo a Abrema (2024), no Brasil, esta é a principal forma de disposição. Ademais, as constantes mudanças na composição gravimétrica dos resíduos resultam em taludes com características variáveis que demandam o desenvolvimento de novos estudos, sobretudo voltados aos riscos geotécnicos (Wang *et al.*, 2009). Yin *et al.* (2016) afirmam que quando ameaças são geridas adequadamente, é possível prevenir a ocorrência de falhas.

Na esfera acadêmica, percebe-se que o número de publicações científicas sobre os aterros é relativamente limitado, com a maioria dos estudos se concentrando em aspectos relacionados aos equipamentos utilizados, métodos de seleção, principais desafios enfrentados, limitações observadas durante sua aplicação e parâmetros de resistência (Blengino *et al.*, 1996; Juca *et al.*, 1998; Zekkos, 2013; Hataf & Mousavinezhad, 2021)

Um monitoramento geotécnico eficaz possibilita a avaliação contínua e sistemática dos fatores que influenciam diretamente a estabilidade do maciço, partindo desde a avaliação de recalques, a variação das pressões internas dos fluidos e gases (ABNT, 2010). Por fim, segundo Jucá (2003), o aperfeiçoamento da compreensão de aspectos, sobretudo relacionados ao monitoramento geotécnico em aterros sanitários, é de grande valia para a realização de ações corretivas em tempo hábil e prevenção de desastres.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Hierarquizar fatores de risco influentes na efetividade do monitoramento geotécnico com base em seu potencial de comprometimento da avaliação do comportamento geomecânico de aterros sanitários, visando o oferecimento de um suporte eficaz à gestão.

3.2. Objetivos específicos

- a) Identificar fatores relevantes no desenvolvimento do monitoramento geotécnico de aterros sanitários;
- b) Mapear os riscos associados aos fatores relevantes;
- c) Realizar uma análise das causas e impactos das falhas associadas a cada fator estudado;
- d) Discutir métodos de análise de riscos aplicáveis à geotecnia;
- e) Propor um modelo híbrido para hierarquização dos fatores, levando em consideração seus riscos.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Contextualização

Existem diversos tipos de resíduos, como: resíduos industriais, RSU, resíduos da construção civil, resíduos de serviços de saúde, resíduos portuários e aeroportuários, rejeitos e estéreis provenientes da mineração, além de lodos gerados em estações de tratamento de água e esgoto. Os RSU, englobam os produzidos em residências, estabelecimentos comerciais, logradouros públicos e outras atividades urbanas, incluindo variação de ruas e praças (ABNT, 2020).

Estima-se que, até 2050, a geração de resíduos sólidos municipais, no mundo, será de 3,4 bilhões de toneladas, de maneira que, ao ser comparado ao crescimento populacional no mesmo período, esse aumento representa mais do que o dobro. Acrescenta-se que em tal projeção, os países menos desenvolvidos terão um aumento na geração per capita de resíduos de 40% ou mais até o ano supracitado (Group, 2022).

No contexto brasileiro, a Lei nº 12.305 (Brasil, 2010), a qual institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em seu art. 3 define:

[...] resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

Mudanças nos padrões culturais, econômicos e sociais influenciam diretamente no volume de resíduos produzidos. Tal geração tem ganhado maior notoriedade no Brasil, a partir do sancionamento da PNRS, que dispõe entre outras coisas, em seu art. 1 “[...] sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos [...]” (Brasil, 2010), sendo a destinação dos mesmos um dos grandes problemas enfrentados pela sociedade (de Lavor *et al.*, 2017).

Em solo brasileiro, a maior parte dos RSU coletados (59%) são encaminhados para aterros sanitários, estima-se que, em 2023, 41 milhões de toneladas destes resíduos foram encaminhadas para aterros sanitários (Abrema, 2024).

Aterro sanitário, segundo a NBR 8419 (ABNT, 1992), corresponde a uma técnica para armazenar RSU sobre o solo utilizando princípios de engenharia, de modo a compactá-lo para diminuir o espaço ocupado e cobri-lo com terra todos os dias uma ou mais vezes, se preciso. Ademais, um maciço de resíduos pode ser considerado uma obra de terra, a qual necessita de um controle sistemático da estabilidade estrutural.

De acordo com Kaimoto (2024), aterros sanitários são obras de engenharia complexas criadas para a disposição segura e ambientalmente adequada de RSU, garantindo a proteção do solo, da água e do ar. Ao contrário dos lixões, estes são capazes de valorizar e tratar resíduos, transformando-os em fontes de energia limpa, como biogás e biometano, contribuindo para a economia circular e a descarbonização.

Dispor RSU em aterros sanitários tem sido o método predominante em todo o mundo, principalmente graças ao menor custo quando comparado a outras formas de disposição final, Brunner & Fellner (2007) relatam que esta prática é mais comum nos países em desenvolvimento.

Conforme o aumento de quantidades, seja por crescimento populacional, expansão da densidade demográfica, desenvolvimento de novos produtos, entre outros, há um incremento na complexidade e custos envolvidos no gerenciamento dos aterros (Alzamora & Barros, 2020).

No Brasil, devido à falta de procedimentos e equipamentos adequados, instalações por vezes mal dimensionadas, conservação duvidosa, recursos financeiros escassos, entre outros, a gestão adequada de RSU encontra dificuldades (Alzamora & Barros, 2020).

4.2. Principais sistemas que compõem um maciço de resíduos

Alguns dos sistemas mais relevantes para aterros sanitários são: impermeabilização, drenagem de líquidos e gases, cobertura dos resíduos, estabilidade de maciço, drenagem superficial de águas pluviais, entre outros (Silva & Tagliaferro, 2021). Segundo Cuartas *et al.* (2018) cada um desses corresponde a uma variável que influencia nas demais sendo difícil quantificar suas interações.

4.2.1. Camada de base

A base utilizada para construir um maciço de resíduos pode ser composta por solo e/ou geossintéticos desde que seja atingido um baixo coeficiente de permeabilidade. Seu objetivo é garantir o confinamento e isolamento da massa de resíduos. Este sistema deve ser desenvolvido para minimizar o risco de contaminação ambiental decorrente dos lixiviados (Chidiac *et al.*, 2023).

Consonante com Ben *et al.* (2023), a escolha de materiais para o sistema de impermeabilização tem influência direta no nível de segurança de um aterro sanitário, a nível de exemplo, quando há a utilização de geomembranas: o tipo texturizada resulta em fatores de segurança mais altos do que o tipo lisa.

A escolha de lugares para a implantação de um maciço deve considerar, entre diversos fatores – a fim de reduzir riscos de instabilização –, a remoção de solos inadequados, como argilas moles e solos colapsáveis, que podem comprometer a estabilidade da obra (Kamiji & Oliveira, 2019). Para Meegoda *et al.* (2016), avaliar o nível da água subterrânea também é uma tarefa importante, pois uma elevação no nível freático pode resultar em um levantamento da base aumentando o risco de problemas relacionados a estabilidade geotécnica.

4.2.2. Drenagem de líquidos e gases

Uma drenagem interna eficaz influencia diretamente na segurança estrutural de um maciço de resíduos, pois minimiza o risco de colapso e subsidia a captação de gases (Wang *et al.*, 2024). De acordo com Kamiji e Oliveira (2019), a ausência de sistemas eficientes de drenagem de líquidos e gases, principalmente no Brasil, está atrelada a ruptura desses tipos de obra. A redução na vazão de lixiviado observada em emissários e pontos de afloramento de chorume ao longo de bermas são indícios de drenagens pouco eficientes (Dominoni *et al.*, 2022).

Segundo Giorgini (2019), com o passar do tempo há uma tendência de elevação nos níveis mínimos de lixiviados no interior de um aterro sanitário, graças a diminuição da permeabilidade dos resíduos, conforme estes se decompõem, e a colmatação (física, química e biológica) dos sistemas de drenagem.

Altos níveis de lixiviado podem comprometer significativamente a estabilidade dos taludes de resíduos. Assim, é importante detectar e controlar os níveis internos

deste líquido (Nai *et al.*, 2023). Quando estes percolam através da camada de cobertura, são percebidos como afloramentos.

4.2.3. Monitoramento superficial

O registro sistemático e contínuo da magnitude das movimentações ocorridas na superfície tem por objetivo garantir a segurança e subsidiar o planejamento das atividades de expansão, servindo como base para a identificação de potenciais instabilidades (Simões *et al.*, 2010). O monitoramento das velocidades de deslocamento serve como base para definir critérios de decisão e selecionar ações preventivas (Boskov, 2008), que são proporcionais às magnitudes das velocidades registradas (Kaimoto, 2008 apud Cunha, 2020).

Conforme Meegoda *et al.* (2016), deformações significativas causadas por recalques diferenciais na massa de resíduos geralmente são percebidos como falhas na camada de cobertura. A análise de trincas, fissuras, abatimentos, inchamentos e mudanças nas inclinações são aspectos que auxiliam na identificação de inconformidades (Benvenuto, 2011).

4.2.4. Drenagem superficial e camada de cobertura

O sistema de drenagem superficial é projetado de modo a coletar e direcionar o escoamento das águas de chuvas com o intuito de prevenir sua infiltração e a ocorrência de erosões nos resíduos aterrados (Boskov, 2008). Conforme Oliveira & Monticeli (2018), quando assoreado, este resulta em desarranjo do escoamento superficial com acúmulo de água em alguns pontos ou escoamentos concentrados.

O sistema de cobertura tem um papel crucial no controle da geração de lixiviado, minimizando a infiltração de águas pluviais na massa interna de resíduos (Gomes & Jucá, 2023). A ocorrência de trincas no platô, segundo Giorgini (2019), pode resultar em um aumento na infiltração de águas de chuvas.

Assim como, tal sistema em solo brasileiro é composto, geralmente, por solo compactado e atua como uma barreira de forma a evitar ou minimizar as emissões de biogás (Candiani & Viana, 2017). Porém, com o passar do tempo, devido aos ciclos de umedecimento e secagem propiciados pelas variações das condições climáticas, esta camada tende a perder eficiência, resultando no escape de gás pela superfície

do aterro sanitário (Mariano & Jucá, 2010). Tal escape resulta em riscos de combustão e explosão, assim como, desconforto ambiental em razão dos odores (Oliveira & Monticeli, 2018).

4.3. Monitoramento geotécnico de aterros sanitários

De acordo com as diretrizes da NBR 15849 (ABNT, 2010), o monitoramento geotécnico de aterros sanitários tem como finalidade avaliar as movimentações e as condições gerais de estabilidade dos maciços. Segundo o Cempre (2018), este sistema engloba o acompanhamento dos deslocamentos horizontais e verticais; o controle do nível de chorume e das pressões de gases no interior do aterro; a verificação das vazões de percolado por meio dos drenos e a realização de inspeções periódicas no local.

Para tal, inicialmente, dados são coletados em campo por meio de instrumentos, sendo posteriormente processados e analisados com base em critérios de alerta e níveis de segurança.

Os principais instrumentos e técnicas de monitoramento, segundo Oliveira & Monticeli (2018), são: inspeções visuais, piezômetros, inclinômetros, marcos superficiais, pluviômetros e medidores de vazão de percolados.

Segundo a CPRH (2021), as inspeções visuais rotineiras em campo têm como objetivo de identificar danos nos componentes do sistema de drenagem de águas pluviais, surgimento de processos erosivos, presença de abatimentos ou outras anomalias que possam comprometer a integridade e o funcionamento adequado do aterro sanitário.

Piezômetros (tipo vector), conforme descrito por Antoniutti Neto *et al.* (1995) *apud* Catapreta e Simões (2016), são compostos por dois tubos concêntricos: um interno, destinado à medição da pressão dos líquidos lixiviados, e outro externo, utilizado para avaliar a pressão do biogás.

Por sua vez, inclinômetros são dispositivos que permitem o acompanhamento dos recalques e deslocamentos horizontais em profundidade, consistindo em segmentos de tubos plásticos ou de alumínio, acoplados por luvas telescópicas em posição vertical ou ligeiramente inclinada em relação à vertical. Cada tubo possui dois pares de ranhuras diametralmente opostas que servem como guia para o “torpedo”, onde se localiza o sensor de leitura (Boskov, 2008).

Marcos superficiais são constituídos, normalmente, de elementos pré-moldados de concreto, equipados com pinos topográficos metálicos fixados na parte superior, e são estrategicamente instalados na superfície do aterro para medir com precisão os deslocamentos verticais e horizontais do maciço (Oliveira & Monticeli, 2018).

O pluviômetro é um instrumento que mede a quantidade de chuva dentro de um determinado horário. Ao passo que o medidor de vazão, calha Parshall, avalia a quantidade de lixiviado que escoar através da rede de drenagem interna. A correlação entre a precipitação e o comportamento dos líquidos lixiviados, contribuindo para a análise do balanço hídrico e, conseqüentemente, para a avaliação da estabilidade e compressibilidade dos resíduos dispostos no aterro (Catapreta, 2008).

4.4. Riscos e gerenciamento de riscos

Os riscos são situações ou eventos em que algo valioso, como pessoas ou bens, são expostos a possíveis perigos – situações com potencial de causar prejuízos (Fell *et al.*, 2008) –, com resultados futuros incertos (Rosa, 2003). São caracterizados como uma consequência da incerteza para a concretização de um determinado objetivo (IRGC, 2005; ABNT, 2018), estes podem resultar em impactos positivos ou negativos no cumprimento de determinado objetivo. Os negativos podem findar em atrasos, aumento nos custos, problemas de segurança e qualidade (El-Sayegh *et al.*, 2021). Já os positivos, segundo a NBR 31000 (ABNT 2018), criam ou resultam em oportunidades.

Para Ho *et al.* (2015), a gestão de risco pode ser entendida como um conjunto de estratégias e planos baseados em avaliação prévia de riscos com o intuito de reduzir vulnerabilidades e garantir a resiliência. De modo a identificar, analisar e respondê-los durante todo o ciclo de vida de um projeto (Wang *et al.*, 2004).

Para a NBR 31000 ABNT (2018, p.1), a gestão de riscos pode ser entendida como “atividades coordenadas para dirigir e controlar uma organização no que se refere a riscos”. Para isso, a norma apresenta um modelo estrutural com foco na integração da gestão com atividades e funções essenciais. Essa contempla aspectos como: concepção, melhoria, avaliação e aprimoramento contínuo da gestão de riscos.

A gestão de riscos pode ser realizada por etapas específicas, como: identificação de fatores e eventos de risco operacional com base em dados relevantes,

análise detalhada das informações coletadas e utilização dos resultados obtidos para orientar a tomada de decisões (Turk, 2010).

4.5. Riscos geotécnico em aterros sanitários

No que tange maciços de resíduos, riscos relevantes podem ser observados no âmbito geotécnico, como: deformações, deslocamentos acentuados, trincas, rachaduras, processos erosivos, deslizamento de taludes, entre outros (Oliveira & Monticeli, 2018). Os mesmos podem ser desencadeados, principalmente, por fatores intrínsecos à massa de resíduos disposta, tendo como exemplo: composição, parâmetros de resistência, grau de compactação dos resíduos, condições climáticas, geometria do aterro, estabilidade do subsolo e fluidos contidos em seu interior (líquidos/gases).

É fundamental destacar a importância de uma atenção especial aos seus riscos geotécnicos, pois podem resultar em deslizamentos de resíduos. Ademais, as pressões hidrostáticas e hidrogeológicas também representam um potencial perigo pois podem resultar no rompimento, compressão ou levantamento da parcela de resíduos aterrada (Santiago Junior *et al.*, 2021).

Outra ameaça significativa a ser monitorada é o controle das movimentações, que, conforme Denardin (2013), representa um dos maiores desafios na operação de um aterro sanitário devido à sua complexidade e a longa duração. Esse aspecto é diretamente influenciado por diferentes origens, tipos de disposição, bem como pela composição física e química dos resíduos depositados no aterro (Eyay, 2016).

Vale mencionar que um monitoramento geotécnico inadequado pode mascarar movimentos desordenados de massa ao longo dos taludes que compõem o maciço, resultando em deslizamentos (Huang & Zhu, 2014).

Paralelamente, quando bem estruturado e preciso, esse monitoramento permite: analisar e avaliar o comportamento das pressões internas e movimentações de massa; verificar possíveis alterações nos padrões de desempenho planejados; monitorar a estabilidade da estrutura; propor medidas preventivas, ações corretivas, entre outras iniciativas específicas à segurança e eficiência do sistema (Simões *et al.*, 2003; Oliveira & Monticeli, 2018).

Para tal, em geral, vale-se de um acompanhamento contínuo de instrumentos como: marcos superficiais, piezômetros, pluviômetros, medidores de vazão de

líquidos lixiviados, inclinômetros, entre outros, aliados a inspeções visuais, partindo desde a coleta de dados, à definição de níveis de alerta. Esse conjunto de medidas é direcionado, principalmente, para o acompanhamento das condições do maciço de resíduos, avaliando aspectos como recalques, níveis piezométricos, e as condições de conservação e manutenção da estrutura (Jucá, 2003; Cempre, 2018).

Acrescenta-se que, integrar análises quantitativas das falhas às quais o monitoramento geotécnico está sujeito aprimora os modelos convencionais, oferecendo uma visão mais holística de seus riscos.

4.6. Metodologias de análise de risco

A análise de riscos é realizada a partir de uma identificação, avaliação e mitigação, combinando métodos qualitativos e quantitativos (ABNT, 2018). A primeira etapa busca mapear as ameaças e vulnerabilidades em contextos diversos, desde a engenharia até a gestão ambiental e de saúde; a segunda estuda o impacto potencial dos eventos adversos; a última, diz respeito ao tratamento dos riscos por meio da implementação de estratégias que reduzem a exposição a falhas e promovem a resiliência dos sistemas.

Os métodos de análise de riscos têm evoluído de abordagens estáticas e lineares para *frameworks* mais flexíveis e iterativos. Esta mudança reflete a busca por cenários mais equilibrados e reais, superando reducionismos e cultivando uma compreensão integrada, profunda e abrangente (Xu *et al.*, 2024).

Exemplos de métodos qualitativos, quantitativos e/ou híbridos são: FMEA, *Fault Tree Analysis* (FTA), *Fine-Kinney*, *Event Tree Analysis* (ETA), FAHP, entre outros (Dehghan Nejad *et al.*, 2016; Toroody *et al.*, 2016; Gul & Celik, 2018; Appolloni *et al.*, 2021).

Vale mencionar os recentes avanços, sobretudo, em relação às análises de decisão multi-critérios – métodos baseados em análise sistemática para avaliar e selecionar alternativas, considerando múltiplos critérios e abordando a incerteza associada a valores e interesses distintos de indivíduos ou tomadores de decisão (Kiker *et al.*, 2009). Essas abordagens analíticas são robustas na gestão de riscos, demonstrando eficácia em cenários complexos onde múltiplos critérios, frequentemente conflitantes, precisam ser considerados (Xu *et al.*, 2024).

4.7. Métodos aplicados a gestão de riscos geotécnicos em aterros sanitários

4.7.1. Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)

4.7.1.1. Analytic Hierarchy Process (AHP)

O método FAHP corresponde a um aprimoramento do AHP, método multicritério proposto por Saaty em 1980 (Saaty, 1980), sendo de fácil e flexível aplicação (Despodov *et al.*, 2011), que permite a análise de impasses simples, aos complexos, mesmo que conflitantes (Emrouznejad & Marra, 2017).

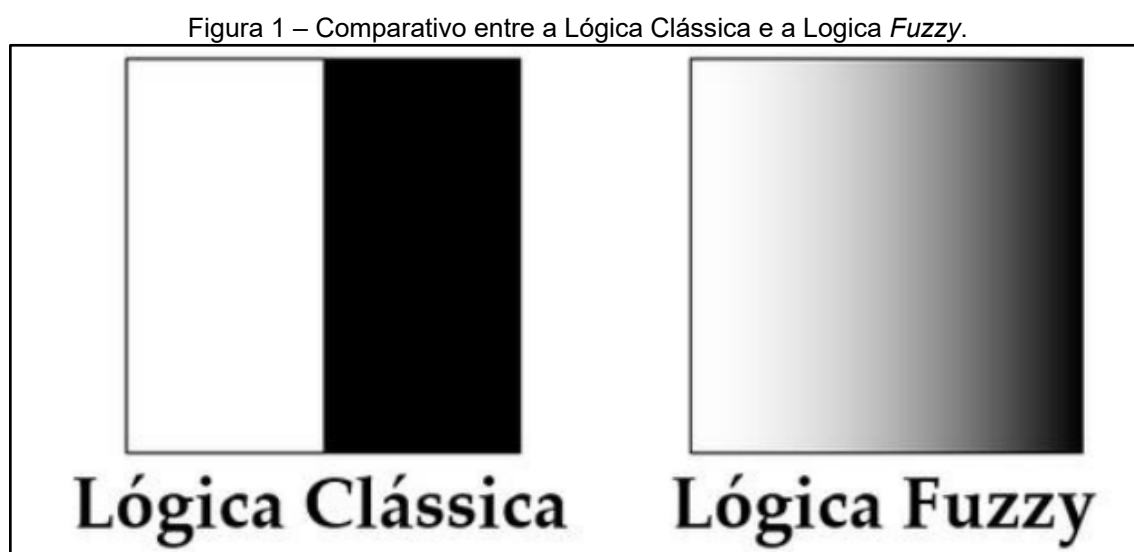
O AHP é o método multicritério de maior prevalência no âmbito de tomada de decisões uma vez que possui base teórica robusta, alta precisão, grau de dificuldade baixo, alta confiabilidade e resultados relativamente precisos (Javanshir Giv *et al.*, 2022). Tradicionalmente diferentes nuances do problema são inseridos em uma estrutura hierárquica, sendo o ponto mais baixo as alternativas, nível intermediário com os critérios e no nível mais alto o sucesso; por sua vez, os julgamentos são realizados por meio de comparação par a par onde são atribuídos *scores* diretos, oriundos de uma escala de nove pontos (Sardinha & Claro, 2009), assim estabelecendo o significado relativo dos critérios ou itens analisados de forma a auxiliar diretamente em decisões.

No entanto, embora amplamente utilizado e conceitualmente simples, este é criticado por sua capacidade limitada ao tratar a incerteza do processo de decisões (Yadav & Sharma, 2015). À medida que os problemas se tornam mais complexos, a percepção humana assume um papel crucial, estando sujeita a imprecisões e ambiguidades (Linhares *et al.*, 2012), conforme Tang & Beynon (2005), a presença de tais incertezas nas decisões cria oportunidades para a aplicação da lógica *fuzzy* dentro do método AHP.

4.7.1.2. Lógica Fuzzy

A lógica *fuzzy*, ou difusa, é uma extensão da lógica booleana convencional – que considera apenas a existência de um sistema binário (zero e um), esta foi desenvolvida com o objetivo de analisar múltiplos níveis entre extremos (Silva Junior, 2015; Costa Filho, 2018).

Conforme Costa Filho (2018), trabalhar com extremos, como preto e branco, tende a simplificar questões, potencialmente distorcendo interpretações e decisões. Diante das incertezas inerentes ao processo decisório humano, adotar uma escala de cinza fornece uma perspectiva mais equilibrada e real, evitando reducionismos e promovendo uma compreensão mais útil e abrangente. A (Figura 1) ilustra um comparativo entre a lógica clássica e a lógica *fuzzy*.



Fonte: Silva Junior (2015), adaptado de Kohagura (2007).

4.7.1.3.O método

O primeiro estudo envolvendo a aplicação de números *fuzzy* dentro do método AHP, foi conduzido por van Laarhoven & Pedrycz (1983), onde foram inseridos números *fuzzy* triangulares (TFNs) como uma extensão do modelo proposto por Saaty e seu propósito consistiu em expressar as opiniões dos tomadores de decisão de forma mais realista, em situações em que há critérios conflitantes e incertezas. Esta lógica é essencial em diversas áreas, como economia, sociedade, indústria e política, entre outras (Zapa & Cogollo, 2018).

Para Tang & Beynon (2005), avanços relacionados ao FAHP incluem: auxílio nos processos de tomada de decisão multicritério em ambientes difusos (Hsieh *et al.*, 2004), a definição de prioridades a partir do FAHP (Mikhailov, 2003) e a reavaliação do modelo original do FAHP (Buckley *et al.*, 2001).

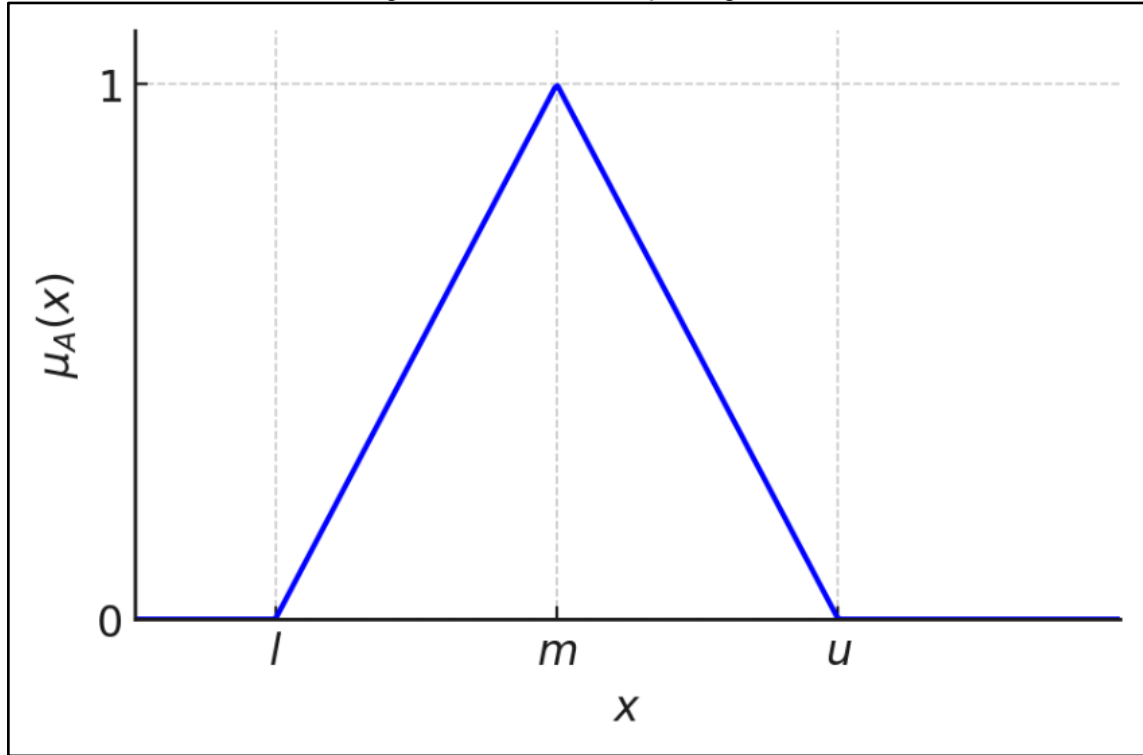
Para este trabalho, utilizou-se uma versão sintética do FAHP proposta por Tang & Beynon (2005), descrita como adequada para problemas onde existem

incertezas no processo de julgamento. A mesma foi originalmente proposta em Chang (1996) e desenvolvida em Zhu *et al.* (1999).

Sua aplicação consiste na definição de critérios e alternativas. Os critérios são derivados da decomposição do processo decisório em aspectos e são representados pelo vetor $C_n = (C_1, C_2, C_3, \dots, C_n)$. Por sua vez, as alternativas correspondem às diferentes opções que serão analisadas e hierarquizadas pelo método e são representadas por $A_n = (A_1, A_2, A_3, \dots, A_n)$ (Linhares & Gussen & Ribas, 2012).

Os vetores são analisados à luz de números *fuzzy*, caracterizados por uma função de pertinência $\mu_{A(x)}$ que assume valores no intervalo $[0,1]$. Esta função apresenta diversas possibilidades, como a triangular, trapezoidal, gaussiana, entre outras, sendo a função triangular é a mais utilizada (Saxena *et al.*, 2010) graças a sua facilidade computacional (Tang & Beynon, 2005).

A representação algébrica destes números pode ser observada na (Figura 2) e pela (Equação 1) (Chang, 1996). Um número *fuzzy* triangular é descrito como: l, m, u , onde: l representa o limite inferior; m é o valor modal, que corresponde ao ponto em que a pertinência é igual a 1; e u é o limite superior.

Figura 2 – Número *Fuzzy* triangular.

Fonte: Autor (2025).

$$\mu_{A(x)} = \begin{cases} 0, & \text{se } x < l; \\ \frac{(x - l)}{(m - l)}, & \text{se } l \leq x \leq m; \\ \frac{(x - u)}{(m - u)}, & \text{se } m \leq x \leq u; \\ 0, & \text{se } x > u. \end{cases} \quad \text{Eq. 1}$$

Assim, dada uma comparação pareada entre os elementos i e j , onde o elemento i é preferido em relação ao elemento j , o valor m do número *fuzzy* triangular resultante dessa comparação corresponderá a um dos valores da escala de Saaty. Para expressar o grau de imprecisão no julgamento dos usuários, nas comparações pareadas do método FAHP, é utilizado um elemento denominado grau de fuzzificação δ (Linhares & Gussen & Ribas, 2012).

Os valores l e u , limites inferior e superior, respectivamente, descrevem a imprecisão do julgamento, a qual é influenciada pelo grau de fuzzificação δ . Em um caso típico, onde a função de pertinência $\mu_{A(x)}$ é considerada simétrica tem-se que $m - l = u - m = \delta$. Assim, dado o valor de m , o número *fuzzy* triangular associado à comparação entre os elementos i e j , onde i é diferente de j e i é preferido em relação a j , será: $(m - \delta, m, m + \delta)$. Com seu inverso correspondente, definido como:

$(\frac{1}{m+\delta}, \frac{1}{m}, \frac{1}{m-\delta})$. Porém, há algumas exceções: quando o valor de m na comparação pareada for igual a 1 (elementos i e j igualmente preferíveis), o número *fuzzy* triangular associado a essa comparação será: $(1, 1, 1 + \delta)$. No caso do valor de m for igual a 9, valor máximo da escala de Saaty, o número *fuzzy* triangular associado a essa comparação será: $(9 - \delta, 9, 9)$ (Tang & Beynon, 2005).

Ao final, cada comparação pareada, seja entre critérios ou alternativas de escolha, terá um número *fuzzy* triangular correspondente, como ilustrado na (Tabela 1). A partir desses valores, operações matemáticas com números *fuzzy* permitirão calcular os pesos, os quais ponderados juntos resultarão na hierarquização final.

Tabela 1 – Matriz de comparações *fuzzy*.

	Critério 1 (C ₁)	Critério 2 (C ₂)	Critério 3 (C ₃)	Critério 4 (C ₄)	...	Critério n (C _n)
C ₁	(1.1.1)	(L ₁₂ .M ₁₂ .U ₁₂)	(L ₁₃ .M ₁₃ .U ₁₃)	(L ₁₄ .M ₁₄ .U ₁₄)	...	(L _{1n} .M _{1n} .U _{1n})
C ₂	(1/U ₁₂ .1/M ₁₂ .1/L ₁₂)	(1.1.1)	(L ₂₃ .M ₂₃ .U ₂₃)	(L ₂₄ .M ₂₄ .U ₂₄)	...	(L _{2n} .M _{2n} .U _{2n})
C ₃	(1/U ₁₃ .1/M ₁₃ .1/L ₁₃)	(1/U ₂₃ .1/M ₂₃ .1/L ₂₃)	(1.1.1)	(L ₃₄ .M ₃₄ .U ₃₄)	...	(L _{3n} .M _{3n} .U _{3n})
C ₄	(1/U ₁₄ .1/M ₁₄ .1/L ₁₄)	(1/U ₂₄ .1/M ₂₄ .1/L ₂₄)	(1/U ₃₄ .1/M ₃₄ .1/L ₃₄)	(1.1.1)	...	(L _{4n} .M _{4n} .U _{4n})
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮
C _n	(1/U _{1n} .1/M _{1n} .1/L _{1n})	(1/U _{2n} .1/M _{2n} .1/L _{2n})	(1/U _{3n} .1/M _{3n} .1/L _{3n})	(1/U _{4n} .1/M _{4n} .1/L _{4n})	...	(1.1.1)

Fonte: Autor (2025).

O objetivo do método FAHP é elucidar uma ordem de preferência por meio de uma série de comparações pareadas, indicando as preferências relativas entre pares de em uma mesma hierarquia. Por meio da utilização de números difusos, as comparações par a par resultarão na matriz $X = (x_{ij})_{n \times m}$. As operações com números difusos, conforme (Tang & Beynon, 2005), obedecem às seguinte regras:

(i) Adição:

$$A (+) B = (l_1, m_1, u_1) (+) (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad \text{Eq. 2}$$

(ii) Multiplicação

$$A \cdot B = (l_1, m_1, u_1) \cdot (l_2, m_2, u_2) = (l_1 \cdot l_2, m_1 \cdot m_2, u_1 \cdot u_2) \quad \text{Eq. 3}$$

(iii) Inverso:

$$(l_1, m_1, u_1)^{-1} \approx \left(\frac{1}{u_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1}\right) \quad \text{Eq. 4}$$

As comparações pareadas são baseadas em valores predefinidos, conforme a escala de razão proposta por Saaty (1980), como pode ser observado no (Quadro 1). A comparação entre a preferência relativa de elementos *i* e *j*, em um critério pode ser modelada com um valor de escala *fuzzy* associado a um grau de imprecisão.

Quadro 1 – Números *Fuzzys* Triangulares utilizados.

Variáveis linguísticas	Número <i>fuzzy</i> triangular positivo	Número <i>fuzzy</i> triangular recíproco positivo
Extremamente forte	$(9 - \delta, 9, 9)$	$\left(\frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9 - \delta}\right)$
Muito forte	$(7 - \delta, 7, 7 + \delta)$	$\left(\frac{1}{7 + \delta}, \frac{1}{7}, \frac{1}{7 - \delta}\right)$
Forte	$(5 - \delta, 5, 5 + \delta)$	$\left(\frac{1}{5 + \delta}, \frac{1}{5}, \frac{1}{5 - \delta}\right)$
Moderado	$(3 - \delta, 3, 3 + \delta)$	$\left(\frac{1}{3 + \delta}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3 - \delta}\right)$
Igual	$(1, 1, 1 + \delta)$	$\left(\frac{1}{1 + \delta}, 1, 1\right)$

Fonte: Adaptado de Lee & Chen & Chang (2008).

Tomando como base os valores apresentados na (Tabela 1) serão calculadas Medidas Sintéticas *fuzzy* para cada critério. Sendo esta composta, inicialmente pela soma dos valores encontrados para (l, m, u) nas colunas e nas linhas da matriz de comparações. Para cada um desses elementos, ter-se-á um número *fuzzy* triangular que representará a soma de (l, m, u) da sua linha $(l_{linha_i}, m_{linha_i}, u_{linha_i})$ e um outro que representará a soma de (l, m, u) da sua coluna $(l_{coluna_i}, m_{coluna_i}, u_{coluna_i})$.

Em seguida, é necessário realizar a soma das somas das colunas de todos os elementos da matriz $(l_{\Sigma \text{ coluna}}, m_{\Sigma \text{ coluna}}, u_{\Sigma \text{ coluna}})$.

Nesse momento, têm-se todos os elementos necessários para o cálculo da Medida Sintética *Fuzzy S*, a qual servirá de base para a hierarquização dos elementos da matriz de comparações. Tal cálculo pode ser representado pela expressão matemática a seguir:

$$S_i = (l_{\text{linha}_i}, m_{\text{linha}_i}, u_{\text{linha}_i}) \cdot \left(\frac{1}{u_{\Sigma \text{ coluna}}, m_{\Sigma \text{ coluna}}, l_{\Sigma \text{ coluna}}} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

Segundo Tang & Beynon (2005), para o cálculo dos pesos no método FAHP é necessário considerar um princípio de comparação para números *fuzzy*. Por exemplo, para dois números M_1 e M_2 , o grau de possibilidade de $M_1 \geq M_2$ é definido como:

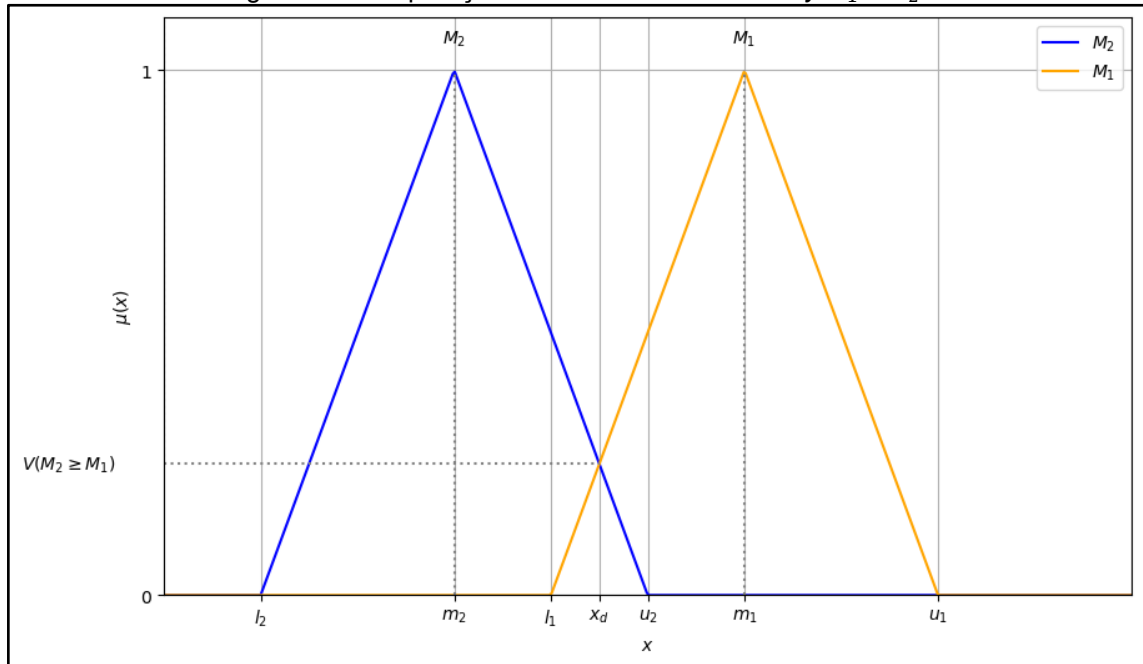
$$V(M_1 \geq M_2) = \sup_{x \geq y} [\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y))] \quad \text{Eq. 6}$$

Em que $\sup$ representa o menor valor do limite superior de um conjunto. Quando um par (x, y) existe tal que $x \geq y$ e $\mu_{M_1}(x) = \mu_{M_2}(y) = 1$, tem-se que $V(M_1 \geq M_2) = 1$ e $V(M_2 \geq M_1) = 0$. Desde que M_1 e M_2 são números *fuzzy* convexos definidos pelo número *fuzzy* triangular (l_1, m_1, u_1) e (l_2, m_2, u_2) respectivamente, assim:

$$\begin{cases} V(M_1 \geq M_2) = 1, & \text{se e somente se } m_1 \geq m_2; \\ V(M_2 \geq M_1) = \text{MaiorValor}(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_1}(x_d). \end{cases} \quad \text{Eq. 7}$$

Com d sendo a ordenada do ponto de interseção mais alto entre os números *fuzzy* triangulares μ_{M_1} e μ_{M_2} (Figura 3) e x_d é o ponto no domínio μ_{M_1} e μ_{M_2} onde a ordenada d é encontrada. O termo *MaiorValor* corresponde a interseção de M_1 e M_2 . Para $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ e $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$, o valor de sua interseção é dado pela (Equação 7). Podendo o grau de possibilidade para um número *fuzzy* convexo ser obtido por meio da (Equação 8):

$$V(M_2 \geq M_1) = \text{MaiorValor}(M_1 \cap M_2) = \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} = d \quad \text{Eq. 8}$$

Figura 3 – Comparação entre dois números *Fuzzy* M_1 e M_2 .

Fonte: Adaptado de Tang & Beynon (2005).

O grau de possibilidade de um número convexo *fuzzy* M ser maior que o número de k números convexos *fuzzy* M_i (onde $i = 1, 2, \dots, k$) pode ser dado pelo uso das operações de máximo e mínimo definidas a seguir:

$$\begin{aligned}
 V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) &= V[(M \geq M_1) \text{ e } (M \geq M_2) \text{ e } \dots \text{ e } (M \geq M_k)] \\
 &= \min V(M \geq M_i), \quad \text{com } i = 1, 2, 3, \dots, k.
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 9}$$

Assim $d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k)$, onde $k = 1, 2, 3, \dots, n$, $k \neq i$, e n é o número de critérios conforme descrito anteriormente. Então, um vetor de pesos é dado por:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), d'(A_3), \dots, d'(A_m)) \tag{Eq. 10}$$

Em que $A_i (i = 1, 2, 3, \dots, m)$ correspondem às respostas dos entrevistados. Assim, cada valor $d'(A_i)$ representa a preferência relativa da comparação analisada. Para permitir que os valores no vetor sejam análogos aos pesos definidos pelo método do AHP, o vetor W' é normalizado e denotado por:

$$W = (d(A_1), d(A_2), d(A_3), \dots, d(A_m)) \tag{Eq. 11}$$

Ademais, quando dois elementos (números difusos), como $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ e $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ apresentam $l_1 - u_2 > 0$ então $V(M_2 \geq M_1) = \text{MaiorValor}(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(x_d)$ com $\mu_{M_2}(x_d)$ definido por:

$$\mu_{M_2}(x_d) = \begin{cases} \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{se e somente se } l_1 \leq u_2; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad \text{Eq. 12}$$

Os autores sugerem que, para agrupar as respostas de um grupo de entrevistados, uma forma eficaz é a utilização da média geométrica, conforme apresentado a seguir, sendo K o número de participantes:

$$l_{ij} = \left(\prod_{k=1}^K l_{ijk} \right)^{\frac{1}{K}} \quad \text{Eq. 13}$$

$$m_{ij} = \left(\prod_{k=1}^K m_{ijk} \right)^{\frac{1}{K}} \quad \text{Eq. 14}$$

$$u_{ij} = \left(\prod_{k=1}^K u_{ijk} \right)^{\frac{1}{K}} \quad \text{Eq. 15}$$

Em que ij é a comparação pareada entre os elementos i e j , a partir desta operação o método pode ser aplicado considerando a análise de vários participantes.

4.7.2.Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

O FMEA, corresponde a um método de análise de risco e gerenciamento muito utilizado em engenharia e gestão (Wang *et al.*, 2020), proposto pelo departamento de defesa dos EUA em 1949 (Wu *et al.*, 2021). Seu principal objetivo é detectar possíveis falhas e avaliar suas causas e efeitos (Brun & Savino, 2018).

Atualmente, tal ferramenta é utilizada nos mais diversos campos como: fabricação de automóveis, área médica, segurança alimentar, escolha de fornecedores, entre outros (Permana *et al.*, 2019; Gueorguiev *et al.*, 2020; Hendiani

et al., 2020; Warnick *et al.*, 2020), com esta é possível estabelecer o *Risk Priority Number* (RPN), coeficiente expresso pelo produto da: Ocorrência (O), Severidade (S) e Detecção (D) (Yuan & Tang, 2022) de possíveis modos de falhas. Cada critério varia em um intervalo de [1,10], de forma que quanto maior o RPN, mais impactante é a falha (Liu & Tang, 2022). O (Quadro 2) exemplifica a classificação da probabilidade de ocorrência de uma falha.

$$RPN = O \times S \times D$$

Eq. 16

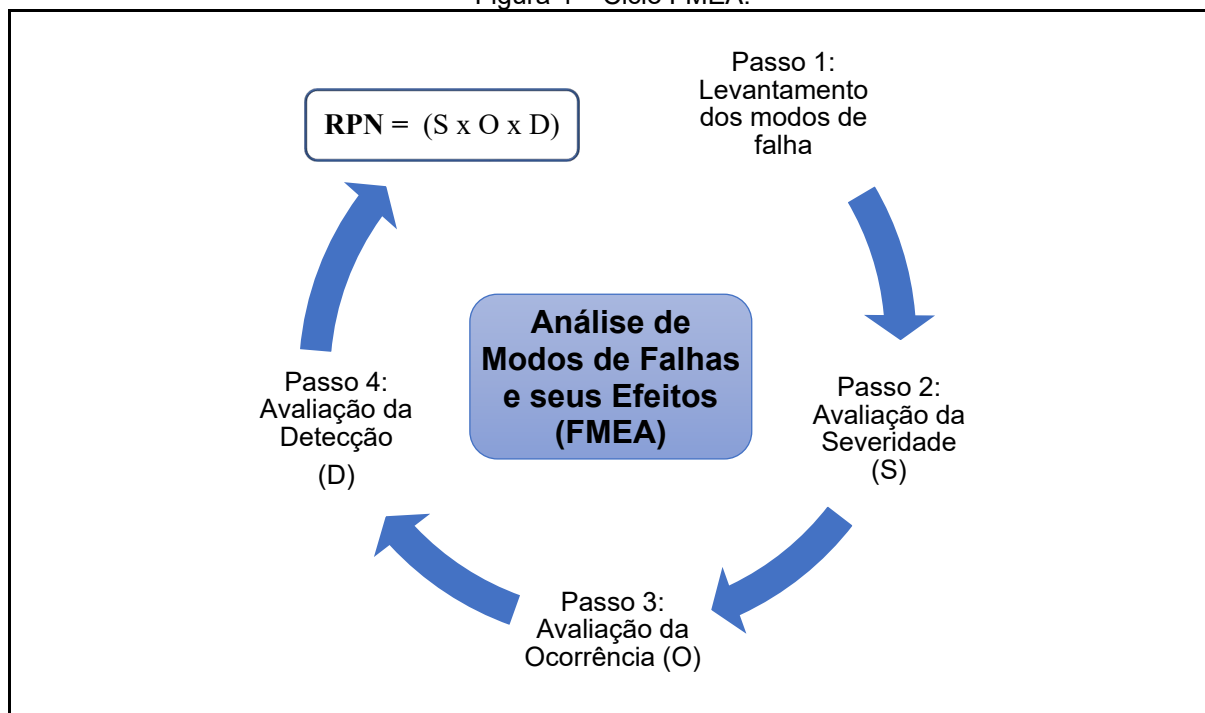
Quadro 2 – Exemplo de classificação da probabilidade de ocorrência de uma falha.

Nível	Possibilidade de Falha
10	Extremamente alto
9	Muito alto
8	Ligeiramente alto
7	Alto
6	Médio alto
5	Médio
4	Médio baixo
3	Baixo
2	Levemente baixo
1	Raro

Fonte: Adaptado de Liu & Tang (2022).

O modelo tradicional FMEA pode ser descrito por meio dos seguintes passos, segundo Liu & Tang (2022): (1) identificar os modos de falha no sistema de interesse; (2) avaliar fatores de risco desses modos de falha com a ajuda de especialistas; (3) calcular o RPN de acordo com o resultado das avaliações; e (4) classificar os modos de falha com base no RPN. A (Figura 4) apresenta um passo a passo para a concepção do modelo FMEA.

Figura 4 – Ciclo FMEA.



Fonte: Adaptado de Apriliana *et al.* (2018).

Entretanto, em problemas complexos, o cálculo do RPN pode apresentar um grau significativo de incerteza, impactando diretamente a análise final de riscos. Essa incerteza pode levar, por exemplo, a diferentes fatores de risco com um mesmo valor de RPN, dificultando uma distinção precisa entre estes O: 9, S: 2, D: 5 e O:2, S:9, D:5 porém com ocorrência e severidade distintos (Yuan & Tang, 2022). Outro fator que pode influenciar na tomada de decisões é o fato de que tradicionalmente o FMEA considera os pesos de O, S e D iguais, sendo que em algumas situações um pode ser mais crucial do que outro (Wang *et al.*, 2009).

Desta forma, quando se trabalha com o método FMEA, é preciso levar em consideração a incerteza das informações obtidas (Yuan & Tang, 2022).

5. METODOLOGIA

Esta pesquisa aplica uma abordagem quantitativa para priorizar fatores influentes no monitoramento geotécnico, considerando seu potencial de impactar negativamente a avaliação do comportamento geomecânico de maciços de resíduos. Para isso, o estudo realizou um levantamento das técnicas de tomada de decisão, visando identificar as mais adequadas para a gestão de riscos em obras complexas onde os fatores possuem interdependência e subjetividade, como é o caso de aterros sanitários, foram escolhidos os métodos FAHP e FMEA.

Após a identificação das técnicas e métodos aplicáveis ao contexto da geotecnia, foram definidos os fatores influentes na efetividade do monitoramento geotécnico e seus principais riscos associados, conforme observado na literatura.

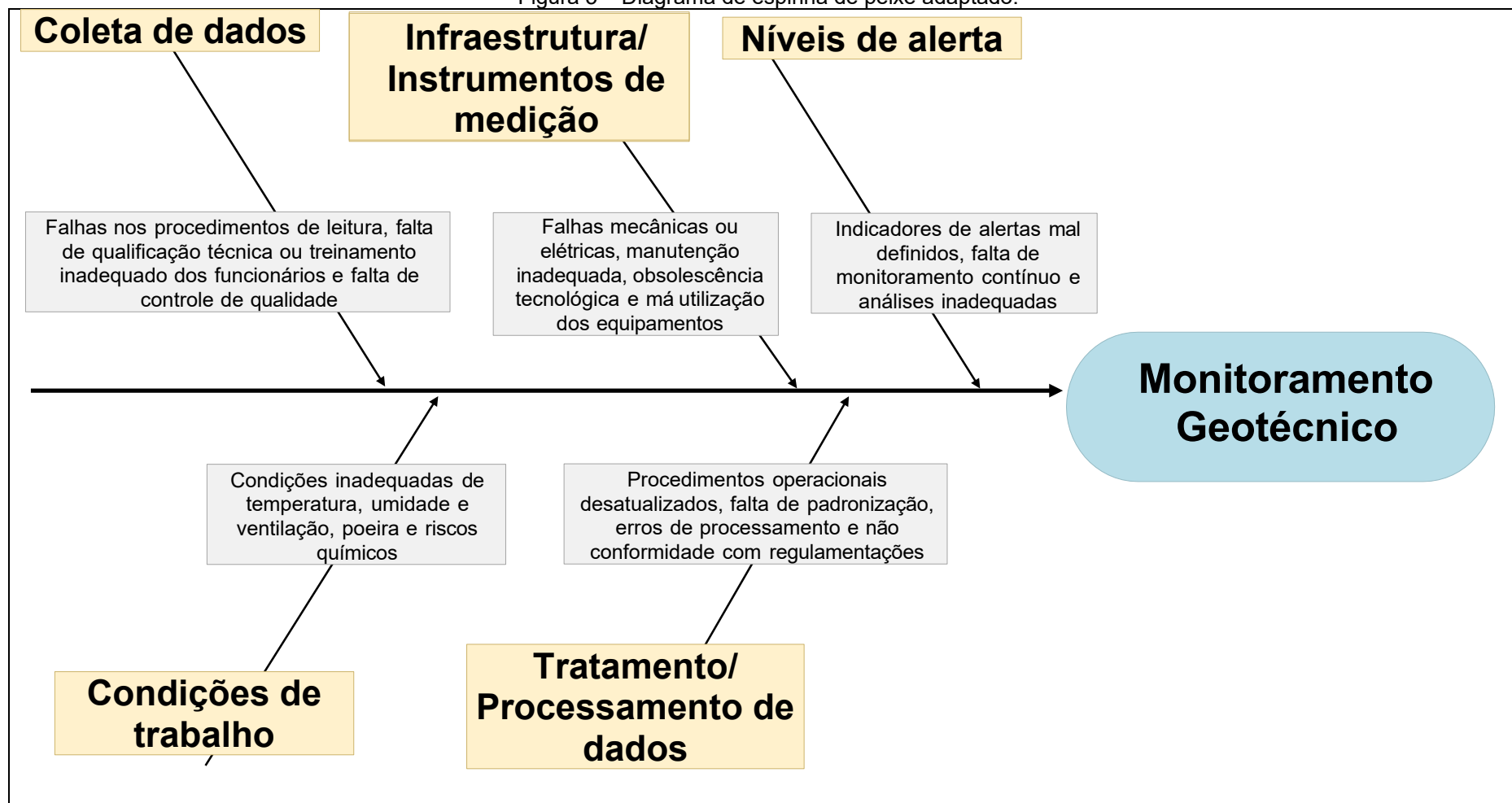
Inicialmente, o FAHP foi desenvolvido, com o suporte do diagrama de espinha de peixe (Diagrama de Ishikawa). Em seguida, o método FMEA foi aplicado com o intuito de obter o indicador RPN associado às falhas de cada fator analisado no FAHP. Ressalta-se que o RPN é formado pelo produto da Severidade, Ocorrência e Detecção. Posteriormente, foi proposto um modelo híbrido, com uma junção dos resultados obtidos pelos dois métodos.

5.1. Identificação de fatores e riscos influentes na efetividade do monitoramento geotécnico

Para a definição dos fatores mais influentes no acompanhamento e avaliação das condições geotécnicas de um maciço de resíduos, a princípio, realizou-se uma pesquisa bibliográfica onde foi encontrado um modelo de aprimoramento da eficiência no monitoramento de aterros, originalmente proposto pelo Grupo Técnico de Questões Globais da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB (Silva, 2006).

Em seguida, cada fator desse modelo foi analisado por meio de revisões bibliográficas, seguidas da aplicação da técnica de *brainstorming*. As discussões tiveram como objetivo principal um melhoramento do modelo e identificação das principais falhas relacionadas a cada item analisado. O resultado dessas reuniões é apresentado na (Figura 5) e discutido a seguir.

Figura 5 – Diagrama de espinha de peixe adaptado.



Fonte: Autor (2025).

5.2. Padronização de respostas

Neste estudo, a padronização e a consistência das avaliações dos especialistas foram garantidas por meio de orientações unificadas de classificação apresentadas no (Quadro 3), onde são apresentadas as variáveis linguísticas empregadas no desenvolvimento do FAHP, enquanto o (Quadro 4) detalha as padronizações adotadas para a aplicação do método FMEA.

Quadro 3 – Números *Fuzzys* Triangulares utilizados.

Variáveis linguísticas	Número <i>fuzzy</i> triangular positivo	Número <i>fuzzy</i> triangular recíproco positivo
Extremamente forte	(8, 9, 9)	(1/9, 1/9, 1/(8))
Muito forte	(6, 7, 8)	(1/8, 1/7, 1/6)
Forte	(4, 5, 6)	(1/6, 1/5, 1/4)
Moderado	(2, 3, 4)	(1/4, 1/3, 1/2)
Igual	(1, 1, 2)	(1/2, 1, 1)

Fonte: Autor (2025).

Quadro 4 – Classificação de severidade, ocorrência e detecção das falhas.

Severidade	Descrição	Score
Alta	Pode comprometer a estabilidade do aterro e põe em risco a segurança humana, infraestrutura e meio ambiente.	10
Moderada	Pode resultar em danos moderados, exigir intervenções corretivas e ter impactos na avaliação das movimentações e condições gerais de estabilidade, são controláveis.	5
Baixa	Sem danos significativos, pode ser corrigida e não impactam na avaliação das movimentações e condições gerais de estabilidade.	1
Ocorrência	Descrição	Score
Alta	Frequentes e têm uma alta probabilidade de ocorrer, indicando problemas no sistema de monitoramento ou em outros aspectos operacionais.	10
Moderada	Ocorrem de maneira ocasional, com uma probabilidade moderada. Previsíveis ou comuns, mas ocorrem com pouca frequência.	5
Baixa	Raras, ocorrendo de forma esporádica e com baixa probabilidade, geralmente resultado de eventos excepcionais ou condições imprevistas.	1
Deteção	Descrição	Score
Baixa	Difícil detecção, detectadas tardiamente ou de forma imprecisa, de modo a impedir a tomada de decisão ágil e eficaz.	10
Moderada	Detectadas com uma certa demora ou com menor precisão, o que pode resultar em análises do maciço não representativas, porém permitem a tomada de decisão em tempo hábil.	5
Alta	Facilmente detectadas, permitindo resposta imediata que evita impactos adversos.	1

Fonte: Autor (2025).

5.3. Coleta de dados

A pesquisa foi realizada de maneira virtual, por meio da plataforma *Microsoft Forms*. O questionário utilizado pode ser observado por meio do APÊNDICE A.

Inicialmente, foram identificados e selecionados trinta especialistas, considerados aptos com base em informações coletadas no Google Acadêmico e no LinkedIn que comprovaram sua competência na área de monitoramento geotécnico de aterros sanitários. Para sua identificação, foram empregadas três estratégias: (1) busca de currículos em plataformas específicas, utilizando as palavras-chave "monitoramento geotécnico" e "aterros sanitários"; (2) contato direto com pesquisadores da área de aterros sanitários; e (3) amostragem em cadeia, do tipo "bola de neve", na qual os entrevistados indicaram outros possíveis participantes.

Após recebimento e contagem dos questionários, dos trinta selecionados, doze (40%) optaram por não participar da pesquisa. A aplicação do questionário ocorreu entre setembro e novembro de 2024, com os dados tratados por meio do Microsoft Excel 365.

Os dezoitos especialistas participantes atuam nos estados de: Pernambuco, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro, possuem experiência diversificada e trabalham, principalmente, com foco em operações de ativos (aterros sanitários), que recebem mais de 1.000 toneladas diárias de resíduos. Vale destacar que, segundo a ABNT (2010), aterros que recebem até 20 toneladas de resíduos diários são classificados como de pequeno porte. Como também, instalações que processam mais de 200 toneladas por dia apresentam viabilidade para a recuperação energética por meio do biogás (World Bank, 2005). E por fim, unidades com capacidade superior a 1.000 toneladas diárias enfrentam desafios operacionais significativos e podem causar impactos ambientais mais severos, especialmente em casos de deslizamento.

O (Quadro 5) apresenta a qualificação dos entrevistados.

Quadro 5 – Qualificação dos entrevistados.

Experiência com aterros sanitários	Quantidade
Menos de 1 ano	-
1-5 anos	6
5-10 anos	4

Experiência com aterros sanitários	Quantidade
Mais de 10 anos	8
Setor ou área de atuação dentro do aterro sanitário	Quantidade
Acadêmico/Pesquisador	6
Operacional	3
Monitoramento geotécnico	6
Desenvolvimento de projetos	3
Em qual região do Brasil de atuação	Quantidade
Nordeste	14
Sudeste	4
Recebimento médio do(s) ativo(s) (Se houver mais de um, considere a soma total)	Quantidade
Menos de 20 t/dia	1
20 - 200 t/dia	1
200 - 1000 t/dia	6
Mais de 1000 t/dia	10

Fonte: Autor (2025).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As próximas seções consolidam a aplicação dos dois métodos utilizados. O primeiro, FAHP, foi direcionado a estabelecer uma hierarquia de cinco fatores relevantes, definindo a coleta de dados como o mais impactante. Paralelamente este método mostrou-se conservador – pesos mínimos de cada vetor associado, resultando na atribuição de percentual a apenas duas etapas. Já o segundo método desenvolvido a partir das falhas contidas em cada um dos cinco fatores, FMEA, demonstrou-se como uma ferramenta útil para a triagem inicial de riscos. No entanto, sua simplicidade matemática ocasionou no empate de dois conjuntos de falhas distintos.

Diante dessas limitações, destaca-se a viabilidade de implementar abordagens híbridas, que integrem os pontos fortes de ambos os métodos. Essa estratégia pode permitir uma diminuição nas restrições do RPN puro ao mesmo tempo em que reduz o conservadorismo do FAHP sintético utilizado, tornando a análise mais equilibrada e eficiente. Com base nisso, a seguir é apresentada uma proposta de um modelo híbrido.

Ao final deste capítulo, são apresentadas discussões dos resultados observados, correlacionando-os com a literatura científica pertinente.

6.1. Resultados obtidos

6.1.1. Método FAHP

Após a definição dos elementos m , com base nas respostas dos 18 especialistas participantes, todas as respostas foram agregadas mediante a média geométrica, cujos resultados são apresentados na (Tabela 2). Para o grau de fuzzificação (δ), adotou-se o valor de 1. De acordo com Zhu *et al.* (1999), utilizar δ entre 0,5 e 1 assegura um equilíbrio adequado entre nitidez e incerteza nos resultados.

Tabela 2 – Matriz *fuzzy* de comparação agregada.

	Coleta de dados (C1)	Infraestrutura/ Instrumentos de medição (C2)	Condições de Trabalho (C3)	Tratamento/ Processamento de dados (C4)	Níveis de alerta (C5)
C1	(1.00,1.00,1.00)	(5.64,6.74,7.44)	(3.64,4.72,5.70)	(5.43,6.52,7.27)	(5.26,6.34,7.18)
C2	(0.13,0.15,0.18)	(1.00,1.00,1.00)	(4.61,5.72,6.67)	(3.90,4.83,5.88)	(4.24,5.18,6.21)
C3	(0.18,0.21,0.27)	(0.15,0.17,0.22)	(1.00,1.00,1.00)	(4.90,6.02,6.93)	(3.99,4.94,5.98)
C4	(0.14,0.15,0.18)	(0.17,0.21,0.26)	(0.14,0.17,0.20)	(1.00,1.00,1.00)	(5.31,6.40,7.16)
C5	(0.14,0.16,0.19)	(0.16,0.19,0.24)	(0.17,0.20,0.25)	(0.14,0.16,0.19)	(1.00,1.00,1.00)

Fonte: Autor (2025).

Com base na (Tabela 2), procedeu-se ao cálculo da Medida Sintética *Fuzzy* (S). Primeiramente, foram somadas as linhas, representando a contribuição total de cada critério (fator) no contexto hierárquico. Em seguida, efetuou-se a soma das colunas, utilizada para normalizar os valores e garantir que os pesos permanecessem em uma escala comparável, viabilizando o cálculo das medidas sintéticas. Os resultados dessas etapas são apresentados na (Tabela 3).

Tabela 3 – Soma das linhas e colunas dos diferentes critérios.

	Soma das linhas	Soma das colunas
C₁	(20.97,25.31,28.59)	(1.59,1.67,1.83)
C₂	(13.88,16.88,19.94)	(7.12,8.31,9.15)
C₃	(10.21,12.35,14.40)	(9.57,11.80,13.82)
C₄	(6.76,7.92,8.80)	(15.37,18.52,21.27)
C₅	(1.61,1.71,1.87)	(19.79,23.86,27.53)
Soma das Somas das Colunas		(53.43,64.17,73.60)

Fonte: Autor (2025).

Posteriormente, tendo como base os dados apresentados na (Tabela 3), pôde-se calcular as Medidas Sintéticas *Fuzzys* (S_i).

$$S_1 = (20.97,25.31,28.59) \cdot \left(\frac{1}{73.60}, \frac{1}{64.17}, \frac{1}{53.43} \right) = (0,2849,0,3945,0,5351)$$

$$S_2 = (13.88,16.88,19.94) \cdot \left(\frac{1}{73.60}, \frac{1}{64.17}, \frac{1}{53.43} \right) = (0,1886,0,263,0,3732)$$

$$S_3 = (10.21, 12.35, 14.40) \cdot \left(\frac{1}{73.60}, \frac{1}{64.17}, \frac{1}{53.43} \right) = (0,1388.0, 1924.0, 2695)$$

$$S_4 = (6.76, 7.92, 8.80) \cdot \left(\frac{1}{73.60}, \frac{1}{64.17}, \frac{1}{53.43} \right) = (0,0918.0, 1235.0, 1648)$$

$$S_5 = (1.61, 1.71, 1.87) \cdot \left(\frac{1}{73.60}, \frac{1}{64.17}, \frac{1}{53.43} \right) = (0,0218.0, 0266.0, 0349)$$

Em seguida foram realizadas as comparações:

$$V(S_1 \geq S_2) = 1 \quad V(S_1 \geq S_3) = 1 \quad V(S_1 \geq S_4) = 1 \quad V(S_1 \geq S_5) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_1) = \left(\frac{0,2849 - 0,3732}{(0,2630 - 0,3732) - (0,3945 - 0,2849)} \right) = 0,40 \quad V(S_2 \geq S_3) = 1$$

$$V(S_2 \geq S_4) = 1 \quad V(S_2 \geq S_5) = 1 \quad V(S_3 \geq S_1) = 0 \quad V(S_3 \geq S_2) = 0,53$$

$$V(S_3 \geq S_4) = 1 \quad V(S_3 \geq S_5) = 1 \quad (S_4 \geq S_1) = 0 \quad (S_4 \geq S_2) = 0$$

$$(S_4 \geq S_3) = 0,27 \quad (S_4 \geq S_5) = 1 \quad (S_5 \geq S_1) = 0 \quad (S_5 \geq S_2) = 0$$

$$(S_5 \geq S_3) = 0 \quad (S_5 \geq S_4) = 0$$

A partir disto, assumindo que o vetor $d'(C_n)$ é composto pelos valores mínimos de cada comparação, como citado, obteve-se os seguintes resultados:

$$d'(C_1) = V(S_1 \geq S_2, S_3, S_4, S_5) = \min (1,1,1,1) = 1$$

$$d'(C_2) = V(S_2 \geq S_1, S_3, S_4, S_5) = \min (0.4,1,1,1) = 0.4$$

$$d'(C_3) = V(S_3 \geq S_1, S_2, S_4, S_5) = \min(0, 0.53, 1, 1) = 0$$

$$d'(C_4) = V(S_4 \geq S_1, S_2, S_3, S_5) = \min(0, 0, 0.27, 1) = 0$$

$$d'(C_5) = V(S_5 \geq S_1, S_2, S_3, S_4) = \min(0, 0, 0, 0) = 0$$

Em seguida, o vetor de pesos foi formulado:

$$W'_c = (d'(C_1), d'(C_2), d'(C_3), d'(C_4), d'(C_5))$$

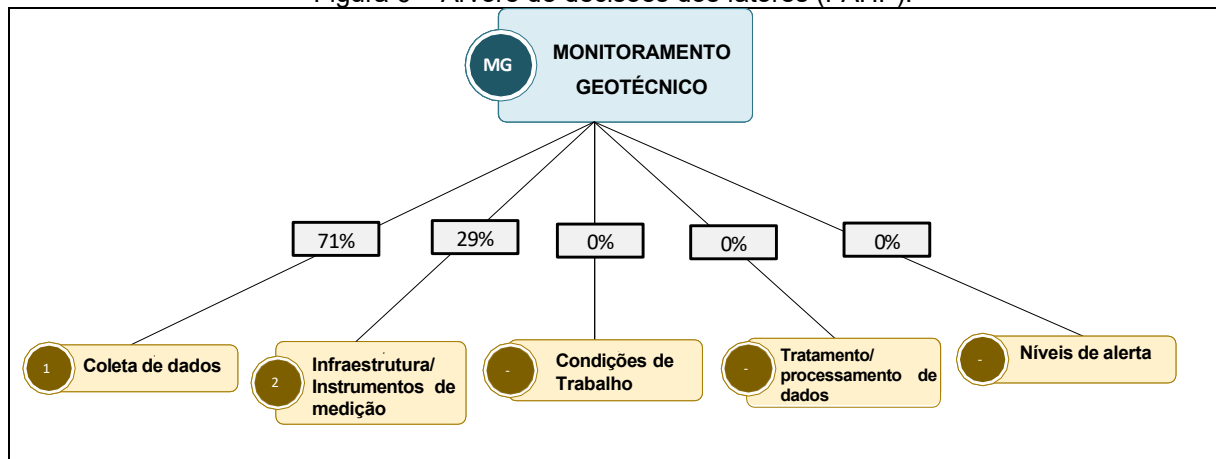
$$W'_c = (1.00, 0.40, 0.00, 0.00, 0.00)$$

Este vetor foi normalizado para alcançar o W_c .

$$W_c = (0.71, 0.29, 0.00, 0.00, 0.00)$$

Com base nestes resultados foi possível determinar a hierarquia dos fatores analisados e criar uma árvore de decisões (Figura 6). Por meio da ilustração a seguir observa-se que a coleta de dados foi o fator mais influente quanto a precisão do monitoramento geotécnico, seguida pela infraestrutura e pelos instrumentos de medição. Além disso, com um grau de fuzzificação igual a 1, os demais fatores receberam pesos nulos, demonstrando baixa preferência em comparação aos principais, reflexo do conservadorismo do método.

Figura 6 – Árvore de decisões dos fatores (FAHP).



Fonte: Autor (2025).

Os pesos nulos atribuídos a determinados fatores não devem ser interpretados como indicativos de irrelevância no monitoramento de aterros sanitários, mas sim como reflexo de uma prioridade menor em comparação com outras alternativas.

6.1.2.Método FMEA

Para a aplicação deste método, foi realizada, inicialmente, uma análise detalhada dos efeitos e das causas das falhas associadas a cada fator estudado. Os resultados dessa análise estão apresentados na (Quadro 6).

Quadro 6 – Efeitos e causas das falhas estudadas.

Fatores	Possíveis falhas	Efeitos das falhas	Causa das falhas
Coleta de dados	Falhas nos procedimentos de leitura, falta de qualificação técnica, treinamento inadequado dos funcionários e falta de controle de qualidade.	- Dados inconsistentes ou imprecisos; - Riscos não detectados; - Tomada de decisão equivocada.	- Falta de qualificação técnica; - Treinamento inadequado dos funcionários; - Falta de controle de qualidade.
Infraestrutura/ Instrumentos de medição	Falhas mecânicas ou elétricas, manutenção inadequada, obsolescência tecnológica e má utilização dos equipamentos	- Interrupção do monitoramento; - Dados incorretos ou inconsistentes; - Atraso na identificação de problemas.	- Ausência de manutenção; - Obsolescência tecnológica; - Má utilização dos equipamentos.
Condições de Trabalho	Condições inadequadas de temperatura, umidade e ventilação, poeira e riscos químicos	- Dificuldade em manusear instrumentos; - Dados não representativos; - Problemas de saúde nos trabalhadores.	- Alta exposição solar; - Poeira; - Riscos químicos.
Tratamento/ Processamento de dados	Procedimentos operacionais desatualizados, falta de padronização, erros de processamento e não conformidade com regulamentações	- Dados imprecisos; - Baixa eficiência operacional; - Não identificação de padrões de comportamento geomecânico.	- Falta de padronização; - Erros no processamento; - Processamento de dados desatualizado.
Níveis de alerta	Indicadores de alertas mal definidos, falta de monitoramento contínuo e análises inadequadas	- Ruptura; - Falta de previsibilidade; - Vazamentos de lixiviado.	- Falta de monitoramento contínuo; - Interpretação de dados deficiente; - Subestimação ou superestimação de níveis.

Fonte: Autor (2025).

Em seguida, com o apoio dos especialistas, calculou-se o Número de Prioridade de Risco (RPN) para cada conjunto de possíveis falhas. Esse índice foi determinado a partir das médias geométricas de severidade, ocorrência e detecção, conforme apresentado no (Quadro 7).

Observa-se que a Coleta de Dados se destacou como o fator mais crítico, com o maior RPN devido à alta severidade, ocorrência elevada e dificuldade de detecção. Em contraste, o fator Condições de Trabalho apresentou menor potencial de comprometimento devido à baixa severidade e detecção mais fácil. Infraestrutura/Instrumentos de Medição e Tratamento/Processamento de Dados obtiveram os mesmos RPNs, ressaltando uma limitação do método. Por fim, o fator Níveis de Alerta, apesar de ocorrer com menor frequência, apresentou elevada severidade e significativa dificuldade de detecção, configurando-o como o segundo fator mais crítico dentre os analisados.

Quadro 7 – Médias geométricas de severidade, ocorrência e detecção.

Riscos associados a cada fator	Severidade	Ocorrência	Detecção	RPN
Falhas nos procedimentos de leitura, falta de qualificação técnica, treinamento inadequado dos funcionários e falta de controle de qualidade	7.26	5.34	6.90	267.39
Falhas mecânicas ou elétricas, manutenção inadequada, obsolescência tecnológica e má utilização dos equipamentos	5.69	3.88	5.33	117.64
Condições inadequadas de temperatura, umidade e ventilação, poeira e riscos químicos	2.78	3.54	5.20	51.26
Procedimentos operacionais desatualizados, falta de padronização, erros de processamento e não conformidade com regulamentações	5.99	3.73	5.27	117.64
Indicadores de alertas mal definidos, falta de monitoramento contínuo e análises inadequadas	7.84	4.03	5.62	177.48

Fonte: Autor (2025).

Posteriormente, para hierarquizar esses conjuntos de falhas, estabeleceu-se o vetor Φ_{RPN} , que resulta da normalização dos RPNs.

$$\Phi_{RPN} = (267.39, 117.64, 51.26, 117.64, 177.48)$$

A partir deste, foram estabelecidos os escores de cada conjunto estudado (vide Tabela 4)

Em que:

$$\phi_{RPN} = \frac{RPN_{Cn}}{\sum RPN} \quad \text{Eq. 17}$$

Com $\phi_{RPN} \in [0,1]$ e $\sum \phi_{RPN} = 1$.

Como pode ser percebido, corroborando com os resultados apresentados pelo método FAHP, falhas associadas à coleta de dados são as mais influentes quanto ao comprometimento de resultados do monitoramento de aterros.

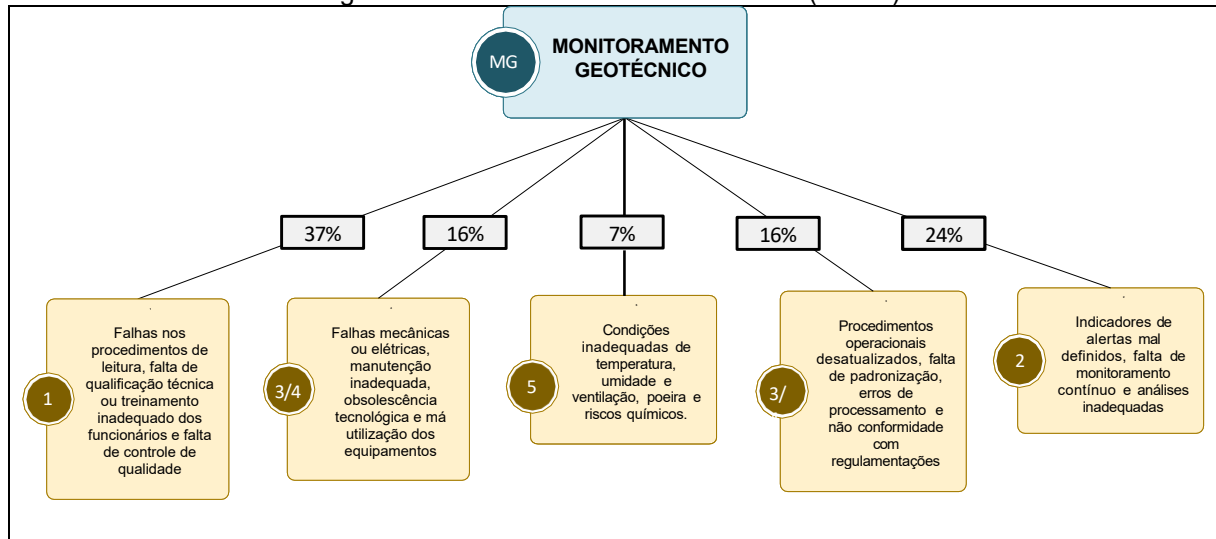
Tabela 4 – Índices de prioridade.

Fatores e falhas associadas	RPN	Influência relativa	Prioridade
Coleta de dados (Falhas nos procedimentos de leitura, falta de qualificação técnica, treinamento inadequado dos funcionários e falta de controle de qualidade)	267,39	36,56%	1
Infraestrutura/Instrumentos de medição (Falhas mecânicas ou elétricas, manutenção inadequada, obsolescência tecnológica e má utilização dos equipamentos)	117,64	16,08%	3/4
Condições de Trabalho (Condições inadequadas de temperatura, umidade e ventilação), poeira e riscos químicos)	51,26	7,01%	5
Tratamento/Processamento de dados (Procedimentos operacionais desatualizados, falta de padronização, erros de processamento e não conformidade com regulamentações)	117,64	16,08%	3/4
Níveis de alerta (Indicadores de alertas mal definidos, falta de monitoramento contínuo e análises inadequadas)	177,48	24,27%	2
TOTAL	731,41	100%	-

Fonte: Autor (2025).

Estes resultados foram utilizados para formular a (Figura 7) que apresenta a árvore de decisão para os riscos.

Figura 7 – Árvore de decisões dos riscos (FMEA).



Fonte: Autor (2025).

6.1.3. Método híbrido

O método híbrido (Equação 18) objetivou estabelecer uma nova hierarquia definida por meio do vetor $MRPN$, a mesma foi gerada a partir da combinação dos resultados obtidos pelos métodos FMEA e FAHP. A soma refletiu a intenção de combinar ambos os resultados em um mesmo indicador. Já a divisão por 2 teve como objetivo garantir que ambas as abordagens tenham influência equilibrada no resultado final, ou seja, cada método contribui igualmente para o cálculo do $MRPN$. Este novo indicador pode ser capaz de proporcionar maior robustez e consistência na priorização e na tomada de decisão.

$$MRPN = \left(\frac{W_{c1} + \phi_{RPN_{c1}}}{2}, \frac{W_{c2} + \phi_{RPN_{c2}}}{2}, \frac{W_{c3} + \phi_{RPN_{c3}}}{2}, \frac{W_{c4} + \phi_{RPN_{c4}}}{2}, \frac{W_{c5} + \phi_{RPN_{c5}}}{2} \right) \quad \text{Eq. 18}$$

Em que W_{Cn} e $\phi_{RPN_{Cn}}$ representam os resultados obtidos nas hierarquizações pelos métodos FAHP e FMEA, respectivamente.

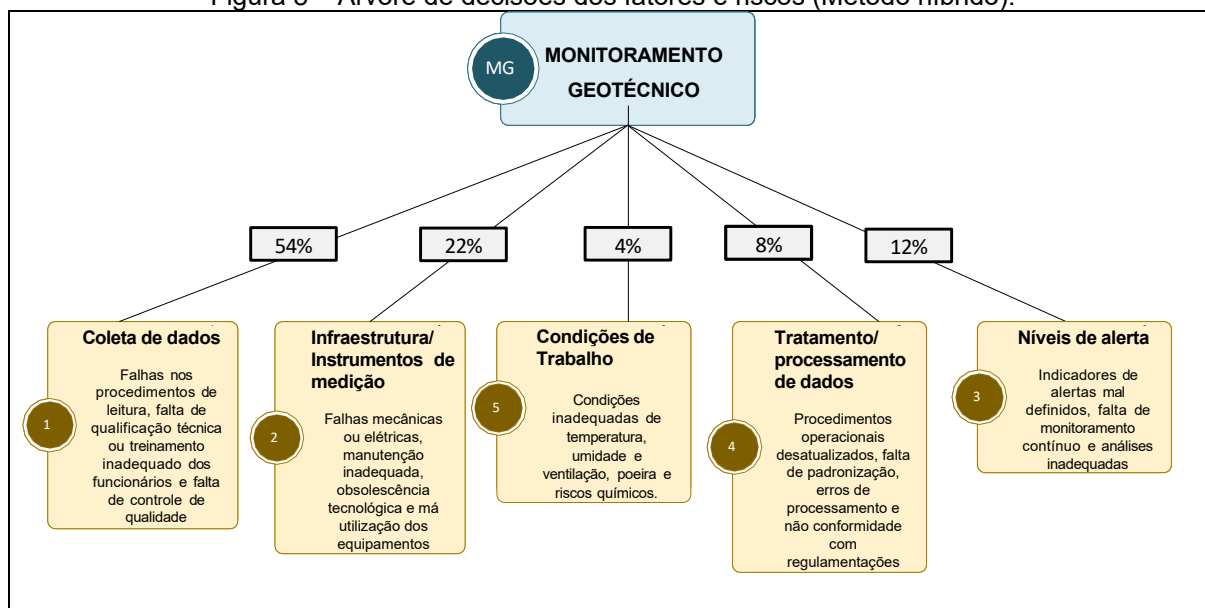
Assim, obteve-se os seguintes resultados:

$$MRPN = \left(\frac{0.71 + 0.37}{2}, \frac{0.29 + 0.16}{2}, \frac{0.00 + 0.07}{2}, \frac{0.00 + 0.16}{2}, \frac{0.00 + 0.24}{2} \right)$$

$$MRPN = (0.54, 0.22, 0.04, 0.08, 0.12)$$

Com base nestes resultados, foi formulada uma nova árvore de decisões (Figura 8). Observa-se que o fator coleta de dados e suas falhas relacionadas permanecem com o maior impacto no comprometimento do sucesso do monitoramento geotécnico, com potencial de comprometimento destes dados em cerca de 54%.

Figura 8 – Árvore de decisões dos fatores e riscos (Método híbrido).



Fonte: Autor (2025).

6.2. Discussões

Por meio da Tabela 5 é possível observar o percentual de influência relativo de cada método estudado.

Tabela 5 – Influência relativa de cada método estudado.

Fatores	Riscos associados	FAHP	FMEA	Híbrido
Coleta de dados	(Falhas nos procedimentos de leitura, falta de qualificação técnica, treinamento inadequado dos funcionários e falta de controle de qualidade)	71,00%	36,56%	53,78%
Infraestrutura/Instrumentos de medição	(Falhas mecânicas ou elétricas, manutenção inadequada, obsolescência tecnológica e má utilização dos equipamentos)	29,00%	16,08%	22,54%

Fatores	Riscos associados	FAHP	FMEA	Híbrido
Condições de Trabalho	(Condições inadequadas de temperatura, umidade e ventilação, poeira e riscos químicos)	0,00%	7,01%	3,51%
Tratamento/Processamento de dados	(Procedimentos operacionais desatualizados, falta de padronização, erros de processamento e não conformidade com regulamentações)	0,00%	16,08%	8,04%
Níveis de alerta	(Indicadores de alertas mal definidos, falta de monitoramento contínuo e análises inadequadas)	0,00%	24,27%	12,14%
TOTAL		100,00%	100,00%	100,00%

Fonte: Autor (2025).

Entre os principais benefícios, observou-se uma redução no impacto de inconsistências, pois a lógica *fuzzy* minimizou discrepâncias nos julgamentos, aumentando a consistência e confiabilidade dos resultados. Ao considerar aspectos como subjetividade e incerteza, o modelo apresentado oferece maior aplicabilidade ao incluir dados empíricos que são provenientes da avaliação de especialistas.

Os resultados do FAHP evidenciaram que a coleta de dados se destacou como o fator mais crítico para a qualidade e precisão do mapeamento das movimentações e das condições gerais de estabilidade. Estes estão alinhados com os estudos de Lopes & Gomes (2015), que acompanharam dois aterros sanitários durante sua instalação e ao longo de sete anos de operação. Estas autoras concluíram que a experiência limitada das equipes técnicas, aliada à escassez de literatura especializada sobre o tema, representa um dos principais desafios para o acompanhamento e compreensão dessas estruturas.

O segundo lugar foi atribuído à Infraestrutura/Instrumentos de Medição. As condições altamente heterogêneas dos resíduos (Zekkos, 2013) somadas à incapacidade dos equipamentos em suportar os elevados níveis de deformação, a heterogeneidade e a agressividade no interior dos maciços (Lopes & Gomes, 2015) podem resultar em monitoramentos imprecisos, aumentando o risco de deslizamentos sem indicação prévia.

De acordo com Moraes (2024), no Brasil, observa-se uma dificuldade na realização de um acompanhamento sistemático e efetivo de aterros sanitários. Essa é atribuída, principalmente, à ausência de instrumentação adequada.

Tendo em vista um grau de fuzzificação de 1, considerado adequado para a avaliação, os demais fatores apresentaram pesos nulos. Esse fato não representa que

há irrelevância desses elementos, mas sim uma preferência menor em comparação aos dois mencionados anteriormente, ou seja, em um contexto complexo, suas influências sobre os resultados são menos expressivas, sendo evidenciadas, sobretudo, pelo caráter conservador do método (pesos mínimos de cada vetor associado).

Dado o número limitado de estudos sobre os riscos relacionados ao monitoramento geotécnico de aterros sanitários, esta dissertação representa um avanço no gerenciamento de possíveis falhas. Esta oferece suporte estratégico ao planejamento de ações preventivas e à mitigação de danos frente a fatores relevantes, aspectos fundamentais na busca de aumento na segurança, a integridade e o monitoramento contínuo de resíduos.

Nos cinco fatores analisados, os conjuntos de falhas associados a cada um foram examinados e hierarquizados também com base em três componentes principais: severidade, ocorrência e detecção, por meio do método FMEA. Essa abordagem estruturada permitiu uma nova forma de priorização.

Conforme evidenciado na análise FMEA, as falhas associadas ao fator Coleta de Dados apresentaram o RPN mais elevado. Os resultados indicam que esse grupo de falhas possui alta severidade, ocorrência acima da média e dificuldade significativa de detecção. No caso das falhas relacionadas à Infraestrutura/Instrumentos de Medição, observou-se que a severidade e a ocorrência se mantiveram em níveis moderados, com uma detecção também mediana.

Com a aplicação do método foi possível observar um empate no RPNs associados aos fatores Tratamento/Processamento de Dados e Infraestrutura/Instrumentos. Esse resultado levanta a discussão de que falhas procedimentais, como: erros de processamento, falta de padronização e não conformidade regulatória, podem exigir a mesma atenção que as falhas de natureza mecânica ou eletrônica. Essa equivalência deu-se pela combinação de uma severidade relativamente alta, sobretudo associada ao tratamento/processamento de dados, com níveis medianos de ocorrência e de detecção.

Por outro lado, as falhas associadas às Condições de Trabalho apresentaram o menor índice de detecção entre as estudadas, o que facilita sua identificação. Ademais, a severidade foi avaliada como a mais baixa dentre todos os modos de falha (2,78), contribuindo significativamente para a redução do RPN geral. Dessa forma, em

termos de prioridade, esse conjunto tende a ser o último fator na lista de intervenções, já que seu impacto é menor em comparação aos demais.

Ainda sobre o método FMEA, o fator Níveis de Alerta, embora com ocorrência não tão elevada, apresentou a maior severidade potencial (7,84) do conjunto. Além disso, a dificuldade de detecção (5,62) de suas falhas contribui significativamente para o seu RPN. Em outras palavras, caso essas falhas neste venham a ocorrer, o impacto tende a ser extremamente grave, ao mesmo tempo em que a identificação precoce se mostra um desafio considerável.

Vale mencionar que, em geral, os Níveis de Alerta utilizados para o monitoramento de aterros sanitários são definidos com base em retroanálises de rupturas ocorridas em maciços no passado. Entretanto, como cada aterro apresenta características singulares — como composição dos resíduos, inclinação dos taludes, níveis pluviométricos variáveis, entre outros, abre-se margem para que haja a utilização de limites de alerta inadequados para o acompanhamento de um determinado maciço. A literatura sobre deslocamentos verticais e horizontais é ampla e, nesse contexto, autores como: Kaimoto (2008) *apud* Benvenuto (2011) e Boscov (2008), discutem, por exemplo, diferentes níveis de alerta para deslocamentos verticais de marcos superficiais, evidenciando a variabilidade de critérios.

Para mitigar esses riscos, uma estratégia consiste em estabelecer Níveis de Alerta a partir de modelos de previsão fundamentados em dados históricos de recalques, levando em conta o comportamento geomecânico e os processos de biodegradação específicos de cada aterro (Teixeira & Pinheiro, 2018). Segundo Brandão (2025), determinar níveis de controle por meio de análise de elementos finitos pode constituir um avanço pois incorpora modos de falha passíveis de monitoramento pelos instrumentos disponíveis, em vez de se restringir apenas à estabilidade estática.

a determinação de níveis de controle por meio de análise de elementos finitos representa um avanço por considerar modos de falha monitoráveis com os instrumentos disponíveis e não somente a estabilidade estática.

Dessa forma, reduz-se a probabilidade de subestimar tais níveis, pois os parâmetros de alerta são calibrados de acordo com a realidade local, ao invés de simplesmente replicar limites genéricos ou baseados em experiências pretéritas que podem não refletir com fidelidade as condições atuais de operação.

Além disso, integrar modelagens numéricas ao monitoramento geotécnico pode contribuir para a compreensão e previsão dos processos que afetam a estabilidade geotécnica, resultando em uma tomada de decisões mais embasadas (Fumagalli *et al.*, 2020).

Para ampliar o entendimento dos riscos associados ao monitoramento geotécnico, esse trabalho propôs a criação de uma nova hierarquia que reduz as limitações do RPN puro, ao mesmo tempo em que minimiza o conservadorismo do FAHP, tornando a análise mais equilibrada e eficiente.

Pelo método híbrido, o fator coleta de dados e suas falhas foram as mais impactantes, representando 54% do total. Em seguida, destacaram-se infraestrutura e instrumentos de medição, com 22%. Níveis de alerta e suas falhas ficaram em terceiro lugar, correspondendo a 12%. Já os problemas relacionados ao tratamento/processamento de dados representaram 8%, enquanto as condições de trabalho tiveram a menor influência, com apenas 4%.

Com este resultado é possível afirmar que investir no desenvolvimento de estratégias e ferramentas voltadas para a melhoria do sistema de coleta de dados pode resultar em um mapeamento mais preciso das condições geomecânicas de aterros sanitários. Considerando que esses dados são gerados por instrumentos geotécnicos, como marcos superficiais, piezômetros, inclinômetros e outros sensores de monitoramento, iniciativas como treinamentos especializados, implementação de controles de qualidade e adoção de sistemas inteligentes de monitoramento mostram-se eficazes para garantir a precisão e a confiabilidade das informações coletadas.

Estes últimos, conforme Lin *et al.* (2024) permitem visualizar e interpretar dados, exibir mapas de monitoramento em tempo real, gerenciar equipamentos e emitir alertas precoces. O sistema inteligente descrito por esses autores reduz desafios do monitoramento geotécnico tradicional, como dificuldades operacionais, proporcionando maior produtividade, processamento, análise rápida dos dados, operação remota, redução em interferências no ambiente monitorado e diminuição dos custos operacionais.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, este trabalho estabeleceu uma hierarquização de fatores e riscos, considerando seu potencial de comprometer a avaliação do comportamento geomecânico dos maciços de resíduos, o que se resultou em apoio estratégico para a tomada de decisões com foco na gestão de riscos. Esse objetivo foi efetivamente alcançado por meio da aplicação dos métodos FAHP e FMEA.

O estudo em questão fundamentou-se nos seguintes fatores do monitoramento geotécnico: coleta de dados, infraestrutura/instrumentos de medição, condições de trabalho, tratamento/processamento de dados e níveis de alerta. Os fatores foram definidos por meio de revisões bibliográficas, seguidas da aplicação da técnica de *brainstorming*. O *framework* foi desenvolvido com a ajuda de dezoito especialistas com atuação nas regiões Nordeste e Sudeste do Brasil.

Com o auxílio de uma versão sintética do FAHP, realizada com um grau de fuzzificação igual a 1, evidenciou que os fatores de Coleta de Dados e Infraestrutura/Instrumentos de medição são os mais influentes na avaliação das condições de estabilidade de aterros sanitários. A influência estimada para este foi de 29% e de 71% para o primeiro, evidenciando o maior potencial de comprometimento deste último.

Paralelamente, um dos aspectos observados foi que três dos cinco critérios apresentaram pesos nulos. Tal comportamento pode ser atribuído às características conservadoras do modelo. Em cenários com um número moderado de critérios, como o desenvolvido neste estudo, a probabilidade de que um ou mais resultados no vetor de pesos sejam iguais a zero aumenta significativamente, destacando-se uma potencial limitação.

Diante deste cenário, a metodologia FAHP se mostrou eficaz para a avaliação dos fatores relevantes, pois foi capaz de lidar com esta complexidade, integrar diferentes perspectivas e tratar incertezas de forma estruturada, auxiliando na priorização e análise de alternativas de maneira mais confiável.

Em relação à análise dos riscos associados a cada etapa, a aplicação do FMEA viabilizou uma avaliação minuciosa de possíveis riscos, culminando em uma nova classificação após a utilização de princípios algébricos. Estes resultados revelaram que o processo de coleta de dados apresenta o RPN mais elevado,

evidenciando alta severidade, ocorrência acima da média e dificuldade significativa de detecção. As falhas relacionadas à Infraestrutura/Instrumentos de Medição demonstraram níveis moderados de severidade, ocorrência e detecção. Por sua vez, as Condições de Trabalho, com a menor severidade (2,78) e maior facilidade de detecção, contribuem para reduzir consideravelmente o RPN geral, sendo consideradas de menor prioridade.

O fator Tratamento/Processamento de Dados empatou com a infraestrutura em termos de RPN, sugerindo que falhas em procedimentos – como erros de processamento, falta de padronização e não conformidade regulatória – exigem a mesma atenção que as falhas mecânicas ou eletrônicas. Ademais, os níveis de alerta, embora com ocorrência menos elevada, apresentaram a severidade potencial mais alta (7,84) e dificuldade de detecção acentuada (5,62), indicando que, quando ocorrem, essas falhas podem ter um impacto severo, exigindo acompanhamento rigoroso para a detecção precoce.

Ademais, foi percebido que sua simplicidade matemática pode não captar nuances críticas no contexto geotécnico de aterros sanitários, especialmente no que se refere a eventos raros, como “Indicadores de alerta mal definidos”, que, embora pouco frequentes, podem ter impactos severos no monitoramento das condições geomecânicas do maciço de resíduos. Dessa forma, posteriormente, ambas as hierarquias foram integradas, resultando na formulação de um método híbrido que combina as vantagens de cada abordagem.

Do ponto de vista teórico, os resultados obtidos por essa fusão podem ser relevantes estrategicamente pois combinam a análise sistemática do FMEA com a capacidade do FAHP de lidar com incertezas e subjetividades, fornecendo uma base mais consolidada para a realização de intervenções em todos os fatores estudados.

Concluiu-se que, no monitoramento geotécnico, a coleta de dados e suas falhas, responsáveis por 54% do impacto total, são as mais críticas, seguidas pelas relacionadas à infraestrutura e instrumentos de medição (22%). Com base nesse resultado, uma contribuição prática para a gestão de riscos associados ao monitoramento geotécnico de aterros deve incluir investimentos em estratégias como treinamentos especializados, implementação de controles de qualidade e desenvolvimento de sistemas inteligentes de monitoramento geotécnico. Essas

iniciativas podem melhorar a precisão, a confiabilidade e a eficiência do processo de monitoramento, alinhando-se às demandas de segurança e gestão sustentável.

O desenvolvimento de sistemas inteligentes de monitoramento geotécnico, conforme Lin *et al.* (2024), implicam em uma redução dos riscos identificados como mais relevantes nesta pesquisa, aprimorando a precisão, a confiabilidade e a eficiência do monitoramento, superando desafios e potencializando o acompanhamento das condições geomecânicas.

Ademais, novas pesquisas podem ser desenvolvidas utilizando outras ferramentas e metodologias como: *Technique For Order Preference By Similarity to Ideal Solution* (Topsis) – método de agrupamento voltado à comparação de um conjunto de alternativas, fundamentado na definição de critérios e na atribuição de pesos correspondentes e *Elimination and Choice Translating Algorithm* (Electre) – método multicritério que classifica alternativas em categorias previamente definidas, entre outros. Além disso, futuros trabalhos poderão incorporar os pesos definidos para o estudo FMEA, permitindo uma análise mais robusta.

Recomenda-se, também, a realização de pesquisas com um número ampliado de especialistas e a aplicação prática dos resultados aqui apresentados por meio de um estudo de caso real em um aterro sanitário monitorado, com o objetivo de validar e aprimorar a abordagem proposta. Essas direções futuras não apenas fortalecerão a identificação e mitigação de riscos no monitoramento geotécnico, mas também contribuirão para um acompanhamento mais preciso e confiável, promovendo maior segurança e eficiência em sua gestão.

Por fim, apesar das limitações citadas, os resultados aqui apresentados podem ser caracterizados como eficazes na representação da complexa realidade de aterros sanitários, oferecendo suporte para a redução de riscos relacionados ao monitoramento geotécnico. A classificação desenvolvida pode ser empregada pelos responsáveis pelo monitoramento como uma ferramenta estratégica para orientar a prevenção de riscos, além de subsidiar a tomada de decisões mais assertivas.

8. REFERÊNCIAS

- ABNT. (1992). *NBR 8419 - Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*.
- ABNT. (2010). *ABNT NBR 15849 - Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento*.
- ABNT. (2018). *NBR ISO 31000: Gestão de riscos — Diretrizes*.
- ABNT. (2020). *ABNT NBR 16849 - Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos — Requisitos*.
- ABRELPE. (2020). *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*.
<https://www.abrema.org.br/download/90934/?tmstv=1718136285>
- ABRELPE. (2021). *PANORAMA 2021*. <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>
- ABREMA. (2024). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024*.
<https://www.abrema.org.br/download/96475/?tmstv=1733786378>
- Ahluwalia, I. J., & Patel, U. (2018). *Solid waste management in india: an assessment of resource recovery and environmental impact*.
- Air Santiago Junior, A., Fuck Von Der Osten, S. B., Von Der Osten Junior, E. H., Ferreira Miyashiro, C., Dos Reis Duarte, E., & Sauer, A. V. (2021). ATERRO SANITÁRIO: RELEVÂNCIA E TÉCNICAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO. *Divers@!*, 13(2), 142. <https://doi.org/10.5380/diver.v13i2.76911>
- Alzamora, B. R., & Barros, R. T. D. V. (2020). Review of municipal waste management charging methods in different countries. *Waste Management*, 115, 47–55.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.020>
- ALZAMORA, B. R., & BARROS, R. T. D. V. (2020). Review of municipal waste management charging methods in different countries. *Waste Management*, 115, 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.020>
- Appolloni, A., D'Adamo, I., Gastaldi, M., Santibanez-Gonzalez, E. D. R., & Settembre-Blundo, D. (2021a). Growing e-waste management risk awareness points towards new recycling scenarios: The view of the Big Four's youngest consultants. *Environmental Technology and Innovation*, 23, 101716.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101716>

- Appolloni, A., D'Adamo, I., Gastaldi, M., Santibanez-Gonzalez, E. D. R., & Settembre-Blundo, D. (2021b). Growing e-waste management risk awareness points towards new recycling scenarios: The view of the Big Four's youngest consultants. *Environmental Technology and Innovation*, 23, 101716. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101716>
- Apriliana, A. F., Sarno, R., & Effendi, Y. A. (2018). Risk analysis of IT applications using FMEA and AHP SAW method with COBIT 54. *2018 International Conference on Information and Communications Technology, ICOIACT 2018, 2018-Janua*, 373–378. <https://doi.org/10.1109/ICOIACT.2018.8350708>
- Arueira, A. de B. (2014). *Aplicação do Método AHP para Avaliação de Transportadores*. <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/24572/24572.PDF>
- Athanasopoulos, G., Vlachakis, V., Zekkos, D., & Spiliotopoulos, G. (2013). The December 29th 2010 Xerolakka municipal solid waste landfill failure. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris*, 309–312.
- Barros, R. (2013). *TRATADO SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS Gestão, Uso e Sustentabilidade* (Editora Interciência, Ed.; Edição: 1).
- Bassey, U., Tom, A.-O., Okono, U., John, M., Sinn, M., Bassey, A., Luke, U., & Narra, S. (2024). Characteristics and management of municipal solid waste in Uyo, Akwa Ibom state, Nigeria. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61108-0>
- Batista, H. P. (2010). *Desenvolvimento de diretrizes para monitoramento geotécnico e plano de contingência/emergência em aterros sanitários*.
- Ben, L. H. F., Falcão, P. R., Pascoal, P. T., do Nascimento, L. A., & Baroni, M. (2023). Um breve estudo a respeito da importância da modelagem da interface geomembrana-resíduo. *X Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2023), Volume II*, 191–198.
- Benvenuto, C. (2011). Monitoramento geotécnico e a estabilidade dos aterros sanitários. *LIMPEZA PÚBLICA*, 28–45.
- Benvenuto, C., & Cunha, M. A. (1991). Escorregamento em massa de lixo no Aterro Sanitário Bandeirantes em São Paulo. *II Simpósio Sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos-REGEO*, 91, 55–66.

- Bezerra, E. A., Rodrigues, F. dos S., Souza, L. S. B., Frota, A. F., & Santos, G. O. (2024). Análise comparativa dos Aterros Sanitários de duas capitais brasileiras do Norte-Nordeste: Boa vista, Roraima e Fortaleza, Ceará. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, 17(8), e10061. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.8-556>
- Blengino, A. M., Veggi, S., Rossello, A., Manassero, M., & Spanna, C. (1996). Investigation, monitoring system and stability analysis of an old canyon landfill. In *Environmental Geotechnics* (pp. 629–634). AA Balkema.
- Boscov, M. E. G. (2008). Geotecnia ambiental. In *São Paulo: Oficina de Textos*.
- Brandão, D. N. (2025). *UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL*.
- BRASIL. (2010). *LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010*. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm
- BRASIL, T. de C. da U. (2018). Referencial básico de gestão de riscos. *TCU, Secretaria de Controle Interno e Externo*, 154.
- Brun, A., & Savino, M. M. (2018). Assessing risk through composite FMEA with pairwise matrix and Markov chains. *International Journal of Quality & Reliability Management*.
- Brunner, P. H., & Fellner, J. (2007). Setting priorities for waste management strategies in developing countries. *Waste Management & Research*, 25(3), 234–240. <https://doi.org/10.1177/0734242X07078296>
- Buckley, J. J., Feuring, T., & Hayashi, Y. (2001). Fuzzy hierarchical analysis revisited. *European Journal of Operational Research*, 129(1), 48–64.
- Butt, T. E., & Oduyemi, K. O. K. (2003). A holistic approach to Concentration Assessment of hazards in the risk assessment of landfill leachate. *Environment International*, 28(7), 597–608. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00100-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00100-9)
- Candiani, G., & Viana, E. (2017). Emissões fugitivas de metano em aterros sanitários. *GEOUSP Espaço e Tempo (Online)*, 21(3), 845–857.
- Catapreta, C. A. A. (2008). *Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação*.

- Catapreta, C. A. A., Simões, G. F., & Barros, R. T. V. (2006). Avaliação da densidade de resíduos sólidos urbanos dispostos em um aterro experimental. *Congreso de La Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 30, 2006.
- Cempre. (2018). *LIXO MUNICIPAL: MANUAL DE GERENCIAMENTO INTEGRADO*. https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/6-Lixo_Municipal_2018.pdf
- Chang, D.-Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649–655.
- Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N., El Rayess, Y., & El Azzi, D. (2023). A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(2), 349–395. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7>
- Costa Filho, T. R. da. (2018). *Aplicação da lógica fuzzy para determinação da permeabilidade em reservatórios carbonáticos*. <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/7093/TCC-TEL BIO.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=33&zoom=100,109,114>
- CPRH. (2021). *Manual de Fiscalização de Aterros Sanitários*. https://www2.cprh.pe.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/Manual_de_Fiscalizacao_de_aterros_sanitarios_CPRH.pdf
- Cuartas, M., López, A., Pérez, F., & Lobo, A. (2018). Analysis of landfill design variables based on scientific computing. *Waste Management*, 71, 287 – 300. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.043>
- CUNHA, M. B. (2020). *AVALIAÇÃO DE INSTABILIDADE EM UM ATERRO SANITÁRIO*. https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/2789/DISSERTA__O_MARIANA_BONELLA_CUNHA_16352598422278_2789.pdf
- da Silva, C. L., & Braz, J. A. (2002). *Aproveitamento Energético do Gás de Aterro Sanitário na Produção de Frio*.
- de Lavor, A. A. A., da Silva, A. C. A., Ribeiro, M. E. O., & Turatti, L. (2017). Conflitos causados pelos lixões: uma análise comparativa da situação do Brasil com o município de Iguatu-CE. *ID on Line REVISTA DE PSICOLOGIA*, 11(37), 246–258.
- Dehghan Nejad, A., Gholam Niya, R., & Alibabaei, A. (2016). The crisis of risk analysis in complex socio-technical systems a literature review Part A: Dependency

- between common risk analysis methods and obsolete accident models. *Iran Occupational Health*, 13(4), 62–76.
- Denardin, G. P. (2013). *Estudo dos recalques do aterro sanitário da Central de Resíduos do Recreio - Minas do Leão/RS*. 0–92.
- Despodov, Z., Mitić, S., & Peltečki, D. (2011). Application of the AHP method for selection of a transportation system in mine planning. *Podzemni Radovi*, 19, 93–99.
- Dias, S. M. F. (2009). Proposição de uma matriz de indicadores de sustentabilidade em gestão integrada de resíduos sólidos urbanos e sua aplicação em um estudo de caso. 58f. *Monografia (Progressão de Carreira No Magistério Superior)-Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana*.
- Dominoni, V. M. B., Ritter, E., Galindo, M. S. V., & Dominoni, C. M. B. (2022). *Análise dos Métodos de Estimativa de Geração de Lixiviado por Resíduos Sólidos Urbanos no Aterro Sanitário de Nova Iguaçu*. XX Congresso Brasileiro de Mecânica Dos Solos e Engenharia Geotécnica. <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/cobramseg.2022.0780.pdf>
- El Fadel, M., Douseid, E., Chahine, W., & Alaylic, B. (2002). Factors influencing solid waste generation and management. *Waste Management*, 22(3), 269.
- El-Sayegh, S. M., Manjikian, S., Ibrahim, A., Abouelyousr, A., & Jabbour, R. (2021). Risk identification and assessment in sustainable construction projects in the UAE. *International Journal of Construction Management*, 21(4), 327–336. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1536963>
- Emrouznejad, A., & Marra, M. (2017). The state of the art development of AHP (1979–2017): A literature review with a social network analysis. *International Journal of Production Research*, 55(22), 6653–6675.
- Eyay, N. (2016). *Previsão de recalques em aterros sanitários novos: caso do aterro de São Leopoldo*.
- Fakhravar, H. (2021). *Application of Failure Modes and Effects Analysis in the Engineering Design*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.05444>
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3), 85–98. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>

- Frangipani, M. J. O. (2018). *Estudo do tensofissuramento em geomembranas de polietileno de alta densidade utilizadas em aterros de resíduos*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL.
- Fumagalli, L., Stefania, G. A., Zanotti, C., Sartirana, D., Di Martino, G. R., Perosa, A., Valentini, P., Rotiroti, M., & Bonomi, T. (2020). Multivariate statistical analysis and numerical modelling for the hydrogeological and hydrochemical characterization of a closed MSW landfill: the case study of Vizzolo-Predabissi. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*. <https://doi.org/10.7343/as-2020-431>
- Giorgini, M. G. (2019). *Avaliação qualitativa de registros de monitoramento geotécnico e modelagem numérica de um aterro sanitário experimental*.
- Gomes, G. J. C., & Jucá, J. F. T. (2023). Controle de compactação para bases e coberturas de aterros sanitários e encerramento de lixões. *X Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2023), Volume I*, 201–206.
- GROUP, W. B. (2022). *Trends in Solid Waste Management*. https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html
- Gueorguiev, T., Kokalarov, M., & Sakakushev, B. (2020). Recent trends in fmea methodology. *2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*, 1–4.
- Gul, M., & Celik, E. (2018). Fuzzy rule-based Fine–Kinney risk assessment approach for rail transportation systems. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(7), 1786–1812.
- Hammami, S., Zouhri, L., Souissi, D., Souei, A., Zghibi, A., Marzougui, A., & Dlala, M. (2019). Application of the GIS based multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process (AHP) in the flood susceptibility mapping (Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1–16.
- Hataf, N., & Mousavinezhad, A. (2021). Evaluating Municipal Solid Wastes (MSW) Shear Strength Parameters to Assess Landfill Slope Stability. *International Journal of Environment and Waste Management*.
- Hendiani, S., Mahmoudi, A., & Liao, H. (2020). A multi-stage multi-criteria hierarchical decision-making approach for sustainable supplier selection. *Applied Soft Computing*, 94, 106456.

- Ho, W., Zheng, T., Yildiz, H., & Talluri, S. (2015). Supply chain risk management: a literature review. *International Journal of Production Research*, 53(16), 5031–5069. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1030467>
- Hsieh, T.-Y., Lu, S.-T., & Tzeng, G.-H. (2004). Fuzzy MCDM approach for planning and design tenders selection in public office buildings. *International Journal of Project Management*, 22(7), 573–584.
- Hu, A. H., Hsu, C.-W., Kuo, T.-C., & Wu, W.-C. (2009). Risk evaluation of green components to hazardous substance using FMEA and FAHP. *Expert Systems with Applications*, 36(3), 7142–7147.
- Huang, Y., & Zhu, C. (2014). Simulation of flow slides in municipal solid waste dumps using a modified MPS method. *Natural Hazards*, 74, 491–508.
- IPT, C. (2000). Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. *Publicação IPT–Instituto de Pesquisa Tecnológicas, S. Paulo*.
- Cempre. (2018). *LIXO MUNICIPAL MANUAL DE GERENCIAMENTO INTEGRADO*. 4ª. https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/6-Lixo_Municipal_2018.pdf
- IRGC. (2005). *RISK GOVERNANCE TOWARDS AN INTEGRATIVE APPROACH*. https://irgc.org/wp-content/uploads/2018/09/IRGC_WP_No_1_Risk_Governance__reprinted_version_3.pdf
- Javanshir Giv, M., Aryafar, A., & Safari, M. (2022). The selection of an appropriate method for Gazik Granite Quarry mine using a hybrid multi-criteria decision making method. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 56(1), 67–74.
- Jayaweera, M., Gunawardana, B., Gunawardana, M., Karunawardena, A., Dias, V., Premasiri, S., Dissanayake, J., Manatunge, J., Wijeratne, N., Karunarathne, D., & Thilakasiri, S. (2019). Management of municipal solid waste open dumps immediately after the collapse: An integrated approach from Meethotamulla open dump, Sri Lanka. *Waste Management*, 95, 227–240. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.019>
- Jucá, J. F. T. (2003). Disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. *Congresso Brasileiro De Geotecnia Ambiental-REGEO*, 5, 2003.

- JUCA, J. F. T., MARIANO, M. O. H., MELO, V. L. A., & Bastos, E. G. (1998). Monitoring of environmental recuperation of the Muribeca municipal solid waste landfill. *Environmental Geotechnics*, 485–489.
- Junior, A. A. S., Von Der Osten, S. B. F., Junior, E. H. V. D. O., Miyashiro, C. F., dos Reis Duarte, E., & Sauer, A. V. (2021). ATERRO SANITÁRIO: RELEVÂNCIA E TÉCNICAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO DO SOLO. *Divers@!*, 13(2), 142–153.
- Kaimoto, L. S. A. (2024). *Sem aterros sanitários não há futuro*. <https://www1.folha.uol.com.br/opiniaio/2024/11/sem-aterros-sanitarios-nao-ha-futuro.shtml>
- KAMIJI, T., & OLIVEIRA, F. (2019). Reflexões a Respeito de Rupturas em Aterros Sanitários Brasileiros. *IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL e VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS. Anais [...]. São Carlos*.
- Kiker, G. A., Bridges, T. S., Varghese, A., Seager, T. P., & Linkov, I. (2009). Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 1(2), 95–108. https://doi.org/10.1897/IEAM_2004a-015.1
- Kwong, C.-K., & Bai, H. (2002). A fuzzy AHP approach to the determination of importance weights of customer requirements in quality function deployment. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 13, 367–377.
- Lee, A. H. I., Chen, W.-C., & Chang, C.-J. (2008). A fuzzy AHP and BSC approach for evaluating performance of IT department in the manufacturing industry in Taiwan. *Expert Systems with Applications*, 34(1), 96–107.
- Li, H., Díaz, H., & Guedes Soares, C. (2021). A failure analysis of floating offshore wind turbines using AHP-FMEA methodology. *Ocean Engineering*, 234(May). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109261>
- Lin, H., Li, J., Lan, J., Dai, S., Jiang, J., & Chen, Y. (2024). Intelligent Landfill Slope Monitoring System and Data Analysis: Case Study for a Landfill Slope in Shenzhen, China. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 10(4), 05024003.
- Linhares, C. G., Gussen, C. T. G., & Ribas, J. R. (2012). O método Fuzzy AHP aplicado à análise de riscos de usinas hidrelétricas em fase de construção. *Congresso Latino-Iberoamericano de Investigação Operacional*, 591–603.

- Liu, Y., & Tang, Y. (2022). Managing uncertainty of expert's assessment in FMEA with the belief divergence measure. *Scientific Reports*, 12(1), 1–12.
- Lopes, M.-L., & Gomes, C. C. (2015). Geotechnical landfill monitoring—adaptations needed. *Environmental Geotechnics*, 2(1), 8–17.
- Lopes, R. C., Naiara, R., & Silva, F. (2015). APLICAÇÃO DAS LÓGICAS BOOLEANA E FUZZY NA DETERMINAÇÃO. 287–297.
- Mariano, M. O. H., & Jucá, J. F. T. (2010). Ensaio de campo para determinação de emissões de biogás em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 15, 223–228.
- Marins, C. S., Souza, D. de O., & Barros, M. da S. (2009). O Uso Do Método De Análise Hierárquica (AHP) Na Tomada De Decisões Gerenciais - Um Estudo. *Xli Sbp*, 11.
- Marques, F. B. R. (2010). *Avaliação dos Procedimentos de Operação em Aterros Sanitários no Estado do Rio de Janeiro*. Universidade Estadual do Rio de Janeiro.
- Medeiros, Á. M., Cabral, F. V., & Lima, L. O. (2023). SISTEMAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL EM ATERROS SANITÁRIOS. *REVISTA FOCO*, 16(11), e3746. <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v16n11-210>
- Meegoda, J. N., Hettiarachchi, H., & Hettiaratchi, P. (2016). Landfill design and operation. In *Sustainable Solid Waste Management*. <https://doi.org/10.1061/9780784414101.ch18>
- Mikhailov, L. (2003). Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgements. *Fuzzy Sets and Systems*, 134(3), 365–385.
- Moloudi, A., Khaloo, S. S., Gholamnia, R., & Saeedi, R. (2021). Prioritizing health, safety and environmental hazards by integrating risk assessment and analytic hierarchy process techniques in solid waste management facilities. *Archives of Environmental & Occupational Health*, 1–12.
- Moraes, T. S. O. (2024). *Contribuição da atualização bayesiana na estimativa de recalques: estudo de caso de um aterro sanitário*.
- Myronidis, D., Papageorgiou, C., & Theophanous, S. (2016). Landslide susceptibility mapping based on landslide history and analytic hierarchy process (AHP). *Natural Hazards*, 81, 245–263.

- Nai, C., Zhang, X., Liu, J., & Xu, Y. (2023). Study on detection method of landfill leachate level affected by HDPE membrane; [受 HDPE 膜影响下的垃圾填埋场渗滤液水位探测方法研究]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 13(1), 325 – 331. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20210864>
- Ohio, E. P. A. (2004). Geotechnical and Stability Analyses for Ohio Waste Containment Facilities. *Geotechnical Resource Group, State of Ohio Environmental Protection Agency*.
- Oliveira, A. M. dos S., & Monticeli, J. J. (2018). *Geologia de engenharia e ambiental, volume 3: aplicações: Vol. volume 3*.
- Pant, S., Kumar, A., Ram, M., Klochkov, Y., & Sharma, H. K. (2022). Consistency indices in analytic hierarchy process: a review. *Mathematics*, 10(8), 1206.
- Parekh, H., Yadav, K., Yadav, S., & Shah, N. (2015). Identification and assigning weight of indicator influencing performance of municipal solid waste management using AHP. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(1), 36–45.
- Paul, K., Chattopadhyay, S., Dutta, A., Krishna, A. P., & Ray, S. (2019). A comprehensive optimization model for integrated solid waste management system: A case study. *Environmental Engineering Research*, 24(2), 220–237.
- Permana, R. A., Ridwan, A. Y., Yulianti, F., & Kusuma, P. G. A. (2019). Design of food security system monitoring and risk mitigation of rice distribution in indonesia bureau of logistics. *2019 IEEE 13th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)*, 249–254.
- Pires, Y., & Oliveira, N. (2021). *Aumento da produção de lixo no Brasil requer ação coordenada entre governos e cooperativas de catadores*. <https://www12.senado.leg.br/noticias/infomaterias/2021/06/aumento-da-producao-de-lixo-no-brasil-requer-acao-coordenada-entre-governos-e-cooperativas-de-catadores#:~:text=Segundo dados do Panorama dos,de 1 kg por dia>.
- Portella, M. O., & Ribeiro, J. C. J. (2014). Aterros sanitários: aspectos gerais e destino final dos resíduos. *Revista Direito Ambiental e Sociedade*, 4(1).
- Recesa. (2008). *Resíduos Sólidos Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários*.

- https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/recesa/projetooperacaoemonitoramentodeaterrossanitarios-nivel2.pdf
- Reddy, K., Hettiarachchi, H., Gangathulasi, J., Bogner, J., & Lagier, T. (2009). Geotechnical properties of synthetic municipal solid waste. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 3(3), 429–438. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2009.03.03.429-438>
- Reddy, K. R., & Basha, B. M. (2014). Slope stability of waste dumps and landfills: state-of-the-art and future challenges. *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference, Kakinada, India*, 18–20.
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468–493.
- Rodrigues, M. D. O. (2014). *Avaliação e gestão de riscos em aterros sanitários*. Universidade do Minho.
- Rosa, E. A. (1998). Metatheoretical foundations for post-normal risk. *Journal of Risk Research*, 1(1), 15–44. <https://doi.org/10.1080/136698798377303>
- Rosa, E. A. (2003). The logical structure of the social amplification of risk framework (SARF): Metatheoretical foundations and policy implications. In N. Pidgeon, P. Slovic, & R. E. Kasperson (Eds.), *The Social Amplification of Risk* (pp. 47–79). Cambridge University Press. <https://doi.org/DOL:10.1017/CBO9780511550461.003>
- Rovai, R. L. (2005). *Modelo estruturado para gestão de riscos em projetos: estudo de múltiplos casos*. Universidade de São Paulo.
- Rugenski, C. Q., & Pinto, L. R. (2024). Políticas públicas do aterro sanitário de Fazenda Rio Grande: uma análise a partir dos impactos no município. *Boletim Do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*, 18(1), 02–15. <https://doi.org/10.19180/2177-4560.v18n12024p02-15>
- Saaty, T. L. (1980). The analytical hierarchy process, planning, priority. *Resource Allocation*. RWS Publications, USA.
- Santiago, L. S., & Dias, S. M. F. (2012). Matriz de indicadores de sustentabilidade para a gestão de resíduos sólidos urbanos Matrix of sustainability indicators for the urban solid waste management. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 203–212.

- Sardinha, P. G., & Claro, F. A. E. (2009). Uso combinado do AHP e do FMEA para análise de riscos em gerenciamento de projetos. *XVI Simpósio de Engenharia de Produção*, 1–10.
- Saxena, V., Jain, M., Singh, P., & Saxena, P. K. (2010). Fuzzy delphi hierarchy process and its application to improve indian telemedical services. *Available at: Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/4c61/7a52ce11d59711ed88bd90b612a32d985625>. Pdf. Accessed, 23.*
- Schneider, E. M., Fujii, R. A. X., & Corazza, M. J. (2017). Pesquisas quali-quantitativas: contribuições para a pesquisa em ensino de ciências. *Revista Pesquisa Qualitativa*, 5(9), 569–584.
- Silva, B. A. da. (2022). Sistemas de proteção ambiental em aterros sanitários. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento*, 26–43. <https://doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/aterros-sanitarios>
- Silva, N. S. da, Sano, E. E., & Chaves, J. M. (2024). Eficiência na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Revisão Bibliométrica dos Últimos 20 Anos. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental Da Alta Paulista*, 20(4). <https://doi.org/10.17271/1980082720420245245>
- Silva Junior, C. H. L. (2015). Lógica Fuzzy e Processo Analítico Hierárquico (AHP) aplicados ao Zoneamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos: Uma Revisão. *Revista Monografias Ambientais*, 14(3).
- Silva, M. F. (2006). *ANÁLISE DE INSTRUMENTOS DE GESTÃO AMBIENTAL VISANDO A MELHORIA CONTÍNUA DO ÍNDICE DA QUALIDADE DE ATERRO DE RESÍDUOS-IQR DO ESTADO DE SÃO PAULO*.
- Silva, W. K. A. S., & Tagliaferro, E. R. (2021). Aterro sanitário-a engenharia na disposição final de resíduos sólidos. *Brazilian Journal of Development*, 7(2), 12216–12236.
- Simões, G. F., Catapreta, C. A. A., de Brito Galvão, T. C., & Batista, H. P. (2003). Monitoramento Geotécnico de Aterros Sanitários—A experiência da central de tratamento de resíduos sólidos da BR-040 em Belo Horizonte—MG. *5 Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Porto Alegre*.
- Simões, G. F., Silva, F. H. R., Catapreta, C. A. A., & Souza, T. C. (2010). Considerações sobre a Interpretação de Registros de Monitoramento de

- Recalques em Aterros Sanitários. *CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 15.
- Skibniewski, M. J., & Chao, L.-C. (1992). Evaluation of advanced construction technology with AHP method. *Journal of Construction Engineering and Management*, 118(3), 577–593.
- Sorourkhah, A., & Edalatpanah, S. A. (2022). Using a combination of matrix approach to robustness analysis (MARA) and fuzzy DEMATEL-based ANP (FDANP) to choose the best decision. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 7(1), 68.
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis*. Quality Press.
- Strauch, M., & Albuquerque, P. P. de. (2008). *Gestão de recursos naturais e resíduos*. União Protetora do Meio Ambiente.
- Tang, Y.-C., & Beynon, M. J. (2005). *Application and Development of a Fuzzy Analytic Hierarchy Process within a Capital Investment Study*.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:44008670>
- Teixeira, M. C., & Pinheiro, R. J. B. (2018). Avaliação e previsão de recalques nos aterros sanitários de Minas do Leão e São Leopoldo, Estado do Rio Grande do Sul. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 23(2), 345–354.
<https://doi.org/10.1590/s1413-41522018148318>
- Thomazoni, A. L. R. (2014). Análise de aproveitamento energético em aterro sanitário baseada em cenários de geração de efluentes. *Igarss 2014*, 1, 1–5.
- Torody, A. B., Abaei, M. M., & Gholamnia, R. (2016a). Conceptual compression discussion on a multi-linear (FTA) and systematic (FRAM) method in an offshore operation's accident modeling. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 22(4), 532–540.
- Torody, A. B., Abaei, M. M., & Gholamnia, R. (2016b). Conceptual compression discussion on a multi-linear (FTA) and systematic (FRAM) method in an offshore operation's accident modeling. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 22(4), 532–540.
- Turk, A. B. (2010). *Quantitative Operational Risk Management* (p. Ch. 3). IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.83881>

- van Laarhoven, P. J. M., & Pedrycz, W. (1983). A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 11(1), 229–241. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(83\)80082-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0165-0114(83)80082-7)
- Varshney, T., Waghmare, A. V, Singh, V. P., Meena, V. P., Anand, R., & Khan, B. (2024). Fuzzy analytic hierarchy process based generation management for interconnected power system. *Scientific Reports*, 14(1), 11446.
- Vianna, C. T. (2013). Classificação das Pesquisas Científicas-Notas para os alunos. *Florianópolis, SC:[Sn]*.
- Wang, J., Jia, Z., Zhou, B., Zhang, L., & Ma, L. (2024). Design of Leachate Drainage System in Shallow Landfill Areas. *Tehnicki Vjesnik*, 31(2), 534 – 542. <https://doi.org/10.17559/TV-20230607000703>
- Wang, S. Q., Dulaimi, M. F., & Aguria, M. Y. (2004). Risk management framework for construction projects in developing countries. *Construction Management and Economics*, 22(3), 237–252. <https://doi.org/10.1080/0144619032000124689>
- Wang, Y.-M., Chin, K.-S., Poon, G. K. K., & Yang, J.-B. (2009). Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. *Expert Systems with Applications*, 36(2, Part 1), 1195–1207. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.11.028>
- Wang, Z., Ran, Y., Chen, Y., Yu, H., & Zhang, G. (2020). Failure mode and effects analysis using extended matter-element model and AHP. *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106233.
- Warnick, R. E., Lusk, A. R., Thaman, J. J., Levick, E. H., & Seitz, A. D. (2020). Failure mode and effects analysis (fmea) to enhance the safety and efficiency of gamma knife radiosurgery. *Journal of Radiosurgery and SBRT*, 7(2), 115.
- Wei, C.-C., Chien, C.-F., & Wang, M.-J. J. (2005). An AHP-based approach to ERP system selection. *International Journal of Production Economics*, 96(1), 47–62.
- World Bank. (2005). *Guidance note on recuperation of landfill gas from municipal solid waste landfills*. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/892171468766767158/pdf/multi-page.pdf>
- Wu, Z., Liu, W., & Nie, W. (2021). Literature review and prospect of the development and application of FMEA in manufacturing industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(5), 1409–1436.

- Xu, Y., Reniers, G., & Yang, M. (2024). A Multidisciplinary Review into the Evolution of Risk Concepts and Their Assessment Methods. *Processes*, 12(11), 2449. <https://doi.org/10.3390/pr12112449>
- Yadav, V., & Sharma, M. K. (2015). Multi-criteria decision making for supplier selection using fuzzy AHP approach. *Benchmarking: An International Journal*, 22(6), 1158–1174.
- Yang, H., Xia, J., Thompson, J. R., & Flower, R. J. (2017). Urban construction and demolition waste and landfill failure in Shenzhen, China. *Waste Management*, 63, 393–396.
- Yazdanpour, B., Karimpour-Fard, M., Sabermahani, M., & Machado, S. L. (2024). Compression Behavior of Municipal Solid Waste in Temperature-Controlled Isotropic Condition. *Geotechnical Testing Journal*, 47(2), 488–503. <https://doi.org/10.1520/GTJ20230354>
- Yin, R. K. (2001). Case study: planning and methods. *Estudo de Caso: Planejamento e Métodos*, 287–298.
- Yin, Y., Li, B., Wang, W., Zhan, L., Xue, Q., Gao, Y., Zhang, N., Chen, H., Liu, T., & Li, A. (2016). Mechanism of the December 2015 Catastrophic Landslide at the Shenzhen Landfill and Controlling Geotechnical Risks of Urbanization. *Engineering*, 2(2), 230–249. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.02.005>
- Yousefian, F., Hassanvand, M. S., Nodehi, R. N., Amini, H., Rastkari, N., Aghaei, M., Yunesian, M., & Yaghmaeian, K. (2020). The concentration of BTEX compounds and health risk assessment in municipal solid waste facilities and urban areas. *Environmental Research*, 191, 110068.
- Yuan, Y., & Tang, Y. (2022). Fusion of expert uncertain assessment in FMEA based on the negation of basic probability assignment and evidence distance. *Scientific Reports*, 12(1), 1–13.
- Zapa, E., & Cogollo, J. (2018). Fuzzy-BSC Methodology for Decision Making in Indemnity Area of Insurance Companies. *IEEE Latin America Transactions*, 16(10), 2539–2546. <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8795133>
- Zekkos, D. (2013). *Experimental evidence of anisotropy in municipal solid waste* (pp. 69–77). <https://doi.org/10.1201/b15004-9>

Zhu, K.-J., Jing, Y., & Chang, D.-Y. (1999). A discussion on extent analysis method and applications of fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 116(2), 450–456.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO



HIERARQUIZAÇÃO DE FATORES DE RISCO RELEVANTES NO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO DE ATERROS SANITÁRIOS

APENDICE A

Todas as questões a seguir têm como foco os resultados do monitoramento geotécnico

Esta seção nos ajudará a tomar decisões em situações complexas. Ao final, o processo permitirá que avaliemos e priorizemos as diferentes alternativas, levando em conta suas incertezas.

1. Nome para fins de identificação interna (opcional):

2. Em qual setor ou área você atua dentro do aterro sanitário?

- ☐ Monitoramento geotécnico
- ☐ Operacional
- ☐ Desenvolvimento de projetos
- ☐ Acadêmico/Pesquisador
- ☐ Other

3. Qual a sua experiência com aterros sanitários?

- ☐ Menos de 1 ano
- ☐ 1-5 anos
- ☐ 5-10 anos
- ☐ Mais de 10 anos

4. Em qual região do Brasil você atua?

☐ Centro-Oeste

☐ Nordeste

☐ Norte

☐ Sudeste

☐ Sul

5. Qual é o recebimento médio do(s) ativo(s) com o(s) qual(is) você trabalha? (Se houver mais de um, considere a soma total)

☐ Menos de 20 ton/dia

☐ 20 - 200 ton/dia

☐ 200 - 1000 ton/dia

☐ Mais de 1000 ton/dia

6. Tomando como parâmetro o efeito de **falhas** relacionadas à **coleta de dados** (falhas nos procedimentos de leitura, falta de qualificação técnica, treinamento inadequado dos funcionários e falta de controle de qualidade) nos resultados do monitoramento geotécnico. Como você avaliaria o efeito, nos resultados deste monitoramento, em caso de falhas nos seguintes elementos:

	Igual	Moderado	Forte	Muito forte	Extremamente forte
a) Infraestrutura/Instrumentos de medição (Falhas mecânicas ou elétricas, manutenção inadequada, obsolescência tecnológica e má utilização dos equipamentos)	☐	☐	☐	☐	☐
b) Condições de trabalho (Condições ambientais adversas (como condições inadequadas de temperatura, umidade e ventilação), poeira e riscos químicos)	☐	☐	☐	☐	☐
c) Tratamento/Processamento de dados (Procedimentos operacionais desatualizados, falta de padronização, erros de processamento e não conformidade com regulamentações)	☐	☐	☐	☐	☐

	Igual	Moderado	Forte	Muito forte	Extremamente forte
d) Níveis de alerta (Indicadores de alertas mal definidos, falta de monitoramento contínuo e análises inadequadas)	☐	☐	☐	☐	☐

7. Tomando como parâmetro o efeito de **falhas** relacionadas à **infraestrutura/instrumentos de medição** (falhas mecânicas ou elétricas, manutenção inadequada, obsolescência tecnológica e má utilização dos equipamentos) nos resultados do monitoramento geotécnico. Como você avaliaria o efeito, nos resultados deste monitoramento, em caso de falhas nos seguintes elementos:

	Igual	Moderado	Forte	Muito forte	Extremamente forte
a) Condições de trabalho (Condições ambientais adversas (como condições inadequadas de temperatura, umidade e ventilação), poeira e riscos químicos)	☐	☐	☐	☐	☐
b) Tratamento/Processamento de dados (Procedimentos operacionais desatualizados, falta de padronização, erros de processamento e não conformidade com regulamentações)	☐	☐	☐	☐	☐
c) Níveis de alerta (Indicadores de alertas mal definidos, falta de monitoramento contínuo e análises inadequadas)	☐	☐	☐	☐	☐

8. Tomando como parâmetro o efeito de **falhas** relacionadas às **condições de trabalho** (condições ambientais adversas (como condições inadequadas de temperatura, umidade e ventilação), poeira e riscos químicos) nos resultados do monitoramento geotécnico. Como você avaliaria o efeito, nos resultados deste monitoramento, em caso de falhas nos seguintes elementos:

	Igual	Moderado	Forte	Muito forte	Extremamente forte
a) Tratamento/Processamento de dados (Procedimentos operacionais desatualizados, falta de padronização, erros de processamento e não conformidade com regulamentações)	☐	☐	☐	☐	☐
b) Níveis de alerta (Indicadores de alertas mal definidos, falta de monitoramento contínuo e análises inadequadas)	☐	☐	☐	☐	☐

9. Tomando como parâmetro o efeito de **falhas** relacionadas ao **tratamento/processamento de dados** (procedimentos operacionais desatualizados, falta de padronização, erros de processamento e não conformidade com regulamentações) nos resultados do monitoramento geotécnico. Como você avaliaria o efeito, nos resultados deste monitoramento, em caso de falhas nos seguintes elementos:

	Igual	Moderado	Forte	Muito forte	Extremamente forte
a) Níveis de alerta (Indicadores de alertas mal definidos, falta de monitoramento contínuo e análises inadequadas)	☐	☐	☐	☐	☐

10. Avalie a **GRAVIDADE** das falhas abaixo considerando como podem afetar no **mapeamento de movimentações e condições gerais de estabilidade**:

	Baixa (Sem danos significativos, pode ser corrigido e não impacta na avaliação das movimentações e condições gerais de estabilidade)	Moderada (Pode resultar em danos moderados, exigir intervenções corretivas e ter impactos na avaliação das movimentações e condições gerais de estabilidade, são controláveis)	Alta (Pode comprometer a estabilidade do aterro e pôr em risco a segurança humana, infraestrutura e meio ambiente)
Falhas nos procedimentos de leitura, falta de qualificação técnica, treinamento inadequado dos funcionários e falta de controle de qualidade	☐	☐	☐

	Baixa (Sem danos significativos, pode ser corrigido e não impacta na avaliação das movimentações e condições gerais de estabilidade)	Moderada (Pode resultar em danos moderados, exigir intervenções corretivas e ter impactos na avaliação das movimentações e condições gerais de estabilidade, são controláveis)	Alta (Pode comprometer a estabilidade do aterro e pôe em risco a segurança humana, infraestrutura e meio ambiente)
Falhas mecânicas ou elétricas, manutenção inadequada, obsolescência tecnológica e má utilização dos equipamentos	☐	☐	☐
Condições de trabalho (como condições inadequadas de temperatura, umidade e ventilação), poeira e riscos químicos	☐	☐	☐
Procedimentos operacionais desatualizados, falta de padronização, erros de processamento e não conformidade com regulamentações	☐	☐	☐
Indicadores de alertas mal definidos, falta de monitoramento contínuo e análises inadequadas	☐	☐	☐

11. Avalie a **OCORRÊNCIA** das falhas abaixo considerando como podem afetar no **mapeamento de movimentações e condições gerais de estabilidade**:

	Baixa (Raras, ocorrendo de forma esporádica e com baixa probabilidade, geralmente resultado de eventos excepcionais ou condições imprevistas)	Moderada (Ocorrem de maneira ocasional, com uma probabilidade moderada. Previsíveis ou comuns, mas ocorrem com pouca frequência)	Alta (Frequentes e têm uma alta probabilidade de ocorrer, indicando problemas no sistema de monitoramento ou em outros aspectos operacionais)
Falhas nos procedimentos de leitura, falta de qualificação técnica, treinamento inadequado dos funcionários e falta de controle de qualidade	☐	☐	☐
Falhas mecânicas ou elétricas, manutenção inadequada, obsolescência tecnológica e má utilização dos equipamentos	☐	☐	☐

	Baixa (Raras, ocorrendo de forma esporádica e com baixa probabilidade, geralmente resultado de eventos excepcionais ou condições imprevistas)	Moderada (Ocorrem de maneira ocasional, com uma probabilidade moderada. Previsíveis ou comuns, mas ocorrem com pouca frequência)	Alta (Frequentes e têm uma alta probabilidade de ocorrer, indicando problemas no sistema de monitoramento ou em outros aspectos operacionais)
Condições de trabalho (como temperatura, umidade, ventilação inadequadas), poeira e riscos químicos	☐	☐	☐
Procedimentos operacionais desatualizados, falta de padronização, erros de processamento e não conformidade com regulamentações	☐	☐	☐
Indicadores de alertas mal definidos, falta de monitoramento contínuo e análises inadequadas	☐	☐	☐

12. Avalie a **DETECÇÃO** das falhas abaixo considerando como podem afetar no **mapeamento de movimentações e condições gerais de estabilidade**:

	Baixa (Difícil detecção, detectadas tardiamente ou de forma imprecisa, de modo a impedir a tomada de decisão ágil e eficaz)	Moderada (Detectadas com demora ou com menor precisão, o que pode resultar em análises do maciço não representativas, porém permitem a tomada de decisão em tempo hábil)	Alta (Facilmente detectadas, permitindo resposta imediata que evita impactos adversos)
Falhas nos procedimentos de leitura, falta de qualificação técnica, treinamento inadequado dos funcionários e falta de controle de qualidade	☐	☐	☐
Falhas mecânicas ou elétricas, manutenção inadequada, obsolescência tecnológica e má utilização dos equipamentos	☐	☐	☐
Condições de trabalho (como condições inadequadas de temperatura, umidade e ventilação), poeira e riscos químicos	☐	☐	☐

	Baixa (Difícil detecção, detectadas tardiamente ou de forma imprecisa, de modo a impedir a tomada de decisão ágil e eficaz)	Moderada (Detectadas com demora ou com menor precisão, o que pode resultar em análises do maciço não representativas, porém permitem a tomada de decisão em tempo hábil)	Alta (Facilmente detectadas, permitindo resposta imediata que evita impactos adversos)
Procedimentos operacionais desatualizados, falta de padronização, erros de processamento e não conformidade com regulamentações	☐	☐	☐
Indicadores de alertas mal definidos, falta de monitoramento contínuo e análises inadequadas	☐	☐	☐