



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARIANA CAMPOS CASTRO E SILVA

**PROPOSTA DE METODOLOGIAS DE GESTÃO DE RISCO PARA TÚNEIS DE
TRANSFERÊNCIA HÍDRICA A PARTIR DE DADOS DE INSPEÇÃO DE CAMPO**

FORTALEZA

2024

MARIANA CAMPOS CASTRO E SILVA

PROPOSTA DE METODOLOGIAS DE GESTÃO DE RISCO PARA TÚNEIS DE
TRANSFERÊNCIA HÍDRICA A PARTIR DE DADOS DE INSPEÇÃO DE CAMPO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Mariana Vella Silveira
Coorientador: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S581p Silva, Mariana Campos Castro e.
Proposta de metodologias de gestão de risco para túneis de transferência hídrica a partir de dados de inspeção de campo / Mariana Campos Castro e Silva. – 2024.
154 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2024.
Orientação: Profª. Dra. Mariana Vella Silveira.
Coorientação: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto.
1. Metodologias de gestão de risco. 2. Inspeção de campo. 3. Túneis de transferência hídrica. I. Título.
CDD 624.15
-

MARIANA CAMPOS CASTRO E SILVA

PROPOSTA DE METODOLOGIAS DE GESTÃO DE RISCO PARA TÚNEIS DE
TRANSFERÊNCIA HÍDRICA A PARTIR DE DADOS DE INSPEÇÃO DE CAMPO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Mariana Vella Silveira
Coorientador: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto

Aprovada em 28/08/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Mariana Vella Silveira (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Vanda Tereza Costa Malveira (Examinador Externo à Instituição)
Universidade do Vale do Acaraú (UVA)

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço aos meus pais, Daniella e Edinaldo, por serem minha base em todos os momentos de alegrias e tristezas, e por todo o apoio e compreensão. Obrigada por tudo.

Agradeço à minha orientadora, professora Mariana Vella Silveira, que desde 2019 vem me conduzindo nessa desafiadora, porém apaixonante pesquisa, sempre com gentileza e paciência. Obrigada pela parceria não apenas na pesquisa, mas também devo a você boa parte da minha formação acadêmica, principalmente em mecânica dos solos que foi o que despertou meu interesse na Geotecnia, área que escolhi para atuar.

Também agradeço ao professor Silvrano que é meu coorientador neste trabalho, mas vem desde a graduação também contribuindo muito com seu conhecimento e experiência na minha formação. Obrigada por todo apoio, professor.

Agradeço a todos os membros do Grupo de Gerenciamento do Risco Climático para a Segurança Hídrica (GRC), em especial aos professores Francisco de Assis de Souza Filho e Samiria Maria Oliveira da Silva por me receberem no grupo. Também agradeço aos profissionais da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) e Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (SRH) pelo apoio no fornecimento de informações para desenvolvimento desta pesquisa e durante todo o período de trabalho em campo.

Agradeço a todos os profissionais da TPF Engenharia, em especial a Eva, Renata e toda a equipe de Jangada e Abóboras, pela parceria leve todos os dias, mesmo durante momentos desafiadores, e por todos os ensinamentos. Vocês me inspiram, e trabalhar com vocês é muito bom.

Agradeço aos meus colegas de graduação que estão comigo até hoje, aos colegas de mestrado que foram parceiros nas alegrias e tristezas desse período, aos amigos que a vida me trouxe e às pessoas que não estão mais por perto, mas que de alguma forma deixaram algo de bom em mim.

E acima de tudo, agradeço a Deus, pelo conforto e pela força nos momentos que apenas eu e Ele sabemos como foi difícil. Eu não teria conseguido. Dedico esse trabalho a Ele.

“Pois d’Ele, por Ele e para Ele são todas as coisas.” (Romanos 11:36)

RESUMO

No Nordeste Brasileiro, devido às persistentes condições de escassez de água em diversas regiões, torna-se importante a realização de extensos projetos de infraestrutura hídrica que englobam a construção de inúmeros canais, barragens, adutoras e túneis de transferência hídrica. Assegurar o correto funcionamento dessas estruturas passa por diversas medidas de prevenção e controle, e dentre elas destaca-se o monitoramento por meio de inspeções periódicas *in loco*. Atualmente, no Brasil, não existem normas oficiais para a gestão de riscos e inspeções em túneis de transferência hídrica, o que dificulta a identificação, avaliação e mitigação de riscos, afetando a segurança, eficiência e sustentabilidade dessas estruturas, e consequentemente, o acesso à água, visto que são parte integrante das obras que realizam a condução da água para abastecimento. Portanto, este trabalho propõe metodologias de gestão de riscos para túneis de transferência hídrica a partir de dados de inspeção de campo. A pesquisa está estruturada na reunião de quatro artigos que atendem aos objetivos específicos e abordam: aplicação e validação do modelo de *checklist* para inspeção em túneis de transferência hídrica desenvolvido por Silva (2022); proposta de metodologia de decisão para escolha de métodos de análise de risco em obras geotécnicas; apresentação de modelo de matriz de risco para avaliação de risco em túneis de transferência hídrica; apresentação de proposta de método de cálculo do Índice de Segurança para túnel de transferência hídrica; aplicação das ferramentas propostas no túnel Boa Vista, localizado no município de Crato, no estado do Ceará, e proposta de manual com orientações para realização de inspeção em túneis de transferência hídrica. No geral, esta dissertação fornece ferramentas robustas, orientações e discussões que contribuem para a compreensão e melhoria dos processos de gestão de risco em túneis de transferência hídrica. Ao apresentar todas essas ferramentas, a dissertação aumenta a capacidade de conceber e implementar um sistema de gestão de risco mais homogêneo e efetivo para os túneis de transferência hídrica, contribuindo assim para o monitoramento e a manutenção dessas estruturas e consequentemente para o fortalecimento da segurança hídrica.

Palavras-chave: metodologias de gestão de risco; inspeção de campo; túneis de transferência hídrica.

ABSTRACT

In the Brazilian Northeast, due to the persistent conditions of water scarcity in various regions, it becomes important to undertake extensive water infrastructure projects that encompass the construction of numerous channels, dams, pipelines, and water transfer tunnels. Ensuring the proper functioning of these structures involves various prevention and control measures, among which the monitoring through periodic on-site inspections stands out. Currently, in Brazil, there are no official standards for risk management and inspections of water transfer tunnels, which hinders the identification, assessment, and mitigation of risks, affecting the safety, efficiency, and sustainability of these structures, and consequently, access to water, since they are an integral part of the works that conduct water for supply. Therefore, this work proposes risk management methodologies for water transfer tunnels based on field inspection data. The research is structured around four articles that meet specific objectives and address: the application and validation of the checklist model for inspection in water transfer tunnels developed by Silva (2022); the proposal of a decision-making methodology for choosing risk analysis methods in geotechnical works; the presentation of a risk matrix model for risk assessment in water transfer tunnels; the presentation of a proposed method for calculating the Quality Index for water transfer tunnels; the application of the proposed tools in the Boa Vista tunnel, located in the municipality of Crato, in the state of Ceará; and the proposal of a manual with guidelines for conducting inspections in water transfer tunnels. Overall, this dissertation provides robust tools, guidelines, and discussions that contribute to the understanding and improvement of risk management processes in water transfer tunnels. By presenting all these tools, the dissertation enhances the ability to conceive and implement a more homogeneous and effective risk management system for water transfer tunnels, thus contributing to the monitoring and maintenance of these structures and consequently to the strengthening of water security.

Keywords: risk management methodologies; field inspection; water transfer tunnels.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Mapa cognitivo com a estrutura do trabalho.....	21
Figura 2.1 – Metodologia adotada no trabalho.....	25
Figura 2.2 – Localização do túnel Boa Vista.....	26
Figura 2.3 – Método construtivo da seção 5A pertencente ao túnel Boa Vista.....	27
Figura 2.4 – Método construtivo da seção 4C pertencente ao túnel Boa Vista.....	27
Figura 2.5 – Túnel Boa Vista. (a) Emboque; (b) Desemboque.	28
Figura 2.6 – Metodologia de inspeção – túnel Boa Vista.....	28
Figura 2.7 – Inspeção no entorno do túnel Boa Vista.	30
Figura 2.8 – Definições dos parâmetros de classificação.....	31
Figura 2.9 – Definições das classificações do <i>checklist</i>	33
Figura 2.10 – Registros fotográficos realizados na inspeção: (a) Manchas de umidade/infiltrações; (b) Eflorescências.	35
Figura 2.11 – Registros fotográficos realizados na inspeção: (a) Presença de macrófitas e coloração inapropriada; (b) Presença de objeto estranho.	36
Figura 2.12 – Registros fotográficos realizados na inspeção: (a) Má conservação de placas de identificação; (b) Equipamento danificado e desprotegido; (c) Presença de vegetação nos locais dos instrumentos.....	38
Figura 2.13 – Erosão no talude próximo ao emboque do túnel.....	40
Figura 2.14 – Registros fotográficos realizados na inspeção: (a) Formação de estalactites; (b) Presença de teias de aranha.	40
Figura 2.15 – Trecho do <i>checklist</i> automatizado – Classificação de situação.....	43
Figura 2.16 – Trecho do <i>checklist</i> automatizado – Classificação de magnitude.....	43
Figura 2.17 – Trecho do <i>checklist</i> automatizado – Classificação de nível de perigo.....	44
Figura 3.1 – Processo de gestão de riscos.	48
Figura 3.2 – Processo de gestão de riscos.	48
Figura 3.3 – Estrutura básica de uma Árvore de Eventos.	51
Figura 3.4 – Exemplo de árvore de eventos para o perigo de abalo sísmico.....	52
Figura 3.5 – Níveis hierárquicos de uma Árvore de Falhas.	53
Figura 3.6 – Exemplo de aplicação de uma árvore de falha.....	54
Figura 3.7 – Diagrama genérico de análise <i>Bow-tie</i>	55
Figura 3.8 – Diagrama <i>Bow-tie</i> para demora na instalação de suporte para a rocha.....	56
Figura 3.9 – Abordagem geral da matriz de riscos.....	57
Figura 3.10 – Matriz de Riscos.....	59
Figura 3.11 – Significado das classes de probabilidades.....	59
Figura 3.12 – Significado das classes de consequências.....	60
Figura 3.13 – Exemplo de Matriz de Risco.	61
Figura 3.14 – Escala para classificação GUT.....	62
Figura 3.15 – Classificação GUT para barragem de rejeitos.....	63
Figura 3.16 – Exemplo de Árvore de Decisão.....	67
Figura 3.17 – Árvore de Decisão proposta.	73
Figura 3.18 – Árvore de Decisão proposta – métodos quantitativos.....	73
Figura 3.19 – Árvore de Decisão proposta – métodos qualitativos.....	74
Figura 3.20 – Árvore de Decisão proposta – métodos semiquantitativos.	74
Figura 4.1 – Metodologia do estudo.....	80
Figura 4.2 – Classificações de situação, magnitude e nível de perigo.	80
Figura 4.3 – Abordagem geral da matriz de riscos.....	82
Figura 4.4 – Exemplo de matriz de riscos para túneis.....	83

Figura 4.5 – Localização do túnel Boa Vista.....	86
Figura 4.6 – Método construtivo da seção 5A pertencente ao túnel Boa Vista.....	87
Figura 4.7 – Método construtivo da seção 4C pertencente ao túnel Boa Vista.....	87
Figura 4.8 – Entorno e emboque do túnel Boa Vista.....	88
Figura 4.9 – Estruturação dos resultados obtidos para a probabilidade de ocorrência (P).....	91
Figura 4.10 – Resultados obtidos para P a partir das combinações possíveis entre S e M.	92
Figura 4.11 – Exemplo de uma matriz de riscos.	95
Figura 4.12 – Classificações de situação, magnitude e nível de perigo.	96
Figura 4.13 – Matriz de risco para o túnel Boa Vista.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação das anomalias observadas – Infraestrutura.	34
Tabela 2.2 - Classificação das anomalias observadas – Revestimento do túnel.	35
Tabela 2.3 - Classificação das anomalias observadas – Água.	36
Tabela 2.4 - Classificação das anomalias observadas – Sistema de drenagem.	37
Tabela 2.5 - Classificação das anomalias observadas – Instrumentação.	38
Tabela 2.6 - Classificação das anomalias observadas – Segurança do trabalho.	39
Tabela 2.7 - Classificação da seção de problemas adversos.	39
Tabela 3.1 - Classificação de prioridade de acordo com o produto entre os valores de gravidade, urgência e tendência.	63
Tabela 3.2 - Comparação entre os métodos.	72
Tabela 4.1 - Classificação de túneis conforme estado de conservação.	77
Tabela 4.2 - Pontuações dos parâmetros de situação (S).	89
Tabela 4.3 - Pontuações dos parâmetros de magnitude (M).	90
Tabela 4.4 - Pontuações dos parâmetros de nível de perigo (NP).	90
Tabela 4.5 - Expressões avaliadas para relação entre S, M e P.	91
Tabela 4.6 - Categorias de probabilidade de ocorrência.	92
Tabela 4.7 - Categorias de consequência.	93
Tabela 4.8 - Resultados da integração de classificações – túnel Boa Vista.	94
Tabela 4.9 - Determinação do Índice de Segurança (IS) e descritor.	97
Tabela 4.10 - Determinação de P_b para o túnel Boa Vista.	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
ACI	American Concrete Institute
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CAC	Cinturão das Águas do Ceará
CNPGB	Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EGR	Empresa Gaúcha de Rodovias
EPI	Equipamentos de Proteção Individual
ETA	Event Trees Analysis
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FMECA	Failure Mode, Effects and Criticality Analysis
GUT	Gravidade, urgência e tendência
ISO	International Organization for Standardization
IEC	International Electrotechnical Commission
IS	Índice de Segurança
ITA	International Tunneling and Underground Space Association
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MAEC	Método de Avaliação do Estado de Conservação de Imóveis
NBR	Norma Brasileira
PAE	Planos de Ação e Emergência
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
SAE	Society of Automotive Engineers
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará
TBM	Tunnel Boring Machine
UFC	Universidade Federal do Ceará
UNSW	University of New South Wales
USACE	US Army Corps of Engineers
USBR	US Bureau of Reclamation

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Objetivos	19
1.1.1	<i>Objetivo geral.....</i>	19
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	19
1.2	Estrutura do trabalho.....	19
2	VALIDAÇÃO DE <i>CHECKLIST</i> PARA INSPEÇÃO EM TÚNEL DE TRANSFERÊNCIA HÍDRICA: ESTUDO DE CASO NO TÚNEL BOA VISTA, NO CEARÁ	22
2.1	Introdução	22
2.2	Metodologia	24
2.2.1	<i>Túnel Boa Vista</i>	25
2.2.2	<i>Checklist a ser aplicado e validado</i>	28
2.2.3	<i>Inspeção do túnel.....</i>	28
2.2.4	<i>Apresentação das anomalias observadas no túnel</i>	30
2.2.5	<i>Validação e proposta de checklist atualizada</i>	31
2.2.6	<i>Automatização do checklist atualizado</i>	32
2.3	Resultados e discussões.....	33
2.3.1	<i>Anomalias observadas no túnel Boa Vista.....</i>	33
2.3.1.1	<i>Infraestrutura.....</i>	33
2.3.1.2	<i>Revestimento do túnel.....</i>	34
2.3.1.3	<i>Água.....</i>	35
2.3.1.4	<i>Sistema de drenagem</i>	37
2.3.1.5	<i>Instrumentação</i>	37
2.3.1.6	<i>Segurança do trabalho</i>	39
2.3.1.7	<i>Problemas adversos.....</i>	39
2.3.2	<i>Validação do checklist e elaboração de uma nova proposta de checklist.....</i>	41
2.3.2.1	<i>Exibir a definição das classificações nas demais páginas</i>	41

2.3.2.2	<i>Dividir as categorias de classificação e adicionar títulos explicativos</i>	41
2.3.2.3	<i>Inserir campo para tipo de inspeção</i>	41
2.3.2.4	<i>Substituir o termo “meteorização”</i>	42
2.3.2.5	<i>Readequar o item “Deformações/irregularidades”</i>	42
2.3.2.6	<i>Substituir o termo “equipamentos”</i>	42
2.3.2.7	<i>Substituir o termo “problemas”</i>	42
2.3.3	<i>Proposta de checklist atualizado</i>	43
2.3.4	<i>Checklist automatizado</i>	43
2.4	Conclusões	44
3	ELABORAÇÃO DE ÁRVORE DE DECISÃO COMO FERRAMENTA DE AUXÍLIO PARA ESCOLHA DE MÉTODO DE ANÁLISE DE RISCOS NO CONTEXTO DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS	46
3.1	Introdução	46
3.2	Metodologia	47
3.2.1	<i>O processo de gestão de riscos</i>	48
3.2.2	<i>Métodos de análise de riscos</i>	50
3.2.2.1	<i>Árvore de Eventos</i>	50
3.2.2.2	<i>Árvore de Falhas</i>	52
3.2.2.3	<i>Bow-tie</i>	54
3.2.2.4	<i>Matriz de Risco</i>	56
3.2.2.5	<i>Matriz GUT</i>	62
3.2.2.6	<i>Método da Performance Histórica</i>	64
3.2.2.7	<i>FMEA – Failure Mode and Effects Analysis</i>	64
3.2.3	<i>Elaboração da Árvore de Decisão</i>	66
3.2.4	<i>Comparação entre os métodos</i>	68
3.2.4.1	<i>Tipo de análise</i>	69
3.2.4.2	<i>Nível de detalhamento</i>	69
3.2.4.3	<i>Experiência necessária</i>	69

3.2.4.4	<i>Adaptabilidade</i>	70
3.2.4.5	<i>Tempo de implementação</i>	70
3.3	Resultados e discussão	71
3.3.1	<i>Tabela de comparação dos métodos</i>	71
3.3.2	<i>Árvore de Decisão</i>	73
3.4	Conclusões	75
4	PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE SEGURANÇA DE TÚNEIS DE TRANSFERÊNCIA HÍDRICA	76
4.1	Introdução	76
4.2	Metodologia	79
4.2.1	<i>Integração entre as classificações do checklist e da Matriz de Risco</i>	80
4.2.2	<i>Montagem e automatização da matriz de risco</i>	81
4.2.3	<i>Desenvolvimento do Índice de Segurança</i>	84
4.2.4	<i>Aplicação no túnel Boa Vista</i>	85
4.3	Resultados e discussão	88
4.3.1	<i>Classificações integradas</i>	89
4.3.2	<i>Determinação do Índice de Segurança</i>	95
4.3.3	<i>Aplicação no túnel Boa Vista</i>	98
4.4	Conclusões	99
5	PROPOSTA DE MANUAL DE ORIENTAÇÃO PARA INSPEÇÃO EM TÚNEIS DE TRANSFERÊNCIA HÍDRICA	101
5.1	Introdução	101
5.2	Metodologia	102
5.3	Termos e definições	104
5.4	Metodologia de inspeção	105
5.4.1	<i>Inspeção cadastral</i>	105
5.4.1.1	<i>Roteiro básico para inspeção cadastral</i>	106
5.4.2	<i>Inspeção rotineira</i>	106

5.4.2.1 Roteiro básico para inspeção rotineira	107
5.4.3 Inspeção especial	107
5.4.3.1 Roteiro básico para inspeção especial	107
5.4.4 Inspeção extraordinária	108
5.5 Equipamentos para inspeção	108
5.6 Inspeção por ensaios	109
5.6.1 Revestimento de concreto.....	109
5.6.1.1 Ultrassom.....	109
5.6.1.2 Esclerometria.....	109
5.6.1.3 Pacometria.....	110
5.6.1.4 Potencial de corrosão da armadura.....	110
5.6.1.5 Determinação do Carbonatação	110
5.6.1.6 Permeabilidade do concreto.....	111
5.6.2 Instrumentação	111
5.6.3 Qualidade da água.....	111
5.7 Segurança.....	112
5.8 Qualificação técnica.....	113
5.9 Relatório de inspeção.....	113
5.10 Orientação para checklist de inspeção.....	114
5.10.1 Legenda do Checklist.....	114
5.10.2 Situação.....	115
5.10.3 Magnitude	115
5.10.4 Nível de perigo	116
5.11 Descrição das anomalias no revestimento do túnel	116
5.11.1 Desplacamento.....	116
5.11.2 Trincas, fissuras e rachaduras.....	117
5.11.3 Corrosão nos tirantes e/ou chumbadores	119

<i>5.11.4 Ferragem exposta</i>	<i>123</i>
<i>5.11.5 Deformações/irregularidades localizadas e/ou excessivas.....</i>	<i>123</i>
<i>5.11.6 Erosões nas paredes e/ou piso.....</i>	<i>124</i>
<i>5.11.7 Manchas de umidade/infiltrações</i>	<i>125</i>
<i>5.11.8 Presença de fungos e/ou outros micro-organismos.....</i>	<i>125</i>
<i>5.11.9 Eflorescências</i>	<i>126</i>
<i>5.11.10 Presença de choco.....</i>	<i>127</i>
<i>5.11.11 Deficiência no elemento de vedação das juntas de dilatação.....</i>	<i>128</i>
5.12 Conclusões	129
6 DISCUSSÃO GERAL E CONCLUSÃO	131
REFERÊNCIAS	133
APÊNDICE A – PROPOSTA DE <i>CHECKLIST</i> ATUALIZADO (CAPÍTULO 2).....	144

1. INTRODUÇÃO

As incertezas associadas às estruturas geotécnicas vêm sendo analisadas de forma recorrente na pesquisa científica. Isso ocorre pois os riscos são inerentes a toda e qualquer atividade que envolva materiais geológicos, visto a sua variabilidade espacial, a incerteza da estratigrafia, a possibilidade da presença de camadas de solo de baixa resistência, dentre outras características. Sendo assim, tem-se a necessidade de desenvolvimento de estudos que avaliem os riscos e busquem metodologias de previsão e mitigação ou resolução total das possíveis eventualidades que podem comprometer a segurança e a integridade dessas estruturas. Além disso, falhas ou colapsos em obras geotécnicas podem apresentar consequências devastadoras no que diz respeito à perda de vidas humanas e impactos ambientais, como também em termos financeiros. Ademais, quando se trata de estruturas que fazem parte de uma rede de abastecimento de água, a ocorrência de falhas pode ocasionar a perda do fornecimento de água para milhares e até milhões de pessoas (ABNT NBR 6122, 2019; Chwała *et al.*, 2023).

No Nordeste Brasileiro, devido às persistentes condições de escassez de água em diversas regiões, torna-se importante a realização de importantes projetos de infraestrutura hídrica. Estes têm como objetivo primordial a captação de água em áreas onde esse recurso é relativamente abundante e sua distribuição estratégica pelo território nordestino. Esses projetos englobam a construção de canais, barragens, adutoras e túneis de transferência hídrica que formam uma intrincada rede que possibilita o encaminhamento desse recurso, contribuindo significativamente para o abastecimento de água, a irrigação e outros usos essenciais em toda a região (Brasil, 2021; Brasil, 2016).

Assegurar o correto funcionamento dessas estruturas passa por diversas medidas de prevenção e controle, e dentre elas destaca-se o monitoramento por meio de inspeções periódicas *in loco*, a partir das quais é possível verificar alterações no seu estado de conservação e as condições do seu entorno, aplicando-se posteriormente um plano de ação de acordo com as anomalias constatadas.

Dessa forma, a Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, a qual foi alterada pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e estabeleceu que o órgão fiscalizador seria responsável pelas inspeções de segurança nessas estruturas. Sendo assim, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) elaborou o Manual de Segurança e Inspeção em Barragens, que se trata de um documento orientativo acerca do planejamento e execução de

inspeções de segurança em barragens, além de apresentar modelos de fichas para auxílio na inspeção (Silva, 2022; ANA, 2016).

Ademais, a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) elaborou *checklists* para inspeção em canais, adutoras e sifões, que são listas de verificação, orientando o profissional que está realizando a inspeção acerca de aspectos que devem ser verificados em campo, como questões relacionadas com a infraestrutura operacional e conservação estrutural. Além disso, as anomalias identificadas são classificadas quanto à situação, intensidade e nível de perigo (COGERH, 2018).

Os túneis de transferência hídrica, por sua vez, são estruturas lineares escavadas sob a superfície da terra, concebidas para direcionar o fluxo de água com variados propósitos. Isso inclui o suprimento de água para áreas urbanas, a alteração de rotas de rios e o fornecimento de recursos hídricos necessários à produção de energia. Portanto, estas obras geotécnicas desempenham um papel fundamental no acesso aos recursos hídricos da região nordeste brasileira, possibilitando o enfrentamento das complexas demandas de água em um cenário desafiador. Destaca-se que no primeiro trecho do Cinturão das Águas do Ceará (CAC), uma iniciativa projetada para coletar água do Projeto de Integração do São Francisco (PISF) e distribuí-la em todo o estado, existem nove túneis de transferência hídrica, abrangendo aproximadamente seis quilômetros de extensão (Guidicini *et al.*, 2022; VBA, 2015).

Diferentemente do que foi exposto anteriormente para outras estruturas, atualmente no Brasil não existem normativas oficiais que orientem acerca de metodologias para gerir os riscos aos quais os túneis de transferência hídrica estão submetidos, tampouco voltadas para a realização de inspeções, o que permite aos responsáveis a adoção de práticas a seu critério, podendo aumentar a probabilidade de falhas não identificadas e potencialmente comprometer a integridade estrutural e a segurança hídrica. A ausência de diretrizes e regulamentações específicas para túneis de transferência hídrica pode gerar desafios na identificação, avaliação e mitigação de riscos, o que, por sua vez, pode afetar a segurança, eficiência e sustentabilidade dessas estruturas e, conseqüentemente, prejudicar o acesso a um bem vital, a água. Assim sendo, seria imperativo que se estabelecessem orientações padronizadas específicas para os túneis de transferência hídrica, a fim de garantir a gestão eficaz dos riscos associados a esse tipo de obra.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

O principal objetivo desse trabalho é propor metodologias de gestão de riscos para túneis de transferência hídrica a partir de dados de inspeção de campo.

1.1.2 *Objetivos específicos*

Adicionalmente, para atingir o objetivo principal, foram definidos objetivos específicos atendidos através de quatro artigos que integram esta dissertação. O estudo tem como objetivos específicos:

- a) Aplicar e validar modelo de *checklist* para inspeção em túneis de transferência hídrica;
- b) Propor metodologia de decisão para escolha de métodos de análise de risco em obras geotécnicas;
- c) Apresentar modelo de matriz de risco para avaliação de risco em túneis de transferência hídrica;
- d) Apresentar proposta de método de cálculo do Índice de Segurança para túnel de transferência hídrica;
- e) Aplicar ferramentas utilizadas em um túnel de transferência hídrica localizado no estado do Ceará, realizando a validação da metodologia.
- f) Propor manual com orientações para realização de inspeção em túneis de transferência hídrica;

1.2 Estrutura do trabalho

A estrutura deste trabalho baseia-se na apresentação de quatro artigos distribuídos em quatro capítulos, relacionados com a inspeção e gestão de riscos em túneis de transferência hídrica. O primeiro artigo, no capítulo 2, discorre sobre a validação e avaliação do *checklist* para inspeção em túneis de transferência hídrica desenvolvido no trabalho de Silva (2022) por meio da inspeção no túnel Boa Vista, no Ceará. Através da inspeção foi possível observar pontos de melhoria no documento, sendo então apresentada uma proposta de *checklist* atualizado e automatizado com auxílio do *software Microsoft Excel*. Também discorre-se sobre as anomalias observadas no túnel,

juntamente com as classificações de situação, magnitude e nível de perigo atribuídas por quatro profissionais que realizaram a inspeção.

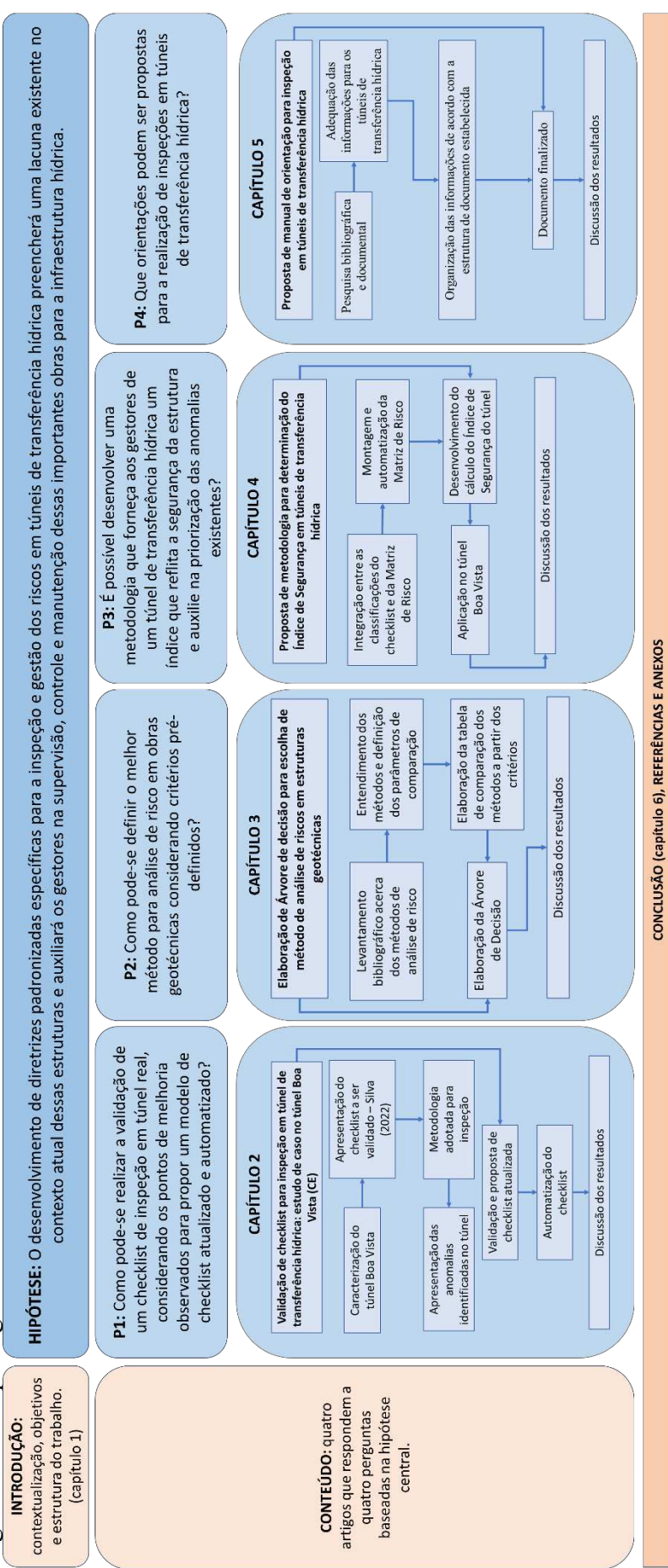
O segundo artigo, no capítulo 3, apresenta a elaboração de uma Árvore de Decisão como ferramenta de auxílio na escolha de método de análise de risco em estruturas geotécnicas. Foi realizado amplo levantamento bibliográfico dos métodos de análise de risco que, segundo a literatura, já foram aplicados em estruturas geotécnicas. Com base no levantamento elaborou-se uma tabela de comparação com critérios pré-definidos que fundamentou a elaboração da árvore de decisão, a qual se trata de uma contribuição significativa em uma fase crítica do processo de gestão de riscos, fornecendo uma ferramenta útil, visual e que apresenta uma estrutura clara e sistemática.

No terceiro artigo (capítulo 4), pode-se observar uma proposta de metodologia para determinação do Índice de Segurança de túneis de transferência hídrica, um índice que indica o estado de conservação e a usabilidade do túnel, além de auxiliar na priorização das anomalias com relação às medidas de intervenção. O método baseou-se no *checklist* de Silva (2022) atualizado e validado através de inspeção no túnel Boa Vista e na interligação desse *checklist* com uma matriz de risco automatizada com o auxílio do *Microsoft Excel*. A metodologia proposta foi aplicada ao túnel Boa Vista e pode-se observar que se trata de uma abordagem que pode contribuir para a segurança hídrica, colaborando para que os túneis sejam mantidos em condições adequadas de operação.

O quarto artigo, no capítulo 5, descreve uma proposta de manual de orientação para inspeções em túneis de transferência hídrica como forma de preencher uma lacuna significativa em relação aos túneis de transferência hídrica, os quais não possuem manuais específicos de orientação como os disponíveis para outras estruturas como barragens. Adotou-se uma abordagem metodológica baseada na adaptação de diretrizes existentes, como o Guia de Inspeções de Segurança de Barragens da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e na revisão ampla de literatura técnica nacional e internacional. O manual compilou um conjunto de recomendações que visa não apenas orientar inspeções futuras, mas também promover a segurança e a manutenção eficiente dessas estruturas.

Por fim são apresentados a conclusão geral do trabalho, as referências e os anexos. Para auxiliar na compreensão da estrutura do trabalho, e para melhor visualização de como serão respondidas as hipóteses e questões de pesquisa, o mapa cognitivo apresentado na Figura 1.1 fornece um resumo do trabalho.

Figura 1.1 – Mapa cognitivo com a estrutura do trabalho.



Fonte: o Autor, 2024.

2 VALIDAÇÃO DE *CHECKLIST* PARA INSPEÇÃO EM TÚNEL DE TRANSFERÊNCIA HÍDRICA: ESTUDO DE CASO NO TÚNEL BOA VISTA, NO CEARÁ

2.1 Introdução

Inspeção se refere à realização de uma visita à uma construção ou estrutura em operação que se encontra debilitada ou não, onde será efetuada análise das manifestações patológicas que podem estar ocorrendo e realizar um levantamento de informações que possam ser base para tomadas de decisão. Através da frequência de inspeções e da magnitude das anomalias encontradas conclui-se qual medida preventiva ou corretiva a ser providenciada. Portanto, a inspeção é o procedimento inicial para a elaboração de um diagnóstico (Bolina *et al.* 2019).

Desde a concepção até a operação, as inspeções desempenham um papel vital em todas as fases do ciclo de vida das infraestruturas civis. Estruturas como pontes, viadutos, barragens e túneis são submetidas a inspeções regulares para detectar sinais de deterioração, desgaste ou danos que possam comprometer sua integridade estrutural (Bolina *et al.* 2019; Fonte, 2011; DNIT, 2004).

O monitoramento das estruturas por meio de inspeções é geralmente complementado por diversas ferramentas, entre as quais o *checklist* se destaca como uma das mais importantes para garantir a eficácia da inspeção, consistindo em um documento que contém listas detalhadas dos pontos a serem verificados durante a inspeção (Silva, 2022).

Tratando-se de barragens, atualmente existe uma ampla gama de bibliografia existente relacionada às inspeções nesse tipo de estrutura, sendo informações que podem servir como base para pesquisas em obras onde ainda não se tem procedimentos de inspeção bem definidos, como os túneis de transferência hídrica (ANA, 2016).

A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, chamada de Lei de Segurança de Barragens, estabeleceu, através do Manual de Segurança e Inspeção em Barragens (ANA, 2016; Brasil, 2012), a utilização dessas listas de verificação para orientar o processo de inspeção visual. No Manual da ANA é apresentado um modelo de *checklist* para inspeção regular, onde inicia-se com o preenchimento das informações gerais da barragem como seu nome, coordenadas, nome do profissional responsável pela vistoria.

O Manual de Inspeção de Obras de Arte elaborado pela Empresa Gaúcha de Rodovias (EGR) em 2018 apresenta as diretrizes técnicas para inspeção de obras de arte (pontes, pontilhões, viadutos e passarelas com estruturas em concreto armado e protendido, aço ou mista). Neste documento são apresentadas as fichas de inspeção para esse tipo de estruturas, de acordo com o tipo de inspeção que se está realizando (cadastral, rotineira e especial, de acordo com o documento). Destaca-se que o documento da EGR se baseia na norma ABNT NBR 9452 de 2016, a qual trata do procedimento para inspeção em pontes, viadutos e passarelas.

No trabalho de Fonte (2011) foi elaborada uma proposta de sistema de inspeção e manutenção dos túneis rodoviários da cidade do Recife (PE) que consistia em uma planilha apropriada para as inspeções e diagnósticos produzidos por engenheiros qualificados. O autor apresentou um modelo de ficha cadastral composta por sete campos para preenchimento, baseados em inspeções realizadas em três túneis rodoviários existentes na cidade do Recife (Túnel Prefeito Augusto Lucena, Túnel Chico Science e Túnel do Pina).

Os túneis de transferência hídrica desempenham um papel crucial no transporte de água dos pontos de captação até os de fornecimento, e os riscos em obras subterrâneas são significativos, pois envolvem materiais geológicos que, apesar de investigações detalhadas em campo e em laboratório, podem ainda apresentar ocorrências imprevistas durante a execução da obra. Portanto, estabelecer procedimentos de monitoramento para essas estruturas é essencial para garantir a segurança hídrica das populações atendidas por esses sistemas de abastecimento. Nesse contexto, incluir inspeções regulares no monitoramento é fundamental para prevenir e resolver problemas nos túneis, evitando interrupções no fornecimento de água (Coelho, 2014; Silva, 2022).

Mesmo tendo essa importância, ainda não tinha sido encontrado na literatura um *checklist* para a inspeção nessas estruturas. No trabalho de Silva (2022) foi desenvolvido um modelo de *checklist* para inspeções em túneis de transferência hídrica, o qual foi criado a partir de levantamentos bibliográficos sobre essas estruturas, análises de acidentes ocorridos, e revisão de *checklists* já existentes para inspeção desse tipo de estrutura. O desenvolvimento do *checklist* seguiu principalmente os modelos estabelecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA) e pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). Entretanto, o *checklist* proposto por Silva (2022) não foi validado por meio de aplicação prática em um túnel existente.

Tendo em vista essas informações, este capítulo tem como objetivo contribuir para a aplicação e validação do *checklist* desenvolvido por Silva (2022), por meio de uma inspeção no túnel de transferência hídrica Boa Vista, localizado no estado do Ceará, Brasil. Além de avaliar e validar o *checklist*, também foi possível realizar uma análise das anomalias verificadas no túnel utilizando essa ferramenta.

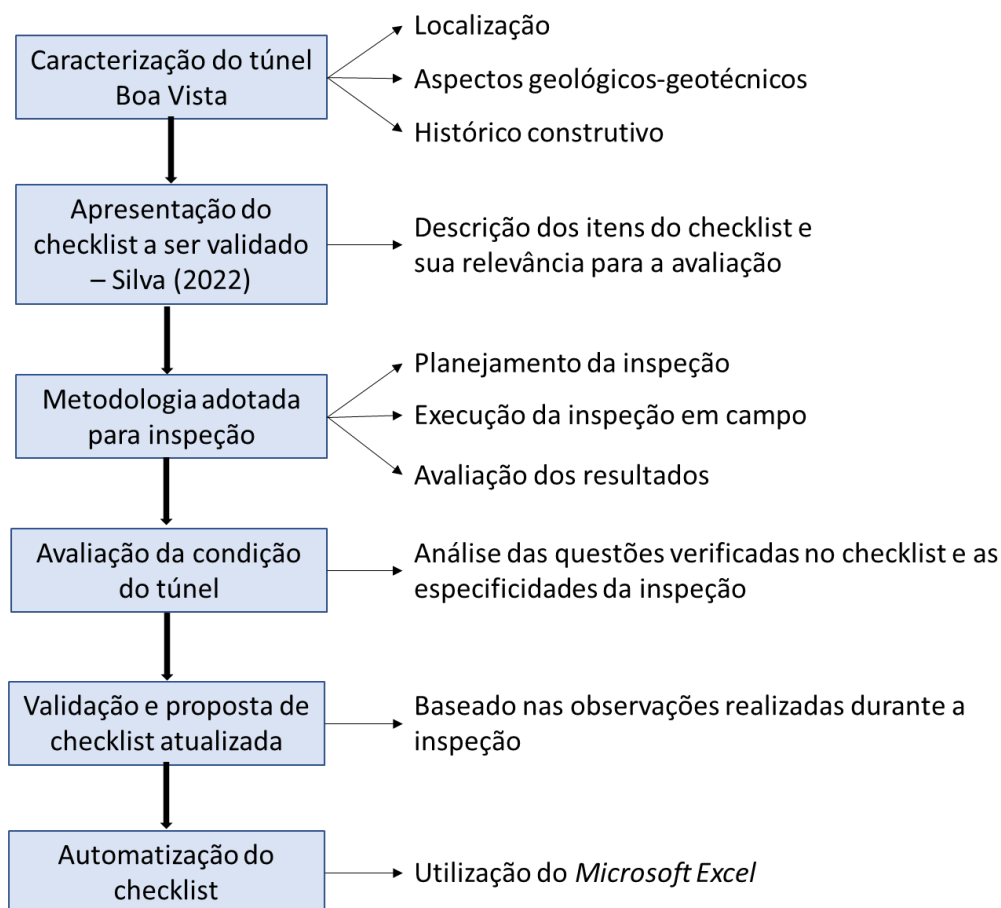
2.2 Metodologia

A metodologia adotada no trabalho seguiu uma sequência de etapas para garantir uma análise abrangente (Figura 2.1). A primeira etapa envolveu a caracterização detalhada do túnel de transferência hídrica Boa Vista, localizado no estado do Ceará, Brasil. Esta fase incluiu a coleta de informações sobre a estrutura, como sua localização, aspectos geológico-geotécnicos e seu histórico construtivo.

Na segunda etapa, foi realizada a apresentação do *checklist* desenvolvido por Silva (2022) que foi utilizado para a inspeção. Esta apresentação incluiu uma descrição dos itens do *checklist* e sua relevância para a avaliação das condições do túnel. A terceira etapa detalhou a metodologia adotada para a inspeção do túnel. Foram descritas as técnicas e ferramentas utilizadas durante a inspeção, os critérios de avaliação e os procedimentos seguidos para garantir a precisão e a consistência dos dados coletados.

Na quarta etapa, foi realizada a avaliação da condição do túnel com base no *checklist* utilizado durante a inspeção. Foram analisadas as questões verificadas através do *checklist* e as especificidades ocorridas durante a inspeção. Em seguida, foi feita a validação do *checklist* de Silva (2022) à luz das observações realizadas durante a inspeção. Com base nos resultados obtidos, foi proposta uma versão atualizada do *checklist*, incorporando melhorias e ajustes necessários para aumentar sua eficácia em futuras inspeções, essa versão foi então automatizada com auxílio do software *Microsoft Excel*.

Figura 2.1 – Metodologia adotada no trabalho.

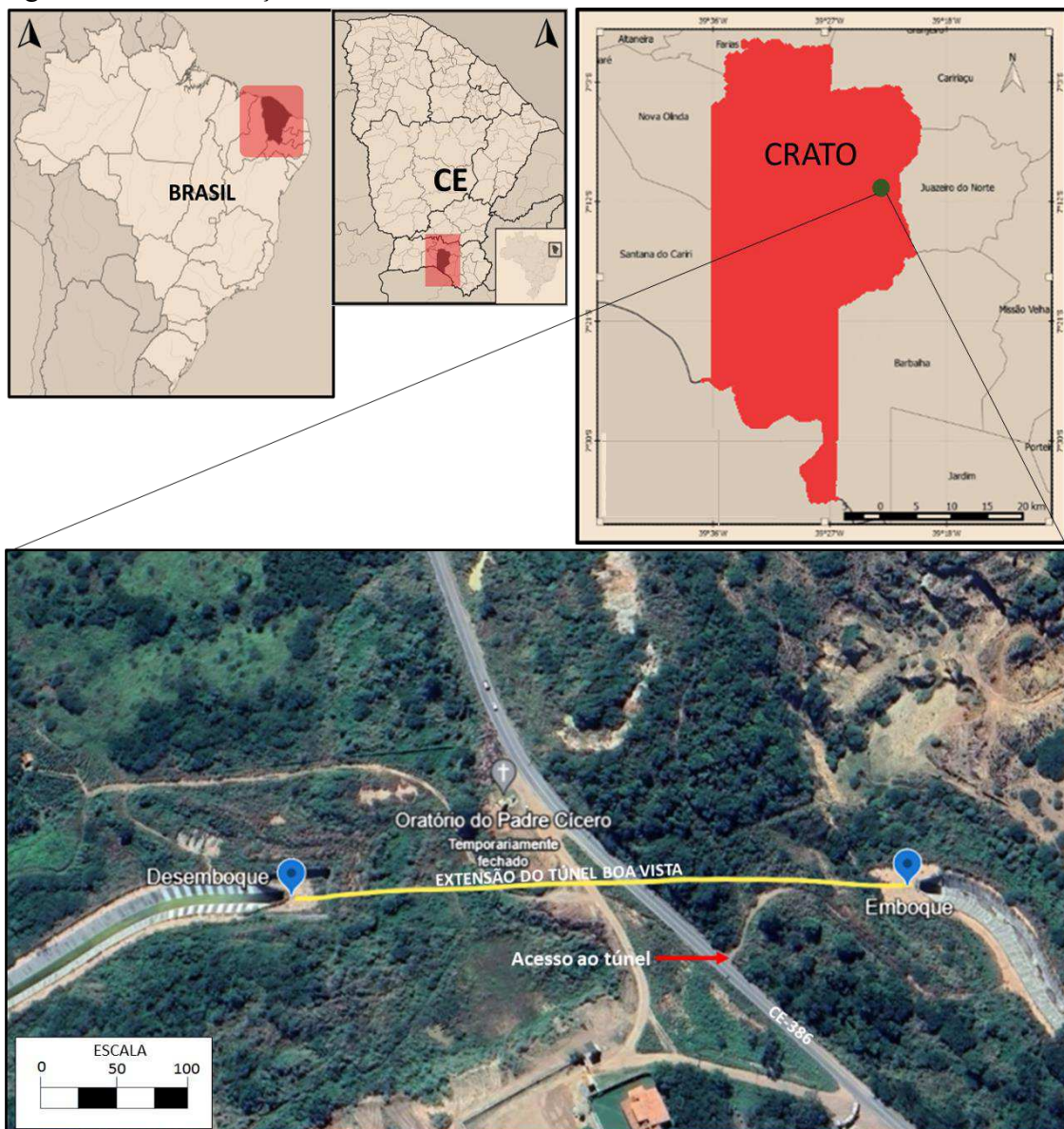


Fonte: o Autor, 2024.

2.2.1 Túnel Boa Vista

O túnel Boa Vista está localizado a poucos quilômetros ao oeste de Crato, município do Ceará, e é 1 dos 9 túneis pertencentes ao Cinturão das Águas do Ceará, realizando o trabalho de conduzir a água do Rio São Francisco ao Ceará. O seu acesso é realizado através da rodovia CE-386, na região do bairro Bela Vista, próximo a indústrias de produção de materiais para construção civil (Google Earth, 2024). Na Figura 2.2 pode-se observar a localização do túnel.

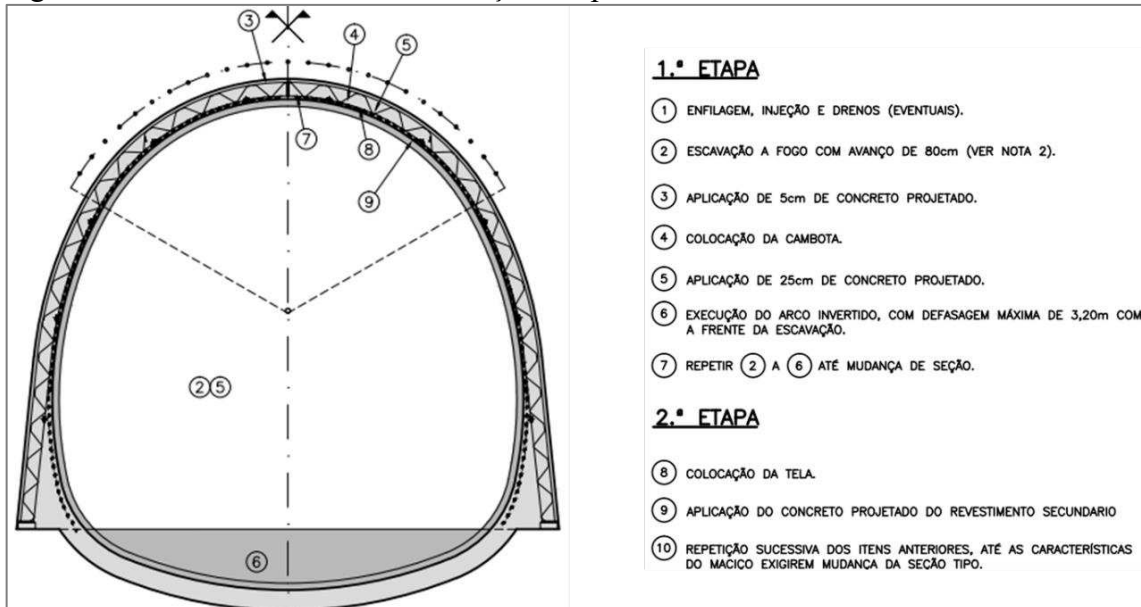
Figura 2.2 – Localização do túnel Boa Vista.



Fonte: adaptado de Oliveira Júnior et al. (2019); Google Earth (2024).

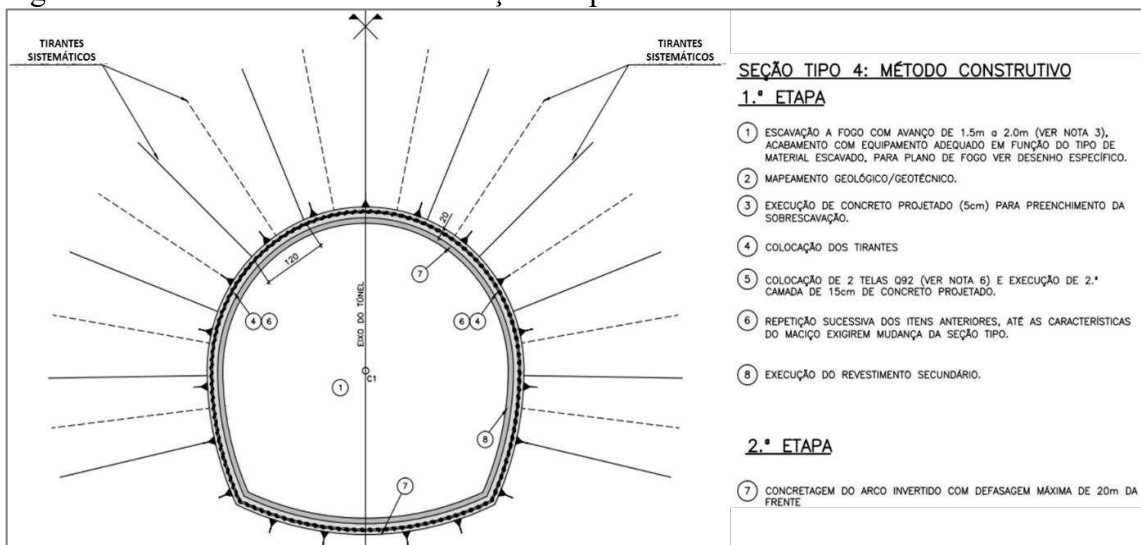
O túnel possui aproximadamente 336 metros de extensão e está localizado na borda da bacia sedimentar da Chapada do Araripe. A classificação geomecânica (Bieniawski, 1976 *apud* Maciel Filho e Nummer, 2014) da rocha presente no emboque do túnel Boa Vista foi classe V, tendo como método construtivo a seção tipo 5A (Figura 2.3). Enquanto seu desemboque apresentou rocha de classe IV (Bieniawski, 1976 *apud* Maciel Filho e Nummer, 2014) com método construtivo de acordo com a seção 4C (Figura 2.4) (VBA, 2013).

Figura 2.3 – Método construtivo da seção 5A pertencente ao túnel Boa Vista.



Fonte: adaptado de VBA, 2013.

Figura 2.4 – Método construtivo da seção 4C pertencente ao túnel Boa Vista.



Fonte: adaptado de VBA, 2013.

A Figura 2.5 (a) exhibe o emboque do túnel e a Figura 2.5 (b) o seu desemboque.

Figura 2.5 – Túnel Boa Vista. (a) Emboque; (b) Desemboque.



Fonte: Instituto Agropolos, 2020.

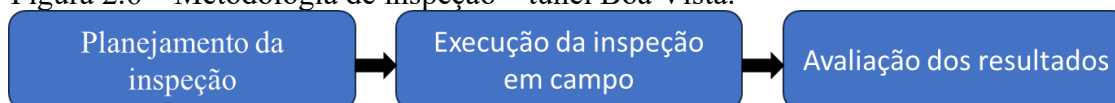
2.2.2 Checklist a ser aplicado e validado

O *checklist* proposto por Silva (2022) consistiu em um documento elaborado com base nos exemplos de *checklist* elaborados pela ANA e COGERH, que consistiu em uma planilha que apresentava 9 seções: Identificação; Legenda dos atributos; Infraestrutura; Revestimento do túnel; Água; Sistema de drenagem; Instrumentação; Segurança no trabalho e Problemas Adversos. Para cada uma das anomalias propostas no documento foram disponibilizados campos de marcação dos atributos relacionados com a situação das anomalias, sua magnitude e o nível de perigo de cada uma.

2.2.3 Inspeção do túnel

Para a inspeção no túnel Boa Vista, foi adotada uma adaptação da metodologia de inspeção apresentada pela ANA (2016) para barragens. A metodologia é ilustrada na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Metodologia de inspeção – túnel Boa Vista.



Fonte: adaptado de ANA, 2016.

O planejamento da inspeção consistiu na coleta e estudo da documentação disponível sobre o túnel. Foram disponibilizados pela Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (SRH) e COGERH documentos referentes ao projeto e execução do túnel que possibilitaram o entendimento do histórico da obra. Também foram realizadas reuniões

de alinhamento com profissionais ligados à estrutura onde discutiu-se acerca dos aspectos técnicos do túnel.

A Lei nº 13.334 de 2010 determina que as inspeções de segurança regular devem ser realizadas por equipe de segurança de barragem composta por profissionais treinados e capacitados, preferencialmente pertencentes à equipe do próprio empreendedor. Ressalta-se que o preenchimento das fichas de inspeção deve ser realizado por engenheiro ou, dependendo do critério adotado pela unidade fiscalizadora, por técnico de nível médio.

Dessa forma, a inspeção foi realizada em agosto de 2023 por uma equipe de 6 pessoas, dentre profissionais da COGERH e pesquisadores da Universidade Federal do Ceará (UFC). Em campo fez-se um reconhecimento inicial da estrutura e do seu entorno e em seguida o *checklist* produzido por Silva (2022) foi distribuído para 4 membros do grupo com formação em engenharia civil (aqui definidos como A1, A2, A3 e A4) cujo preenchimento do *checklist* deveria ser independente entre si.

A inspeção foi iniciada com o preenchimento das seções do *checklist* que não necessitavam da entrada no túnel (infraestrutura, instrumentação e segurança do trabalho) conforme Figura 2.7, para então prosseguir para o interior da estrutura e para o preenchimento das demais seções (revestimento do túnel, água e sistema de drenagem). As anomalias indicadas no *checklist* que foram observados em campo receberam a classificação quanto à situação, magnitude e nível de perigo.

Destaca-se que apesar de o túnel ainda não estar em operação no momento da inspeção, ele apresentava água em seu interior, sendo necessário a utilização de um barco de pequeno porte para inspecionar o túnel, primeiramente na direção do desemboque para o emboque, e depois realizando o caminho contrário. Sempre que aplicável, todas as questões identificadas são acompanhadas por registros fotográficos realizados, a fim de ilustrar as anomalias visto que durante a fiscalização a fotografia representa um método crucial de arquivamento, utilizado tanto para relatórios quanto para estudos e observações adicionais. Em situações críticas, ela pode reduzir a subjetividade do inspetor, permitindo que o grupo de inspeção discuta as condições com base nas fotografias registradas (Berk, 2006).

Figura 2.7 – Inspeção no entorno do túnel Boa Vista.



Fonte: o Autor, 2023.

Além das seções já mencionadas, o *checklist* também apresenta um espaço chamado problemas adversos em que são registrados, a cargo de cada inspetor, as anomalias verificadas em campo, mas que não foram apresentados nas seções anteriores do *checklist*. As anomalias inseridas nesta seção também recebem a classificação mencionada anteriormente.

Ressalta-se que o preenchimento do *checklist* se deu a partir das observações em campo e das informações repassadas pelos profissionais da COGERH responsáveis pela sua manutenção. Após a conclusão da inspeção, os quatro *checklists* preenchidos foram coletados e avaliou-se as anomalias observadas no túnel Boa Vista e o *checklist* aplicado durante a inspeção.

2.2.4 Apresentação das anomalias observadas no túnel

A análise das anomalias constatadas no túnel foi realizada com base no *checklist* de Silva (2022), adotado durante a inspeção. A análise foi desenvolvida após a inspeção, por seção do *checklist* e considerou as anomalias identificadas pelos inspetores, juntamente com as classificações atribuídas para a situação, magnitude e nível de perigo, conforme exhibe a Figura 2.8, que aborda as definições dos parâmetros de classificação.

Figura 2.8 – Definições dos parâmetros de classificação.

LEGENDA		
SITUAÇÃO	MAGNITUDE	
NA: item não aplicável	I - insignificante	anomalia que pode simplesmente ser mantido sob observação do operador.
NE: anomalia não existente	P – pequena	quando a anomalia pode ser resolvido/ encaminhado pelo próprio operador.
PV: anomalia verificado pela primeira vez	M – média	anomalia que só pode ser resolvido com apoio da equipe de manutenção / gerência regional.
PR: anomalia resolvido	G – grande	anomalia que só pode ser resolvido através empresa especializada.
DI: anomalia diminuiu	NÍVEL DE PERIGO	
PC: anomalia permaneceu constante	0 – nenhum	não compromete a segurança/funcionamento do túnel, mas que indica descaso e/ou falta de manutenção.
AU: anomalia aumentou	1 – atenção	não compromete a segurança/funcionamento do túnel a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada ao longo do tempo.
NI: item não inspecionado (informar motivo)	2 – preocupante	possibilidade de comprometimento da segurança/funcionamento do túnel, devem ser tomadas providências para a eliminação da anomalia.
	3 – máximo	risco crítico de segurança/comprometimento do funcionamento do túnel.

Fonte: Silva, 2022.

Além disso, discorreu-se sobre questões específicas da inspeção, incluindo pontos indicados no documento que não foram possíveis de inspecionar devido a questões ocorridas em campo, como por exemplo a impossibilidade de inspecionar o piso do túnel devido à baixa luminosidade.

2.2.5 Validação e proposta de checklist atualizada

Conforme Berk (2006), a subjetividade é inevitável em uma inspeção visual devido às variações nas percepções dos inspetores. A inconsistência no julgamento decorre das diferentes visões que cada indivíduo possui, influenciadas por suas experiências pessoais. Para prevenir ou minimizar erros humanos, as inspeções devem ser avaliadas com extremo cuidado, os parâmetros devem ser elaborados de maneira mais objetiva possível e a execução deve ser realizada por uma equipe experiente. Dessa forma, sendo o *checklist* a ferramenta-base da inspeção realizada, ele também está sujeito a variações na interpretação dos inspetores, sendo esse um aspecto relevante nessa avaliação.

A validação do *checklist* foi realizada através da análise de aspectos como a uniformidade ou a variação das classificações atribuídas pelos 4 inspetores, além de possíveis erros que podem ter sido cometidos durante o preenchimento, que evidenciam a subjetividade a que a ferramenta está sujeita. É importante destacar que não foram encontrados registros de inspeções anteriores para fundamentar as classificações realizadas, o que revela uma ausência de orientação específica sobre como lidar com essa situação.

Outras questões observadas estão relacionadas à apresentação do documento, incluindo sua praticidade para utilização em campo, a abrangência das informações

solicitadas inicialmente e a adequação dos termos adotados. É fundamental que o documento seja fácil de usar no local de inspeção, que as informações requisitadas cubram de fato todos os aspectos necessários e que a terminologia empregada seja correta e acessível para os profissionais que utilizarão o *checklist*.

Em seguida, foi proposto um modelo de *checklist* atualizado, após a validação realizada em campo durante a inspeção no túnel Boa Vista. Este novo modelo aborda as adequações evidenciadas durante sua utilização, incluindo melhorias no layout para facilitar seu uso prático, a inclusão de informações mais abrangentes e relevantes, e a revisão dos termos técnicos para garantir clareza e acessibilidade aos profissionais que utilizarão o *checklist*.

2.2.6 Automatização do *checklist* atualizado

A automatização do *checklist* foi realizada através do *software Microsoft Excel*, para onde foi transferido o modelo mais atualizado do *checklist*, após validação no túnel Boa Vista. A planilha elaborada solicita, inicialmente, os dados de entrada com as informações acerca do túnel, e são apresentadas as legendas dos parâmetros das classificações de situação, magnitude e nível de perigo, assim como o modelo original. Em seguida realizou-se algumas adequações de formatação na estrutura do *checklist*, em sua maioria a eliminação de linhas vazias, para tornar mais prático para o usuário e para facilitar a elaboração das fórmulas no *Excel*.

Além disso, as células correspondentes às classificações de situação, magnitude e nível de perigo foram configuradas com auxílio da ferramenta “Validação de dados”, permitindo que, ao serem selecionadas, exibam automaticamente as opções de parâmetros de classificação, sendo necessário que o usuário apenas selecione qual se adequa à anomalia em questão.

A automatização do *checklist* visou facilitar o desenvolvimento da análise, padronizando o procedimento, e, para contextos futuros, permitir que as inspeções sejam realizadas com o auxílio de aparelhos eletrônicos, como tablets ou celulares, eliminando a necessidade do *checklist* em papel (Kanashiro *et al.*, 2022; Costa *et al.*, 2024).

2.3 Resultados e discussões

A seguir, serão apresentados os resultados das avaliações realizadas, começando pelo estado de conservação do túnel Boa Vista. Em seguida, serão abordadas questões relacionadas ao uso do *checklist*. Os pontos observados durante a inspeção serão discutidos, culminando com a apresentação do modelo de *checklist* atualizado, que incorpora as adequações necessárias identificadas durante a inspeção.

2.3.1 Anomalias observadas no túnel Boa Vista

A seguir exibe-se as anomalias identificadas durante a inspeção no túnel Boa Vista apresentados de acordo com as seções do *checklist* de Silva (2022) com as respectivas classificações quanto à situação, magnitude e nível de perigo realizadas pelos 4 inspetores (A1, A2, A3 e A4) e observações pertinentes. Na Figura 2.9 são apresentadas as definições dos parâmetros de classificação presentes no *checklist* supracitado.

Figura 2.9 – Definições das classificações do *checklist*.

SITUAÇÃO	MAGNITUDE	
NA: item não aplicável	I - insignificante	anomalia que pode simplesmente ser mantido sob observação do operador.
NE: anomalia não existente	P – pequena	quando a anomalia pode ser resolvido/ encaminhado pelo próprio operador.
PV: anomalia verificado pela primeira vez	M – média	anomalia que só pode ser resolvido com apoio da equipe de manutenção / gerência regional.
PR: anomalia resolvido	G – grande	anomalia que só pode ser resolvido através empresa especializada.
DI: anomalia diminuiu	NÍVEL DE PERIGO	
PC: anomalia permaneceu constante	0 – nenhum	não compromete a segurança/funcionamento do túnel, mas que indica descaso e/ou falta de manutenção.
AU: anomalia aumentou	1 – atenção	não compromete a segurança/funcionamento do túnel a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada ao longo do tempo.
NI: item não inspecionado (informar motivo)	2 – preocupante	possibilidade de comprometimento da segurança/funcionamento do túnel, devem ser tomadas providências para a eliminação da anomalia.
	3 – máximo	risco crítico de segurança/comprometimento do funcionamento do túnel.

Fonte: Silva (2022).

2.3.1.1 Infraestrutura

A Tabela 2.1 mostra as anomalias estruturais no túnel Boa Vista relacionados com a seção do *checklist* referente à infraestrutura. Ressalta-se que o item “Falta ou deficiência de cercas de proteção”, presente no *checklist*, não foi inspecionado pois segundo informações dos técnicos responsáveis as cercas estavam cobertas por vegetação no momento da inspeção.

Tabela 2.1 - Classificação das anomalias observadas – Infraestrutura.

Anomalias observadas	Situação				Magnitude				Nível de Perigo			
	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
Falta de documentação (livro de ocorrência, manuais e fichas de operação e manutenção)	PC	PC	PC	PC	P	P	P	M	0	0	0	0
Falta de treinamento operacional	PC	PC	PC	PC	P	P	M	M	0	0	0	0
Ausência de placas de aviso	PC	PC	PC	PC	M	M	M	M	1	1	0	1
Vigilância patrimonial sem logística/ausente	PC	PC	PC	PC	I	P	I	I	0	0	0	0

Fonte: o Autor (2024).

Observou-se uma uniformidade na classificação da situação realizada pelos quatro inspetores. Em contraste, houve maior variação nas classificações de magnitude, exceto na ausência de placas de aviso, onde todos os profissionais atribuíram uma magnitude média. Em relação ao nível de perigo, a ausência de placas de aviso foi a única circunstância que apresentou variação nas classificações: apenas o inspetor A3 atribuiu um valor de 0, enquanto os demais inspetores atribuíram um valor de 1.

Portanto, a ausência de placas de aviso constatada em campo foi evidenciada pelos 4 inspetores como a anomalia com maior magnitude e maior nível de perigo. Essas placas de aviso são elementos importantes para a segurança dos indivíduos que circulam no entorno da estrutura, e podem ter diversas funções como informar sobre perigos como áreas onde há perigo de afogamento ou queda, proibir ações perigosas como advertir que a entrada no túnel é permitida apenas para pessoal autorizado e também para fornecer informações ambientais como área de conservação, proibição de descarte de lixo, por exemplo.

2.3.1.2 Revestimento do túnel

Na Tabela 2.2 tem-se as anomalias observadas no revestimento do túnel Boa Vista. Evidencia-se que não foi possível inspecionar o item “Arraste hidráulico no piso”, indicado para verificação no *checklist*, devido à baixa luminosidade no interior do túnel prejudicando a visualização do piso.

Tabela 2.2 - Classificação das anomalias observadas – Revestimento do túnel.

Anomalias observadas	Situação				Magnitude				Nível de Perigo			
	A 1	A 2	A 3	A 4	A 1	A 2	A 3	A 4	A 1	A 2	A 3	A 4
Percolação de água	P C	P C	P C	P C	M	M	M	M	0	0	0	0
Manchas de umidade/infiltrações	P C	P C	P C	P C	I	I	I	I	0	0	0	0
Eflorescências	P C	P C	P C	P C	I	I	I	I	0	0	0	0

Fonte: o Autor, 2024.

Observa-se que esta seção apresentou maior uniformidade das classificações atribuídas pelos 4 inspetores, sendo o item “Percolação de água” classificado com a maior magnitude dentre as anomalias observadas. A seguir, na Figura 2.10 (a) e (b) podem ser observados os registros fotográficos dessas anomalias realizadas durante a inspeção.

Figura 2.10 – Registros fotográficos realizados na inspeção: (a) Manchas de umidade/infiltrações; (b) Eflorescências.



Fonte: o Autor, 2023.

2.3.1.3 Água

A Tabela 2.3 mostra as anomalias relacionadas à água. Evidencia-se que não foi possível inspecionar os itens “Assoreamento” devido à dificuldade de visualização do piso do túnel e “Turbidez” pois seria necessário equipamento para realização de teste em campo ou coleta de amostra para teste em laboratório, os quais não foram realizados. Além disso, ressalta-se que, com relação às anomalias observadas em campo, o inspetor 2 (A2) não atribuiu classificação de nível de perigo para a anomalia “Presença de

macrófitas”. O item “Presença de objeto estranho” recebeu a classificação apenas dos inspetores A1 e A4 e o item “Odor ou coloração inapropriada” não foi observado pelo A3 e conseqüentemente não recebeu a classificação nos registros deste inspetor.

Tabela 2.3 - Classificação das anomalias observadas – Água.

Anomalias observadas	Situação				Magnitude				Nível de Perigo			
	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
Presença de macrófitas	PC	PC	PC	PC	I	I	I	I	0	-	0	0
Presença de objeto estranho	PC	-	-	PC	I	-	-	I	0	-	-	0
Odor ou coloração inapropriada	PC	PC	-	PC	I	I	-	I	0	0	-	0

Fonte: o Autor, 2024.

Observa-se que esta seção também apresentou uniformidade das classificações atribuídas pelos 4 inspetores, no entanto destaca-se a variação nas observações das anomalias, pois alguns inspetores identificaram certas questões, enquanto outros não as perceberam. Também é possível observar falhas humanas no *checklist*, como o esquecimento do inspetor A2 de preencher o nível de perigo de uma anomalia que ele identificou em campo. A seguir, na Figura 2.11 (a) e (b) podem ser observados os registros fotográficos dessas anormalidades realizados durante a inspeção.

Figura 2.11 – Registros fotográficos realizados na inspeção: (a) Presença de macrófitas e coloração inapropriada; (b) Presença de objeto estranho.



Fonte: o Autor, 2023.

2.3.1.4 Sistema de drenagem

Na Tabela 2.4 exibe-se as anomalias relacionados ao sistema de drenagem do túnel Boa Vista. É possível observar a subjetividade do *checklist* em evidência através de uma maior variedade das classificações atribuídas pelos 4 profissionais com relação às classificações de magnitude e nível de perigo. Ressalta-se que não foi possível realizar registros fotográficos das anomalias observados devido à baixa luminosidade no interior do túnel.

Tabela 2.4 - Classificação das anomalias observadas – Sistema de drenagem.

Anomalias observadas	Situação				Magnitude				Nível de Perigo			
	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
Obstrução de drenos	PC	PC	PC	PC	P	P	P	P	0	1	0	1
Drenos quebrados	PC	PC	PC	PC	P	P	I	P	0	0	0	0

Fonte: o Autor, 2024.

2.3.1.5 Instrumentação

A instrumentação do túnel é composta por pinos de convergência, marcos superficiais, tassômetros e piezômetros. Conforme Engesoft e Ibi (2017), em junho de 2017 os marcos topográficos apresentaram movimentação entre -1,00 e 1,20 cm, enquanto nos tassômetros e nos pinos de convergência não foi observada nenhuma movimentação significativa nesse período. Com relação aos piezômetros encontrou-se uma coluna d'água de aproximadamente 10 m no mês de junho de 2017. Ressalta-se que de acordo com os documentos consultados, nessa época várias medidas não foram realizadas pois os instrumentos foram avaliados e considerados danificados. Ressalta-se que na época da realização da inspeção o túnel se encontrava inoperante.

De acordo com os documentos elaborados por Instituto Agropolos (2020), que trazem os dados mais recentes fornecidos, em janeiro de 2020 os resultados das leituras de instrumentação e das inspeções realizadas indicaram que não existia nenhuma anomalia aparente na seção geométrica do túnel Boa Vista.

A Tabela 2.5 exibe as anomalias observadas no túnel Boa Vista que estão relacionados com a seção do *checklist* referente à instrumentação do túnel e seu entorno. Ressalta-se que o inspetor (A2) não realizou a classificação de magnitude da anomalia, apesar de o ter observado em campo.

Tabela 2.5 - Classificação das anomalias observadas – Instrumentação.

Anomalias observadas	Situação				Magnitude				Nível de Perigo			
	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
Equipamentos danificados	PC	PC	PC	PC	I	I	I	I	0	0	0	0
Equipamentos desprotegidos	PC	PC	PC	PC	I	I	I	P	0	0	0	0
Ausência de limpeza de equipamentos	PC	PC	PC	PC	P	-	P	P	1	1	1	1
Presença de vegetação nos locais dos equipamentos	PC	PC	PC	PC	P	P	P	P	0	0	0	0
Má conservação de placas de identificação	PC	PC	PC	PC	P	P	P	P	0	0	0	0

Fonte: o Autor, 2024.

Observa-se a uniformidade das classificações atribuídas pelos 4 inspetores às anomalias identificadas, com destaque para a ausência de limpeza dos equipamentos que foi item com maior nível de perigo de acordo com as classificações realizadas. Na Figura 2.12 (a), (b) e (c) podem ser observados os registros fotográficos dessas anomalias realizadas durante a inspeção.

Figura 2.12 – Registros fotográficos realizados na inspeção: (a) Má conservação de placas de identificação; (b) Equipamento danificado e desprotegido; (c) Presença de vegetação nos locais dos instrumentos.



Fonte: o Autor, 2023.

2.3.1.6 Segurança do trabalho

A Tabela 2.6 apresenta as anomalias observadas no túnel Boa Vista que estão relacionados com a segurança do trabalho. Ressalta-se que no momento da inspeção o túnel não estava em operação e não estavam ocorrendo obras no local, sendo assim, classificou-se esta seção de acordo com as atividades de manutenção que pontualmente são realizadas no interior da estrutura e em seu entorno.

Tabela 2.6 - Classificação das anomalias observadas – Segurança do trabalho.

Anomalias observadas	Situação				Magnitude				Nível de Perigo			
	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
Falta de EPI's	PC	PC	PC	PC	P	P	P	P	0	0	0	0
Não utilização dos EPI's	PC	PC	PC	PC	P	P	P	P	0	0	0	0

Fonte: o Autor, 2024.

2.3.1.7 Problemas adversos

Nesta seção as anomalias “Erosão no talude próximo ao emboque do túnel” e “Drenagem do talude próximo ao emboque obstruída” não foram registrados apenas pelo inspetor A1, enquanto as anomalias “Presença de morcegos no interior do túnel”, “Presença de teias de aranha no interior do túnel”, “Formação de estalactites no revestimento do túnel” e “Ausência de identificação de instrumentos” foram registrados e classificados apenas pelo inspetor A4. A Tabela 2.7 exhibe as classificações atribuídas pelos 4 indivíduos.

Tabela 2.7 - Classificação da seção de problemas adversos.

Anomalias observadas	Situação				Magnitude				Nível de Perigo			
	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
Erosão no talude próximo ao emboque do túnel	-	PC	PC	PC	-	M	M	M	-	1	1	1
Drenagem do talude próximo ao emboque obstruída	-	PC	PC	PC	-	M	M	P	-	1	1	1
Presença de morcegos no interior do túnel	-	-	-	PC	-	-	-	I	-	-	-	0
Presença de teias de aranha no interior do túnel	-	-	-	PC	-	-	-	I	-	-	-	0
Formação de estalactites no interior do túnel	-	-	-	PC	-	-	-	P	-	-	-	1

Fonte: o Autor, 2024.

Na Figura 2.13 e Figura 2.14 (a) e (b) pode-se observar os registros fotográficos realizados de alguns dessas anomalias. Evidencia-se que não foi possível registrar imagens dos morcegos presente no interior do túnel devido à baixa luminosidade e a equipe em campo não realizou registros fotográficos da obstrução da drenagem presente no talude próximo ao emboque do túnel.

Figura 2.13 – Erosão no talude próximo ao emboque do túnel.



Fonte: o Autor, 2023.

Figura 2.14 – Registros fotográficos realizados na inspeção: (a) Formação de estalactites; (b) Presença de teias de aranha.



Fonte: o Autor, 2023.

2.3.2 Validação do checklist e elaboração de uma nova proposta de checklist

A partir da realização da inspeção foi possível validar o *checklist* desenvolvido por Silva (2022) visto que o documento não tinha sido aplicado a um túnel existente até o momento dessa inspeção. A partir de sua utilização foram identificadas oportunidades de melhorias que poderiam elevar sua efetividade e facilitar seu uso. A seguir esses pontos serão melhor detalhados.

2.3.2.1 Exibir a definição das classificações nas demais páginas

No modelo levado à campo a definição das classificações de situação, magnitude e nível de perigo era exibida apenas na primeira página do *checklist*. Em campo, no decorrer do preenchimento das seções do *checklists* foi necessário retornar diversas vezes à primeira página para lembrar essas definições. Portanto, um ponto de melhoria seria exibir essas definições de forma resumida no rodapé das demais páginas, tornando mais prático e eficiente esse processo de consulta para os inspetores.

2.3.2.2 Dividir as categorias de classificação e adicionar títulos explicativos

Percebeu-se que o modelo utilizado carecia de uma separação clara entre as categorias de situação, magnitude e nível de perigo, bem como de seus atributos, ao longo das seções do *checklist*. Além disso, esses títulos não estavam presentes, o que dificultou o entendimento e, conseqüentemente, o preenchimento do *checklist*. Portanto, sugeriu-se aumentar a espessura das bordas de cada categoria de classificação e inserir esses títulos em cada seção do *checklist*.

2.3.2.3 Inserir campo para tipo de inspeção

Visto que existem diferentes categorias de inspeção (cadastral, rotineira, especial ou extraordinária, por exemplo), observou-se que nos campos iniciais do *checklist*, onde são solicitadas informações como nome do túnel, data, etc., não era requerido o tipo de inspeção que estava sendo realizada. Como essa informação é importante para contextualizar os dados coletados e garantir a correta interpretação dos resultados, sugeriu-se incluir um campo específico para o tipo de inspeção nos campos

iniciais do *checklist*. Isso facilitará o registro e a análise posterior, assegurando que todos os detalhes relevantes sejam devidamente documentados.

2.3.2.4 Substituir o termo “meteorização”

Durante a inspeção em campo 3 dos 4 inspetores tiveram dúvidas acerca da definição deste termo que está presente no item B.7 (Presença de meteorização) da seção B do *checklist*, correspondente ao revestimento do túnel. Visto isso sugeriu-se a substituição desse termo por “intemperismo”, um sinônimo que os profissionais estariam mais familiarizados.

2.3.2.5 Readequar o item “Deformações/irregularidades”

Observou-se que o item B.6, referente à “Deformações/irregularidades” necessitava de adequação visto que após a inspeção percebeu-se que nem sempre essas manifestações não seriam necessariamente um problema, podendo evidenciar apenas a conformação do solo após a escavação. Sendo assim, sugeriu-se que o item fosse adequado para “Deformações/irregularidades excessivas” como meio de solucionar essa questão.

2.3.2.6 Substituir o termo “equipamentos”

Como o termo "instrumentos" geralmente se refere a ferramentas específicas utilizadas para medições ou análises detalhadas, enquanto "equipamentos" é um termo mais amplo que inclui uma variedade de itens, optou-se pela troca dos termos na seção E relativa à instrumentação. Essa mudança foi feita para evitar possíveis ambiguidades, visto que o *checklist* em questão trata especificamente de instrumentação.

2.3.2.7 Substituir o termo “problemas”

O modelo de *checklist* produzido por Silva (2022) apresentava a palavra “problemas” para nomear os pontos observados no *checklist* que estariam divergentes do padrão esperado para a estrutura. Entretanto, determinou-se que seria mais apropriado substituir essa nomenclatura por “anomalias”, visando enfatizar que se trata de desvios

específicos detectados durante a inspeção, que podem indicar potenciais problemas ou condições não usuais na estrutura.

2.3.3 Proposta de checklist atualizado

No Apêndice A é apresentado o modelo de *checklist* atualizado após a validação em campo com as adequações discutidas anteriormente.

2.3.4 Checklist automatizado

A automatização do *checklist* realizada no *Microsoft Excel* pode ser observada na Figura 2.15 à Figura 2.17, que exibem trechos do *checklist* juntamente com os resultados da aplicação da ferramenta "Validação de dados" que exhibe automaticamente as opções de parâmetros de classificação para a situação, magnitude e nível de perigo a partir de sua seleção, permitindo que o usuário escolha facilmente a opção mais adequada para a anomalia em questão.

Figura 2.15 – Trecho do *checklist* automatizado – Classificação de situação.

	Identificador	ANOMALIA	SITUAÇÃO	MAGNITUDE	NÍVEL DE PERIGO
A. INFRAESTRUTURA	A.1	Falta de documentação (livro de ocorrência, manuais e fichas de operação e manutenção)	PC	M	0
	A.2	Falta de material para manutenção/ operação básica	NA NE PV PR DI		
	A.3	Falta de treinamento operacional	PC AU NI	M	0
	A.4	Precriedade de acesso de veículos	NE		

Fonte: o Autor, 2024.

Figura 2.16 – Trecho do *checklist* automatizado – Classificação de magnitude.

	Identificador	ANOMALIA	SITUAÇÃO	MAGNITUDE	NÍVEL DE PERIGO
A. INFRAESTRUTURA	A.1	Falta de documentação (livro de ocorrência, manuais e fichas de operação e manutenção)	PC	M	0
	A.2	Falta de material para manutenção/ operação básica	NE	I P M G	
	A.3	Falta de treinamento operacional	PC	M	0

Fonte: o Autor, 2024.

Figura 2.17 – Trecho do *checklist* automatizado – Classificação de nível de perigo.

	Identificador	ANOMALIA	SITUAÇÃO	MAGNITUDE	NÍVEL DE PERIGO
A. INFRAESTRUTURA	A.1	Falta de documentação (livro de ocorrência, manuais e fichas de operação e manutenção)	PC	M	0
	A.2	Falta de material para manutenção/ operação básica	NE		0 1 2 3
	A.3	Falta de treinamento operacional	PC	M	0

Fonte: o Autor, 2024.

2.4 Conclusões

Neste trabalho foi tratado acerca da validação do *checklist* elaborado por Silva (2022) para inspeção em túneis de transferência hídrica e análise das anomalias observadas no túnel através da inspeção realizada no túnel Boa Vista, localizado no estado do Ceará.

Dentre as anomalias observadas durante a inspeção no túnel Boa Vista, notou-se que aquelas que se destacaram por terem recebido classificações mais críticas no *checklist* foram “Ausência de placas de aviso”, “Percolação de água” e “Erosão no talude próximo ao emboque do túnel”. Os pontos “Ausência de placas de aviso” e “Erosão no talude próximo ao emboque do túnel” receberam nível de perigo 1 pela maioria dos inspetores, indicando, de acordo com as orientações do *checklist*, que essas anomalias não comprometem a segurança/funcionamento do túnel a curto prazo, mas devem ser controlados e monitorados ao longo do tempo.

Durante a aplicação do *checklist* em campo foram observadas questões de padronização e organização do documento, melhorias na estrutura, visualização das informações e esclarecimento de termos e procedimentos. Evidencia-se a separação das categorias de classificação e inserção dos títulos de situação, magnitude e nível de perigo para cada seção, que trará maior clareza para os usuários dessa ferramenta. Ademais, ao comparar as classificações atribuídas pelos quatro inspetores às anomalias registradas no *checklist*, observou-se uma notável uniformidade, com apenas algumas discrepâncias e falhas de preenchimento consideradas típicas. Essas inconsistências são atribuídas à subjetividade inerente às inspeções e conseqüentemente ao uso do *checklist*.

Tendo como base as adequações no documento, indicadas em campo, elaborou-se um modelo de *checklist* atualizado, fornecendo-se então uma ferramenta cada

vez mais confiável e competente para guiar as inspeções e fornecer informações aos gestores acerca da condição do túnel e seu entorno.

Este trabalho apresenta contribuições significativas para a área de inspeção de túneis de transferência hídrica. A validação do *checklist* desenvolvido por Silva (2022) demonstrou sua eficácia como guia durante a inspeção realizada no túnel Boa Vista, localizado no estado do Ceará. Além de confirmar a utilidade do *checklist*, o estudo ofereceu um panorama das anomalias existente no túnel, destacando problemas críticos. Essas contribuições não apenas fortalecem a aplicação prática do *checklist* em futuras inspeções, mas também proporcionam *insights* importantes para o aprimoramento contínuo da manutenção e segurança de túneis de transferência hídrica.

3 ELABORAÇÃO DE ÁRVORE DE DECISÃO COMO FERRAMENTA DE AUXÍLIO PARA ESCOLHA DE MÉTODO DE ANÁLISE DE RISCOS NO CONTEXTO DE ESTRUTURAS GEOTÉCNICAS

3.1 Introdução

Os riscos são inerentes a toda e qualquer atividade que envolva materiais geológico-geotécnicos. Sendo assim, nas obras geotécnicas, especificamente, os riscos devem ser tratados como parâmetros importantes na tomada de decisão, já que são obras onde se tem muitas incertezas associadas. Mesmo com a realização de investigações e simulações, a natureza apresenta um comportamento dinâmico e por mais que se tente prever, nem sempre ela seguirá o comportamento previsto (NBR 6122, 2019).

Dessa forma, tem-se o conceito de gestão de riscos, que atualmente, no âmbito da geotecnia, é mais fortemente aplicado às barragens, mas vem abrangendo cada vez mais outras estruturas. A gestão de riscos é um conjunto de atividades integradas e dentre elas tem-se a análise de risco que objetiva estimar a probabilidade de falha e a extensão da sua consequência (ISO 31000, 2018; Melo, 2014).

Segundo Hartford e Baecher (2004), o procedimento para análise de risco comumente inclui as seguintes fases: estabelecimento do escopo e escolha do método de análise, definição e reconhecimento das condições de perigo, avaliação da probabilidade de falha e suas consequências, cálculo do risco, documentação, verificação e revisão periódica da análise. Tendo em vista a escolha do método de análise, atualmente existe uma gama de métodos disponíveis na literatura, e a escolha adequada, dependendo do contexto específico, é crucial para uma gestão eficaz dos riscos.

Visto que uma decisão precisa ser tomada quando se está diante de um problema que possui mais de uma alternativa de solução, uma ferramenta que pode fornecer importante auxílio na fase de escolha do método de análise de riscos é a Árvore de Decisão, que emprega modelos gráficos para exibir aspectos relevantes de uma situação de decisão. Tais modelos consistem em estruturas semelhantes a uma árvore, que possui um nó raiz e uma série de ramos para representar as possíveis combinações de ação-evento. É um método muito utilizado na mineração de dados, permitindo extrair informações quando se tem um conjunto de elementos (Gomes e Gomes, 2019; Dey, 2002; Murphy *et al.*, 2016; Lee e Lee, 2015).

Essa abordagem permite a representação visual das decisões e eventos associados, simplificando a compreensão e a comunicação dos resultados. Ao integrar múltiplos fatores e variáveis, a Árvore de Decisão facilita a identificação de padrões complexos, contribuindo para uma avaliação mais abrangente e precisa dos riscos envolvidos em obras geotécnicas (Gomes e Gomes, 2019).

Com base nesse panorama, este capítulo busca explorar e contextualizar a aplicação da Árvore de Decisão como uma ferramenta estratégica na escolha de métodos de análise de risco em obras geotécnicas, destacando sua eficácia na gestão de riscos e nas tomadas de decisões fundamentadas.

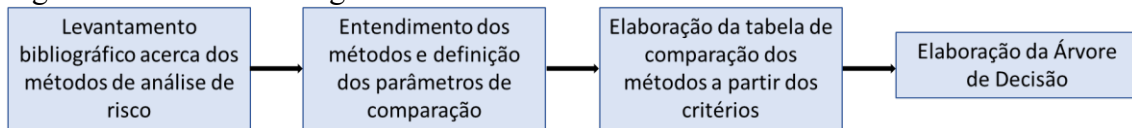
3.2 Metodologia

Para o presente estudo inicialmente foi tratado acerca da estrutura do processo de gestão de riscos apresentado pela norma *International Organization for Standardization* (ISO) 31000 (2018) e a categorização dos tipos de análises de riscos apresentada pela norma *International Electrotechnical Commission* (IEC) 31010 (2019). A fim de um maior aprofundamento, realizou-se uma revisão bibliográfica acerca de métodos de análise de riscos já utilizadas em estruturas geotécnicas como barragens e túneis, assim como as características pertencentes a cada uma dessas técnicas, segundo a literatura disponível.

Como parte da elaboração de Árvore de Decisão, analisou-se as informações obtidas a partir do levantamento bibliográfico realizado e estabeleceu-se quatro critérios pré-definidos de comparação entre os métodos estudados: nível de detalhamento, experiência necessária, flexibilidade e tempo de implementação. A partir dessa análise foi elaborada uma tabela para comparação dos métodos que foi utilizada como subsídio para produção da Árvore de Decisão.

Então a Árvore de Decisão foi elaborada para auxiliar na escolha da metodologia com foco inicial na disponibilidade de dados numéricos tendo como base o trabalho de Magee (1964). Em seguida o usuário é conduzido por um caminho de decisão que leva em consideração a natureza dos dados, o tipo de análise, os critérios pré-definidos e finalmente à metodologia que melhor se adequa ao contexto apresentado. A Figura 3.1 exibe um esquema com a metodologia adotada nesse estudo.

Figura 3.1 – Processo de gestão de riscos.

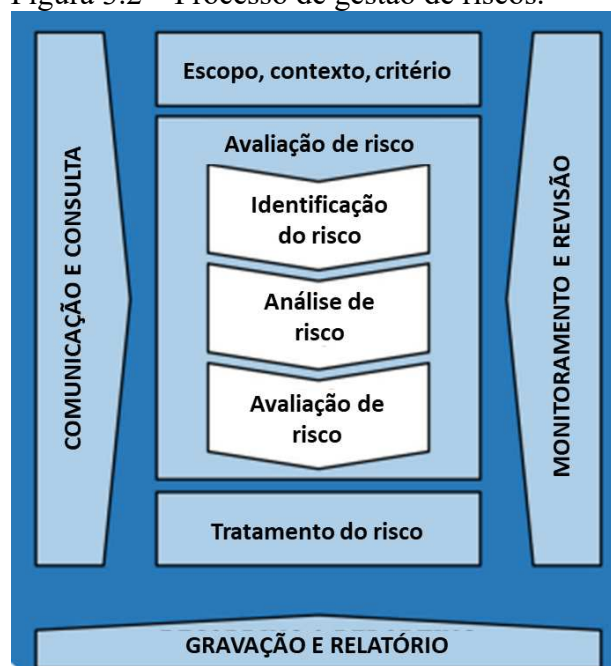


Fonte: o Autor, 2024.

3.2.1 O processo de gestão de riscos

A norma ISO 31000 (2018) afirma que o processo de gestão de riscos compreende a estrutura descrita na Figura 3.2. Segundo a norma, é necessário que o processo de gestão de riscos seja parte integrante da gestão geral, interligado com os princípios e com a estrutura de gestão. O documento recomenda, ainda, que a comunicação e a consulta às partes interessadas ocorram durante todas as fases do processo de gestão de riscos.

Figura 3.2 – Processo de gestão de riscos.



Fonte: Adaptado de ISO 31000, 2018.

O processo de avaliação de riscos é o processo global de identificação, análise e estimativa de riscos. Na etapa de identificação objetiva-se produzir uma lista abrangente de riscos baseada em eventos possíveis, incluindo o exame das consequências desses eventos. A análise de riscos, por sua vez, envolve o desenvolvimento da compreensão dos riscos, com a apreciação das causas e fontes de risco, suas consequências positivas e

negativas, e a probabilidade de que essas consequências possam ocorrer (ISO 31000, 2018).

A estimativa de riscos objetiva auxiliar na tomada de decisões com base nos resultados da análise de riscos, acerca de quais riscos necessitariam de tratamentos e a priorização para o implemento dessas medidas de intervenção. Sendo assim, na fase de tratamento de riscos ocorre a seleção de uma ou mais opções de ações para modificar os riscos identificados e a sua implementação (ISO 31000, 2018).

Convém que o monitoramento e análise crítica sejam regularmente implementados, também fazendo parte de todas as fases do processo de gestão de riscos a fim de garantir que os controles sejam eficientes e de obter informações adicionais para melhorar o processo de avaliação dos riscos (ISO 31000, 2018).

Com relação à fase de análise dos riscos, a norma australiana e neozelandesa AS/NZS 4360 (2004) define os tipos de análises de riscos que podem ser desenvolvidas, sendo elas análises qualitativas, semiquantitativas e quantitativas. As quais são definidas abaixo:

- Análises qualitativas: são utilizadas palavras ou escalas para descrever a magnitude de consequências potenciais e a probabilidade de ocorrência dessas consequências. Essas escalas podem ser adaptadas para atendimento às circunstâncias e diferentes descrições podem ser utilizadas para diferentes tipos de risco. Podem ser utilizadas como uma triagem inicial para identificar os riscos que requerem análises mais detalhadas; onde esse tipo de análise é apropriada para a tomada de decisões e; onde dados numéricos ou recursos são inadequados para uma análise quantitativa.
- Análises semiquantitativas: nesse tipo de análise as escalas quantitativas como as citadas acima recebem valores. O objetivo é produzir uma escala de classificação mais expandida do que o normalmente alcançado na análise qualitativa e não sugerir valores realistas para o risco como tenta-se na análise quantitativa. Ademais, como o valor atribuído a cada descrição pode não apresentar relação precisa com a magnitude real das consequências ou probabilidade, os valores devem ser combinados através de uma fórmula que reconheça as limitações dos tipos de escalas utilizados. Deve-se ter cautela na adoção de análises semiquantitativas pois os valores utilizados podem não refletir apropriadamente as relatividades, o que pode levar a resultados inadequados ou inconsistentes. Esse

tipo de análise pode não diferenciar adequadamente os riscos, principalmente quando as consequências ou a probabilidade são extremas;

- **Análises quantitativas:** utilizam valores numéricos ao invés de escalas descritivas utilizadas nas análises qualitativas e semiquantitativas. Os valores aplicam-se para consequências e probabilidades utilizando dados de variadas fontes. A qualidade das análises quantitativas depende da acurácia e integridade dos valores e da validade dos modelos adotados. As consequências podem ser determinadas através de modelagem dos resultados de um evento ou conjunto de eventos, além da extrapolação de estudos experimentais ou de dados anteriores. Ressalta-se que as consequências podem ser expressas em termos de critérios monetários, técnicos ou impactos humanos. Em alguns casos, mais de um valor numérico é requerido para especificar consequências para diferentes tempos, lugares, grupos ou situações.

3.2.2 Métodos de análise de riscos

A seguir serão abordados alguns métodos de análise de riscos que, segundo a literatura consultada, já foram aplicados em estruturas geotécnicas e cujas informações foram obtidas através de levantamento bibliográfico.

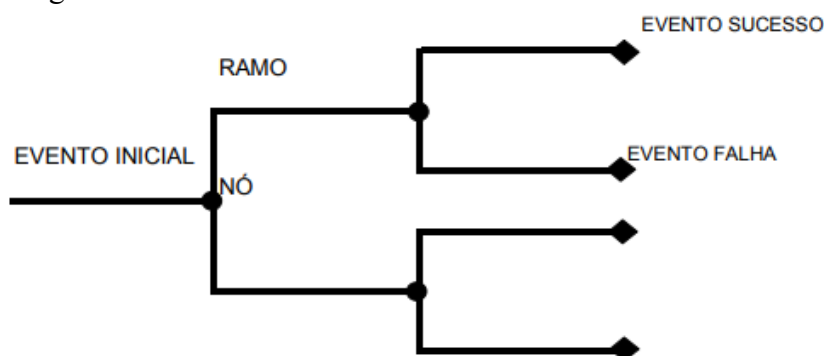
3.2.2.1 Árvore de Eventos

A análise por Árvore de Eventos ou Event Trees Analysis – ETA, foi desenvolvida no início da década de 1970 para apoiar a implementação de análises de riscos em centrais nucleares. Atualmente é utilizada nas mais diversas áreas técnico-científicas. Essa análise trata-se de um método indutivo, ou seja, tem como ponto de partida a observação, e procura estabelecer relações entre eventos a partir de um evento inicial, podendo ser aplicada de forma qualitativa, semiquantitativa ou quantitativa (Vianna, 2015).

A árvore de eventos é uma construção gráfica em ordem cronológica (da esquerda para a direita) e a análise se inicia a partir de um perigo ou evento, passando então para a sequência lógica de ocorrência do evento, podendo alcançar o evento final (Vianna, 2015). Cada ramo da árvore divide-se em dois ramos, representando uma situação de sucesso e outra de falha, e o nó representa uma transição de estado do sistema (Melo, 2014).

Quando a árvore é utilizada de forma quantitativa ou semiquantitativa, são exibidas as probabilidades de ocorrência de cada sequência de eventos e o único requisito é que esses eventos sejam mutuamente exclusivos, ou seja, a ocorrência de um exclui a possibilidade de ocorrência dos outros, e coletivamente exaustivos, significando que a união desses eventos equivale à população ou espaço amostral (Vianna, 2015). A Figura 3.3 exibe a estrutura básica desse tipo de análise.

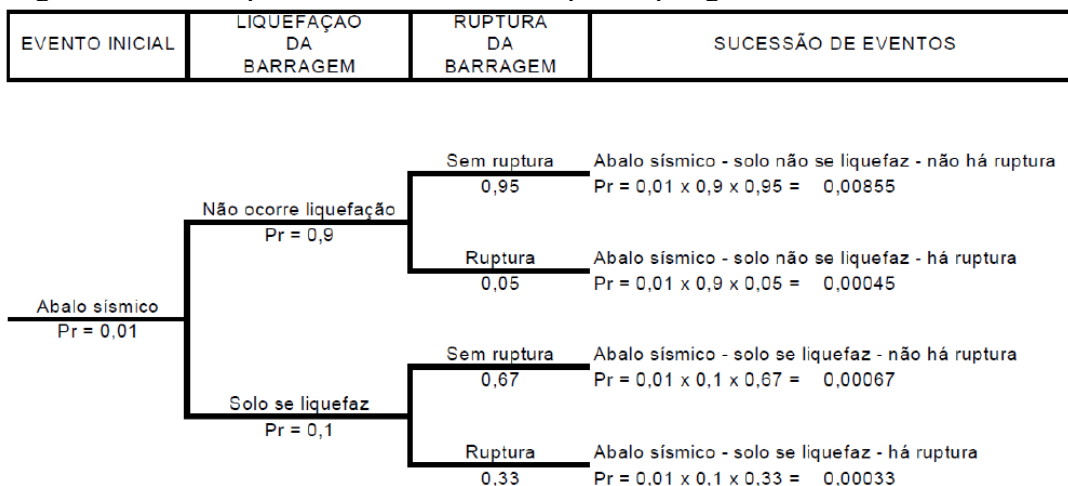
Figura 3.3 – Estrutura básica de uma Árvore de Eventos.



Fonte: Ladeira 2007 adaptado de Hartford e Baecher, 2004.

Segunda Ladeira (2007), para que o processo de estimativa de probabilidades seja válido, o método deve apresentar os seguintes princípios: reprodutibilidade; tratamento de incertezas e validação. A reprodutibilidade significa que o modelo deve apresentar os mesmos resultados quando reproduzido por outras pessoas. O tratamento das incertezas se refere ao fato de que as análises devem deixar claras as fontes, natureza e magnitudes das incertezas. Já a validação está relacionada com a acessibilidade das análises e à facilidade com que elas podem ser comprovadas. A Figura 3.4 exibe um exemplo de aplicação da Árvore de Eventos para uma barragem frente à ocorrência de abalo sísmico.

Figura 3.4 – Exemplo de árvore de eventos para o perigo de abalo sísmico.



Fonte: Ladeira 2007 adaptado de Hartford e Baecher 2004.

De acordo com Ladeira (2007) durante a construção da Árvore de Eventos podem ocorrer problemas como os resultados dependerem da equipe formada e existirem poucos dados a partir dos quais essa equipe pode estimar as probabilidades de progressão de falhas. Ainda de acordo com o autor, a partir da literatura existente sobre o tema, outros autores argumentam que alguns resultados da estimativa de probabilidades na Árvore de Eventos são obtidos a partir da subjetividade, sendo necessário relacionar à performance histórica de dados para garantir a credibilidade do que foi obtido com a metodologia.

A Análise por Árvore de Eventos deve ser utilizada em última análise, com o intuito de embasar decisões, esclarecendo como a estrutura pode se comportar. Essa ferramenta incrementa informações que anteriormente não eram levadas em consideração formalmente: as probabilidades de vários modelos de comportamento e as respectivas consequências, que podem ser avaliadas à medida do andamento da ocorrência. Sendo assim, árvores de eventos seriam uma ferramenta para auxílio no diagnóstico, não tendo o objetivo de gerar valores, mas de realizar inferências sobre como a estrutura pode se comportar (Hartford e Baecher, 2004; Vianna, 2015).

3.2.2.2 Árvore de Falhas

A Análise por Árvore de Falhas, ou Failure Tree Analysis – FTA, foi desenvolvida por Watson (1961) na área de telefonia e seguiu se expandido para diversas áreas do conhecimento a partir da década de 70. Diferentemente da Árvore de Eventos, a Árvore de Falhas é um método dedutivo (Melo, 2014). Segundo o dicionário do Centro de Informação Metal Mecânica (n.d.), dedução é um processo ou resultado de raciocínio

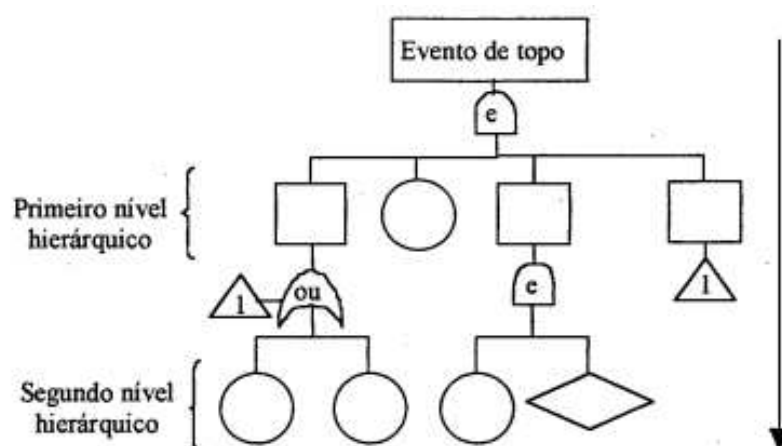
por meio do qual, partindo de um todo, chega-se a uma conclusão específica. Dessa forma, a partir de uma determinada falha, procura-se identificar todos os eventos que possam resultar em sua ocorrência.

De acordo com Hellman e Andrey (1995) apud Vollertt Junior (1996), dentre as finalidades de uma Árvore de Falhas, destaca-se que objetiva estabelecer um método padronizado de análise de falhas ou problemas para verificar como ocorrem em um processo; indicar componentes mais críticos ou condições críticas de operação; compilar informações para testes e inspeções; analisar e projetar sistemas de segurança.

Segundo Sakurada (2001) a Árvore de Falhas pode apresentar vários níveis hierárquicos, a depender da complexidade do sistema analisado. Os eventos relacionados diretamente com o “evento de topo” representam o primeiro nível hierárquico, já os eventos relacionados com aqueles ocorridos abaixo do primeiro nível hierárquico seriam de segundo nível e assim por diante. Dessa forma, quanto maior a quantidade de níveis hierárquicos, maior será a quantidade de eventos encadeados e mais longa será a árvore de falhas.

Na Figura 3.5 pode-se observar uma árvore de falhas genérica onde tem-se dois níveis hierárquicos e estão sendo empregadas as portas lógicas “e” e “ou”. Os símbolos utilizados na metodologia são usualmente retângulos, círculos, losangos e triângulos.

Figura 3.5 – Níveis hierárquicos de uma Árvore de Falhas.

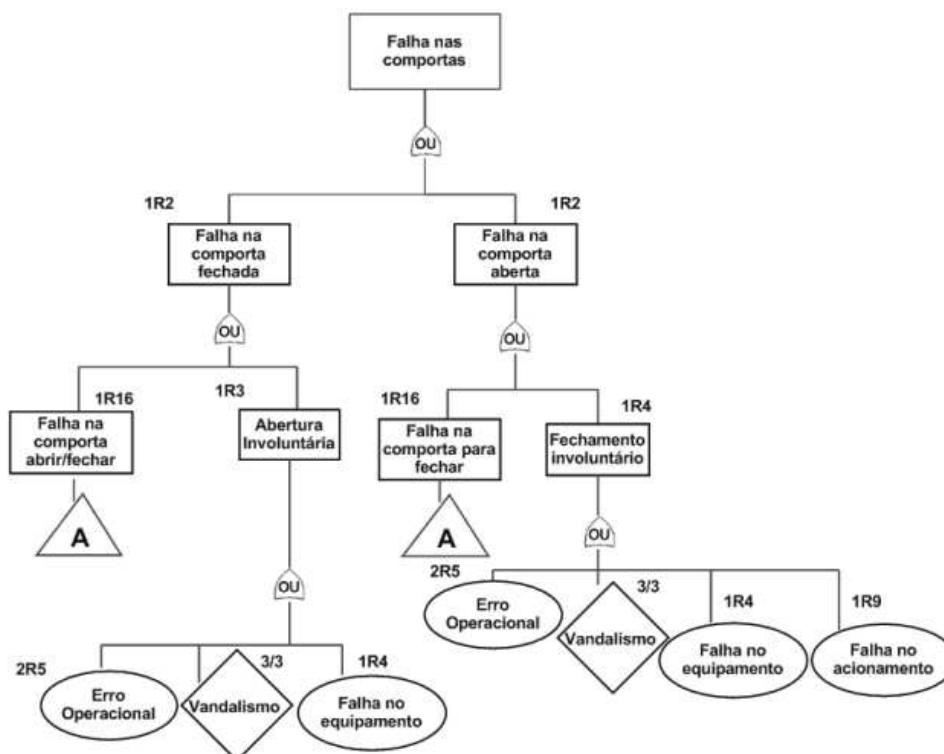


Fonte: Sakurada, 2001.

Esse tipo de método é bastante utilizado em retro análises, ou seja, o pós-acidente ou pós-evento e pode ser utilizado em análises qualitativas, semiquantitativas ou

quantitativas (Melo, 2014). A Figura 3.6 aborda um exemplo de aplicação dessa metodologia para avaliação da probabilidade de falhas das comportas do vertedouro de uma barragem apresentada no trabalho de Lima *et al.* (2013).

Figura 3.6 – Exemplo de aplicação de uma árvore de falha



Fonte: Lima *et al.*, 2013.

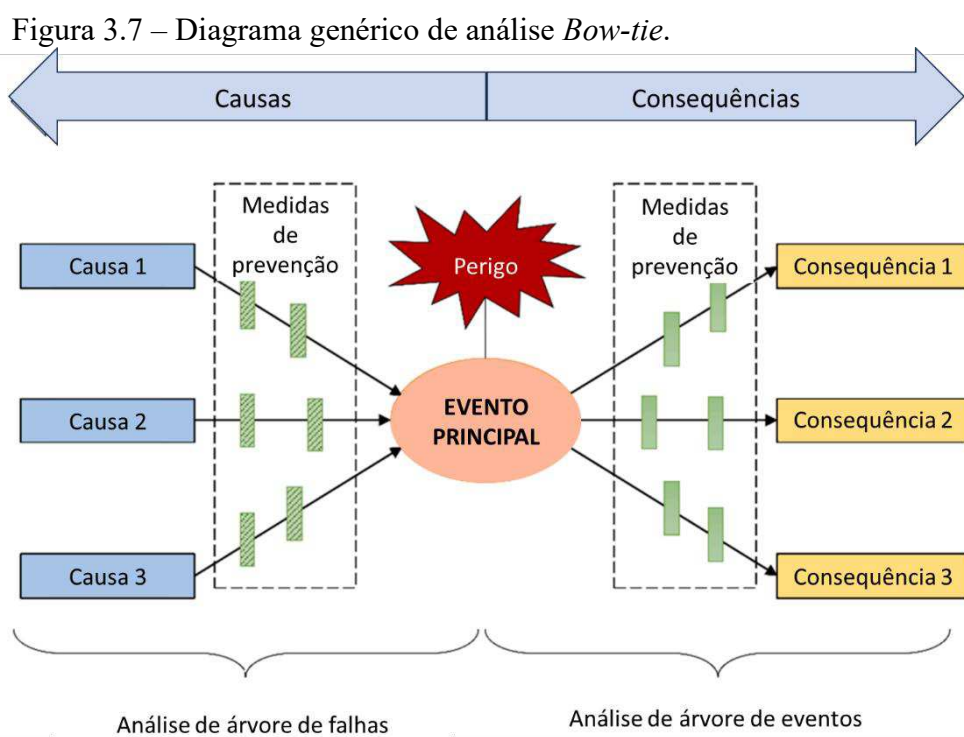
Destaca-se a seguir alguns dos benefícios dessa metodologia de acordo com Henley e Kumamoto (1981) apud Vollertt (1996): fornecer auxílio gráfico para dar visibilidade às mudanças necessárias; fornecer opções para análise de confiabilidade quantitativa e qualitativa; pontuar os aspectos importantes do sistema que estejam relacionados com a falha de interesse.

3.2.2.3 Bow-tie

A análise de risco através da metodologia *Bow-tie* realiza uma integração entre as causas e as consequências de um evento crítico utilizando árvores de falhas e eventos. Essa técnica de gerenciamento de risco é construtiva e gráfica, proporcionando uma visão ampla para identificação dos riscos e possíveis medidas de controle. É um método probabilístico onde o evento principal da árvore de eventos é conectado com o

evento inicial da árvore de falhas, e medidas preventivas são inseridas (Sharafat *et al.*, 2021).

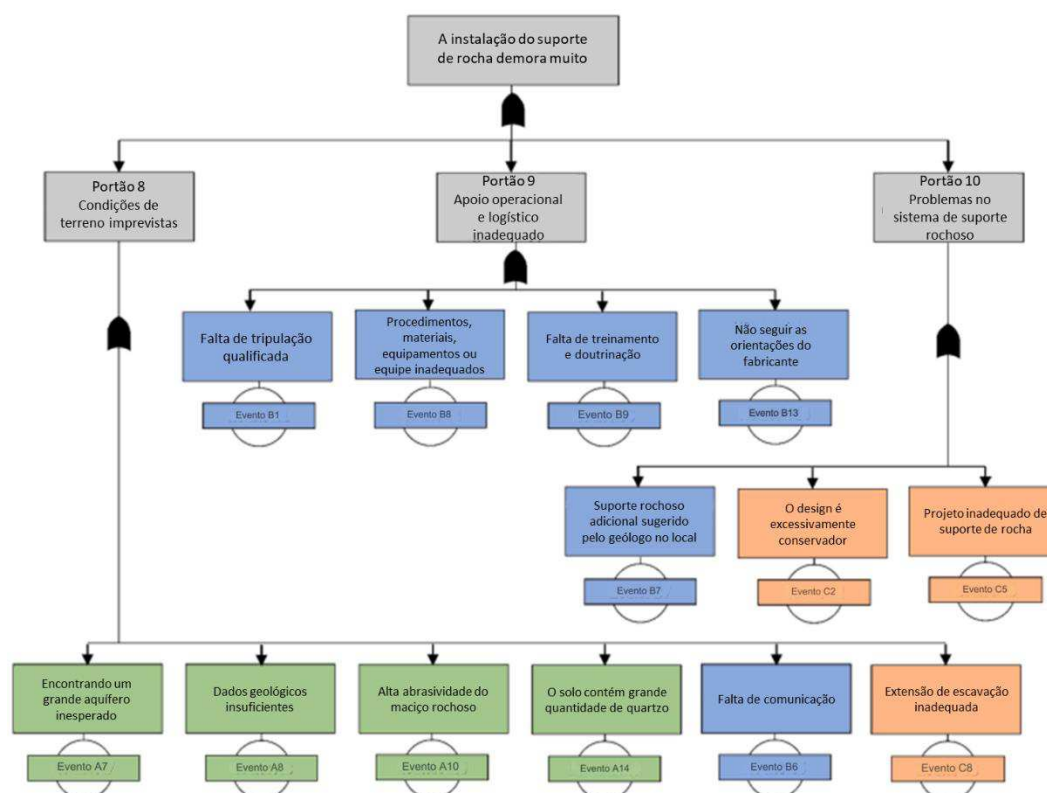
As árvores de falhas e de eventos são técnicas de análise focadas em detectar e avaliar as causas e elementos mitigadores de eventos adversos e seus desfechos. Ademais, abordam a investigação ao desmembrar completamente o sistema para identificar as causas primárias e os desdobramentos do evento central. O evento principal atua como o núcleo do ciclo; à esquerda, a árvore de falhas aponta para as causas potenciais, enquanto à direita, a árvore de eventos destaca as possíveis consequências (Ehlers *et al.*, 2017). A Figura 3.7 exibe um diagrama genérico para análise com o *Bow-tie*.



Fonte: Adaptado de Sharafat *et al.*, 2021.

No trabalho de Sharafat *et al.* (2021) o método é utilizado como ferramenta de gestão de riscos em um túnel em condições difíceis de escavação executado através da técnica TBM (*Tunnel Boring Machine*), aplicando o que foi desenvolvido em um túnel localizado no Himalaia. A implementação prática provou-se bem-sucedida no túnel em questão, possibilitando a identificação das causas e consequências associadas com a técnica TBM e fornecendo aos profissionais da área uma compreensão abrangente dos riscos a que a estrutura pode estar submetida, assim como as ações de mitigação correspondentes. A Figura 3.8 exibe um dos diagramas *Bow-tie* elaborados pelo autor, associado com a demora para a instalação do suporte de rocha.

Figura 3.8 – Diagrama *Bow-tie* para demora na instalação de suporte para a rocha.



Fonte: Adaptado de Sharafat *et al.*, 2021.

Ruijter e Guldenmund (2016) apontaram como algumas das dificuldades na utilização da metodologia Bow Tie a subjetividade, visto que são geralmente elaborados por especialistas, e a dificuldade para atribuir probabilidades e taxas de falha aos elementos do diagrama caso os dados de entrada forem insuficientes ou não possuírem qualidade satisfatória. Saud *et al.* (2012) aponta que a maior vantagem desse tipo de diagrama reside na sua natureza gráfica, que facilita a compreensão do gerenciamento de riscos.

3.2.2.4 Matriz de Risco

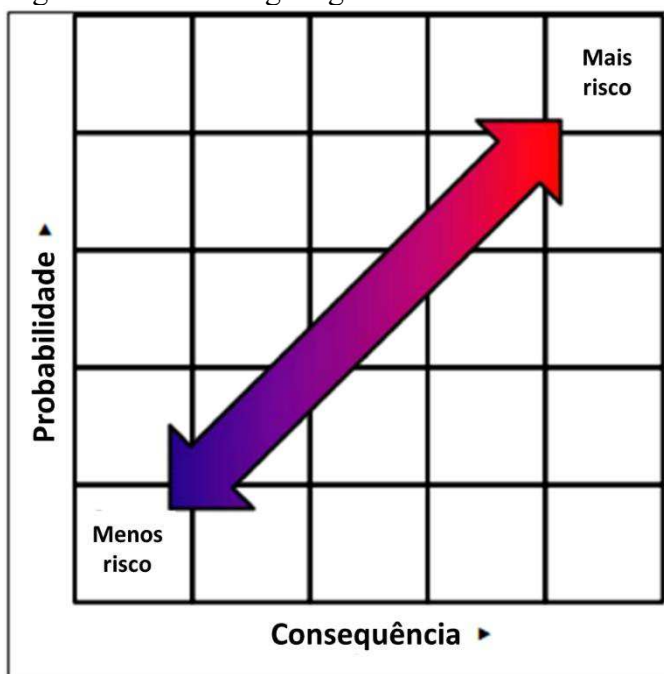
Também chamada de Matriz de Indicadores de Risco ou Matriz de Probabilidade e Impacto (PxI), segundo o *US Bureau of Reclamation* (USBR) e o *US Army Corps of Engineers* (USACE) é uma matriz utilizada em análises qualitativas e semiquantitativas para mapear a probabilidade de ocorrência de cada risco e seu impacto na segurança da estrutura geotécnica se esse risco ocorrer.

No trabalho de Baptista (2009) foram abordadas metodologias de risco para o contexto de aplicação em barragens de aterro. Segundo Baptista (2009) matrizes de

risco são variações que têm sido desenvolvidas para análises qualitativas e semiquantitativas, classificando a probabilidade de ocorrência e as respectivas consequências através de escalas numéricas ou descritivas.

De acordo com o USBR e o USACE (2019) no documento com as melhores práticas em análises de risco para barragens e diques, a matriz de risco pode ser utilizada para retratar a probabilidade de falha e as consequências devido aos modos de falha potenciais; além disso, o documento apresenta o conceito geral de matriz de riscos para barragens e diques (Figura 3.9), onde o risco aumenta à medida que a posição do traçado se move para cima e para a direita.

Figura 3.9 – Abordagem geral da matriz de riscos.



Fonte: Adaptado de Bureau of Reclamation e US Army Corps of Engineers, 2019.

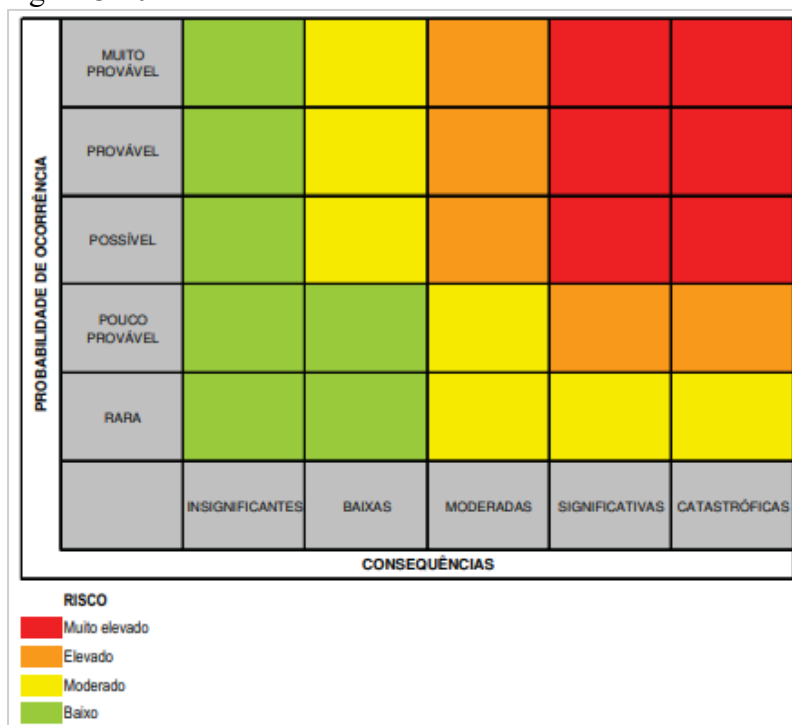
São encontradas variações das matrizes de riscos acerca do número de classes de probabilidades de ocorrência, do número de classes de consequências, do significado das diferentes classes e do número e significado das classes de risco (Baptista 2009). A Figura 3.10 exibe um modelo de matriz de risco proposta em um documento acerca da orientação com objetivo de aplicar legislação de avaliação de riscos do governo escocês onde as várias classes de riscos identificados através das cores são explicadas a seguir, de acordo com Baptista (2009):

- Risco muito elevado: refere-se a riscos críticos que requerem a implementação de medidas imediatas. Os riscos inseridos nesta classe podem ter ocorrência

moderada a muito elevada e a magnitude das consequências, podem ser significativas ou catastróficas, exigindo prioridade máxima na implementação de medidas estruturais para sua mitigação;

- Risco elevado: refere-se a riscos importantes com probabilidades de ocorrência baixa e consequências significativas a catastróficas ou probabilidade de ocorrência moderada a muito elevada e consequências de magnitude moderada. Nessa classe de riscos, requerem-se a implementação imediata ou a curto prazo de medidas estruturais ou não estruturais para mitigação dos riscos;
- Risco moderado: refere-se a riscos com probabilidade de ocorrência moderada a muito elevada e consequências baixas ou probabilidade de ocorrência muito baixa a baixa e consequências moderadas a catastróficas. Nesta classe, requerem-se a implementação, a curto prazo, de medidas de observação e de inspeção das estruturas e de mitigação das consequências, objetivando o desenvolvimento de estudos aprofundados da situação e à eventual definição de medidas posteriores;
- Risco baixo: refere-se a riscos com consequências insignificantes, independentemente da probabilidade de ocorrência, ou riscos baixos com consequências baixas e probabilidade de ocorrência muito baixa a baixa. Esta classe de riscos requer a eventual implementação de medidas de observação e controle.

Figura 3.10 – Matriz de Riscos.



Fonte: Scottish Executive, 2006 apud Baptista, 2009.

Nas Figura 3.11 e Figura 3.12 apresenta-se o significado das classes de probabilidades e de consequências que foram definidas no trabalho de Scottish Executive (2006) apud Baptista (2009), um documento que trata do planejamento de emergências e resposta a situações de crise.

Figura 3.11 – Significado das classes de probabilidades.

Nível	Descrição	Probabilidade anual associada	Observações
5	Muito provável	> 20%	Ocorrências registadas regularmente. Pode ocorrer uma vez em cada 5 ou menos anos.
4	Provável	10-15%	Ocorrências registadas regularmente. Pode ocorrer uma vez em cada 7 a 10 anos.
3	Possível	5-10%	Algumas ocorrências registadas. Pode ocorrer uma vez em cada 10 a 20 anos.
2	Pouco provável	0,4 - 5%	Não é expectável que ocorra e/ou sem ocorrências registadas. Pode ocorrer uma vez em cada 20 a 250 anos.
1	Raro	< 0,2%	Pode ocorrer em circunstâncias excepcionais. Pode ocorrer uma vez em cada 500 ou mais anos.

Fonte: Scottish Executive, 2006 apud Baptista, 2009.

Figura 3.12 – Significado das classes de consequências.

Nível	Descrição	Categorias	Observações
5	Catastróficas	Pessoas e bens	Impacto sobre centenas de pessoas, com número significativo de fatalidades, grande número de feridos graves e feridos com afectação de longo prazo ou permanente. Grande número de desalojados por períodos longos e carecendo de apoios externos generalizados. Danos muito elevados em propriedades, estruturas e infraestruturas carecendo de importantes intervenções de demolição e reconstrução. Interrupção de importantes serviços da comunidade por períodos prolongados e impossibilidade de funcionamento sem apoio externo.
		Ambiente	Impactos ambientais de grandes dimensões com efeitos a longo prazo ou permanentes.
		Segurança	Impactos muito importantes ao nível da segurança.
		Operacionalidade	Impacto de grandes dimensões ao nível da operacionalidade. Necessidade de recorrer a ajuda nacional.
4	Significativas	Pessoas e bens	Número significativo de pessoas afectadas, com diversas fatalidades e número importante de feridos hospitalizados e de feridos graves. Número significativo de desalojados por um ou mais dias e necessitando de apoio externo. Danos significativos em propriedades, estruturas e infraestruturas carecendo de apoios externos. Funcionamento parcial da comunidade.
		Ambiente	Impactes ambientais significativos com efeitos a médio/ longo prazo.
		Segurança	Impacto significativo ao nível da segurança.
		Operacionalidade	Impacto significativo na operacionalidade. Necessidade de recorrer a ajuda local ou regional.
3	Moderadas	Pessoas e bens	Inexistência de fatalidades. Alguns feridos hospitalizados ou necessitando de tratamento médico. Existência de desalojados por um período entre 6 a 24 horas em reduzido número, resolução com meios locais. Danos localizados em propriedades, estruturas, infraestruturas e afectação localizada de serviços, não impedindo, no entanto, o normal funcionamento da comunidade afectada.
		Ambiente	Impactes ambientais moderados com efeitos apenas no curto prazo ou impactes ambientais reduzidos com efeitos a médio/ longo prazo.
		Segurança	Eventual impacto localizado ao nível da segurança.
		Operacionalidade	Impacto localizado ao nível da operacionalidade.
2	Baixas	Pessoas e bens	Inexistência de fatalidades. Reduzido número de feridos ligeiros. Existência de desalojados por um período muito reduzido (inferior a 6 horas) e em reduzido número. Reduzidos danos em propriedades, estruturas, infraestruturas e reduzido número de serviços afectados.
		Ambiente	Impactes ambientais reduzidos.
		Segurança	Sem afectação da segurança.
		Operacionalidade	Impacto reduzido ao nível da operacionalidade.
1	Insignificantes	Pessoas e bens	Inexistência de fatalidades, feridos ou quaisquer impactos na saúde. Inexistência de desalojados. Danos insignificantes em propriedades, estruturas, infraestruturas ou serviços.
		Ambiente	Sem impactes ambientais.
		Segurança	Sem afectação da segurança.
		Operacionalidade	Sem afectação da operacionalidade.

Fonte: Scottish Executive, 2006 apud Baptista, 2009.

A Figura 3.13 exhibe uma matriz de risco com cinco classes de probabilidades, de consequências e de risco.

Figura 3.13 – Exemplo de Matriz de Risco.

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	MUITO ELEVADA	3	4	4	5	5
	ELEVADA	2	3	4	4	5
	MODERADA	2	2	3	4	4
	BAIXA	1	2	2	3	4
	POUCO PROVÁVEL	1	1	2	2	3
		MUITO BAIXAS	BAIXAS	MODERADAS	ELEVADAS	MUITO ELEVADAS
	CONSEQUÊNCIAS					

Classes de risco

Fonte: Baptista, 2009.

Baptista (2009) ressalta que esse tipo de ferramenta é mais subjetivo do que as metodologias aplicadas em análises quantitativas, sendo comum a utilização de matrizes de risco em conjunto com outras técnicas de gestão. De acordo com a norma IEC 31010 (2019), os pontos fortes da Matriz de Risco consistem na sua facilidade de uso; proporciona uma classificação rápida dos riscos em diferentes níveis de importância; oferece uma representação visual clara da importância do risco pela sua consequência, probabilidade ou seu nível e pode ser utilizada para comparar riscos com diferentes tipos de consequência.

Com relação às limitações da matriz de risco, a norma IEC 31010 (2019) aponta que é necessário boa expertise para projetar uma matriz consistente; a validade das classificações de risco depende de quão bem as escalas foram desenvolvidas e calibradas; requer um único valor indicativo para a consequência ser definida, porém podem ocorrer situações onde uma variedade de valores de consequência são possíveis e a classificação do risco depende do que é escolhido; seu uso é subjetivo e indivíduos diferentes podem atribuir classificações diferentes ao mesmo risco; pode-se ter dificuldade para combinar ou comparar riscos de diferentes magnitudes ou frequências diretamente, ou seja, não é possível simplesmente somar ou agrupar vários riscos de baixa magnitude ou baixa probabilidade para chegar a um risco médio, por exemplo; e cada classificação dependerá da forma como um risco é descrito e do nível de detalhe

fornecido. A maneira como os cenários são agrupados na descrição do risco deve ser consistente e definida antes da classificação.

3.2.2.5 Matriz GUT

Segundo Meireles (2001) a Matriz GUT é uma ferramenta utilizada para definir prioridades e a sigla GUT se refere aos três critérios utilizados para ordenação – gravidade, urgência e tendência. A Gravidade seria a intensidade dos danos que o problema pode causar se ocorrer atuação sobre ele; a Urgência seria o tempo para a eclosão dos danos ou resultados indesejáveis caso não sejam tomadas medidas de intervenção; a Tendência seria o desenvolvimento que o problema apresentará se nenhuma ação for posta em prática.

Essa ferramenta de gestão de risco pode ser aplicada de forma qualitativa ou quantitativa e segundo Meireles (2001) deve-se indicar a avaliação correspondente a cada um dos requisitos através de escalas variando de 1 a 5, conforme indica a Figura 3.14.

Figura 3.14 – Escala para classificação GUT.

Escala	Gravidade (G)	Urgência (U)	Tendência (T)
1	Dano mínimo	Longuíssimo prazo (dois ou mais meses)	Desaparece
2	Dano leve	Longo prazo (um mês)	Reduz-se ligeiramente
3	Dano regular	Prazo médio (uma quinzena)	Permanece
4	Grande dano	Curto prazo (uma semana)	Aumenta
5	Dano gravíssimo	Imediatamente (está ocorrendo)	Piora muito

Fonte: Meireles, 2001.

Dessa forma, para cada atributo que se deseja avaliar, é adotado um valor e, ao final, o número GUT corresponde ao produto dos valores atribuídos à Gravidade, Urgência e Tendência do problema. A Tabela 3.1 mostra um exemplo de classificação

baseado no resultado deste produto quando aplicado a barragens, no contexto de priorização para implementação de medidas de intervenção.

Tabela 3.1 - Classificação de prioridade de acordo com o produto entre os valores de gravidade, urgência e tendência.

Nível de Prioridade	GUT	Prazo/Grau de Hierarquização	Período
1	≥ 100	Imediato	15 dias
2	≥ 60 e < 100	Curto	6 meses
3	≥ 40 e < 60	Médio	12 meses
4	≥ 25 e < 40	Longo	18 meses
5	< 25	Muito Longo	24 meses

Fonte: Oliveira, 2018.

No trabalho de Vidal (2022) a matriz GUT foi utilizada para priorização de processos durante a operação de uma barragem de rejeitos, auxiliando na tomada de decisões. A Figura 3.15 exibe uma das matrizes GUT elaboradas no trabalho, representando a análise para priorização de falhas ao descartar ou captar água.

Figura 3.15 – Classificação GUT para barragem de rejeitos.

[PC]: Falha ao Descartar/Captar água	G	U	T	P	SP
Insuficiência de recursos hídricos	5	5	5	125	1º
Deficiência de sistema de descarte/captação	4	3	3	36	2º
Ausência de licença ambiental para descarte/captação	4	4	2	32	3º
Erro humano no manejo do sistema	3	3	3	27	4º
Baixa eficiência do conjunto de evaporação	3	3	2	18	5º

Fonte: Vidal, 2022.

De acordo com Oliveira (2018) a matriz GUT demonstrou-se de fácil aplicação, além de a metodologia poder ser facilmente adaptada para diversas situações e que as informações técnicas necessárias para aplicação da GUT são de fácil aquisição. Ressaltou também que os resultados obtidos necessitam de adequada avaliação, a qual está totalmente interligada com a experiência do profissional que a utiliza.

Dyck (2022) aponta que a principal desvantagem dessa metodologia seria a possibilidade de empate, que pode causar dificultar a determinação de prioridades e a limitação da aplicação da matriz GUT. Nesses casos, aconselha-se a utilização de mais de uma ferramenta para assegurar uma tomada de decisão eficaz.

3.2.2.6 Método da Performance Histórica

Também chamado método UNSW (*University of New South Wales, Sydney-Australia*), esse método quantitativo aplica-se na determinação inicial do risco e é adotado para comparar-se com os resultados obtidos através do método da Árvore de Eventos, recomendando-se que o método da análise histórica não seja utilizado como única forma de avaliação (Ladeira, 2007). Segundo Fell e Wan (2005) o método apresenta como ponto positivo a simplicidade e é útil para fornecer uma ideia aproximada da probabilidade de falha e para comparação com os resultados de análises realizadas através de Árvores de Eventos.

No trabalho de Foster *et al.* (1998) o método foi aplicado para barragens e é baseado no conhecimento das características da barragem, comparando-a com a performance histórica de barragens semelhantes. Aplicou-se o ajuste de probabilidades médias históricas de rupturas de barragens causadas por piping no barramento, na fundação e do barramento para a fundação. Utilizou-se de um banco de dados denominado ERDATA1, pertencente à UNSW para obtenção de informações que baseassem a estimativa de fatores para ajustar a probabilidade histórica (Ladeira, 2007).

O método UNSW utiliza estatística histórica de acidentes relacionados com as características da estrutura geotécnica que se esteja analisando. São atribuídos pesos para estimar probabilidades qualitativas de acordo com a frequência de ocorrência de acidentes e esses pesos são utilizados no ajuste da probabilidade histórica anual para cada modo de falha para determinar a probabilidade total (Foster *et al.*, 1998).

Dessa forma, o resultado obtido ao final da análise não representa o valor exato do risco, mas sim a ordem de grandeza dos valores que podem ser comparados com outro ou outros métodos de análise e priorização de ações. Observa-se, portanto, que o método tem como um de seus fatores limitantes a dependência de um vasto banco de dados ou de uma profunda investigação de casos históricos, sendo por vezes baseado em poucas ocorrências a depender do tipo de barragem em estudo, podendo induzir a subestimação ou superestimação dos fatores de pesos (Ladeira, 2007).

3.2.2.7 FMEA – Failure Mode and Effects Analysis

A Análise dos Modos de Falhas e Efeitos (FMEA) consiste em uma análise de confiabilidade para o mapeamento das consequências de eventos que podem ocorrer

durante a operação de um sistema, identificando e priorizando as ações necessárias. O método teve origem em 1949, na norma *Military Standard Mil-STD-1629 – Procedures for performing a failure mode, effect and criticality analyses*, desenvolvida pelo exército norte-americano (Vianna 2015). Nesta norma o FMEA foi utilizado para classificar as falhas de acordo com o impacto que essas teriam sobre as missões militares e na segurança dos indivíduos e dos equipamentos que seriam utilizados (Teixeira, 2009).

Em 1994 a *Society of Automotive Engineers* (SAE) publicou a norma SAE J1739 que orienta acerca do método de aplicação do FMEA. Segundo a norma, o FMEA é uma ferramenta onde se apresentam todos os componentes que podem afetar ou serem afetados devido às falhas no sistema em análise. A metodologia FMEA consiste inicialmente na divisão do sistema principal em subsistemas, até o componente mais “básico”, possibilitando uma compreensão adequada de suas funções (Fonseca, 2018).

Portanto, o FMEA é um método qualitativo para análise de risco que pode ser adaptado para a realização de análises semiquantitativas, o método chamado de Análise de Criticidade, Modos e Efeitos de Falhas (FMECA), através da aplicação de escalas de probabilidade para a ocorrência de falhas e para a gravidade dos efeitos que essas falhas podem acarretar. Dessa forma, aplicar o FMECA significa que, além da análise do modo de falha, é realizada também uma análise de criticidade (*C*) (Teixeira, 2009).

Segundo Coelho (2014) a determinação da criticidade consiste na definição do índice de risco (*IR*) de cada modo de falha, o qual é utilizado para avaliar a probabilidade, ou seja, a chance de a falha ocorrer. Dessa forma, tem-se as Equações 1 e 2:

$$FMECA = FMEA + C \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$$C = IR = (Ocorrência) \times (Severidade) \times (Detecção) \quad \text{Equação 2}$$

Segundo a Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens (CNPGB, 2005) e a norma europeia EM IEC 60812, de 2018, as fases para desenvolvimento do FMEA são: análise e hierarquização do sistema; seleção do subsistema a analisar; estudo funcional e seleção de um estado de funcionamento; identificação de um modo potencial de falha; identificação dos efeitos possíveis do modo de falha; identificação das respectivas causas; identificação dos métodos de detecção e de prevenção.

Já para aplicação do FMECA é necessário seguir os seguintes passos adicionais: estimar a gravidade do modo de falha em estudo (*S*); estimar a probabilidade de ocorrência do modo de falha (*O*); estimar a probabilidade de detecção do modo de falha (*D*); análise de criticidade.

Essa técnica tinha como objetivo inicial ser aplicada na área de projetos, no entanto encontrou aplicação na análise do potencial de falha de sistemas pertencentes às indústrias automobilística, química e nuclear. Na área geotécnica o FMEA vem sendo bastante aplicado na gestão de risco em estruturas como barragens e túneis (Vianna, 2015).

No trabalho de Teixeira (2009) essa ferramenta é aplicada em sistemas de estabilização e reforço de maciços em túneis. Segundo o autor foi possível verificar que o método apresenta elevado grau de subjetividade pois as classificações dos riscos podem apresentar variação entre os avaliadores a partir de fatores como por exemplo a experiência desses indivíduos com o objeto de estudo. É ressaltado no trabalho que a aplicação do método é de grande importância devido ao grau de minúcia que acrescenta à análise dos processos.

A aplicação do FMEA em barragens pode ser observada no trabalho de Vianna (2015) utilizando a metodologia para contribuir no processo de tomada de decisão em Planos de Ação e Emergência (PAE's) através da identificação dos aspectos mais críticos de uma barragem em estudo. Os resultados obtidos são, de acordo com o autor, representativos do comportamento observado em campo e conclui que a divisão em sistemas e subsistemas devem ser bem avaliadas, pois possuem grande influência no resultado e a simplificação destes sistemas pode ocultar possíveis falhas, enquanto um grande detalhamento pode inviabilizar a análise.

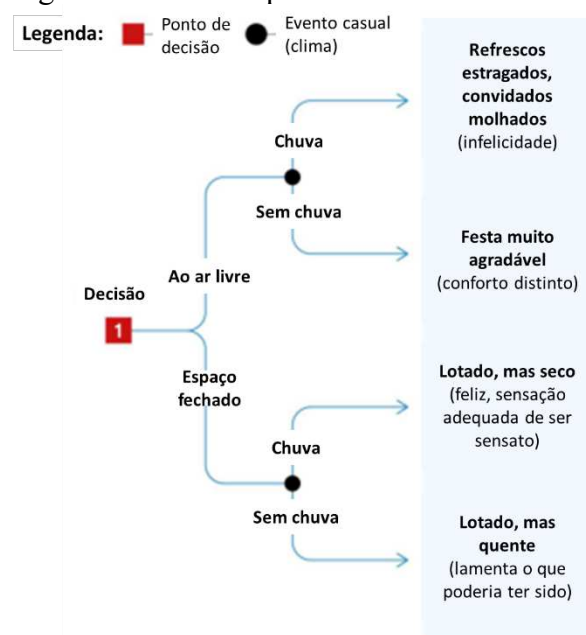
3.2.3 Elaboração da Árvore de Decisão

No trabalho de Magee (1964), o autor afirma que a representação através da Árvore de Decisão é muito útil para mostrar as rotas pelas quais as variadas possibilidades de resultados podem ser alcançados. A Árvore de Decisão é composta por nós e galhos, sendo cada galho representativo de um caminho alternativo de ação ou de decisão e ao final de cada um dos galhos tem-se outro nó representando um evento. Associado com cada caminho alternativo completo da árvore tem-se um resultado.

Ainda em seu artigo, Magee (1964) cita que a árvore pode combinar alternativas de escolha com diferentes possibilidades de eventos ou resultados, os quais são parcialmente afetados por acaso ou outras circunstâncias que estariam fora do controle.

A Figura 3.16 exibe um exemplo simples de Árvore de Decisão para uma situação em que se deseja escolher entre uma festa realizada ao ar livre ou em um espaço fechado. A decisão estaria baseada em dois eventos: com chuva ou sem chuva, e suas respectivas consequências.

Figura 3.16 – Exemplo de Árvore de Decisão.



Fonte: Adaptado de Magee, 1964.

Para Gomes e Gomes (2019), as etapas da técnica para o auxílio da tomada de decisão são definidas como: a) definição do tema; b) definição do objetivo, metas e submetas; c) construção da Árvore de Decisão; d) revisão da Árvore de Decisão; e) encerramento.

As vantagens da utilização dessa metodologia seriam, segundo Gomes e Gomes (2019): permitir a subdivisão do problema, facilitando o entendimento; orientar o tomador de decisão à medida que este entende o que é necessário fazer para alcançar a resolução do problema; permitir o exame, pelo tomador de decisão, de todas as possibilidades; permitir a criação de algoritmos facilmente implementados em computadores.

Vale destacar que as árvores de decisão garantem maior flexibilidade que os mecanismos tradicionais, já que as decisões são definidas com um maior grau de flexibilidade. Nesse método, uma série de eventos podem ser mapeados ao longo dos diversos ramos, envolvendo várias decisões de sequenciamento (Silva *et al.*, 2008).

A partir da revisão bibliográfica desenvolvida, pode-se entender a caracterização dos tipos de métodos, assim como exemplos de metodologias. Dessa forma compreendeu-se que o ponto de decisão inicial seria a existência ou não de dados numéricos disponíveis, o qual identificou-se como um pré-requisito importante para a escolha do método de análise.

Em seguida foi avaliada a qualidade dos dados disponíveis, pois caso sejam completos e abrangentes pode ser aplicado um método de análise de risco quantitativo, mas caso os dados não tenham essa abrangência, seria mais indicado seguir para métodos qualitativos.

No outro ramo da árvore, quando não existem dados numéricos disponíveis, questiona-se se há possibilidade de serem atribuídos valores aproximados ou escalas a dados qualitativos. Em caso positivo, direciona-se para aplicação de métodos semiquantitativos de análises. Caso não seja possível essa atribuição, indica-se a utilização de métodos qualitativos.

A partir da determinação de qual tipo de análise (qualitativa, quantitativa ou semiquantitativa) melhor se adequa com a natureza dos dados disponíveis, a árvore foi subdividida em três “sub-árvores” cada qual referente a um desses tipo de análise. A partir disso, inseriu-se os critérios analisados anteriormente acerca do nível de detalhamento, experiência necessária, flexibilidade e tempo de implementação para definir qual método específico seria mais apropriado.

Ressalta-se que para alguns casos não foram identificados nessa pesquisa métodos apropriados, como por exemplo para métodos quantitativos com baixo nível de detalhamento. Nessas situações recomendou-se a busca de outros métodos na literatura existente, visto que atualmente existem diversas opções, as quais podem não ter sido abrangidas no estudo desenvolvido nesse trabalho.

3.2.4 Comparação entre os métodos

Após o levantamento realizado, elaborou-se uma tabela onde foi exibida uma comparação entre os métodos com base em alguns critérios. A definição de quais seriam

esses critérios foi realizada a partir da análise das informações obtidas. A seguir serão apontados cada um desses critérios e os aspectos considerados.

3.2.4.1 Tipo de análise

Dado que a natureza dos dados disponíveis para a realização da análise de risco pode variar conforme a situação, é essencial que o método aplicado seja adequado ao contexto específico. Assim, os métodos de análise de risco utilizam procedimentos que podem ser direcionados para análises qualitativas, quantitativas ou semiquantitativas. Muitas vezes, esses métodos são versáteis e se aplicam a mais de um tipo de análise. Com base na bibliografia existente, foram caracterizados os tipos de análise possibilitados por cada método, permitindo uma escolha informada e adequada conforme as características dos dados e os objetivos da análise.

3.2.4.2 Nível de detalhamento

Um nível crescente de detalhe é geralmente considerado importante para uma avaliação de risco mais precisa (Sieg *et al.*, 2023). Dessa forma, o nível de detalhamento se trata da profundidade e extensão da análise fornecida por cada método de análise de riscos. Alguns métodos oferecem uma análise mais abrangente e detalhada, enquanto outros podem ser mais simplificados ou fornecer uma visão mais geral dos riscos envolvidos.

Considerou-se no nível de detalhamento a quantificação dos riscos, pois métodos de análise de riscos podem fornecer uma quantificação detalhada dos riscos, atribuindo valores numéricos às probabilidades e consequências dos eventos, o que fornece um elevado nível de detalhamento. Além disso, o nível de detalhamento também pode se relacionar com a profundidade da avaliação do impacto dos riscos, visto que métodos mais detalhados podem examinar uma variedade de impactos potenciais em diferentes áreas, como financeira, operacional, reputacional, entre outras.

3.2.4.3 Experiência necessária

A experiência dos profissionais envolvidos é um dos parâmetros de entrada para o desenvolvimento de grande parte dos métodos de análise de risco (IEC 31010 2019). Alguns métodos podem demandar uma compreensão mais profunda de conceitos

específicos de análise de riscos, enquanto outros podem ser mais acessíveis para aqueles com menos experiência. Além do conhecimento em análise de riscos, espera-se que para aplicação prática dos métodos o profissional apresente a capacidade de analisar criticamente os resultados da análise e tomar decisões informadas com base nessas informações, incluindo a habilidade de avaliar a relevância e a precisão dos dados, identificar pontos fortes e fracos na análise e recomendar ações corretivas apropriadas.

3.2.4.4 *Adaptabilidade*

A estrutura necessária para a prática da gestão de riscos e suas componentes devem ser continuamente monitoradas e adaptadas para abordar mudanças externas e internas (ISO 31000, 2018). Sendo assim, adaptabilidade seria a capacidade de cada método de análise de riscos se adaptar a uma variedade de situações, tipos de riscos e necessidades específicas. Métodos mais flexíveis podem ser ajustados e personalizados para atender a diferentes cenários, enquanto métodos menos flexíveis podem ser mais limitados em sua aplicação.

Com relação a esse aspecto, considerou-se a adaptabilidade a diferentes tipos de riscos; a customização, ou seja, a capacidade de ajustar os critérios da análise de riscos, modificar as etapas do processo de análise ou adaptar a terminologia usada. Também foi levado em consideração a facilidade ou não de integração com outros métodos de análise de riscos.

3.2.4.5 *Tempo de implementação*

O tempo de implementação refere-se ao período necessário para conduzir a análise de riscos utilizando cada método específico. Esse tempo pode variar significativamente de acordo com a complexidade do método, a dimensão e a complexidade do sistema ou processo sendo analisado, a disponibilidade de dados e recursos, entre outros fatores. Foram adotados os termos curto, médio e longo prazos para classificar os métodos quanto a esse critério, os quais são melhor definidos a seguir:

1. Curto Prazo: geralmente, um período curto de tempo para implementação pode ser considerado de alguns dias a algumas semanas. Esse prazo pode ser

adequado para análises de riscos mais simples, de menor escopo ou que exigem menos dados e recursos para serem concluídas;

2. Médio Prazo: um prazo médio de implementação pode variar de algumas semanas a alguns meses. Esse período de tempo pode ser necessário para análises de riscos de complexidade moderada, que exigem uma análise mais detalhada ou o envolvimento de múltiplas partes interessadas;
3. Longo Prazo: um prazo longo de implementação pode abranger vários meses ou até mesmo anos, dependendo da complexidade da análise e das restrições de recursos. Isso pode ser necessário para análises de riscos altamente complexas, que envolvem múltiplos sistemas, processos ou áreas, e que exigem uma coleta extensiva de dados e análise detalhada.

É importante ressaltar que essas definições são apenas orientações gerais e podem variar dependendo das características específicas de cada situação. Ao determinar o prazo de implementação para uma análise de riscos, deve-se considerar a complexidade da análise, a disponibilidade de recursos, as restrições de tempo e os seus objetivos.

3.3 Resultados e discussão

A seguir apresentam-se a tabela obtida a partir do levantamento bibliográfico realizado dos métodos de análise de riscos com o objetivo de compará-los a partir de três critérios pré-definidos e o modelo de Árvore de Decisão proposto para auxiliar na escolha do método.

3.3.1 Tabela de comparação dos métodos

A Tabela 3.2 exhibe um resumo com os critérios considerados mais relevantes para comparação dos métodos de análise de risco avaliados anteriormente.

Tabela 3.2 - Comparação entre os métodos.

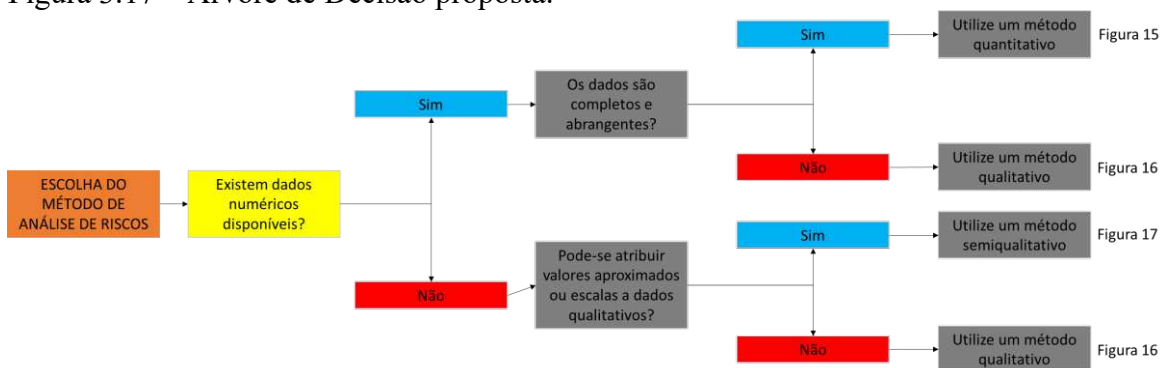
Critério	Árvore de Eventos	Árvore de Falhas	Bow-Tie	Matriz de Risco	Matriz GUT	Método da Performance Histórica	FMEA/ FMECA
Tipo de Análise	Qualitativa, semiquantitativa ou quantitativa	Qualitativa, semiquantitativa ou quantitativa	Qualitativa, semiquantitativa ou quantitativa	Qualitativa e semiquantitativa	Qualitativa ou quantitativa	Quantitativo	Qualitativa e semiquantitativa
Nível de Detalhamento	Alto	Alto	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Alto
Experiência Necessária	Alta	Alta	Moderada	Moderada	Baixa	Moderada	Alta
Adaptabilidade	Baixa	Baixa	Moderada	Moderada	Alta	Moderada	Alta
Tempo de Implementação	Longo	Longo	Médio	Médio	Curto	Médio	Longo

Fonte: o Autor, 2024.

3.3.2 Árvore de Decisão

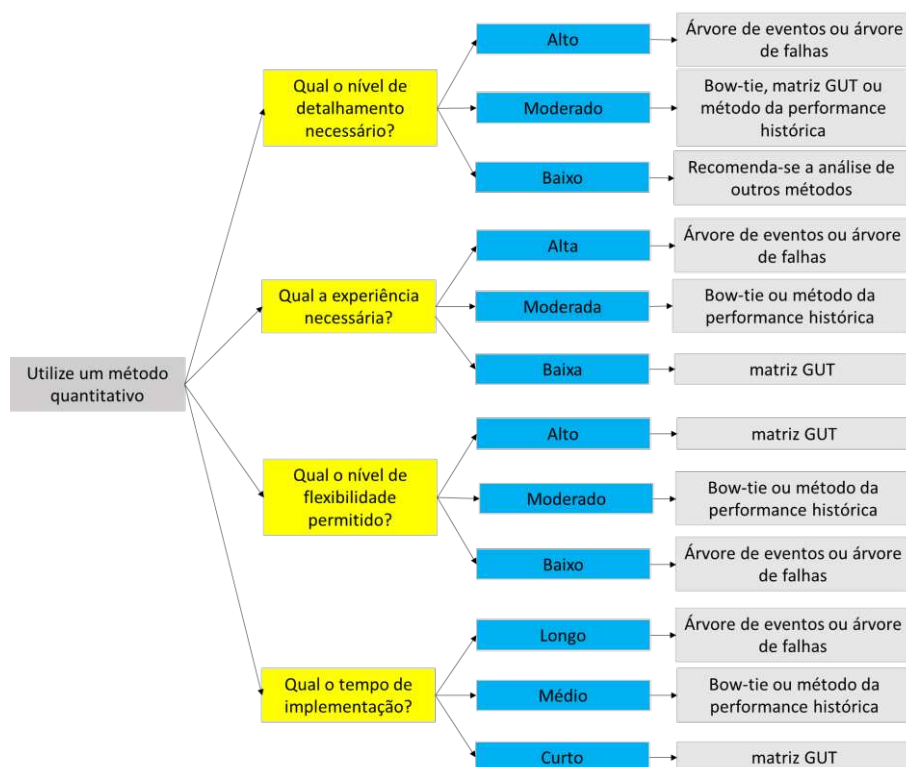
Da Figura 3.17 à Figura 3.20 é apresentada, portanto, a proposta de Árvore de Decisão para auxiliar na escolha do método de análise de riscos.

Figura 3.17 – Árvore de Decisão proposta.



Fonte: o Autor, 2024.

Figura 3.18 – Árvore de Decisão proposta – métodos quantitativos.



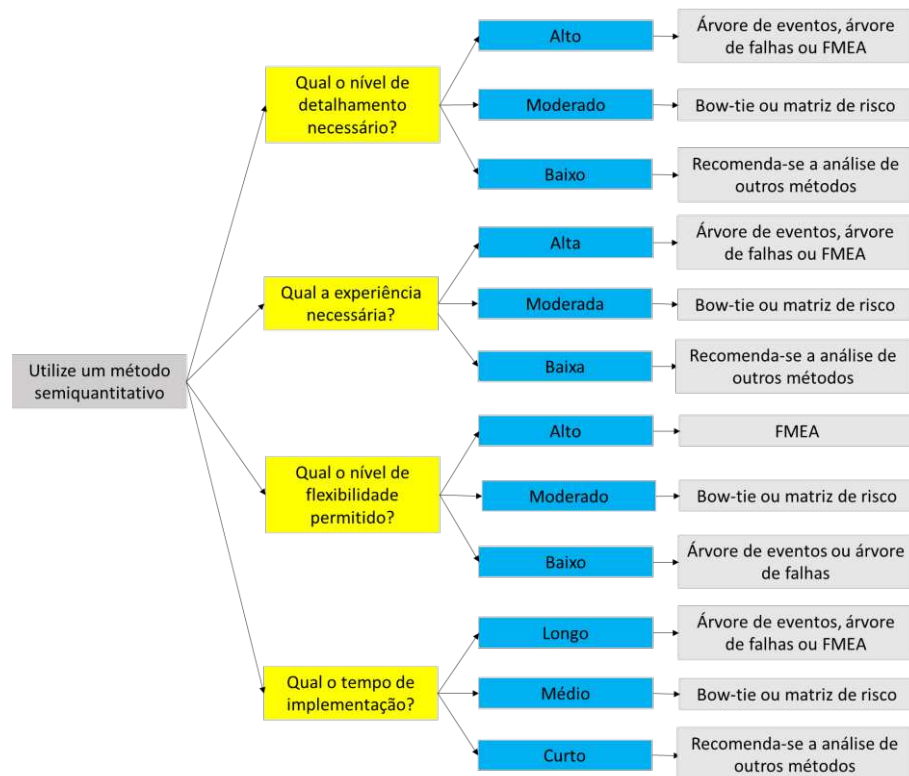
Fonte: o Autor, 2024.

Figura 3.19 – Árvore de Decisão proposta – métodos qualitativos.



Fonte: o Autor, 2024.

Figura 3.20 – Árvore de Decisão proposta – métodos semiquantitativos.



Fonte: o Autor, 2024.

3.4 Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvida uma Árvore de Decisão para auxiliar na escolha do método de análise de risco no contexto de estruturas geotécnicas. A partir da realização de levantamento bibliográfico foi possível verificar as características de alguns métodos (Árvore de Eventos, Árvore de Falhas, Bow-Tie, Matriz de Risco, Matriz GUT, Método da Performance Histórica e FMEA) e posteriormente elaborar uma tabela com critérios pré-definidos para comparação entre esses métodos.

Dentre os métodos analisados observou-se que grande parte possibilitam o desenvolvimento de análises diversificadas dentre os três tipos. As árvores de eventos e de falhas, por exemplo, permitem análises qualitativas, quantitativas e semiquantitativas, mas por outro lado apresentam baixa flexibilidade. Enquanto o método da performance histórica permite apenas análises quantitativas, mas se caracteriza por flexibilidade moderada. Destaca-se também o FMEA, que a partir dos critérios analisados, seria o método de maior complexibilidade, visto que possui elevado nível de detalhamento, é necessário alta experiência para colocá-lo em prática e requer longo tempo de implementação.

Todas essas informações foram então utilizadas para elaborar a Árvore de Decisão, que tem como ponto de partida a natureza dos dados disponíveis e permite ao seu usuário realizar uma avaliação quanto à abrangência desses dados, definindo qual tipo de análise melhor se adequa à situação. Então, após essa definição, os critérios de nível de detalhamento, experiência necessária, flexibilidade e tempo de implementação são utilizados para determinar qual método, dentre os analisados, seria mais recomendado. A inserção desses critérios tornou a árvore um instrumento mais abrangente e adaptável, capaz de fornecer uma orientação mais precisa e personalizada na seleção do método de análise de riscos mais apropriado para cada cenário específico.

Sendo assim, a Árvore de Decisão apresentada seria um auxílio inicial útil e bastante visual na avaliação dos métodos de análise de riscos para estruturas geotécnicas, fornecendo uma estrutura clara e sistemática para a seleção do método mais apropriado com base em critérios específicos, uma contribuição significativa em uma fase crítica do processo de gestão de riscos. Essa abordagem não apenas simplifica o processo de escolha, mas também promove uma análise mais precisa, resultando em decisões mais fundamentadas e eficazes na mitigação de riscos geotécnicos.

4 PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE SEGURANÇA DE TÚNEIS DE TRANSFERÊNCIA HÍDRICA

4.1 Introdução

No contexto da avaliação do estado de conservação de edificações, no Brasil tem-se a Norma de Desempenho (ABNT NBR 15575) que entrou em vigor em 2013 e é composta por seis partes, as quais estão relacionadas com os requisitos gerais, estruturais, de pisos, de vedações, de coberturas e hidrossanitários. Essa norma tem como objetivo validar os materiais e sistemas construtivos empregados na construção civil em termos de segurança, habitabilidade e sustentabilidade. Foram estabelecidos três níveis de desempenho a serem atingidos pelos sistemas, onde cada um classifica o respectivo grau de qualidade: mínimo, intermediário e superior (Bolina *et al.*, 2019).

Para além das edificações, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) desenvolveu uma metodologia para avaliação do estado de conservação de pontes rodoviárias. Essa metodologia consiste em uma abordagem sistemática que envolve a inspeção visual, análise documental, medições e ensaios específicos para determinar o estado atual dessas estruturas. Foi elaborado um manual que objetiva treinar profissionais habilitados para realizar inspeções e padronizar os procedimentos e práticas para determinar condições de estabilidade, necessidade de manutenção e capacidade de carga desse tipo de estrutura (DNIT, 2004).

No trabalho de Malva (2014) é retratada a experiência em relação à inspeção, monitoramento e diagnóstico de túneis existentes na Rede Ferroviária Nacional, em Portugal. Com base nas informações coletadas, foi possível analisar o funcionamento do túnel e verificar se seu estado de conservação se encontra de acordo com o esperado. Como resultado os túneis foram classificados de acordo com seu estado de conservação conforme as categorias elencadas na Tabela 4.1. O trabalho desenvolvido permitiu diagnosticar os túneis e avaliar seus estados de conservação, facilitando o planejamento e a distribuição dos recursos financeiros para manutenção. As medidas de manutenção são aplicadas conforme a categoria de cada túnel, variando de pequenas atividades a intervenções de emergência em casos de deterioração avançada.

Tabela 4.1 - Classificação de túneis conforme estado de conservação.

Estado de conservação	Definição	Medidas de intervenção
Túnel em bom estado	Túnel sem defeitos, ou quando existem, são insignificantes	-
Túnel em condição razoável	Túnel que apresenta alguns defeitos, mas sem danos estruturais	Necessárias pequenas obras de preservação, para evitar sua deterioração
Túnel em mau estado	Túnel com danos estruturais e deformações e fissuras elevadas ou excessivas. Também são classificados nesta categoria os túneis com grandes infiltrações de água	As estruturas devem ser reparadas em um prazo que não exceda cinco anos. É necessária a instrumentação de áreas sensíveis
Túnel em estado muito ruim	Túnel com danos estruturais graves e com risco de colapso de áreas significativas de sua estrutura	Túnel que deve ser reparado o mais rápido possível, com estabilização em um prazo não superior a um ano. Requer inspeções especiais com periodicidade rigorosa. Também requer o monitoramento das áreas em risco

Fonte: adaptado de Malva, 2014.

Em Portugal, o Método de Avaliação do Estado de Conservação de Imóveis (MAEC) desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) utiliza como base uma ficha de avaliação do imóvel, preenchida durante a inspeção. Para determinar o estado de conservação no MAEC, são contrastadas as condições do local na data da inspeção atual com as condições que existiam quando foi originalmente construído ou quando passou pela última intervenção significativa, e o estado de conservação final é representado em uma escala de cinco níveis. Cada “nível de conservação” está associado a um valor do “coeficiente de conservação”: excelente – 1,2, bom – 1,0, médio – 0,9, ruim – 0,7 e péssimo – 0,5 (Pedro e Paiva, 2012; Portaria n.º 1192-B, 2006).

O MAEC é uma metodologia considerada rigorosa, objetiva e transparente de determinar o estado de conservação. A exigência de rigor advém da realização de uma avaliação minuciosa das condições do imóvel. A objetividade é garantida pelas regras claras e predefinidas, o que possibilita que os resultados sejam o mais independentes possível do técnico responsável pela avaliação. Já a transparência garante que tanto o

processo quanto os resultados sejam facilmente compreendidos por todas as partes envolvidas. Na versão original, o instrumento de pesquisa empregado pelo método consiste em uma Ficha de Avaliação que segmenta a edificação em 37 elementos funcionais, sendo que, dependendo do tipo de edifício, alguns desses elementos podem ser considerados como não aplicáveis (Oliveira *et al.*, 2018).

Em pontes, Rashidi e Gibson (2012) apresentaram uma metodologia para avaliação da condição da ponte através do coeficiente do *OSCI* (sigla em inglês para índice de condição estrutural geral) que é determinado através da Equação 1:

$$OSCI = \frac{CF \sum(Mi \times Si \times ESCIi)}{64n} \quad \text{Equação 1}$$

Onde CF seria o fator causal que considera a idade da ponte (*A*), o ambiente (*E*), a classe de estrada (*R*) e a qualidade da inspeção realizada (*I*). O CF é calculado de acordo com a Equação 2, onde os pesos de cada um desses fatores foram determinados utilizando o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) que é uma técnica de tomada de decisão em que elementos de um problema são comparados dois a dois para estabelecer prioridades entre eles (Rashidi & Gibson, 2012).

$$CF = 0,411(A) + 0,120E + 0,107R + 0,362I \quad \text{Equação 2}$$

Na Equação 1, *Mi* é o fator de vulnerabilidade do material, *Si* é o fator de importância estrutural, *ESCIi* é o Índice de Condição Estrutural do Elemento e *n* é o número de tipos de elementos, visto que neste sistema a ponte é dividida em elementos de materiais semelhantes. O *ESCIi* é determinado através da Equação 3:

$$ESCI = \frac{\sum(qi \times ci)}{\sum qi} \quad \text{Equação 3}$$

Onde *qi* é a quantidade de elementos da ponte relatados no Índice de Condição *Ci*. O Índice de Condição varia de 1 a 4, com cada valor correspondendo a um estado específico da condição da ponte.

Em paralelo, para o contexto dos túneis de transferência hídrica, atualmente tem-se o *checklist* desenvolvido por Silva (2022). Essa ferramenta mostrou-se efetiva para

avaliação das anomalias apresentadas pelo túnel no momento da inspeção, principalmente através das classificações de situação, magnitude e nível de perigo a que as anomalias identificadas são submetidas, levando em consideração a evolução da anomalia em relação a inspeções anteriores, a necessidade de intervenção imediata e o risco que a anomalia representa para a segurança e para o funcionamento do túnel (Silva, 2022).

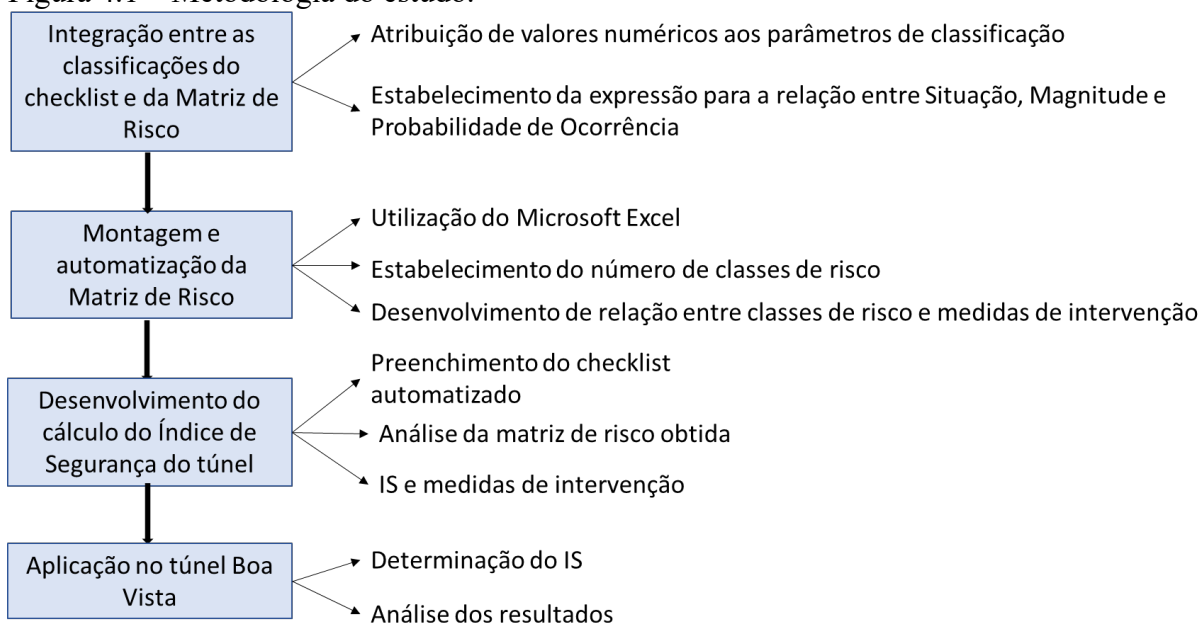
Dada a importância dessas estruturas para a segurança hídrica em diversas regiões, é necessário aplicar uma metodologia de avaliação do estado de conservação eficaz a longo prazo, algo ainda inexistente na literatura atual. Dessa forma, assim como o “coeficiente de conservação” para edificações e o OSCI para pontes, definiu-se nesse trabalho o Índice de Segurança (IS) para túneis de transferência hídrica, com as devidas adequações necessárias para esse tipo de estrutura.

4.2 Metodologia

Neste trabalho será apresentada uma proposta para determinação do Índice de Segurança (IS). Este índice está direcionado para túneis que se encontram na etapa de pós-construção e fundamenta-se no registro que é a base de todo o processo de diagnóstico da condição de uma estrutura: a inspeção, englobando o histórico das inspeções através do *checklist* com a classificação detalhada das anomalias e fornecendo uma resposta clara e fundamentada para os gestores acerca do estado de conservação e da segurança operacional através da Matriz de Risco, uma ferramenta de gestão de risco familiar à comunidade técnica. Além disso, pretendeu-se através do método, auxiliar na priorização das anomalias identificadas, garantindo um nível de resposta adequado para a manutenção e mitigação de riscos, objetivando a funcionalidade contínua do túnel. Além disso, a proposta de método também auxilia na priorização das anomalias identificadas.

Na Figura 4.1 apresenta-se a esquematização da metodologia adotada neste estudo.

Figura 4.1 – Metodologia do estudo.



Fonte: o Autor, 2024.

4.2.1 Integração entre as classificações do checklist e da Matriz de Risco

Para realizar a integração entre as classificações adotadas no *checklist* e na matriz de risco optou-se por uma abordagem que utiliza uma matriz de risco elaborada a partir da probabilidade de ocorrência versus a consequência das anomalias. O *checklist* seria então a ferramenta fundamental para fornecer informações sobre o estado de conservação da estrutura e elaboração dessa integração.

Esse processo foi realizado por meio das classificações de situação, magnitude e nível de perigo, às quais todas as anomalias identificadas durante a inspeção com o uso do *checklist* são submetidas. Cada uma dessas classificações é composta por parâmetros, definidos conforme a Figura 4.2, extraída de um trecho do *checklist*.

Figura 4.2 – Classificações de situação, magnitude e nível de perigo.

SITUAÇÃO	LEGENDA	
	MAGNITUDE	
NA: item não aplicável	I - insignificante	problema que pode simplesmente ser mantido sob observação do operador.
NE: problema não existente	P – pequena	quando o problema pode ser resolvido/ encaminhado pelo próprio operador.
PV: problema verificado pela primeira vez	M – média	problema que só pode ser resolvido com apoio da equipe de manutenção / gerência regional.
PR: problema resolvido	G – grande	problema que só pode ser resolvido através empresa especializada.
DI: problema diminuiu	NÍVEL DE PERIGO	
PC: problema permaneceu constante	0 – nenhum	não compromete a segurança/funcionamento do túnel, mas que indica descaso e/ou falta de manutenção.
AU: problema aumentou	1 – atenção	não compromete a segurança/funcionamento do túnel a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada ao longo do tempo.
NI: item não inspecionado (informar motivo)	2 – preocupante	possibilidade de comprometimento da segurança/funcionamento do túnel, devem ser tomadas providências para a eliminação do problema.
	3 – máximo	risco crítico de segurança/comprometimento do funcionamento do túnel.

Fonte: Silva, 2022.

A probabilidade de ocorrência na matriz de risco foi determinada pela relação entre situação e magnitude. A relação foi estabelecida através da análise das definições dos termos. Situação refere-se ao contexto da anomalia, como sua existência, resolução, redução, entre outros aspectos. Magnitude representa o tamanho ou amplitude da anomalia. A probabilidade de ocorrência, por sua vez, indica a frequência ou probabilidade de ocorrência de fenômenos potencialmente prejudiciais (Silva, 2022; ANA, 2016; Porter *et. al*, 2019).

A expressão matemática foi obtida por meio de testes que consideraram os valores máximos e mínimos obtidos, de forma a se adequar ao intervalo percentual de uma probabilidade. Sendo $P(A)$ a probabilidade de ocorrência de um evento A , de acordo com Murray *et al.* (2013) tem-se o seguinte teorema:

$$0 \leq P(A) \leq 1$$

Isto é, a probabilidade está entre 0 e 1, ou entre 0 e 100%. Além disso, o nível de perigo foi relacionado diretamente com a consequência também a partir das definições desses termos. Nível de perigo seria a gradação do perigo à estrutura, decorrente da identificação de determinada anomalia e consequência se trata do resultado negativo (ou perda) que resulta da existência de uma anomalia (ANA, 2016; Porter *et. al*, 2019).

Os valores atribuídos aos parâmetros das classificações foram associados a categorias de probabilidade de ocorrência e de consequências. A partir dessas categorias é possível determinar a dimensão da matriz de risco e o número de classes de risco que a mesma apresentará.

4.2.2 Montagem e automatização da matriz de risco

O risco é definido como $\text{Risco} = \text{probabilidade} \times \text{consequência}$ ou função semelhante. Essa função é a base para avaliar os riscos. Na matriz de risco, a apresentação deve seguir essa definição, de modo que as pontuações iguais correspondam a valores iguais do produto das variáveis de risco na célula (Dujim, 2015).

A matriz de risco foi introduzida primeiramente por Garvey e Lansdowne (1998) e é uma ferramenta utilizada para retratar o risco associado aos potenciais modos de falha, onde a probabilidade de falha se encontra no eixo vertical e as consequências estão no eixo horizontal, utilizando divisões correspondentes às categorias de

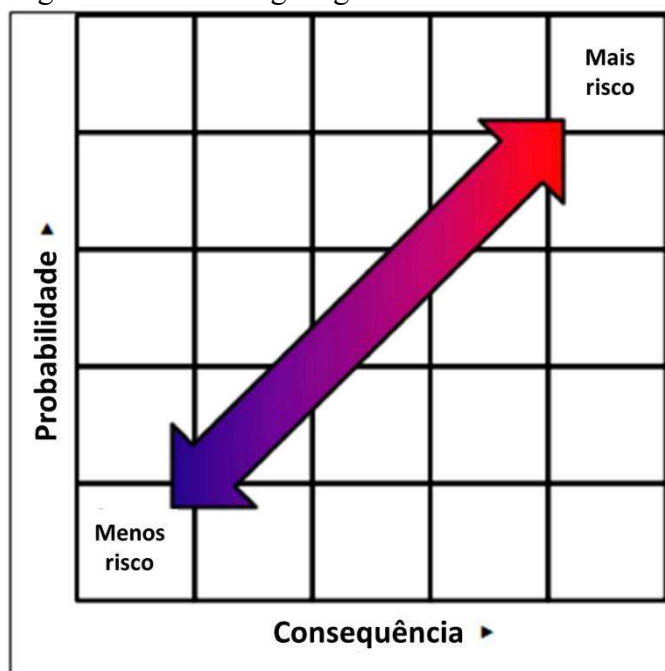
probabilidade e de consequência previamente definidas em diferentes níveis, dependendo da precisão dos resultados esperados. Essa matriz tem sido desenvolvida para análises qualitativas e semiquantitativas, classificando a probabilidade de ocorrência e as respectivas consequências através de escalas numéricas ou descritivas. (Baptista, 2009; Scott, 2011; Moradi *et al.*, 2013).

Para construir uma matriz de risco, deve-se adotar os passos descritos a seguir (Moradi *et al.*, 2013):

- Identificação dos diferentes riscos que trazem algum tipo de perigo para o projeto;
- Definição do nível de risco para cada perigo, determinando a sua probabilidade de ocorrência e tendo em conta a sua consequência. O nível de risco para cada perigo é dado por: índice de risco = probabilidade x consequência.

Na Figura 4.3 pode-se observar um modelo geral de matriz de risco utilizando as categorias de probabilidade de falha e consequências. Tendo-se uma linha imaginária traçada na diagonal da matriz, a célula mais à direita representa uma situação de maior risco e a célula mais à esquerda, de menor risco.

Figura 4.3 – Abordagem geral da matriz de riscos.



Fonte: Adaptado de Bureau of Reclamation e US Army Corps of Engineers, 2019.

Observa-se, portanto, que uma categoria de probabilidade e uma categoria de consequência são atribuídas a cada modo de falha potencial identificado e, em seguida, são plotadas na célula apropriada da matriz. É importante que a justificativa e a

fundamentação para cada categoria atribuída sejam bem esclarecidas. Os modos de falha potenciais com probabilidade remota e consequências de nível 0 não são incluídos na matriz, visto que normalmente seriam descartados pois as chances de falha ou as consequências foram consideradas insignificantes (Scott, 2011).

Em Remedy (2018) foi realizada uma revisão da literatura acerca das matrizes de risco aplicadas para avaliação de risco em engenharia geotécnica. No estudo foram levantadas as dimensões mais comuns de matrizes de risco de acordo com o campo de aplicação, concluindo que as matrizes 5×5 com 3 ou 4 níveis de risco são mais comumente utilizadas em diferentes áreas da engenharia geotécnica.

O grupo de trabalho número 2 da *International Tunneling and Underground Space Association* (ITA) elaborou em 2004 diretrizes para identificação e gestão de riscos em projetos de túneis e obras subterrâneas. Neste documento é apresentado um exemplo de Matriz de Risco onde as ações a serem aplicadas para cada nível de perigo estão relacionadas com a classificação do risco entre “Inaceitável”, “Indesejável”, “Aceitável” ou “Negligenciante” (Eskesen et al., 2004). A seguir apresenta-se detalhadamente essa classificação:

- Inaceitável: o risco deve ser reduzido pelo menos para Indesejado, independentemente dos custos de mitigação de riscos.

- Indesejável: devem ser identificadas medidas de mitigação de riscos indesejados. As medidas serão implementadas desde que os custos das medidas não sejam desproporcionais à redução de risco obtida

- Aceitável: o perigo deve ser gerenciado durante todo o projeto. A consideração da mitigação de riscos não é necessária.

- Negligenciável: não é necessária mais consideração sobre o perigo.

A matriz de risco apresentada na Figura 4.4 pode ser tomada como base para a decisão sobre a aceitabilidade de cada perigo considerado.

Figura 4.4 – Exemplo de matriz de riscos para túneis.

Probabilidade	Muito provável	Indesejável	Indesejável	Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável
	Provável	Aceitável	Indesejável	Indesejável	Inaceitável	Inaceitável
	Ocasional	Aceitável	Aceitável	Indesejável	Indesejável	Inaceitável
	Improável	Negligenciável	Aceitável	Aceitável	Indesejável	Indesejável
	Muito improvável	Negligenciável	Negligenciável	Aceitável	Aceitável	Indesejável
		Insignificante	Considerável	Sério	Severo	Desastroso
Consequência						

Fonte: adaptado de Eskesen et al., 2004.

Porter *et al.* (2019) destaca que uma das limitações das matrizes de risco seria a ausência de orientações acerca de como essas ferramentas devem ser aplicadas em diferentes escalas de projeto. Dessa forma, é importante que sejam bem definidos a aplicação da ferramenta e quem será ou quem serão os responsáveis pela sua utilização e análise dos resultados, pois cenários diferentes de aplicação envolvem escalas de avaliação diferentes. Ademais, os autores também salientam que quando se trata de riscos que apresentam natureza variável e dinâmica, que estão sob influência de diversos fatores sobre os quais não se tem controle (solo, clima, tempo, etc) é importante manter as avaliações sob revisão através de inspeções regulares e monitoramento.

Ressalta-se que a matriz de risco também foi automatizada através do *Microsoft Excel* de forma que a partir do preenchimento do *checklist* na planilha, automaticamente a matriz também é preenchida com os identificadores das anomalias, que são códigos únicos atribuídos a cada anormalidade listada no *checklist* de inspeção. Esses identificadores facilitam a referência, o acompanhamento e a documentação de cada anomalia específica. No *checklist*, as anomalias são numeradas sequencialmente com um prefixo "A" seguido de um ponto e um número, por exemplo, A.1, A.2, A.3, e assim por diante.

A letra inicial varia conforme a seção do *checklist* em que estamos tratando, permitindo uma organização clara e estruturada. Por exemplo, a seção "A" refere-se a anomalias relacionadas com a infraestrutura, enquanto a seção "B" se trata de irregularidades que podem ocorrer no revestimento do túnel. Para tornar a visualização mais clara e organizada, optou-se por apresentar apenas os identificadores na matriz. Caso as anomalias fossem detalhadas com suas descrições completas, a matriz ficaria sobrecarregada de informações, comprometendo sua praticidade e eficácia na análise dos dados.

4.2.3 Desenvolvimento do Índice de Segurança

A partir da definição do modelo de matriz de risco a ser utilizado, com as categorias de probabilidade de ocorrência e de consequência, assim como as classes de risco que são distinguidas por uma escala de cores, elaborou-se uma relação entre cada classe de risco e as medidas de intervenção necessárias. Essa relação foi baseada em uma matriz de risco proposta no documento de orientação para aplicação de legislação de

avaliação de riscos proposta pelo governo escocês, onde o significado atribuído às classes de risco são exibidas a seguir (Scottish Executive, 2006 apud Baptista 2009).

- Risco muito elevado: refere-se a riscos críticos que requerem a implementação de medidas imediatas. Os riscos inseridos nesta classe podem ter ocorrência moderada a muito elevada e a magnitude das consequências, podem ser significativas ou catastróficas, exigindo prioridade máxima na implementação de medidas estruturais para sua mitigação.
- Risco elevado: refere-se a riscos importantes com probabilidades de ocorrência baixa e consequências significativas a catastróficas ou probabilidade de ocorrência moderada a muito elevada e consequências de magnitude moderada. Nessa classe de riscos, requerem-se a implementação imediata ou a curto prazo de medidas estruturais ou não estruturais para mitigação dos riscos.
- Risco moderado: refere-se a riscos com probabilidade de ocorrência moderada a muito elevada e consequências baixas ou probabilidade de ocorrência muito baixa a baixa e consequências moderadas a catastróficas. Nesta classe, requerem-se a implementação, a curto prazo, de medidas de observação e de inspeção das estruturas e de mitigação das consequências, objetivando o desenvolvimento de estudos aprofundados da situação e à eventual definição de medidas posteriores.
- Risco baixo: refere-se a riscos com consequências insignificantes, independentemente da probabilidade de ocorrência, ou riscos baixos com consequências baixas e probabilidade de ocorrência muito baixa a baixa. Esta classe de riscos requer a eventual implementação de medidas de observação e controle.

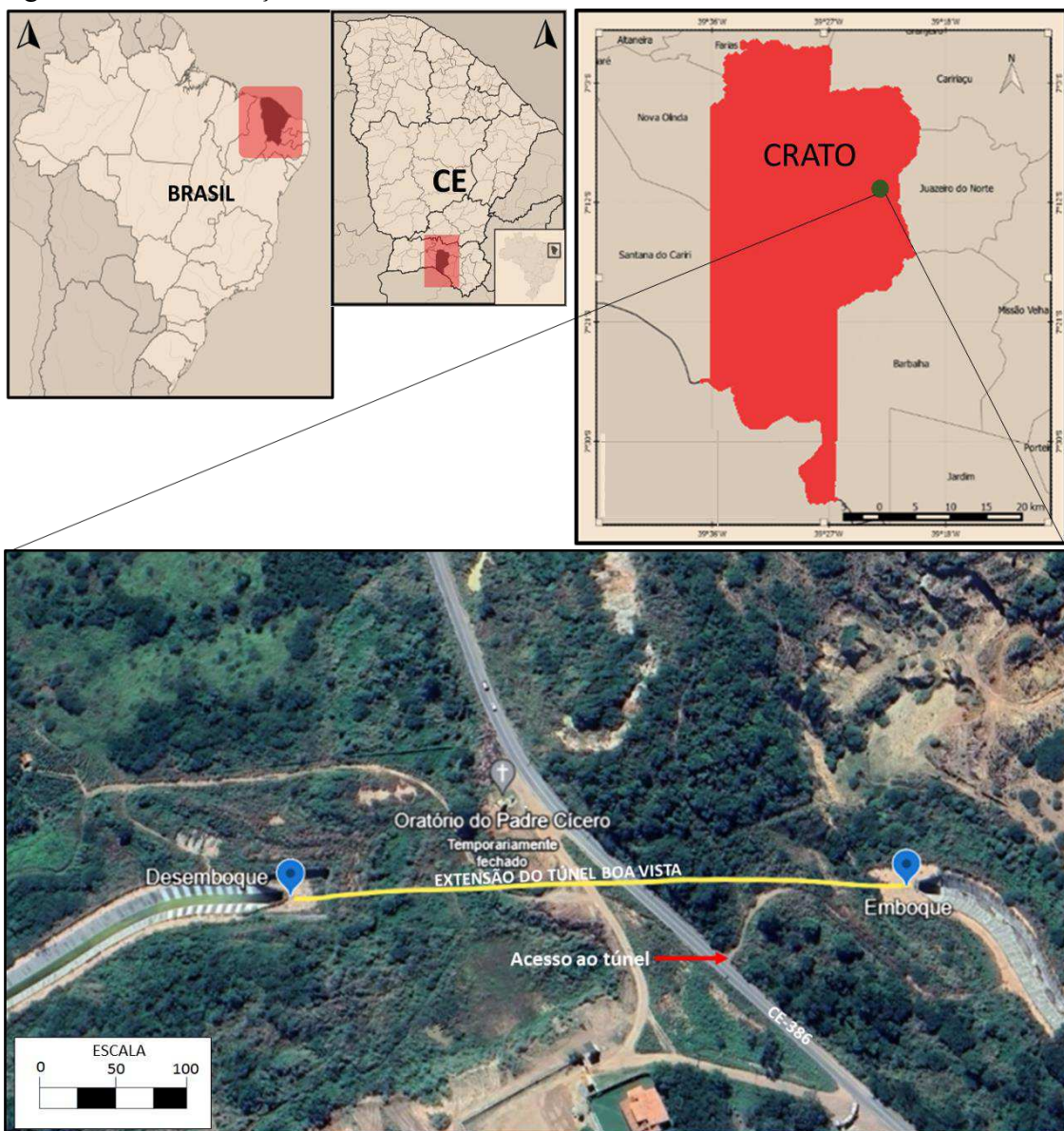
A determinação do Índice de Segurança (IS) do túnel foi realizada inicialmente a partir da proporção de anomalias presentes na classe de risco baixo. Tendo-se o valor dessa proporção, determinou-se então o IS, que se trata de um valor tabelado, acompanhado de um descritor de natureza qualitativa que se refere ao estado de conservação e ao potencial de usabilidade desse túnel.

4.2.4 Aplicação no túnel Boa Vista

O túnel Boa Vista está localizado a poucos quilômetros ao oeste de Crato, município do Ceará, e é 1 dos 9 túneis pertencentes ao Cinturão das Águas do Ceará, realizando o trabalho de conduzir a água do Rio São Francisco ao Ceará. O seu acesso é

realizado através da rodovia CE-386, na região do bairro Bela Vista, próximo a indústrias de produção de materiais para construção civil (Google Earth, 2024). Na Figura 2.2 pode-se observar a localização do túnel.

Figura 4.5 – Localização do túnel Boa Vista.

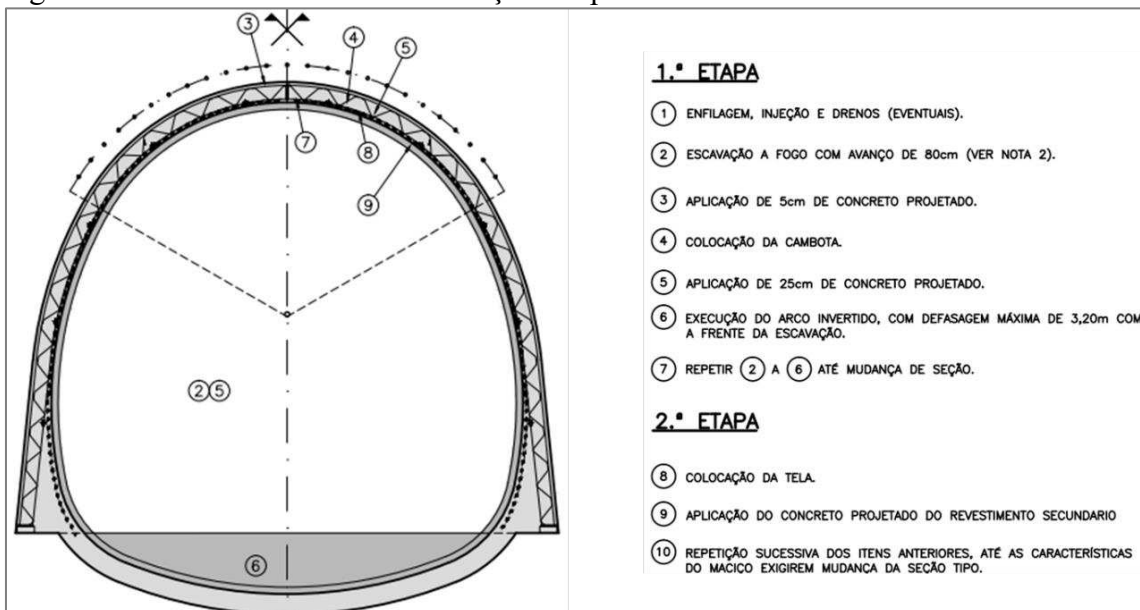


Fonte: adaptado de Oliveira Júnior (2019); Google Earth (2024).

O túnel possui aproximadamente 336 metros de extensão e está localizado na borda da bacia sedimentar da Chapada do Araripe. A classificação geomecânica (Bieniawski, 1976 *apud* Maciel Filho e Nummer, 2014) da rocha presente no emboque do túnel Boa Vista foi classe V, tendo como método construtivo a seção tipo 5A (Figura 2.3). Enquanto seu desemboque apresentou rocha de classe IV (Bieniawski, 1976 *apud*

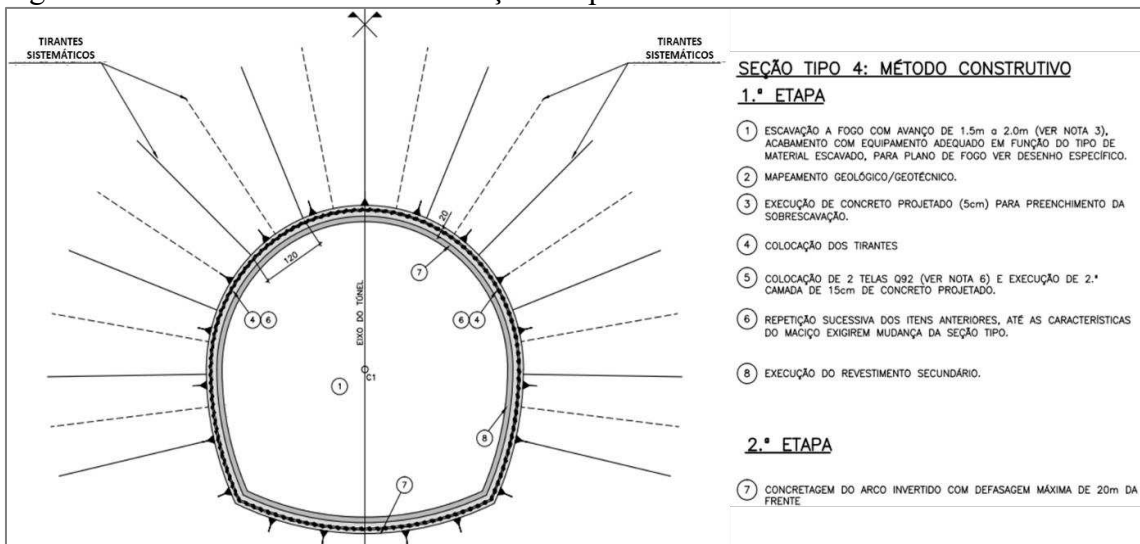
Maciel Filho e Nummer, 2014) com método construtivo de acordo com a seção 4C (Figura 2.4) (VBA, 2013).

Figura 4.6 – Método construtivo da seção 5A pertencente ao túnel Boa Vista.



Fonte: VBA, 2013.

Figura 4.7 – Método construtivo da seção 4C pertencente ao túnel Boa Vista.



Fonte: VBA, 2013.

A inspeção no túnel Boa Vista (Figura 4.8) foi realizada em agosto de 2022 por membros da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) juntamente com pesquisadores da Universidade Federal do Ceará (UFC). Para orientar a atividade, durante a inspeção adotou-se o *checklist* elaborado por Silva (2022) que foi utilizado por 4 profissionais, formados em engenharia civil, que foram chamados

respectivamente de A1, A2, A3 e A4. Para o estudo apresentado neste trabalho adotou-se o *checklist* preenchido pelo inspetor A4, visto que foi o que identificou mais anomalias na seção de problemas adversos, que não estavam sendo apresentados nas demais seções do *checklist*. Ressalta-se que o túnel estava concluído, mas não em funcionamento no momento da inspeção.

Figura 4.8 – Entorno e emboque do túnel Boa Vista.



Fonte: COGERH, 2023.

Durante a inspeção realizada no túnel, realizou-se o preenchimento do *checklist* elaborado por Silva (2022). Esse documento foi então adotado como base para a aplicação da proposta de determinação do IS para o túnel Boa Vista, assim como as anomalias que demonstraram, através do método, maior atenção e se o resultado obtido estaria dentro do que se espera para o estado de conservação de um túnel que está concluído, mas não se encontrava em operação.

4.3 Resultados e discussão

A seguir, serão apresentados os resultados das etapas realizadas, iniciando pela apresentação do *checklist* automatizado. Em seguida, será abordada a integração realizada entre as classificações do *checklist* e a probabilidade de ocorrência e

consequência da matriz de risco. Posteriormente será apresentada a matriz de risco adotada juntamente com o método proposto para cálculo do Índice de Segurança (IS). Finalmente, o método será aplicado no túnel Boa Vista.

4.3.1 Classificações integradas

Considerando as definições de cada parâmetro de situação (S) definidos no *checklist*, a atribuição de valores resultou em uma escala que variou de 0 a 3. Por exemplo, um parâmetro como NE (anomalia não existente) recebeu pontuação 0, pois, se a anomalia não existe, ele não tem peso na probabilidade de consequência. Da mesma forma, o item DI (anomalia diminuiu) recebeu pontuação 1, refletindo alguma influência na probabilidade de consequência, embora não significativa. Em contrapartida, uma anomalia classificada como AU (anomalia aumentou) recebeu a pontuação mais elevada, indicando uma maior probabilidade de ser observado novamente em uma próxima inspeção. As pontuações atribuídas estão detalhadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Pontuações dos parâmetros de situação (S).

Atributo	Definição	Pontuação
NA	item não aplicável	0
NE	anomalia não existente	0
PV	anomalia verificada pela primeira vez	1
PR	anomalia resolvida	0
DI	anomalia diminuiu	1
PC	anomalia permaneceu constante	2
AU	anomalia aumentou	3
NI	item não inspecionado	0

Fonte: o Autor, 2024.

Os parâmetros pertencentes à classificação de magnitude (M) das anomalias receberam pontuação de 0 a 3, levando em consideração as definições, conforme Tabela 4.3. A anomalia que recebeu classificação I (insignificante) possui pontuação 0 pois representa uma anomalia que pode simplesmente ser mantido sob observação do operador, enquanto aquele que recebe classificação G (grande) apresenta pontuação maior.

Tabela 4.3 - Pontuações dos parâmetros de magnitude (M).

Atributo	Definição	Pontuação
I	Insignificante	0
P	Pequena	1
M	Média	2
G	Grande	3

Fonte: o Autor, 2024.

As pontuações dos parâmetros de nível de perigo (NP) foram atribuídas de forma intuitiva visto que já se tratava de uma classificação numérica, diferente das anteriores em que se tinham parâmetros qualitativos. Sendo assim, a pontuação varia de 0 a 3, conforme se tem o aumento da nota atribuída à anomalia na escala de nível de perigo (Tabela 4.4). Sendo assim, quanto maior o nível de perigo da anomalia observada, entende-se que maior seria a consequência que ela traria.

Tabela 4.4 - Pontuações dos parâmetros de nível de perigo (NP).

Atributo	Definição	Pontuação
0	não compromete a segurança/funcionamento do túnel, mas que indica descaso e/ou falta de manutenção.	0
1	não compromete a segurança/funcionamento do túnel a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada ao longo do tempo.	1
2	possibilidade de comprometimento da segurança/funcionamento do túnel, devem ser tomadas providências para a eliminação da anomalia.	2
3	risco crítico de segurança/comprometimento do funcionamento do túnel.	3

Fonte: o Autor, 2024.

Para estabelecer a relação matemática entre situação (S), magnitude (M) e a probabilidade de ocorrência (P), realizaram-se alguns testes para determinar uma expressão que refletisse de forma adequada a natureza percentual da probabilidade (limites de 0 a 100%). Inicialmente avaliou-se algumas expressões, estabelecendo quais seriam os valores máximos e mínimos que poderiam ser obtidos a partir dos valores pré-estabelecidos para S e M. As expressões avaliadas juntamente com seus valores de máximo e mínimo estão exibidos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Expressões avaliadas para relação entre S, M e P.

Expressão para P	Valor mínimo de P	Valor máximo de P
$\frac{\Sigma(S, M)}{2}$	0,5	3
$\frac{\Sigma(S, M)}{3}$	0,33	2
$\frac{\Sigma(S, M)}{6}$	0,16	1

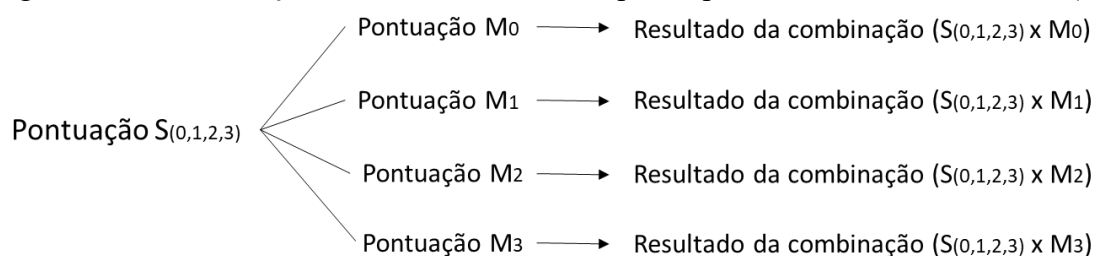
Fonte: o Autor, 2024.

Sendo assim, optou-se pela terceira expressão, visto que os seus valores de máximo e mínimo melhor se enquadraram no intervalo estabelecido. Portanto, a probabilidade de ocorrência (P) se relacionou com a situação (S) e a magnitude (M) através da Equação 4:

$$P = \frac{S+M}{6} \quad \text{Equação 4}$$

Em seguida analisou-se os valores obtidos a partir das combinações possíveis de resultados com a expressão escolhida (Equação 4). A exibição dos resultados seguirá a seguinte estrutura, conforme Figura 4.9.

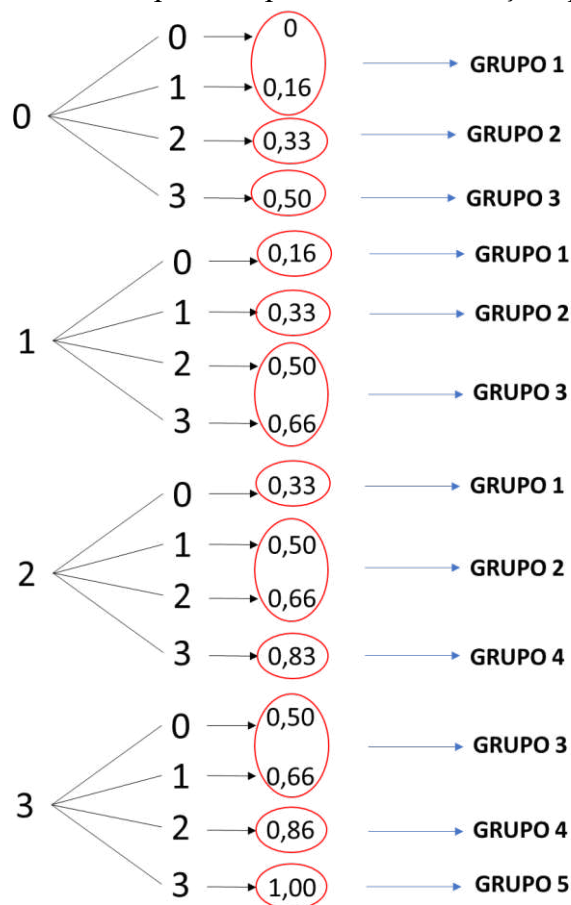
Figura 4.9 – Estruturação dos resultados obtidos para a probabilidade de ocorrência (P).



Fonte: o Autor, 2024.

Os resultados obtidos a partir da combinação utilizando-se da Equação 4 são exibidos na Figura 4.10. Identificou-se 5 grupos de valores que posteriormente foram atribuídos às 5 categorias de Probabilidades de Ocorrência, conforme Tabela 4.6.

Figura 4.10 – Resultados obtidos para P a partir das combinações possíveis entre S e M.



Fonte: o Autor, 2024.

Tabela 4.6 - Categorias de probabilidade de ocorrência.

Categoria de probabilidade de ocorrência	Resultado da equação 1
Pouco provável	até 0,16
Baixa	entre 0,17 e 0,33
Possível	entre 0,34 e 0,66
Provável	entre 0,67 e 0,86
Muito provável	entre 0,87 e 1

Fonte: o Autor, 2024.

As categorias de consequência foram definidas a partir do nível de perigo das anomalias, como pode ser observada na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Categorias de consequência.

Categoria de probabilidade de ocorrência	Pontuação do nível de perigo
Insignificante	0
Baixa	1
Moderada	2
Elevada	3

Fonte: o Autor, 2024.

Ressalta-se que o *checklist* automatizado contém também as relações desenvolvidas. A Tabela 4.8 exibe os resultados obtidos para as anomalias identificadas no túnel Boa Vista, com a identificação das categorias de probabilidade de ocorrência e consequência.

Tabela 4.8 - Resultados da integração de classificações – túnel Boa Vista

Identificador	Anomalia	Situação (S)	Magnitude (M)	Nível de perigo (NP)	Probabilidade de ocorrência (P)	Consequência (C)	Categoria de P	Categoria C
A.1	Falta de documentação (livro de ocorrência, manuais e fichas de operação e manutenção)	PC	M	0	0,67	0	Provável	Insignificante
A.3	Falta de treinamento operacional	PC	M	0	0,67	0	Provável	Insignificante
A.14	Ausência de placas de aviso	PC	M	1	0,67	1	Provável	Moderada
A.21	Vigilância patrimonial sem logística ou ausente	PC	I	0	0,33	0	Possível	Insignificante
B.6	Manchas de umidade/infiltrações	PC	I	0	0,33	0	Possível	Insignificante
B.8	Eflorescências	PC	I	0	0,33	0	Possível	Insignificante
C.1	Presença de macrófitas	PC	I	0	0,33	0	Possível	Insignificante
C.2	Presença de objeto estranho	PC	P	0	0,50	0	Possível	Insignificante
C.4	Odor ou coloração inapropriada	PC	I	0	0,33	0	Possível	Insignificante
D.1	Obstrução de drenos	PC	P	1	0,50	1	Possível	Moderada
D.7	Drenos quebrados	PC	P	0	0,50	0	Possível	Insignificante
E.1	Instrumentos danificados	PC	I	1	0,33	1	Possível	Moderada
E.4	Instrumentos desprotegidos	PC	P	1	0,50	1	Possível	Moderada
E.5	Ausência de limpeza de instrumentos	PC	P	1	0,50	1	Possível	Moderada
E.7	Presença de vegetação nos locais dos instrumentos	PC	P	0	0,50	0	Possível	Insignificante
E.8	Má conservação de placas de identificação	PC	P	0	0,50	0	Possível	Insignificante
G.1	Erosão no talude próximo ao emboque	PC	M	1	0,67	1	Provável	Moderada
G.2	Drenagem do talude obstruída	PC	P	1	0,50	1	Possível	Moderada
G.3	Presença de morecos no túnel	PC	I	0	0,33	0	Possível	Insignificante
G.4	Presença de teias de aranha no túnel	PC	I	0	0,33	0	Possível	Insignificante
G.5	Presença de estalactites no revestimento	PC	P	1	0,50	1	Possível	Moderada
G.6	Ausência de identificação dos instrumentos	PC	P	1	0,50	1	Possível	Moderada

Fonte: o Autor, 2024.

4.3.2 Determinação do Índice de Segurança

Em geral, as matrizes de risco apresentam variações do número de classes de probabilidades de ocorrência, do número de classes de consequências, do significado das diferentes classes e do número e significado das classes de risco. A Figura 4.11 exibe um exemplo de matriz de risco com cinco classes de probabilidade (muito baixas, baixas, moderadas, elevadas e muito elevadas), cinco classes de consequências (muito baixa, baixa, moderada, elevada e muito elevada) e cinco classes de riscos (1 a 5) (Baptista, 2009).

Figura 4.11 – Exemplo de uma matriz de riscos.

PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	MUITO ELEVADA	3	4	4	5	5
	ELEVADA	2	3	4	4	5
	MODERADA	2	2	3	4	4
	BAIXA	1	2	2	3	4
	POUCO PROVÁVEL	1	1	2	2	3
		MUITO BAIXAS	BAIXAS	MODERADAS	ELEVADAS	MUITO ELEVADAS
	CONSEQUÊNCIAS					

Classes de risco

Fonte: Baptista, 2009.

A seguir são apresentadas algumas orientações acerca da utilização de matrizes de risco para gestão de riscos geológicos (Porter *et al.*, 2019):

- A fim de compreender as origens e a finalidade de cada matriz de risco, estas devem ser acompanhadas de documentos de orientação e os responsáveis pela sua aplicação e avaliação devem ser bem definidos;
- Evitar alterações ou adaptações arbitrárias, devendo-se documentar as mudanças necessárias e posteriormente discuti-las com os profissionais responsáveis;
- Atentar-se para o fato de que as atribuições de risco variam com o tempo: à medida que o projeto se desenvolve, fatores que influenciam nas análises podem ocorrer como mudanças no uso da terra e a ocorrência de eventos climáticos. Sendo assim, a matriz de risco

deve também estar em constante avaliação para adequar-se ao contexto em que está sendo aplicada.

A matriz de risco elaborada considerou-se as categorias estabelecidas para a probabilidade de ocorrência e para a consequência, obtendo-se um modelo 5 x 4 com 4 classes de risco (Baixo, Médio, Elevado e Muito Elevado) distinguidos a partir de uma escala de cores. A matriz e a legenda das classes de risco pode ser observada na Figura 4.12.

Figura 4.12 – Classificações de situação, magnitude e nível de perigo.

Probabilidade de ocorrência	Muito provável					
	Provável					
	Possível					
	Baixa					
	Pouco provável					
		Insignificante	Baixa	Moderada	Elevada	
		Consequência				<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #90EE90; margin-bottom: 2px;"></div> Baixo <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #FFFF00; margin-bottom: 2px;"></div> Médio <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #FF4500; margin-bottom: 2px;"></div> Elevado <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #FF0000;"></div> Muito Elevado </div>

Fonte: o Autor, 2024.

Realizada a definição do modelo de matriz de risco, realizou-se uma relação entre cada classe de risco e as medidas de intervenção necessárias. A seguir, são apresentadas as categorias de risco juntamente com suas respectivas definições, relacionadas com a necessidade de medidas de intervenção:

- Baixo: Anomalias classificadas como de risco baixo devem ser monitoradas durante a próxima inspeção. Essa classe indica que a situação não requer intervenção imediata, mas precisa ser observada para identificar possíveis mudanças no futuro.

- Médio: Anomalias de risco médio necessitam de planejamento para reparos no próximo ciclo de manutenção. Aqui, é importante antecipar as ações corretivas a fim de evitar que a anomalia se agrave, mas a situação não é considerada urgente.

- Alto: Anomalias classificadas como de risco alto requerem ação imediata ou um planejamento de intervenção a curto prazo. Isso significa que, embora a anomalia não seja crítica, ele pode ter consequências significativas se não for tratado prontamente.

- Muito Alto/Crítico: Anomalias de risco muito alto ou crítico exigem ação imediata e uma investigação aprofundada. Esta classe representa as situações mais graves, que podem

comprometer a segurança ou a funcionalidade do túnel, necessitando de respostas rápidas e detalhadas.

O Índice de Segurança (IS) do túnel é determinado a partir da proporção de anomalias presentes na classe de risco baixo (P_b), conforme pode-se observar na Equação 5.

$$P_b = \frac{A_b}{T} \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

Sendo A_b a quantidade de anomalias presentes na classe de risco baixo, e T se refere ao total de anomalias identificadas no túnel a partir do *checklist* de inspeção.

A partir do valor dessa proporção, determina-se o IS, que seria um valor pré-determinado através da Tabela 4.9 e esse índice é acompanhado de um descritor de natureza qualitativa que se refere ao estado de conservação e consequentemente ao potencial de usabilidade desse túnel. Esses descritores variam de "Inadequado" a "Excelente" e têm como objetivo facilitar a compreensão dos gestores e profissionais relacionados com a estrutura acerca do estado geral do túnel.

Tabela 4.9 - Determinação do Índice de Segurança (IS) e descritor.

Proporção de anomalias localizadas na classe de risco baixo	Índice de segurança do túnel (IS)	Descritor
0%	0	Inadequado
1-10%	1	
11-20%	2	
21-30%	3	Insatisfatório
31-40%	4	
41-50%	5	
51-60%	6	Aceitável
61-70%	7	
71-80%	8	
81-90%	9	Satisfatório
91-100%	10	
		Excelente

Fonte: o Autor, 2024.

O descritor “Inadequado”, de acordo com o método proposto, se refere a túneis com IS entre 0 e 2, que seriam estruturas que apresentam um grande número de anomalias distribuídas ou concentradas entre as classes de risco médio, elevado e muito elevado, que

necessitam de intervenções imediatas ou em curto prazo, representando um risco significativo para a sua segurança e funcionalidade. A utilização da estrutura sob essas condições é arriscada e requer ações corretivas urgentes.

Enquanto um túnel com IS entre 9 e 10 é descrito como “Excelente” e seria aquele em que grande parte das anomalias representa um risco baixo. Isso indica que o túnel é seguro, funcional e bem conservado, com necessidade mínima de intervenções. A condição do túnel é ideal, garantindo um alto nível de segurança e confiabilidade para sua operação.

4.3.3 Aplicação no túnel Boa Vista

Conforme descrito anteriormente, foi realizada uma inspeção no túnel Boa Vista para validação do *checklist* desenvolvido por Silva (2022). Este túnel foi objeto de aplicação da metodologia aqui elaborada, com o objetivo de conceber um estudo completo sobre a estrutura.

Durante a inspeção no túnel Boa Vista, foram identificados 80 anomalias no *checklist* do inspetor 4, adotado para essa análise. Esse total de 80 seria correspondente ao valor de T na Equação 5. Das 80 anomalias, 75 foram classificadas como de risco baixo. A Figura 4.13 exibe a matriz de risco obtida para o túnel Boa Vista, obtida automaticamente a partir do preenchimento do *checklist* automatizado.

Figura 4.13 – Matriz de risco para o túnel Boa Vista.

Probabilidade de ocorrência	Muito provável				
	Provável	A.1, A.3		A.14	
	Possível	A.21, B.6, B.8, C.1, C.2, C.4, D.7, E.7, E.8		D.1, E.1, E.4, E.5	
	Baixa				
	Pouco provável	A.2, A.4, A.5, A.6, A.7, A.8, A.9, A.10, A.11, A.12, A.13, A.15, A.16, A.17, A.18, A.19, A.20, A.22, A.23, A.24, A.25, B.1, B.2, B.3, B.4, B.5, B.7, B.9, B.10, B.11, B.12.1, B.12.2, B.12.3, B.12.4, B.12.5, C.3, C.5, C.6, C.7, C.8, D.2, D.3, D.4, D.5, D.6, E.2, E.3, E.6, E.9, E.10, E.11, E.12, E.13, F.1, F.2, F.3, F.4, F.5, F.6, F.7, F.8, F.9, F.10, F.11			
		Insignificante	Baixa	Moderada	Elevada
		Consequência			

Baixo

Médio

Elevado

Muito Elevado

Fonte: o Autor, 2024.

Na Tabela 4.10 apresenta-se os valores correspondentes aos termos da Equação 5 para o túnel Boa Vista.

Tabela 4.10 - Determinação de P_b para o túnel Boa Vista.

Número de anomalias na classe baixa (A_b)	Total de anomalias observadas no <i>checklist</i> (T)	Proporção de anomalias na classe de risco baixo (P_b)
75	80	93,75%

Fonte: o Autor, 2024.

Conforme observado, a partir da aplicação da Equação 5 obteve-se um P_b de 93,75% de anomalias localizadas na classe de risco baixo, sendo anomalias que devem ser monitorados durante a inspeções posteriores e indica-se que a situação não requer intervenção imediata, mas precisa ser observada para identificar possíveis mudanças no futuro. Esse valor de P_b fornece um Índice de Segurança (IS) de 10 que classifica o túnel como "Excelente" indicando que o túnel é seguro, funcional e bem conservado, com necessidade mínima de intervenções, o que está em consonância com o que foi observado em campo e considerando-se que se trata de um túnel que está concluído, mas não se encontrava em operação.

Destaca-se que as anomalias identificadas na classe de risco alto são: ausência de placas de aviso; obstrução de drenos; instrumentos danificados; instrumentos desprotegidos e ausência de limpeza de instrumentos. Essas anomalias de risco elevado requerem atenção imediata para assegurar a manutenção do nível de excelência da estrutura.

4.4 Conclusões

Neste trabalho, foi desenvolvida uma proposta de metodologia para calcular o Índice de Segurança (IS) de um túnel de transferência hídrica. Essa metodologia baseia-se no *checklist* de Silva (2022) atualizado e validado através de inspeção no túnel Boa Vista e na interligação desse *checklist* com uma matriz de risco automatizadas com o auxílio do *Microsoft Excel*.

A metodologia mostrou-se válida ao ser aplicada ao túnel Boa Vista, demonstrando sua praticidade e capacidade de fornecer informações claras e fundamentadas para gestores. A automatização das ferramentas, realizada através do *Microsoft Excel*, não apenas agiliza o processo de avaliação, mas também permite uma atualização constante e precisa dos dados, além de facilitar a transição da utilização em campo do *checklist* em papel para dispositivos eletrônicos.

Os parâmetros de situação, magnitude e nível de perigo atribuídos às anomalias identificadas no *checklist* foram utilizados para determinar a probabilidade de ocorrência e a consequência das anomalias, resultando em uma matriz de risco que categoriza as anomalias

em classes de risco distintas. Essa categorização se mostrou bem fundamentada para a tomada de decisões informadas e a priorização das intervenções necessárias, buscando manter a manutenção da segurança e funcionalidade dos túneis.

O desenvolvimento e aplicação da metodologia para determinar o Índice de Segurança (IS) de túneis de transferência hídrica, apresentada neste estudo, representa um avanço significativo na avaliação e manutenção dessas estruturas essenciais para a segurança hídrica. Com base em uma combinação detalhada do *checklist* de inspeção validado e da matriz de risco, a metodologia fornece uma avaliação sistemática e quantitativa do estado de conservação dos túneis, facilitando a priorização de medidas de intervenção.

A aplicação prática da metodologia no túnel Boa Vista validou sua aplicação. Os resultados indicaram que 93,75% das anomalias identificadas foram classificadas como de risco baixo, resultando em um Índice de Segurança de 10, categorizando o túnel como "Excelente". Este resultado não apenas confirma a utilidade da metodologia, mas também ressalta a importância de um sistema de avaliação detalhado e automatizado para a gestão contínua da infraestrutura hídrica.

Portanto, a metodologia desenvolvida neste trabalho proporciona uma ferramenta robusta e confiável para a avaliação do estado de conservação de túneis de transferência hídrica. A combinação de um *checklist* validado, uma matriz de risco detalhada e a automação das ferramentas oferece um sistema integrado que melhora significativamente a análise do estado de conservação da estrutura. A adoção desta metodologia pelos gestores pode contribuir para a segurança hídrica, garantindo que os túneis sejam mantidos em condições adequadas de operação, minimizando riscos e prolongando a vida útil dessas estruturas.

5 PROPOSTA DE MANUAL DE ORIENTAÇÃO PARA INSPEÇÃO EM TÚNEIS DE TRANSFERÊNCIA HÍDRICA

5.1 Introdução

Os procedimentos de inspeção requerem a expertise de profissionais especializados tanto para o planejamento quanto para utilizar as ferramentas e técnicas disponíveis de maneira eficaz pois são capazes de identificar os pontos críticos que exigem atenção durante a inspeção e determinar as melhores abordagens para avaliar a condição e integridade da estrutura. Em barragens, por exemplo, tem-se o Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) que traz diversas orientações para inspeções de segurança em barragens de acumulação de água (Bolina *et al.* 2019; ANA, 2016).

A norma ABNT NBR 16230, publicada em 2013, aborda a qualificação e certificação de profissionais para a inspeção de estruturas de concreto. Na norma são tratados temas como critérios de aptidão física e acuidade visual, habilidades para o desempenho da função e exames de qualificação dos profissionais. Ressalta-se que com base nos resultados dos exames de qualificação aplicados pelo Centro de Exame de Qualificação (CEQ), o organismo de certificação emite um documento de identificação do profissional, confirmando que ele atendeu satisfatoriamente a todos os requisitos desta norma (ABNT NBR 16230, 2013).

Para a realização de inspeções em pontes, viadutos e passarelas de concreto, aço ou mistas (aço e concreto), a norma ABNT NBR 9452 de 2023 oferece orientações específicas para essas atividades. O documento destaca a necessidade de elaborar um manual de utilização, inspeção e manutenção, que deve especificar os requisitos básicos para a utilização e manutenção preventiva, além de identificar os elementos da estrutura que merecem atenção especial (ABNT NBR 9452, 2023).

A norma ABNT NBR 5674, de 2024, estabelece os requisitos para o sistema de gestão de manutenção de edificações, e apresenta informações como o conteúdo básico do relatório de inspeção, orientações acerca do programa de manutenção, além de outras diretrizes voltadas para as edificações que seriam produtos compostos por um conjunto de sistemas, elementos ou componentes organizados e integrados de acordo com os princípios e técnicas da engenharia e da arquitetura (ABNT NBR 5674, 2024).

Em pontes rodoviárias, o Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias, elaborado pelo DNIT em 2004, apresenta cinco tipos de inspeção: os três tradicionais cadastral, rotineira,

especial, extraordinária e intermediária, além dos equipamentos necessários para a realização de inspeção e as práticas de segurança recomendadas para essa atividade (DNIT, 2004).

O Manual de Inspeção de Obras de Arte, desenvolvido pela Empresa Gaúcha de Rodovias (EGR) em 2018, detalha as diretrizes técnicas para a inspeção de obras de arte, como pontes, pontilhões, viadutos e passarelas com estruturas de concreto armado e protendido, aço ou mistas. Além disso, o documento inclui as fichas de inspeção específicas para cada tipo de estrutura, conforme a categoria de inspeção realizada.

Destaca-se que, em relação às barragens, países como Canadá, Espanha, França e Estados Unidos também possuem diretrizes oficiais para a realização de inspeções, que incluem procedimentos detalhados para a avaliação da integridade estrutural, a identificação de potenciais riscos, e a implementação de medidas preventivas e corretivas (Water Management Branch, 2016; Espanha 2021; Comité Français des Barrages et Réservoirs, 2020; US Army Corp of Engineers, 2011).

No estudo realizado por Fonte (2011), foi proposta a implementação de um sistema de manutenção para os túneis rodoviários de Recife, Pernambuco. A metodologia do estudo envolveu a inspeção visual e a identificação das manifestações patológicas presentes nos túneis rodoviários de Recife, seguida da elaboração de um plano de inspeção e manutenção para essas estruturas.

Túneis de transferência hídrica, diferentemente de outras estruturas, não apresentam manuais oficiais de orientação para realização de inspeções nesse tipo de estrutura. Tendo em vista essa lacuna para túneis de transferência hídrica, este documento tem como objetivo definir diretrizes técnicas para a realização de inspeções nessas estruturas, com base em ampla pesquisa bibliográfica e documental. Pretende-se com este documento estruturar as melhores práticas recomendadas, consolidando as orientações presentes em normas, na literatura técnica existente acerca do tema e na experiência acumulada.

5.2 Metodologia

Para elaborar o manual de orientação, adotou-se uma estrutura semelhante à apresentada no Manual de Inspeção de Obras de Arte da EGR (2018), devido à sua clareza na exposição das informações. A adaptação para os túneis de transferência hídrica envolveu a revisão de diversos documentos de inspeção, que foram ajustados para atender às necessidades específicas da estrutura em questão, levando-se em consideração que o acesso para inspeções e

manutenção pode ser complexo devido ao ambiente confinado com baixa iluminação e à presença de água.

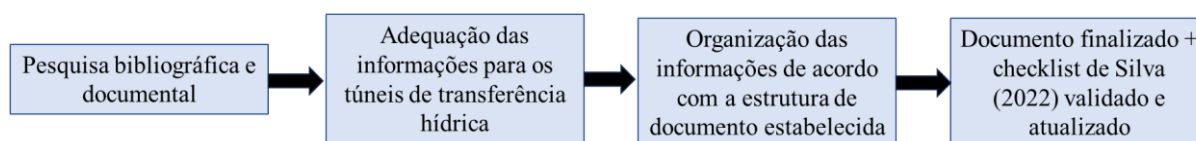
Um dos principais guias consultados para a elaboração deste documento foi o Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem da ANA. Por tratar-se também de uma estrutura hídrica, facilitou a relação com o túnel em foco. Este guia é abrangente, abordando o planejamento, execução e elaboração de relatórios de inspeção de maneira detalhada.

Além desses documentos, para elaboração deste foram consultados diversos manuais, guias e normativas tanto nacionais quanto internacionais. As informações foram obtidas por meio de uma variedade de ferramentas de pesquisa, incluindo Google, Google Scholar, Scielo e repositórios de universidades. A pesquisa foi planejada com o uso de palavras-chave desde as mais gerais até as mais específicas, e foram explorados sinônimos para ampliar a diversidade das buscas.

Todos os materiais coletados foram organizados com o auxílio do software *Mendeley*, que facilitou a gestão dos arquivos, permitiu a leitura dos documentos, fez anotações digitais e gerou referências de forma automatizada, otimizando o processo de pesquisa e organização dos dados.

Ressalta-se que o manual proposto também aborda maiores esclarecimentos acerca da utilização do *checklist* para inspeção em túneis de transferência hídrica desenvolvido por Silva (2022) validado durante a inspeção realizada no túnel Boa Vista em 2023 juntamente com atualizações adotadas após a inspeção. Pretende-se que o manual, quando apresentado como documento único e oficial, tenha como seu apêndice o *checklist* mencionado. A Figura 5.1 exibe a metodologia adotada para elaboração deste manual.

Figura 5.1 - Etapas da metodologia para confecção do manual.



Fonte: o Autor.

A seguir é apresentado o conteúdo do manual, onde inicialmente exibem-se termos e definições consideradas importantes, relacionadas com o conteúdo do documento, em seguida caracterizam-se as metodologias de inspeção (cadastral, rotineira, especial e extraordinária) juntamente com o roteiro básico necessário para a realização. Posteriormente aborda-se os

equipamentos necessários para a inspeção e são descritos alguns ensaios que podem ser executados no contexto da inspeção de túneis de transferência hídrica. Além disso, na sequência o documento lista os equipamentos de proteção individual (EPI) recomendados para uso dos profissionais que realizarão a inspeção. Subsequentemente o manual trata da qualificação técnica recomendada para os inspetores, diretrizes para a elaboração do relatório de inspeção, orientações para uso do *checklist* de inspeção e a descrição das anomalias que podem ser identificados no revestimento do túnel

5.3 Termos e definições

Os termos e definições apresentados a seguir foram obtidos através de normas, bibliografia e documentos coletados acerca do tema:

a) **Acidente:** indica a ocorrência de uma anormalidade, ou imprevisto, de proporções significativas, capaz de comprometer, parcial ou totalmente a funcionalidade do sistema (Guidicini *et al.*, 2022).

b) **Anomalia:** descaracterização de um elemento ou sistema integrante da obra de arte em relação à sua concepção original (Bolina *et al.* 2019).

c) **Incidente:** ocorrência de algum evento anormal ou imprevisto, de amplitude limitada, que revela o desempenho inadequado de algum componente, mas sem o comprometimento do sistema, requerendo a adoção de medidas corretivas, sob risco de agravamento (Guidicini *et al.*, 2022).

d) **Inspeção de segurança:** atividade de segurança a ser executada periodicamente durante a vida útil do túnel, para verificação da funcionalidade, confiabilidade operacional dos equipamentos, dispositivos, sistemas, obras civis e os demais procedimentos relacionados com a continuidade da sua operação (ABNT NBR 15775, 2009).

e) **Manifestação patológica:** é a expressão resultante de um mecanismo de degradação (Bolina *et al.* 2019).

f) **Patologia:** ciência formada por um conjunto de teorias que serve para explicar o mecanismo e a causa da ocorrência de determinada manifestação patológica (Bolina *et al.* 2019).

g) **Túnel de transferência hídrica:** estrutura escavada em solo ou rocha, destinada a passagem de água (Silva, 2022).

5.4 Metodologia de inspeção

A inspeção em túneis de transferência hídrica pode ser realizada seguindo um dos seguintes modelos: Cadastral, Rotineira, Especial e Extraordinária. A seguir são explanadas as especificidades de cada método.

5.4.1 Inspeção cadastral

O levantamento cadastral é a primeira inspeção realizada na obra e deve ocorrer logo após sua conclusão, instalação ou integração a um sistema de monitoramento e acompanhamento. Deve-se registrar a identificação e a localização precisa de uma obra, incluindo suas características funcionais e estruturais. A localização deve ser detalhada, incluindo informações como o município e coordenadas geográficas. Além disso, é importante registrar adequadamente todas as particularidades e informações relevantes, mesmo que não sejam explicitamente solicitadas no *checklist* de inspeção. Como também devem ser registrados quaisquer outros fatores que influenciem no acesso ao túnel ou às partes que o compõe (EGR, 2018).

Adicionalmente, é necessário realizar esse tipo de inspeção sempre que ocorrerem alterações na configuração da obra, tais como ampliação, aumento de comprimento, reforço ou mudanças no sistema estrutural. A inspeção cadastral deve abranger (EGR, 2018):

- Registros fotográficos e/ou registros em vídeo das condições em que o túnel se encontra, bem como anomalias observadas;
- Desenhos esquemáticos referentes à topografia e seções-tipo transversal e perfil longitudinal, com suas respectivas medidas principais;
- Especificação de medidas de intervenção ou solicitação detalhada de inspeção especial e/ou monitoramento, incluindo quais estudos, ensaios e métodos deverão ser aplicados;
- Demais informações consideradas importantes para a inspeção.
- Informações do Roteiro Básico para inspeção cadastral (descrito no item 6.4.1.1);

É necessário que as fotografias incluam o registro das anomalias identificadas, que possam afetar as condições estruturais, funcionais e de durabilidade da obra. As fotos devem ser datadas e, se possível, georreferenciadas. O registro fotográfico deve ser apresentado junto com os dados coletados, seguindo o roteiro básico para inspeção cadastral descrito neste documento (EGR, 2018).

5.4.1.1 Roteiro básico para inspeção cadastral

A etapa inicial da inspeção cadastral envolve o registro das informações gerais do ambiente em que a obra do túnel de transferência hídrica está inserida, além da coleta de documentos e registros construtivos disponíveis, conforme listados a seguir (EGR, 2018; ANA, 2016):

- a) Dados de projeto, como desenhos, memoriais, especificações de serviços e materiais;
- b) Registros de execução da obra, contendo dados de ensaios dos materiais utilizados;
- c) *Checklist* de inspeção;
- d) Termo de recebimento da obra;
- e) Registros de monitoramento da estrutura;
- f) Registro de eventuais modificações de projeto como alargamentos, reforços, reparos e recuperações.

5.4.2 Inspeção rotineira

Inspeção rotineira a ser executada periodicamente durante a vida útil do túnel, com ou sem o uso de equipamentos ou recursos especiais para análise ou acesso. Objetiva verificar e registrar as possíveis anomalias identificadas em inspeções anteriores, além de serem observadas novas ocorrências, reparos e/ou recuperações realizadas durante o período entre inspeções. A inspeção rotineira deve conter (EGR, 2018):

- Introdução contendo informações básicas do túnel (localização, finalidade, caracterização geológico-geotécnica da área de implantação do túnel e breve histórico da construção);
- Comentário quanto a eventuais alterações do estado geral do túnel detectadas em relação à inspeção anterior;
- *Checklist* de inspeção;
- Registro fotográfico;
- Especificação de medidas de intervenção ou solicitação detalhada de inspeção especial e/ou monitoramento, incluindo quais estudos, ensaios e métodos deverão ser aplicados;
- Demais informações consideradas importantes para a inspeção.

5.4.2.1 Roteiro básico para inspeção rotineira

Deve-se adotar metodologia semelhante à inspeção cadastral, diferenciando-se no fato de que deve ser registrado o acompanhamento histórico das anomalias encontradas, evidenciando sua diminuição ou aumento no intervalo entre inspeções, assim como aquelas que estão sendo observadas pela primeira vez. Além disso, a inspeção deve vir acompanhada com a recomendação de tratamentos para as anomalias registradas (EGR, 2018).

5.4.3 Inspeção especial

A inspeção especial deve ser minuciosa e incluir um mapeamento gráfico e quantitativo de todas as anomalias visíveis e/ou acessíveis nos elementos do túnel, com o objetivo de formular um diagnóstico e prognóstico da estrutura. Em alguns casos, pode ser necessário o uso de equipamentos especiais para acessar todos os componentes da estrutura. Em túneis de transferência hídrica recomenda-se a prática de uma inspeção especial quando verificada anomalia considerada grave durante uma inspeção regular ou por equipe de operação e manutenção do túnel durante suas atividades de rotina, em situações críticas da vida do túnel (antes do primeiro enchimento e após o primeiro esvaziamento) (EGR, 2018, ANA, 2016).

5.4.3.1 Roteiro básico para inspeção especial

A etapa inicial da inspeção especial envolve a coleta de informações gerais sobre o contexto em que o túnel está inserido, bem como a obtenção de documentos e registros construtivos disponíveis. Além disso, é realizada a catalogação dos relatórios das inspeções anteriores realizadas na obra de arte.

A inspeção especial poderá demandar técnicas avançadas de inspeções, geralmente empregadas para (EGR, 2018):

- a) Avaliar defeitos detectados durante a inspeção visual, como por exemplo a execução de ensaios específicos para analisar as condições do revestimento após identificação de corrosão nas armaduras na inspeção;
- b) Inspeccionar componentes e elementos que não podem ser facilmente inspecionados usando a inspeção visual ou outras técnicas mais simples;

- c) Inspeccionar componentes e elementos que apresentaram anomalias no passado ou entraram em colapso em túneis de projetos similares;
- d) Monitorar o comportamento de uma estrutura, em serviço.

Essas técnicas avançadas englobam uma variedade de ensaios, estudos e métodos especiais, cujos resultados devem ser apresentados em relatórios técnicos complementares. Esses relatórios são elaborados por especialistas e acompanham justificativas técnicas para a realização desses serviços. As técnicas avançadas incluem:

- Análises estruturais com memória de cálculo;
- Estudos hidráulico-hidrológicos;
- Estudos geotécnicos;
- Ensaios geofísicos;
- Ensaios tecnológicos;
- Instrumentação específica para monitoramento de estrutura;
- Outros estudos de interesse.

5.4.4 Inspeção extraordinária

A inspeção extraordinária deve seguir a mesma metodologia definida para a inspeção especial e é gerada por uma das demandas não programadas a seguir, associadas ou não:

- a) Necessidade de avaliar com mais critério um elemento ou parte do túnel, podendo ou não estar relacionada com a inspeção anterior;
- b) Ocorrência de eventos da natureza, como inundações, vendaval, sismo ou outros.

5.5 Equipamentos para inspeção

Recomenda-se a utilização dos seguintes equipamentos para auxílio na inspeção. Outros materiais podem ser utilizados a depender do caso em averiguação.

- a) Equipamento de gravação em vídeo;
- b) Câmera fotográfica;
- c) Fissurômetro, para medição de aberturas no concreto;
- d) Trena;

- e) Esclerômetro, para medição da resistência do concreto;
- f) Perfilômetro (Pente de Barton), para realizar perfilagens, moldes e desenhos de rugosidade da superfície;
- g) Equipamento para retirada e armazenamento de amostras de água e/ou material de revestimento;
- h) Drone;
- i) Equipamento para inspeção subaquática (quando necessário).

5.6 Inspeção por ensaios

A seguir são detalhados alguns ensaios que podem ser realizados no contexto da inspeção em túneis de transferência hídrica. Apesar das informações apresentadas, ressalta-se a importância da leitura das normas e manuais mencionados para cada procedimento.

5.6.1 Revestimento de concreto

5.6.1.1 Ultrassom

O ensaio de ultrassom, caracterizado por ser um ensaio não destrutivo, tem suas diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 16616 do ano de 2017, e consiste na determinação da velocidade do pulso ultrassônico no concreto e através desse valor determinar a localização de anomalias ou descontinuidades, além da aderência entre as camadas e o suporte. O equipamento para execução do ensaio consiste basicamente em circuitos que geram o impulso elétrico e medem o tempo, conectados a dois transdutores: um emissor, que transforma o pulso elétrico em onda ultrassônica, e o outro, receptor.

Dentre outras informações, a referida norma recomenda que o ensaio seja realizado por profissional habilitado, seguindo as diretrizes das normas ABNT NBR 15146-1 (2011) ou ABNT NBR 16230 (2013) que tratam da qualificação de pessoal para controle tecnológico e inspeção em estruturas de concreto, respectivamente.

5.6.1.2 Esclerometria

O ensaio de esclerometria, também não destrutivo, tem suas diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 7584 de 2012. Trata-se de um método para medir a dureza superficial

do concreto, fornecendo elementos para a avaliação de sua qualidade. Para um túnel revestido com concreto projetado, por exemplo, Silva *et al.* (2012) utilizou desse ensaio para verificação dos trechos de um túnel que apresentavam resistência característica à compressão inferior à especificada em projeto, situação evidenciada pela presença de fissuras e deslocamentos, anomalias que podem ser observadas durante a inspeção visual (Bolina *et al.*, 2019).

5.6.1.3 Pacometria

Atualmente não existe no Brasil uma norma que orienta esse ensaio, sendo então utilizado o documento técnico ACI 228 2R, de 2004, publicado pelo American Concrete Institute (ACI). O ensaio é realizado com o equipamento chamado pacômetro que, segundo a norma, consiste em um dispositivo que gera um campo magnético alternado de baixa frequência, o qual se altera pela presença das armaduras de reforço quando aplicado na superfície da estrutura, estimando então a localização e a profundidade do revestimento. Além disso, o aparelho é leve, portátil e fácil de usar.

5.6.1.4 Potencial de corrosão da armadura

O ensaio de potencial de corrosão da armadura é orientado de acordo com a norma internacional ASTM C 876 de 1999. De acordo com a norma é realizado por meio da medição da diferença de potencial da armadura, através da comparação com faixas de valores empíricos de potencial elétrico que fornecem a probabilidade de corrosão das armaduras.

5.6.1.5 Determinação do Carbonatação

Ensaio orientado pela norma DIN EN 14630 (2007) e é empregado para determinar a espessura média da frente de carbonatação no concreto. De acordo com a norma a presença de dióxido de carbono está associada à corrosão das armaduras e é identificada através da aspersão de um identificador de pH, geralmente uma solução de fenolftaleína. Considera-se carbonatada a região com pH inferior a 8,3. Este ensaio deve ser aplicado com cuidado e combinado com outros métodos, pois em regiões com pH próximo a 11,5 a armadura pode já estar apresentando corrosão.

5.6.1.6 Permeabilidade do concreto

A determinação do coeficiente de permeabilidade do concreto endurecido é realizado através da percolação de água sob pressão e deve-se seguir as orientações presentes na norma ABNT NBR 10786 (2013).

5.6.2 Instrumentação

No caso de túneis com piezômetros e/ou indicadores de nível de água instalados no seu entorno recomenda-se a realização de testes de vida periodicamente para avaliar a funcionalidade dos instrumentos. Para realização desse tipo de verificação recomenda-se o Boletim nº 4 (2013) e o Manual de Sondagens (2013) ambos produzidos pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE). O teste de vida é realizado a partir da injeção instantânea de um volume de água conhecido dentro do tubo do instrumento e após a injeção, o nível é monitorado até que atinja pelo menos 90% de recuperação do nível estático inicial.

Para extensômetros e inclinômetros recomenda-se a realização de ensaios de calibração (verificação da precisão), de repetibilidade (verificação da consistência das leituras), teste de zero (verificar a estabilidade do ponto zero ao longo do tempo), teste de sensibilidade (avaliar a sensibilidade a pequenas variações de deformação), além de outros. Para melhor entendimento dos ensaios em extensômetros recomenda-se a consulta da norma ASTM E83 de 2016 e para inclinômetros as normas ISO 18674-3 de 2017 e ASTM D6230-98 de 2005.

5.6.3 Qualidade da água

Quando possível, recomenda-se a utilização de kit portátil por profissional especializado para realização de testes de qualidade da água presente no túnel a partir de amostras coletadas *in loco* como testes de pH, teor de cloro residual, turbidez, presença de nitratos e nitritos, dureza da água. Quando não for possível a realização de testes em campo, ou quando for necessários estudos mais aprofundados, recomenda-se a coleta de amostras para testes em laboratório especializado determinando-se esses e demais parâmetros físico-químicos (Santos, 2017).

5.7 Segurança

As inspeções devem ser realizadas com segurança, atendendo às normas e legislação de segurança do trabalho apresentadas na Portaria 3214:1978 do Ministério do Trabalho e as instruções de trabalho da empresa ou órgão gestor do túnel. Além disso, em espaços confinados é importante executar o monitoramento de gases e/ou vapores tóxicos antes da entrada o que pode ser realizado com aparelhos portáteis, e recomenda-se que a inspeção seja precedida também por medidas de iluminação interna do túnel, ventilação prévia e preferivelmente com a participação de equipe de segurança (ABNT NBR 15775, 2009; Guidicini *et al.*, 2022).

Para a entrada da equipe de inspeção no túnel, recomenda-se, quando possível, o seu esvaziamento para que a inspeção seja feita pelos profissionais caminhando sobre o piso da extensão interna do túnel. Quando o esvaziamento não for possível, recomenda-se o fechamento da comporta (se aplicável) e a utilização de um barco de pequeno porte com no máximo 3 profissionais para inspeção por vez e mais uma pessoa que ficará responsável pela condução do transporte (barco por remos, não utilizar barco motorizado para evitar vibrações no interior do túnel).

Visando à proteção de quem está realizando e a efetividade da inspeção, todos os profissionais envolvidos nessa atividade devem realizá-la devidamente munidos dos equipamentos de proteção individual (EPI). Dessa forma, recomenda-se a utilização dos seguintes equipamentos:

- Botina de segurança;
- Capa de chuva;
- Capacete de segurança;
- Capuz de fuga;
- Carneira para capacete;
- Chapéu de casquete;
- Fardamento manga longa com faixa refletiva ou macacão de espeleologia;
- Óculos de proteção;
- Perneira de couro;
- Protetor solar;
- Repelente;
- Lanterna;
- Equipamento de comunicação eletrônica adequado.

Ressalta-se a importância da verificação das normas relacionadas com o tema, como a Norma Regulamentadora nº 33 (2007), que trata da segurança e saúde no trabalho em espaços confinados.

5.8 Qualificação técnica

Para a realização da inspeção em um túnel de transferência hídrica, indica-se profissionais com as seguintes qualificações técnicas:

a) Inspetor-chefe:

- Ser engenheiro habilitado e registrado em conselho de profissionais de engenharia;
- Ter experiência em projeto e operação de túneis;
- Ter conhecimento de normas e códigos de prática de instalação e operação de túneis de transferência hídrica;
- Ter experiência mínima de três anos em atividades de inspeção, com habilidade para avaliar as condições de operação e identificar falhas operacionais do sistema inspecionado;
- Possuir conhecimento para reconhecer problemas relacionados com a qualidade da água.

b) Inspetor auxiliar:

- Ser engenheiro civil ou tecnólogo habilitado e registrado em conselho de profissionais de engenharia ou ser técnico habilitado;
- Ter habilidade para realizar registros fotográficos e em vídeo;
- Ter habilidade de compreender os documentos de projeto;
- Possuir conhecimento acerca de instrumentos de medida tais como réguas, trenas, paquímetros e etc.

A equipe pode ser constituída de mais profissionais, dependendo das características do túnel a ser inspecionado. Recomenda-se que, quando a inspeção for realizada de barco, seja incluído um profissional com função exclusiva de operar o transporte.

5.9 Relatório de inspeção

O relatório de inspeção de segurança de um túnel de transferência hídrica é um documento que registra os resultados e conclusões de uma avaliação realizada para verificar as condições de conservação e de segurança da estrutura. Normalmente, é elaborado por profissionais especializados (engenheiros e/ou inspetores), com o objetivo de identificar e

relatar condições inseguras, riscos potenciais e medidas corretivas necessárias para garantir um ambiente seguro.

O relatório de inspeção de segurança deve conter informações sobre os itens inspecionados, descobertas, recomendações, datas das inspeções, assinaturas dos responsáveis técnicos, sendo um documento adaptável ao tipo de inspeção que foi realizada.

A composição básica sugerida para o relatório de inspeção de segurança de um túnel de transferência hídrica é descrita a seguir:

- a) Capa com a data da inspeção;
- b) Índice;
- c) Listas de tabelas e figuras;
- d) Introdução contendo o contexto de realização da inspeção;
- e) Descrição geral do túnel;
- f) Listagem dos documentos utilizados para elaboração, contendo código e revisão;
- g) Procedimentos de inspeção utilizados;
- h) Resultados;
- i) Recomendações;
- j) *Checklist* de inspeção, em anexo.

Os relatórios de inspeção do túnel devem ser certificados em nome da entidade ou do consultor independente que a realizou, identificados e datados.

5.10 Orientação para *checklist* de inspeção

Apresenta-se no Apêndice A o modelo de *checklist* para aplicação em túneis de transferência hídrica. A seguir são tratados pontos específicos do documento de acordo com Silva (2022) e ANA (2016).

5.10.1 Legenda do *Checklist*

Para o preenchimento do *checklist* de inspeção, todas as anomalias apontadas devem receber uma classificação quanto a sua situação, magnitude e nível de perigo. A seguir discorre-se acerca do significado de cada um dos termos utilizados para classificação.

5.10.2 Situação

Refere-se ao contexto da anomalia e deve-se relacionar, quando possível, ao histórico da anomalia. A classificação quanto à situação da anomalia se dá a partir dos seguintes critérios:

a) NA - Este item não é aplicável: o item examinado não é pertinente ao túnel que está sendo inspecionado;

b) NE - Anomalia não existe: quando não existe nenhuma anomalia que se relacione com o item examinado;

c) PV - Anomalia verificada pela primeira vez: quando da visita ao túnel a anomalia for constatada pela primeira vez, não havendo indicação de sua presença em inspeções anteriores;

d) PR - Anomalia resolvida: quando uma determinada anomalia verificada na inspeção anterior não esteja mais ocorrendo na inspeção atual, sendo identificados sinais de correção;

e) DI - Anomalia diminuiu: quando uma determinada anomalia apresenta-se em menor intensidade ou dimensão em relação ao que foi constatado na inspeção anterior;

f) PC - Anomalia permanece constante: quando na inspeção atual, uma anomalia apresenta-se com intensidade ou dimensão igual ao que foi constatado na inspeção anterior;

g) AU - Anomalia aumentou: quando na inspeção atual, uma anomalia apresenta-se com intensidade ou dimensão maior ao que foi constatado na inspeção anterior;

h) NI - Item não inspecionado: quando um determinado aspecto do túnel que estaria previsto sua verificação na inspeção, mas por motivos alheios à pessoa que está executando a inspeção, o item não foi verificado. Recomenda-se que a justificativa da não realização da inspeção seja justificada.

5.10.3 Magnitude

Refere-se ao grau de intensidade da anomalia identificada. A classificação quanto à magnitude da anomalia se dá a partir dos seguintes critérios:

a) I – Insignificante: anomalia que pode ser mantida sob observação pela equipe local responsável pelo túnel;

- b) P – Pequena: anomalia que pode ser resolvida pela própria equipe local responsável pelo túnel;
- c) M – Média: anomalia que pode ser resolvida pela equipe local responsável pelo túnel com apoio de equipe externa;
- d) G – Grande: anomalia que pode ser resolvida apenas com apoio de equipe externa.

5.10.4 Nível de perigo

Refere-se ao potencial da anomalia de comprometer a segurança do túnel em análise. A classificação quanto ao nível de perigo da anomalia se dá a partir dos seguintes critérios:

- a) 0 – Nenhum: a anomalia observada não compromete a segurança do túnel.
- b) 1 – Atenção: a anomalia observada não compromete a segurança do túnel a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada ao longo do tempo.
- c) 2 – Preocupante: a anomalia observada representa risco ao túnel e devem ser tomadas providências para a eliminação da anomalia.
- d) 3 – Máximo: a anomalia observada representa risco de desabamento iminente, situação fora de controle.

Ressalta-se que quando se trata de primeira inspeção de um túnel de transferência hídrica, as situações escolhidas devem estar entre NA, NE, PV e NI.

5.11 Descrição das anomalias no revestimento do túnel

Visto que a seção B do *checklist*, correspondente às anomalias que podem ocorrer no revestimento do túnel apresenta considerável quantidade de termos técnicos, para garantir uma correta avaliação do túnel traz-se as definições a seguir. Ressalta-se que devem ser registradas quaisquer anomalias existentes, ainda que não mencionadas neste documento.

5.11.1 Desplacamento

O deslocamento do concreto refere-se à separação ou descolamento de uma camada superficial desse material. Esta é uma anomalia comum em estruturas de concreto e pode ser causado por várias razões como por exemplo a ação da água e reação álcali-agregado. A presença constante de umidade pode acelerar o processo corrosivo, implicando o

deslocamento, enquanto a reação álcali-agregado, que seria uma reação química entre os álcalis no cimento e certos tipos de agregados no concreto, pode levar à expansão e, eventualmente, ao deslocamento ou fissuração do concreto (Bolina *et al.*, 2019). A Figura 5.7 exibe um exemplo de deslocamento ocorrido em um túnel TS4 CAR em São Paulo.

Figura 5.7 – Deslocamento no túnel TS4 CAR em São Paulo



Fonte: Radar Litoral, 2021.

5.11.2 *Trincas, fissuras e rachaduras*

De forma conceitual, as aberturas no concreto são caracterizadas como microfissuras, fissuras, trincas, rachaduras e fendas, de acordo com sua amplitude. As microfissuras e as fissuras se apresentam de forma estreita e alongada, muitas vezes localizadas de forma aleatória e em geral são anomalias superficiais (Bolina *et al.*, 2019).

As trincas, rachaduras e fendas são aberturas que apresentam-se em maior profundidade, localizadas e acentuadas, que promovem uma separação entre partes do concreto. Na Tabela 5.1 é apresentada a classificação deste tipo de anomalia segundo Bolina *et al.* (2019) em função das suas dimensões. As Figuras 5.8 a 5.11 apresentam exemplos desses tipos de manifestações patológicas. Ressalta-se que o autor também aborda a junta, um tipo de abertura com dimensão superior a 5,1 mm, a qual não será adotada neste documento.

Tabela 5.1 – Classificação das aberturas segundo sua amplitude.

Tipo de abertura	Dimensões
Microfissura	Inferior a 0,2 mm
Fissura	0,2 mm a 0,4 mm
Trinca	0,5 mm a 1,4 mm
Rachadura	1,5 mm a 5,0 mm

Fonte: Bolina *et al.*, 2019.

Figura 5.8 – Microfissuramento no concreto.



Fonte: Neoipsum, 2020.

Figura 5.9 – Fissuramento no concreto.



Fonte: Neoipsum, 2020.

Figura 5.10 – Trinca no concreto.



Fonte: Andrade, 2016.

Figura 5.11 – Rachadura no concreto.



Fonte: LPE Engenharia, 2015.

5.11.3 Corrosão nos tirantes e/ou chumbadores

Corrosão é a interação destrutiva de um metal com o ambiente, promovendo a sua dissolução em íons metálicos por meio de reações químicas ou eletroquímicas. Como tirantes e chumbadores são, respectivamente elementos ativos e passivos que geralmente são constituídos por metais, eles estão sujeitos ao fenômeno da corrosão (Bolina *et al.*, 2019).

Os tirantes são elementos semirrígidos projetados para transmitir esforços de tração em suas extremidades, já os chumbadores são elementos que iniciam sua atuação quando da mobilização do maciço. A corrosão pode-se dar ao longo do elemento estrutural ou na cabeça do tirante. Durante a inspeção em grande parte dos casos não será possível identificar a corrosão no corpo do elemento, sendo necessário a realização de ensaios específicos para esse fim. Contudo, quando a corrosão se encontra na cabeça, pode-se identifica-la através do fissuramento ou trincamento do capacete de concreto, sendo possível observar pontos de corrosão no capacete metálico (ABNT NBR 5629, 2018; ABNT NBR 14827, 2002). A Figura 5.12 à Figura 5.14 exibem exemplos dessa manifestação patológica.

Figura 5.12 – Corrosão em tirante.



Fonte: Pinheiro, 2019.

Figura 5.13 – Corrosão em tirante.



Fonte: Pinheiro, 2019.

Figura 5.14 – Corrosão em chumbador.



Fonte: Fishman, 2015.

Ademais, em túneis destaca-se as abordagens específicas para instalação desses elementos. No teto do túnel, por exemplo, as boas práticas de engenharia recomendam reforços que não sejam instalados com injeção de calda de cimento, como é realizado normalmente, pois devido à ação da gravidade, a calda escorreria. Sendo assim, outras alternativas como os tirantes *End Anchored*, Swellex® e tirante com fixação química através de resina podem ser adotados (Gontijo *et al.*, 2016; Epiroc, s.d.).

O tirante *End Anchored* é fixado mecanicamente apenas na sua ponta, através da expansão da coquilha do tirante, ao girar sua barra. O Swellex®, por sua vez, consiste em um tubo de aço selado e dobrado sobre si mesmo, que se expande com alta pressão de água durante a instalação, proporcionando uma maior interação com a massa rochosa. Esse tipo de reforço pode atingir profundidades em torno de 12 m para um diâmetro de cerca de 42 mm. Na fixação química, utiliza-se resina de poliéster de pega lenta e pega rápida em cartuchos para instalar os tirantes nos furos (Gontijo *et al.*, 2016; Epiroc, s.d.). Nas Figuras 5.15 a 5.17 pode-se observar esses tipos de tirantes.

Figura 5.15 – Tirante *End Anchored*.



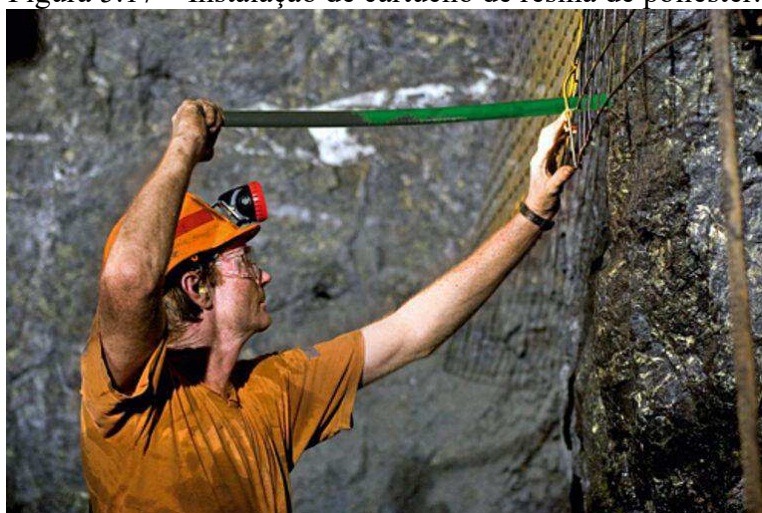
Fonte: DSI Underground, s.d.

Figura 5.16 – Tirante Swellex.



Fonte: Indiamart, s.d.

Figura 5.17 – Instalação de cartucho de resina de poliéster.



Fonte: DSI Underground, s.d.

5.11.4 Ferragem exposta

Esse tipo de anomalia pode decorrer como consequência de outras manifestações patológicas como ataques químicos ao concreto, erosões, carbonatação, infiltração de água, dentre outros. Além disso, pode ser causado devido ao cobrimento insuficiente das armaduras, o que torna o concreto mais susceptível à deterioração por corrosão devido à agressividade ambiental. Na Figura 5.18 pode-se observar exemplos dessa anomalia (Bolina *et al.*, 2019).

Figura 5.18 – Ferragem exposta em revestimento de concreto.

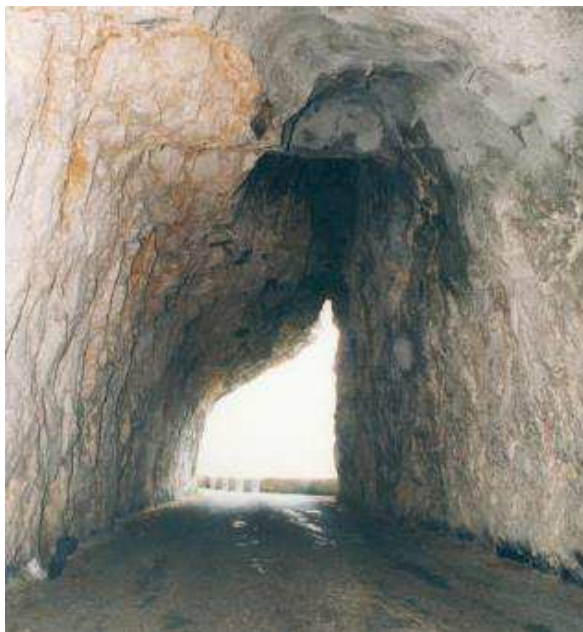


Fonte: Gao *et al.*, 2022.

5.11.5 Deformações/irregularidades localizadas e/ou excessivas

Deformações e irregularidades localizadas e/ou excessivas são manifestações patológicas que podem resultar, dentre outras causas, de reações envolvendo formação de produtos expansivos no concreto, gerando o aumento das tensões internas do material. O assentamento do solo ao redor do túnel, os fenômenos de expansão e contração térmica, a infiltração de água e até mesmo falhas na construção podem ser algumas das causas de deformações e irregularidades no concreto em túneis (Guidicini *et al.*, 2022). A Figura 5.19 traz um exemplo em túnel.

Figura 5.19 – Instabilidades residuais reforçadas com concreto projetado na área de alargamento lateral.

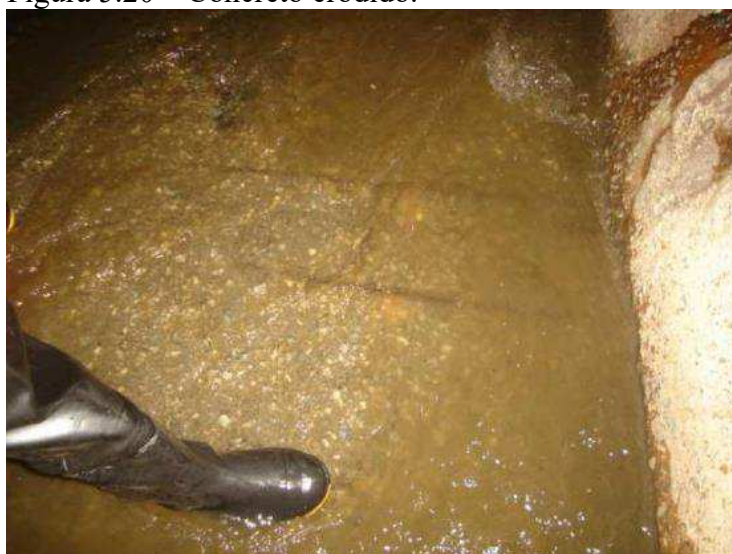


Fonte: CETU, 2015.

5.11.6 Erosões nas paredes e/ou piso

Refere-se ao desgaste pela ação abrasiva de fluidos contendo partículas sólidas em suspensão. Essa manifestação patológica ocorre comumente em estruturas hidráulicas e quando um fluido contendo partículas sólidas está em contato com o concreto, a colisão, o escorregamento ou a rolagem das partículas podem causar esse desgaste superficial (Guidicini *et al.*, 2022). Na Figura 5.20 tem-se um exemplo desse tipo de manifestação patológica.

Figura 5.20 – Concreto erodido.

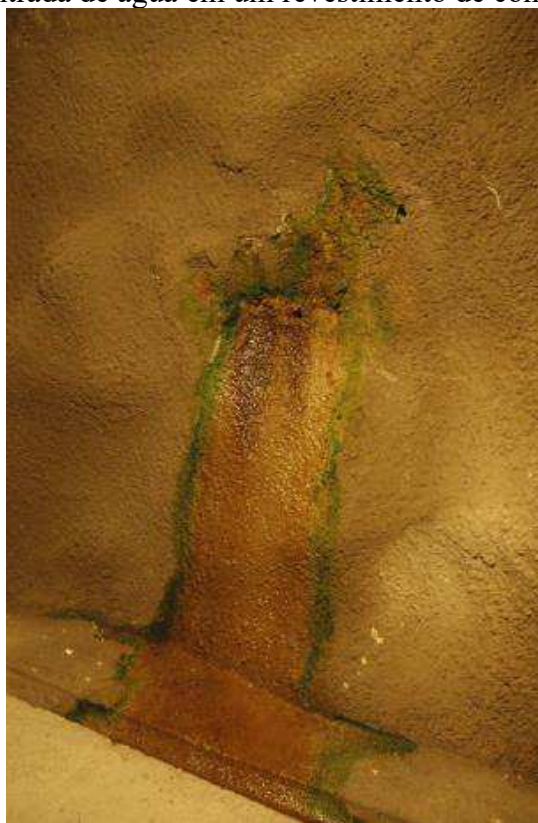


Fonte: Gonçalves, s.d.

5.11.7 *Manchas de umidade/infiltrações*

As manchas de umidade, também podendo ser entendidas como infiltrações no revestimento, referem-se à percolação de água no concreto, que seria a movimentação da água através dos poros e vazios desse material. O movimento em questão geralmente ocorre devido a combinações de pressões diferenciais de ar ou água, umidades diferenciais ou diferenças de temperatura ou concentração de soluções. A percolação de água pode levar a vários problemas, especialmente quando a água carrega substâncias deletérias, ou seja, materiais tóxicos ou nocivos, para o interior do concreto (Bolina *et al.*, 2019). A Figura 5.21 apresenta um exemplo de manchas de umidade/infiltrações em um revestimento de concreto.

Figura 5.21 – Entrada de água em um revestimento de concreto projetado.



Fonte: CETU, 2015.

5.11.8 *Presença de fungos e/ou outros micro-organismos*

O concreto também pode sofrer ataques por agentes biológicos, já que se trata de uma superfície rugosa e porosa, com alta concentração de nutrientes, podendo apresentar proliferação de parasitas de origem vegetal ou animal ou micro-organismos como microalgas, bactérias, fungos, líquens e etc. A presença desses seres pode ocasionar deterioração química

devido aos ácidos resultantes de decomposição e do seu metabolismo, como também a processos mecânicos de deterioração pois a sua presença provoca a saturação da superfície do concreto, ou podem penetrar no concreto gerando fissuras (Hari *et al.*, 2011). A Figura 5.22 traz um exemplo.

Figura 5.22 – Biodegradação do concreto.



Fonte: Hari *et al.*, 2011.

5.11.9 Eflorescências

Esse fenômeno é caracterizado por manchas brancas com aspecto de escorrimento e se dá quando a cal livre formada na hidratação do cimento, é carregada até a superfície através de infiltrações. Quando em contato com o CO_2 , transforma-se em carbonato de cálcio (CaCO_3), o qual tem baixa solubilidade em água (Figueiredo Júnior, 2017). As Figuras 5.23 e 5.24 trazem exemplos de eflorescências no concreto.

Figura 5.23 – Eflorescência no concreto.



Fonte: Revista Construa, 2020.

Figura 5.24 – Eflorescência no concreto.



Fonte: Archtrends Portobello, 2021.

5.11.10 Presença de choco

O processo de abertura de galerias no interior do maciço rochoso leva à alteração do seu equilíbrio natural e provoca a ocorrência de chocos, que se tratam de pedaços de rochas prestes a se desprender das paredes após o desmonte da rocha (Guidicini *et al.*, 2022). Na Figura 5.25 pode-se observar um exemplo de choco.

Figura 5.25 – Exemplo de choco em túnel.

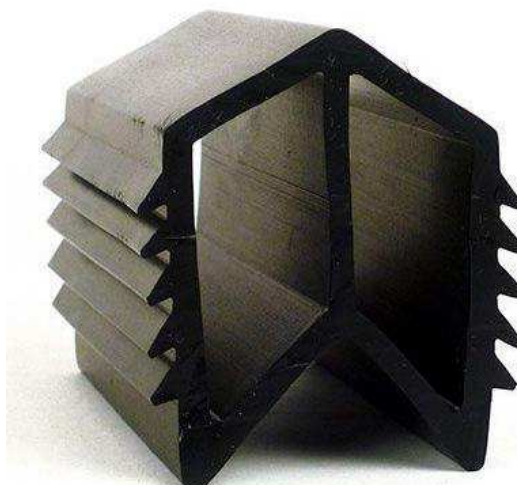


Fonte: Naresi, s.d.

5.11.11 Deficiência no elemento de vedação das juntas de dilatação

Junta de dilatação é uma abertura que divide as estruturas para que as partes separadas possam se movimentar devido às forças mecânicas e térmicas. A junta de dilatação estrutural recebe a colocação de perfis elastoméricos que podem ser feitos a partir de diversos materiais (Uniontech, s.d.). A Figura 5.26 exibe um exemplo de perfil de borracha.

Figura 5.26 – Exemplo de perfil de borracha para junta de dilatação.



Fonte: Garra Borrachas, s.d.

A colocação de perfis elastoméricos na junta de dilatação estrutural e o monitoramento das condições desse elemento através de inspeção é necessária, pois as juntas devem ser seladas e impermeabilizadas para que se evite a deterioração da estrutura (Uniontech, s.d.).

5.12 Conclusões

Com base na análise das diretrizes existentes para inspeção de diferentes tipos de estruturas, evidenciou-se uma lacuna significativa em relação aos túneis de transferência hídrica, os quais não possuem manuais específicos de orientação como os disponíveis para barragens, pontes e outras obras de arte. Dessa forma, neste trabalho foi desenvolvida uma proposta de manual de orientação para inspeção em túneis de transferência hídrica.

Adotou-se uma abordagem metodológica baseada na adaptação de diretrizes existentes, como o Guia de Inspeções de Segurança de Barragens da ANA, e na revisão ampla de literatura técnica nacional e internacional. A metodologia empregada buscou preencher essa lacuna, estruturando as melhores práticas recomendadas e consolidando orientações técnicas.

O manual se mostrou abrangente pois aborda aspectos pré-inspeção através de sugestões de roteiros que podem ser seguidos a partir do tipo de inspeção que será realizada, equipamentos que devem ser utilizados e etc. Para o momento da inspeção são elucidados os ensaios que podem ser realizados, as anomalias que podem ser observadas e também aborda maiores esclarecimentos sobre o *checklist* de inspeção, o qual foi desenvolvido por Silva (2022) e atualizado após a inspeção no túnel Boa Vista, conforme explicitado no capítulo 4. Além disso, o manual proposto também traz orientações acerca do pós-inspeção, através da elaboração do relatório de inspeção.

A partir do desenvolvimento deste documento foi possível compilar um conjunto de recomendações que visa não apenas orientar inspeções futuras, mas também promover a segurança e a manutenção eficiente dessas estruturas. Este trabalho representa um passo significativo na padronização das práticas de inspeção e manutenção de túneis hídricos, contribuindo para a segurança e eficiência operacional dessas infraestruturas fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental.

Ressalta-se que este documento está sujeito a adequações caso julgue-se necessário para situações específicas. Além disso, recomenda-se que esta ferramenta seja utilizada como auxílio para definição do estado de conservação da estrutura, sendo acompanhada da análise de

dados da instrumentação, registros fotográficos e em vídeo, além de análises de risco mais aprofundadas quando aplicável.

6 DISCUSSÃO GERAL E CONCLUSÃO

Esta dissertação apresentou propostas de metodologias para gerenciamento de riscos em túneis de transferência hídrica com base na inspeção de campo a fim de suprir uma lacuna no contexto atual, de ausência de diretrizes e regulamentações específicas para esse tipo de estrutura, contribuindo para a padronização de processos de gestão de riscos nessa estrutura fundamental para o acesso à água. O trabalho foi desenvolvido através da elaboração de quatro artigos.

No capítulo 2 foi realizada a validação do *checklist* de inspeção elaborado por Silva (2022) para túneis de transferência hídrica. A validação ocorreu através de inspeção no túnel Boa Vista, no Ceará, com o uso do *checklist* por 4 profissionais. Além disso avaliou-se o estado de conservação do túnel Boa Vista, acerca das anomalias constatadas, e a classificação das mesmas de acordo com critérios definidos no *checklist* que foram preenchidos em campo (situação, magnitude e nível de perigo). Foi possível observar pontos de melhoria no *checklist*, com relação à sua formatação, termos adotados e informações que poderiam ser complementadas, assim como a heterogeneidade dos resultados obtidos pelos 4 profissionais. A partir dessa classificação concluiu-se que as anomalias identificadas no túnel não comprometiam a segurança/funcionamento a curto prazo, mas deveriam ser controladas e monitoradas ao longo do tempo. Por fim foi então proposto um modelo de *checklist* atualizado com base nas observações realizadas.

O capítulo 3 consistiu na elaboração de uma árvore de decisão para auxiliar na escolha de método de análise de risco em estruturas geotécnicas. A árvore foi elaborada a partir de levantamento bibliográfico acerca dos métodos existentes que já foram aplicados em estruturas geotécnicas. A partir das informações obtidas, elaborou-se uma tabela, classificando os métodos a partir de critérios pré-definidos de nível de detalhamento, experiência necessária, flexibilidade e tempo de implementação, sendo então a base para a estruturação da árvore. A ferramenta desenvolvida é um auxílio inicial visualmente intuitivo para a escolha do método de análise de riscos em estruturas geotécnicas, uma fase crítica da gestão de riscos.

No capítulo 4 foi proposta uma metodologia para determinação do Índice de Segurança (IS) de um túnel de transferência hídrica, que se fundamenta no *checklist* de inspeção validado e automatizado, juntamente com a classificação detalhada das anomalias realizada no documento a qual foi interligada a uma matriz de risco, também automatizada, que além de ser a base para o cálculo do IS, também auxilia na priorização das anomalias identificadas em

campo. O IS é uma ferramenta que objetiva fornecer uma visão geral e direta acerca do estado de conservação e da segurança operacional do túnel aos seus gestores e à sociedade em geral. A aplicação da metodologia no túnel Boa Vista indicou um IS de 10, categorizando o túnel como "Excelente", o que está condizente com o que foi observado durante a inspeção de campo.

No capítulo 5 apresentou-se a proposta de um manual com orientações acerca da inspeção em túneis de transferência hídrica. Frente à lacuna de diretrizes para inspeções em túneis de transferência hídrica, elaborou-se o manual com base em orientações disponíveis para outras estruturas e em levantamento na literatura técnica nacional e internacional. O documento aborda aspectos antes, durante e após a inspeção, como orientações acerca dos equipamentos que devem ser utilizados, ensaios, uso do *checklist* e estruturação do relatório de inspeção.

No geral, esta dissertação fornece ferramentas robustas, orientações e discussões que contribuem para a compreensão e melhoria dos processos de gestão de risco em túneis de transferência hídrica. Discutiu-se a metodologia de inspeção nessas estruturas, fornecendo um *checklist* validado, consolidado e automatizado que também pode vir a ser utilizado através de aparelhos eletrônicos em contextos futuros, além de um método de avaliação do estado de conservação através de um índice abrangente que fornece uma resposta direta aos gestores e propôs-se um manual de orientações que consolida todo o conhecimento obtido através do estudo realizado neste trabalho.

Ao apresentar todas essas ferramentas, a dissertação aumenta a capacidade de conceber e implementar um sistema de gestão de risco mais homogêneo e efetivo para os túneis de transferência hídrica, contribuindo assim para o monitoramento e a manutenção dessas estruturas e conseqüentemente para o fortalecimento da segurança hídrica.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Unidade 3: inspeções visuais. In: AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Curso Segurança de Barragens. [201-].

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens - Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem. Volume II. 2016. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Acervo/Detalhe/68806. Acesso em: 02 abr. 2023.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 228.2R-04: 2004. Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. American Concrete Institute.

ANDRADE, S. Trincas em Pavimentos de Concreto. SA Soluções de Engenharia, 2016. Disponível em: <http://sasolucoes.com.br/trincas-em-pavimentos-de-concreto/>. Acesso em: 17 ago. 2023.

ARCHTRENDS PORTOBELLO. 6 perguntas e respostas importantes sobre eflorescência. **Archrends Portobello**, 2021. Disponível em: <https://blog.archtrends.com/eflorescencia/>. Acesso em: 07 set. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. **Boletim nº 4: Ensaios de Permeabilidade em Solos**. ABGE, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL. **Boletim nº 3: Manual de Sondagens**. 5ª ed. ABGE, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5674: Manutenção de edificações — Requisitos para o sistema de gestão de manutenção**. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9452: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5629: Execução de Tirantes Acorados no Terreno - Projeto e Execução**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16616: Ensaios não destrutivos – ultrassom convencional – qualificação de procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10786: Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de permeabilidade à água.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16230: Inspeção de estruturas de concreto – Qualificação e certificação de pessoal - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7584: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15146-1: Controle tecnológico de concreto – qualificação de pessoal - parte 1: requisitos gerais.** Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15775: Sistemas de segurança contra incêndio em túneis – Ensaios, comissionamento e inspeções.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14827: Chumbadores instalados em elementos de concreto ou alvenaria – Determinação de resistência à tração e ao cisalhamento.** Rio de Janeiro, 2002

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C 876: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.** ASTM International, 1999.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D 6230-98: Standard Test Method for Monitoring Ground Movement Using Probe-Type Inclinometers.** ASTM International, 2005.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E83: Standard Specification for Digital Contact Thermometers.** ASTM International, 2016.

BAPTISTA, Maria de Lurdes Pimenta. **Abordagens de riscos em barragens de aterro.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009. Disponível em: <http://repositorio.lnec.pt:8080/jspui/handle/123456789/17187>. Acesso em: 20 mar. 2023.

BERK, Aysu. **Development of a safety-inspection methodology for river bridges.** 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Engenharia Civil) - Graduate School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, Ankara, 2006.

BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Patologia de estruturas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

BRASIL. **Cinturão das Águas do Ceará recebe mais R\$ 31,6 milhões em recursos federais. Brasil,** 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e->

transportes/2021/06/cinturao-das-aguas-do-ceara-recebe-mais-r-31-6-milhoes-em-recursos-federais. Acesso em: 21 jan. 2024.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Sumário Executivo: Projeto de Integração do Rio São Francisco. Ministério da Integração Nacional, 2016. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-temporarias/externas/55a-legislatura/transposicao-rio-sao-francisco/documentos/outros-documentos/documentos-tcu/SumrioExecutivoAbr2016.pdf>. Acesso em: 8 out. 2023.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 20 set. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm. Acesso em: 1 out. 2023.

BRASIL. Lei nº 13.334, de 13 de setembro de 2016. Cria o Programa de Parcerias de Investimentos - PPI e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 14 set. 2016.

BRASIL. Portaria/MTP nº 1.690 de 2022. Aprova a nova redação da Norma Regulamentadora nº 33 – Segurança e Saúde no Trabalho em Espaços Confinados (NR-33). *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 94, 24 jun. 2022. Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/portaria/mtp-n-1.690-de-15-de-junho-de-2022-410048596>. Acesso em: 01 jul. 2023.

BRASIL. Portaria/MTP nº 2.175 de 2022. Aprova a nova redação da Norma Regulamentadora nº 06 - Equipamentos de Proteção Individual - EPI. (Processo nº 19966.101223/2021-46). *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 68, 05 set. 2022. Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mtp-n-2.175-de-28-de-julho-de-2022-420564666>. Acesso em: 01 jul. 2023.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 04 set. 2012.

BRASIL. Ministério do Trabalho. Norma Regulamentadora nº 33, de 23 de março de 2007. Segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 26 mar. 2007.

BRASIL. Ministério do Trabalho. Portaria nº 3.214, de 8 de junho de 1978. Normas Regulamentadoras de Segurança e Medicina do Trabalho. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 9 jun. 1978.

CABRAL, E. Ensaios em estruturas deterioradas. Notas de aula da disciplina de Patologia e recuperação de estruturas de concreto do curso de graduação em engenharia civil da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2020.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. **Definição: O que é Dedução.** [s.d.]. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/847-deducao>. Acesso em: 20 mar. 2023.

CENTRE D'ÉTUDES DES TUNNELS (CETU). Road tunnel civil engineering guide. Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, 2015.

Chwata, M. *et al.* Time capsule for geotechnical risk and reliability. **Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards**, London, v. 17, n.3, p. 439-466, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17499518.2022.2136717>. Acesso em: 25 abr. 2024.

COELHO, Adoniran Martins. **Gerenciamento de riscos geotécnicos em obras subterrâneas.** 2014. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/5287>. Acesso em: 28 set. 2023.

COMITÉ FRANÇAIS DES BARRAGES ET RÉSERVOIRS. Pratiques françaises de l'analyse de risques et de l'évaluation de la sûreté des barrages. 2020. Disponível em: https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/fr-en_recommandations_cfbr_2021_analyse_de_risques.pdf. Acesso em: 22 jan. 2024.

COMPANHIA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ. **Entorno e emboque do túnel Boa Vista.** (2023). Cariri. [Fotografia]. Foto fornecida pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará.

COMPANHIA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ. **Checklist Orós-Feiticeiro.** Fortaleza: COGERH, 2018.

COMISSÃO NACIONAL PORTUGUESA DAS GRANDES BARRAGENS. Grupo de trabalho de análise de riscos em barragens: 1º relatório de progresso (janeiro de 2005). Amadora, Lx: Agência Portuguesa do Ambiente, 2005.

COSTA, V. M.; ARAÚJO, V. dos S. de; CALHEIROS, C. S. Desenvolvimento do aplicativo INSPER para elaboração de laudos técnicos de inspeção predial. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, v. 17, n.2, p. 01-22, 2024. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/4925>. Acesso em: 07 jul. 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias. 2004. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/709_manual_de_inspecao_de_pontes_rodoviaras.pdf. Acesso em: 25 jun. 2023.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). DIN EN 14630: 2007. **Non-destructive testing of welds - Magnetic particle testing - Acceptance levels**. Beuth Verlag.

DSI UNDERGORUND. **Case studies**. [s.d.] Disponível em: https://www.dsiunderground.com/case-studies?ajax=1&q=&tx_solr%5Bfilter%5D%5B0%5D=application%3AMining&tx_solr%5Bfilter%5D%5B1%5D=segment%3ATunneling&cHash=a21be3e31b59a7f94c9b33d5237542bb. Acesso em: 01 jul. 2024.

DUJIM, N. J. Recommendations on the use and design of risk matrices. **Safety Science**, v. 76, p. 21-31, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925753515000429>. Acesso em: 20 abr. 2024.

DYCK, Esther. **Metodologia de apoio à tomada de decisão para planos de segurança de barragens**. 2022. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) — Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Instituto de Engenharia do Paraná, 2022. Disponível em: <https://mestrado.lactec.com.br/dissertacoes/354-metodologia-de-apoio-a-tomada-de-decisao-para-planos-de-seguranca-de-barragens/>. Acesso em: 20 out. 2023.

EHLERS, U. C.; RYENG, E.O.; McCORMACK, E.; KHAN, F.; EHLERS, S. Assessing the safety effects of cooperative intelligent transport systems: A bowtie analysis approach. **Accident Analysis and Prevention**, v. 99, p. 125–141, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2016.11.014>. Acesso em: 15 fev. 2024.

EMPRESA GAÚCHA DE RODOVIAS. **Manual de Inspeção em Obras de Arte – EGR**. 2018. Disponível em: <https://www.egr.rs.gov.br/upload/arquivos/202206/28143825-20181003115038manual-de-inspecao.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2023.

ENGESOFT ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA; IBI ENGENHARA CONSULTIVA S/S. Relatório de Obras dos Túneis: junho/2017. Fortaleza, 2017. Documento fornecido pela Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (SRH).

EPIROC. Swellex. [s.d.]. Disponível em: <https://www.epiroc.com/pt-pt/products/rock-drilling-tools/ground-support/quasi-static-rockbolts/inflatable-rockbolts/swellex>. Acesso em: 01 jul. 2024.

ESKESEN, S. D.; TENGBORG, P.; KAMPMANN, J.; VEICHERTS, T. H. Guidelines for tunnelling risk management. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 19, p. 217-237, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2004.01.001>. DOI: 10.1016/j.tust.2004.01.001.

ESPANHA. Real Decreto 264, de 13 de abril de 2021. Por el que se aprueban las normas técnicas de seguridad para las presas y sus embalses. Boletín Oficial del Estado: seção 1, Madrid, 14 abr. 2021.

FELL, R.; WAN, C. F. **Methods for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping in the foundation and from embankment to foundation**. Sydney, Australia: The University of New South Wales, 2005.

FIGUEIREDO JÚNIOR, Geraldo Josafá de. **Patologia em revestimentos de fachadas – diagnóstico, prevenção e causas**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Construção Civil) – Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/42782/1/MOGRAFIA%20GERALDO%20JR..pdf>. Acesso em: 23 jul. 2024.

FISHMAN, K. L. Condition assessment, durability and corrosion of rock reinforcements. In: 17th Annual Technical Forum – Geohazards Impacting Transportation in the Appalachian Region. Blacksburg, 2015. Disponível em: https://www.marshall.edu/cegas/geohazards/2017pdf/session6/3_Ken%20Fishman%20-%20Session%206%20-%20Fishman.pdf. Acesso em: 16 out. 2023.

FONSECA, Marcus Nicholas Esquivel. **Análise dos modos de falha e efeitos (FMEA) para avaliação de um acidente em barragem de rejeitos: um evento de mineração**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) — Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/25698>. Acesso em: 11 mar. 2024.

FONTE, Felipe José Meira da. **Proposta para um sistema de inspeção e manutenção dos túneis da cidade do Recife**. 2011. Monografia (Especialização em Inspeção, Manutenção e Recuperação de Estruturas) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, 2011. Disponível em: https://www.vitorioemelo.com.br/publicacoes/Proposta_Sistema_Inspecao_Manutencao_Tuneis_Recife.pdf. Acesso em: 06 mai. 2024.

FOSTER, M. A.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. **Analysis of embankment dam incidents**. Sydney, Australia: The University of New South Wales, 1998.

FRAJNDLICH, Roberto. **Cálculo da probabilidade de ocorrer acidentes no reator IEA-R1. 1982**. Dissertação (Mestrado em reatores nucleares de potência e tecnologia do combustível nuclear) — Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1982. Disponível em: http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Roberto%20Frajndlich_M.pdf. Acesso em: 26 abr. 2024.

GAO, Z. *et al.* Deformation Analysis of the Rock Surrounding a Tunnel Excavated through a Gently Dipping Bed. **Applied Science**, Basel, v. 12, n. 4, p. x-y.

GARRA BORRACHAS. Junta de dilatação calçada de concreto. [s.d.]. Disponível em: <https://www.garraborrachas.com.br/produtos/junta-de-dilatacao/junta-de-dilatacao-calçada-de-concreto>. Acesso em: 27 jul. 2024.

GÓIS, Thaís de Souza. (2016). **Estudo da corrosão do concreto microbiologicamente induzida (CCMI) em estruturas de saneamento**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016. Disponível em: <https://lemac.ufes.br/sites/lemac.ufes.br/files/field/anexo/Thais%20Gois.pdf>. Acesso em: 07 set. 2023.

GOMES, Luiz F. A. Monteiro; GOMES, Carlos F. S. **Princípios e Métodos para Tomada de Decisão Enfoque Multicritério**. São Paulo: Editora Atlas LTDA, 2019.

GONÇALVES, G. S. **Sintomatologia: lixiviação e desgaste superficial do concreto**. Notas de aula da disciplina de patologia e recuperação de estruturas do curso de graduação em engenharia civil da Faculdade Kennedy. Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <https://meumaterialsite.files.wordpress.com/2017/01/ap5-sintomatologia.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2023.

GONTIJO, A.; LOPEZ, J.; PEREIRA, F. de B.; *et al.* Parâmetros Relevantes e Críticos que Influenciam na Performance do Atirantamento com Cartucho de Resina de Poliéster. In: Anais do Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas. Belo Horizonte, 2016. Disponível em: https://www.mecroc.com.br/wp-content/uploads/2020/03/SBMR-06-0022_Par%C3%A2metros-Relevantes-e-Cr%C3%ADticos-que-influenciam-na-Perfo....pdf. Acesso em: 01 jul. 2024.

GOOGLE. Google Earth. Imagem do túnel Boa Vista, Crato, Brasil. Disponível em: <https://earth.google.com/web/@-7.17492763,-39.41341316,485.35434905a,754.74398853d,35y,12.25812216h,6.88509871t,360r>. Acesso em: 03 jun. 2024.

GUIDICINI, G. *et al.* **Patologia de túneis hidráulicos: acidentes e incidentes no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

HARI, S. *et al.* Biodeterioration of coastal concrete structures by macro algae-ulva Fasciata. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 19, n.2, p. 154-161.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 31000: 2018. Risk management: Guidelines**. Geneva: ISO, 2018.

INDIAMART. **Jenmar Python Swellex bolts**. Disponível em: <https://www.indiamart.com/proddetail/jenmar-python-swellex-bolts-9239966673.html>. Acesso em: 01 jul. 2024.

INSTITUTO AGROPOLOS. Produto: documento técnico. Crato, Instituto Agropolos, 2020. Documento fornecido pela Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (SRH).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18674-3: Geotechnical investigation and testing — Geotechnical monitoring by field instrumentation**. ISO, 2017.

KANASHIRO, A. M.; MISTRONI, M. S.; MUNHOZ, F. C. *et al.* Automatização de Checklist de Inspeção Predial. **Environmental Science & Technology Innovation**, Bauru, v. 1, n. 2, p. 171-194, mar. 2023. Disponível em: <https://revistas.unisagrado.edu.br/index.php/esti/article/download/460/276/1476>. Acesso em: 07 jul. 2024.

LADEIRA, Josias Eduardo Rossi. **Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos: o caso UHE – São Simão**. 2007. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)

— Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/FRPC-78HHUG>. Acesso em: 27 abr. 2023.

LIMA, F. N.; NAGHETTINI, M.; ESPÓSITO, T. Aplicação do método da árvore de falhas (FTA) para avaliação da probabilidade de falhas das comportas do vertedouro de uma barragem. In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves, 2013.

LPE Engenharia. **Qual a diferença entre fissura e trinca?** 2015. Disponível em: <http://lpe.tempsite.ws/blog/index.php/qual-a-diferenca-entre-fissura-e-trinca/>. Acesso em: 28 ago. 2023.

MACIEL FILHO, C. L.; NUMMER, A. V. **Introdução à Geologia de Engenharia**. 5 ed. Santa Maria: UFSM, 2014. 456 p.

MAGEE, J. F. Decision Trees for Decision-Making. **Harvard Business Review**, v. 42, n. 4, p. 126–137, 1964. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1068316X.2018.1528359>. Acesso em: 15 ago. 2023.

MALVA, R. The Inspection, Monitoring and Diagnosis of Tunnels. In: Proceedings of the World Tunnel Congress. Foz do Iguaçu, 2014.

MEIRELES, M. **Ferramentas Administrativas para identificar, observar e analisar problemas**. São Paulo: Arte e Ciência, 2001.

MELO, Alexandre Vaz de. **Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da CEMIG GT**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-9RWH45>. Acesso em: 26 abr. 2023.

MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, RELACIONES CON LAS CORTES Y MEMORIA DEMOCRÁTICA.

MORADI, M. R.; FARSANGI, M. A. E. Application of the risk matrix method for geotechnical risk analysis and prediction of the advance rate in rock TBM tunneling. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 47, n. 5, p. 1951-1960. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00603-013-0464-x>. Acesso em: 19 mar. 2024.

MURRAY, R. S.; SCHILLER, J.; SRINIVASAN, A. Probabilidade e Estatística. 3 ed. São Paulo: Bookman, 2013. 211 p.

NARESI JÚNIOR, L. A. **Abatimento de Choco**. Naresi – Fundações e Geotecnia, 2010. Disponível em: <https://sites.google.com/site/naresifundacoesgeotecnias/112-execucao-debate-choco#:~:text=GENERALIDADES%3A,escava%C3%A7%C3%B5es%20ap%C3%B3s%20dismonte%20de%20rocha>. Acesso em: 07 set. 2023.

NEOIPSUM. **05 principais causas de fissuras no concreto**. Neoipsum, 2020. Disponível em: <https://neoipsum.com.br/fissuras-no-concreto-e-suas-principais-causas/>. Acesso em: 31 ago. 2023.

OLIVEIRA JÚNIOR, A. I. de. Análise da precipitação e determinação de equações de chuvas intensas para o município de Crato-CE situado no semiárido do Brasil. **Revista GEAMA – Ciências Ambientais e Biotecnologia**, v. 5, n. 3, p. 56-65, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338197413_Analise_da_precipitacao_e_determinacao_de_equacoes_de_chuvas_intensas_para_o_municipio_de_Crato-CE_situado_no_semiarido_do_Brasil. Acesso em: 06 jul. 2024.

OLIVEIRA, Josimar Alves de. **Análise e hierarquização de barragens usando matriz GUT como ferramenta de análise de risco no contexto da política nacional de segurança de barragens**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Segurança de Barragens) — Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/38405>. Acesso em: 17 jul. 2023.

OLIVEIRA, A. M. de S.; TERRIBELE, A. B.; SWIDERSKI, B.; OLIVEIRA, R.R. Classificação do estado de conservação de fachadas de edificações públicas. **E&S – Engineering and Science**, v. 3, n. 7, p. 42-57, 2018. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/6890/4864>. Acesso em: 24 mar. 2024.

PEDRO, J. B. PAIVA, J. V. de. Métodos de avaliação do estado de conservação de edifícios desenvolvidos no LNEC: Características e possibilidades de aplicação. **Revista de Engenharia Civil**, n. 42, p. 5-14, 2012. Disponível em: <https://www.civil.uminho.pt/revista/artigos/n42/P%C3%A1g.5-18.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2024.

PINHEIRO, I. **A Explicação Definitiva Sobre Tirantes na Construção**. Inova Civil, 2019. Disponível em: <https://www.inovacivil.com.br/tirantes/>. Acesso em: 04 set. 2023.

PORTARIA N.º 1192-B/2006, de 3 de novembro. Diário da República n.º 212/2006, 1º Suplemento, Série I, p. 9-15. Presidência do Conselho de Ministros e Ministérios das Finanças e da Administração Pública, do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional e das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Portugal. Disponível em: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/1192-b-2006-152704>. Acesso em: 25 jun. 2024.

PORTER, M.; LATO, M.; QUINN, O.; *et al.* Challenges with use of risk matrices for geohazard risk management for resource development projects. In: Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk, Perth, 2019. Disponível em: https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1905_01_Porter/. Acesso em: 20 mar. 2024.

RADAR LITORAL. Queda de estrutura de concreto em túnel assusta trabalhadores na Tamoios; QG diz que operação obedece a técnicas de engenharia. **Radar Litoral**, 2021. Disponível em: [https://radarlitoral.com.br/noticias/16849/queda-de-estrutura-de-concreto-em-tunel-assusta-trabalhadores-na-tamoios; -qg-diz-que-operacao-obedece-tecnicas-de-engenharia](https://radarlitoral.com.br/noticias/16849/queda-de-estrutura-de-concreto-em-tunel-assusta-trabalhadores-na-tamoios;-qg-diz-que-operacao-obedece-tecnicas-de-engenharia). Acesso em: 31 ago. 2023.

RASHIDI, M.; GIBSON, P. A methodology for bridge condition evaluation. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 6, n.9, p. 1149-1157, 2012. Disponível em: <https://ro.uow.edu.au/eispapers/351/>. Acesso em: 07 jul. 2024.

REMEDY. **Risk Reduction of Groundwork Damage: A literature review of risk matrices applied for risk assessment in geotechnical engineering**. Deliverable D5.1. Oslo: BegrensSkade/REMEDY, 2018. Disponível em:

<https://www.ngi.no/nor/Projekter/BegrensSkade-II-REMEDY-Risk-Reduction-of-Groundwork-Damage>. Acesso em: 18 mar. 2024.

REVISTA CONSTRUA. As 5 patologias mais comuns da construção civil. **Revista Construa**, 2020. Disponível em: <https://revistaconstrua.com.br/noticias/engenharia/as-5-patologias-mais-comuns-da-construcao-civil/>. Acesso em: 07 set. 2023.

RUIJTER, A. de; GULDENMUND, F. The bowtie method: a review. **Safety Science**, v. 88, p. 211-218, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.001>. Acesso em: 20 abr. 2024.

SAKURADA, Eduardo Yuji. **As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/80128>. Acesso em: 02 mar. 2024.

SANTOS, Ana Paula da Silveira. **Avaliação da qualidade da água de poços artesianos utilizados no abastecimento público do município de Carlos Gomes-RS, através de análises físico-químicas, microbiológicas e testes toxicológicos**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado em engenharia ambiental) – Universidade Federal da Fronteira Sul, 2017. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/1694/1/SANTOS.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2024.

SAUD, Y. Y; KUMAR, I. C.; GODDARD, J. Bow-tie diagrams in downstream hazard identification and risk assessment. **Process Safety Progress**, v. 33, p. 26-35, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/prs.11576>. Acesso em: 16 mar. 2024.

SHARAFAT, A.; LATIF, K.; SEO, J. Risk analysis of TBM tunneling projects based on generic bow-tie risk analysis approach in difficult ground conditions. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 111, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103860>. Acesso em: 26 abr. 2024.

SIEG, T. *et al.* Toward an adequate level of detail in flood risk assessments. **Journal of Flood Risk Management**, v. 16, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12889>. Acesso em: 21 abr. 2024.

SILVA, M. C. C. e. **Proposta de checklist para inspeção em túneis de transferência hídrica como ferramenta de avaliação de risco**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em engenharia civil), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

SILVA, W. V. et al. Avaliação da escolha de um fornecedor sob condição de riscos a partir do método de Árvore de Decisão. **Revista de Gestão USP**, v. 15, p. 77-94, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.5700/issn.2177-8736.rege.2008.36648>. Acesso em: 28 abr. 2024.

SOUSA, R.; COSTA, A. L. D.; EINSTEIN, H. H. Exploration and decision-making in geotechnical engineering – a case study. **Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards**, v. 10, 2016. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/loi/ngrk20>. Acesso em: 28 abr. 2024.

STANDARDS AUSTRALIA/STANDARDS NEW ZEALAND. AS/NZS: 2004. Risk management guidelines. Sydney and Wellington: 2004.

TEIXEIRA, Pedro Alexandre Manso. **Aplicação do FMECA a sistemas de estabilização e reforço de maciços em túneis**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10773/2398>. Acesso em: 26 abr. 2024.

THE BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN IEC 60812: 2018. Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)**. Brussels, 2018.

UNIONTECH TECNOLOGIA DE JUNTAS. Junta de dilatação estrutural. [s.d.]. Disponível em: <https://www.uniontech.com.br/junta-dilatacao-estrutural>. Acesso em: 20 mai. 2024.

UNITED STATES. Department of the Interior; U.S. Army Corps of Engineers. **Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis**. 2019.

UNITED STATES. Department of the Army; U.S. Army Corps of Engineers. **Safety of Dams – Policy and Procedures**. 2011.

ULTRALAB. Potencial de corrosão das armaduras. Ultralab, s.d. Disponível em: <https://ultralabengenharia.com.br/potencial-de-corrosao-das-armaduras>. Acesso em: 17 out. 2023.

VBA TECNOLOGIA E ENGENHARIA. Método Construtivo Seção Tipo 5A e 4C: túnel Boa Vista. Desenho em seção. Fortaleza: VBA Tecnologia e Engenharia, 2013. Formato .dwg. Documento fornecido pela Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (SRH).

VBA TECNOLOGIA E ENGENHARIA. Projeto Executivo do 1º Trecho Jati / rio Cariús do Cinturão de Águas do Ceará (CAC): relatório final dos serviços geológico-geotécnico (volume IV/VI). 2015. Disponível em: <http://www.ged.srh.ce.gov.br/>. Acesso em: 24 mai. 2023.

WATER MANAGEMENT BRANCH. Inspection & Maintenance of Dams: Dam Safety Guidelines. 2016. Disponível em: https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/dam-safety/i_and_m_of_dams_guideline_2016_v3.pdf. Acesso em: 20 jan. 2024.

APÊNDICE A – PROPOSTA DE CHECKLIST ATUALIZADO (CAPÍTULO 2)

IDENTIFICAÇÃO	
Túnel	Diâmetro do túnel
Trecho	Finalidade
Subtrecho	Projetista
Quilômetro	Construtora
Data da inspeção	Data de conclusão da obra
Responsável pela Inspeção	Tipo de Inspeção () Cadastral () Rotineira () Especial () Extraordinária

LEGENDA	
SITUAÇÃO	MAGNITUDE
NA: item não aplicável	anomalia que pode simplesmente ser mantido sob observação do operador.
NE: anomalia não existente	quando a anomalia pode ser resolvido/ encaminhado pelo próprio operador.
PV: anomalia verificado pela primeira vez	anomalia que só pode ser resolvido com apoio da equipe de manutenção / gerência regional.
PR: anomalia resolvido	anomalia que só pode ser resolvido através empresa especializada.
DI: anomalia diminuiu	NÍVEL DE PERIGO
PC: anomalia permaneceu constante	não compromete a segurança/funcionamento do túnel, mas que indica descaso e/ou falta de manutenção.
AU: anomalia aumentou	não compromete a segurança/funcionamento do túnel a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada ao longo do tempo.
NI: item não inspecionado (informar motivo)	possibilidade de comprometimento da segurança/funcionamento do túnel, devem ser tomadas providências para a eliminação da anomalia.
	risco crítico de segurança/comprometimento do funcionamento do túnel.

SITUAÇÃO

NA: item não aplicável

NE: anomalia não existente

PV: anomalia verificado pela primeira vez

PR: anomalia resolvido

DI: anomalia diminuiu

PC: anomalia permaneceu constante

AU: anomalia aumentou

NI: item não inspecionado (informar motivo)

MAGNITUDE

I – insignificante: anomalia que pode ser mantido sob observação do operador.

P – pequena: anomalia pode ser resolvido/ encaminhado pelo próprio operador.

M – média: anomalia apenas pode ser resolvido com apoio da equipe de manutenção / gerência regional.

G – grande: anomalia que apenas pode ser resolvida através empresa especializada.

NÍVEL DE PERIGO

0 – nenhum: não compromete a segurança/funcionamento do túnel, mas que indica descaso e/ou falta de manutenção.

1 – atenção: não compromete a segurança/funcionamento do túnel a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada.

2 – preocupante: possibilidade de comprometimento da segurança/funcionamento do túnel, devem ser tomadas providências.

3 – máximo: risco crítico de segurança/comprometimento do funcionamento do túnel.

Observação: anomalia diverso detectado no item (descrever item-situação) ou outras anomalias existentes não enumerados, na seção G

A. DOCUMENTAÇÃO E INFRAESTRUTURA														
Nº	ANOMALIA	NA	NE	PV	PR	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	NP
A.1	Falta de documentação (livro de ocorrência, manuais e fichas de operação e manutenção)													
A.2	Falta de material para manutenção/ operação básica													
A.3	Falta de treinamento operacional													
A.4	Precariedade de acesso de veículos													
A.5	Sistema de comunicação deficiente													
A.6	Falta ou deficiência de cercas de proteção													
A.7	Falta de acompanhamento da adm. regional													
A.8	Desmatamento irregular nas faixas de domínio													
A.9	Presença de lixo, entulhos ou animais pastando													
A.10	Ocupação social irregular													
A.11	Estrada obstruída ou bloqueada													
A.12	Estrada com precariedade de acesso													
A.13	Estrada com drenagem deficiente													
A.14	Ausência de placas de aviso													

SITUAÇÃO

NA: item não aplicável

NE: anomalia não existente

PV: anomalia verificado pela primeira vez

PR: anomalia resolvido

DI: anomalia diminuiu

PC: anomalia permaneceu constante

AU: anomalia aumentou

NI: item não inspecionado (informar motivo)

MAGNITUDE

I – insignificante: anomalia que pode ser mantido sob observação do operador.

P – pequena: anomalia pode ser resolvido/ encaminhado pelo próprio operador.

M – média: anomalia apenas pode ser resolvido com apoio da equipe de manutenção / gerência regional.

G – grande: anomalia que apenas pode ser resolvida através empresa especializada.

NÍVEL DE PERIGO

0 – nenhum: não compromete a segurança/funcionamento do túnel, mas que indica descaso e/ou falta de manutenção.

1 – atenção: não compromete a segurança/funcionamento do túnel a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada.

2 – preocupante: possibilidade de comprometimento da segurança/funcionamento do túnel, devem ser tomadas providências.

3 – máximo: risco crítico de segurança/comprometimento do funcionamento do túnel.

ANOMALIA		A. DOCUMENTAÇÃO E INFRAESTRUTURA												
Nº		NA	NE	PV	PR	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	NP
A.15	Placas de aviso danificadas ou ilegíveis													
A.16	Placas de aviso furtadas													
A.17	Lembrete de informação ilegível													
A.18	Câmeras de segurança furtadas													
A.19	Câmeras de segurança inoperantes													
A.20	Casa de apoio da segurança em má conservação													
A.21	Vigilância patrimonial sem logística ou ausente													
A.22	Cabos furtados na rede elétrica													
A.23	Transformadores danificados ou furtados													
A.24	Identificação de sinistro na rede elétrica													
A.25	Ausência de rede elétrica													
A.26	Presença de animais no entorno e/ou no interior do túnel													
A.27	Ausência de projeto executivo ou <i>As Built</i>													
A.28	Ausência de investigação geotécnica													
A.29	Ausência de instrumentação													
A.30	Ausência de monitoramento da instrumentação													

SITUAÇÃO

NA: item não aplicável

NE: anomalia não existente

PV: anomalia verificado pela primeira vez

PR: anomalia resolvido

DI: anomalia diminuiu

PC: anomalia permaneceu constante

AU: anomalia aumentou

NI: item não inspecionado (informar motivo)

MAGNITUDE

I – insignificante: anomalia que pode ser mantido sob observação do operador.

P – pequena: anomalia pode ser resolvido/ encaminhado pelo próprio operador.

M – média: anomalia apenas pode ser resolvido com apoio da equipe de manutenção / gerência regional.

G – grande: anomalia que apenas pode ser resolvida através empresa especializada.

NÍVEL DE PERIGO

0 – nenhum: não compromete a segurança/funcionamento do túnel, mas que indica descaso e/ou falta de manutenção.

1 – atenção: não compromete a segurança/funcionamento do túnel a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada.

2 – preocupante: possibilidade de comprometimento da segurança/funcionamento do túnel, devem ser tomadas providências.

3 – máximo: risco crítico de segurança/comprometimento do funcionamento do túnel.

B. REVESTIMENTO DO TÚNEL														
Nº	ANOMALIA	NA	NE	PV	PR	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	NP
B.1	Deslocamento													
B.2	Corrosão nos tirantes e/ou chumbadores													
B.3	Ferragem exposta													
B.4	Deformações/irregularidades localizadas e/ou excessivas													
B.5	Erosões nas paredes e/ou piso													
B.6	Manchas de umidade/infiltrações													
B.7	Presença de fungos e/ou outros micro-organismos													
B.8	Eflorescências													
B.9	Presença de choco													
B.10	Deficiência no elemento de vedação das juntas													
B.11	Arraste hidráulico no piso													
B.12	ABERTURAS													
B.12.1	Microfissura (inferior a 0,2 mm)													
B.12.2	Fissura (0,2 a 0,4 mm)													

SITUAÇÃO

NA: item não aplicável

NE: anomalia não existente

PV: anomalia verificado pela primeira vez

PR: anomalia resolvido

DI: anomalia diminuiu

PC: anomalia permaneceu constante

AU: anomalia aumentou

NI: item não inspecionado (informar motivo)

MAGNITUDE

I – insignificante: anomalia que pode ser mantido sob observação do operador.

P – pequena: anomalia pode ser resolvido/ encaminhado pelo próprio operador.

M – média: anomalia apenas pode ser resolvido com apoio da equipe de manutenção / gerência regional.

G – grande: anomalia que apenas pode ser resolvida através empresa especializada.

NÍVEL DE PERIGO

0 – nenhum: não compromete a segurança/funcionamento do túnel, mas que indica descaso e/ou falta de manutenção.

1 – atenção: não compromete a segurança/funcionamento do túnel a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada.

2 – preocupante: possibilidade de comprometimento da segurança/funcionamento do túnel, devem ser tomadas providências.

3 – máximo: risco crítico de segurança/comprometimento do funcionamento do túnel.

B. REVESTIMENTO DO TÚNEL														
ANOMALIA		NA	NE	PV	PR	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	NP
B.12.3	Trinca (0,5 mm a 1,4 mm)													
B.12.4	Rachadura (1,5 mm a 5,0 mm)													

C. ÁGUA														
ANOMALIA		NA	NE	PV	PR	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	NP
C.1	Presença de macrófitas													
C.2	Presença de objeto estranho													
C.3	Presença de animais mortos													
C.4	Odor ou coloração inapropriada													
C.5	Captação de água não registrada ou em desconformidade													
C.6	Assoreamento													
C.7	Despejo de resíduos não registrado													
C.8	Turbidez													

SITUAÇÃO

NA: item não aplicável

NE: anomalia não existente

PV: anomalia verificado pela primeira vez

PR: anomalia resolvido

DI: anomalia diminuiu

PC: anomalia permaneceu constante

AU: anomalia aumentou

NI: item não inspecionado (informar motivo)

MAGNITUDE

I – insignificante: anomalia que pode ser mantido sob observação do operador.

P – pequena: anomalia pode ser resolvido/ encaminhado pelo próprio operador.

M – média: anomalia apenas pode ser resolvido com apoio da equipe de manutenção / gerência regional.

G – grande: anomalia que apenas pode ser resolvida através empresa especializada.

NÍVEL DE PERIGO

0 – nenhum: não compromete a segurança/funcionamento do túnel, mas que indica descaso e/ou falta de manutenção.

1 – atenção: não compromete a segurança/funcionamento do túnel a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada.

2 – preocupante: possibilidade de comprometimento da segurança/funcionamento do túnel, devem ser tomadas providências.

3 – máximo: risco crítico de segurança/comprometimento do funcionamento do túnel.

D. SISTEMA DE DRENAGEM														
Nº	ANOMALIA	NA	NE	PV	PR	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	NP
D.1	Obstrução de drenos													
D.2	Vazamentos excessivos													
D.3	Falhas na proteção anticorrosiva													
D.4	Assoreamento na saída do dreno													
D.5	Falhas em juntas de drenos													
D.6	Falhas no revestimento geotêxtil de drenos													
D.7	Drenos quebrados													

E. INSTRUMENTAÇÃO														
Nº	ANOMALIA	NA	NE	PV	PR	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	NP
E.1	Instrumentos danificados													
E.2	Furto de instrumentos													
E.3	Faltam dispositivos de segurança dos instrumentos													
E.4	Instrumentos desprotegidos													
E.5	Ausência de limpeza de instrumentos													
E.6	Acúmulo de água ao redor de instrumentos													

SITUAÇÃO

NA: item não aplicável

NE: anomalia não existente

PV: anomalia verificado pela primeira vez

PR: anomalia resolvido

DI: anomalia diminuiu

PC: anomalia permaneceu constante

AU: anomalia aumentou

NI: item não inspecionado (informar motivo)

MAGNITUDE

I – insignificante: anomalia que pode ser mantido sob observação do operador.

P – pequena: anomalia pode ser resolvido/ encaminhado pelo próprio operador.

M – média: anomalia apenas pode ser resolvido com apoio da equipe de manutenção / gerência regional.

G – grande: anomalia que apenas pode ser resolvida através empresa especializada.

NÍVEL DE PERIGO

0 – nenhum: não compromete a segurança/funcionamento do túnel, mas que indica descaso e/ou falta de manutenção.

1 – atenção: não compromete a segurança/funcionamento do túnel a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada.

2 – preocupante: possibilidade de comprometimento da segurança/funcionamento do túnel, devem ser tomadas providências.

3 – máximo: risco crítico de segurança/comprometimento do funcionamento do túnel.

E. INSTRUMENTAÇÃO														
Nº	ANOMALIA	NA	NE	PV	PR	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	NP
E.7	Presença de vegetação nos locais dos instrumentos													
E.8	Má conservação de placas de identificação													
E.9	Instrumentos descalibrados													
E.10	Fita métrica de equipamento danificada													
E.11	Sensores sem funcionamento													
E.12	Presença de animais ao redor de instrumentos													
E.13	Presença de lixo ao redor de instrumentos													

F. SEGURANÇA DO TRABALHO														
Nº	ANOMALIA	NA	NE	PV	PR	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	NP
F.1	Falta de treinamento – operadores													
F.2	Falta de EPI's													
F.3	Não utilização dos EPI's													
F.4	Extintores vencidos													
F.5	Sinalização vertical/horizontal deficiente													
F.6	Falta uniforme para os operadores													

SITUAÇÃO

NA: item não aplicável

NE: anomalia não existente

PV: anomalia verificado pela primeira vez

PR: anomalia resolvido

DI: anomalia diminuiu

PC: anomalia permaneceu constante

AU: anomalia aumentou

NI: item não inspecionado (informar motivo)

MAGNITUDE

I – insignificante: anomalia que pode ser mantido sob observação do operador.

P – pequena: anomalia pode ser resolvido/ encaminhado pelo próprio operador.

M – média: anomalia apenas pode ser resolvido com apoio da equipe de manutenção / gerência regional.

G – grande: anomalia que apenas pode ser resolvida através empresa especializada.

NÍVEL DE PERIGO

0 – nenhum: não compromete a segurança/funcionamento do túnel, mas que indica descaso e/ou falta de manutenção.

1 – atenção: não compromete a segurança/funcionamento do túnel a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada.

2 – preocupante: possibilidade de comprometimento da segurança/funcionamento do túnel, devem ser tomadas providências.

3 – máximo: risco crítico de segurança/comprometimento do funcionamento do túnel.

F. SEGURANÇA DO TRABALHO														
Nº	ANOMALIA	NA	NE	PV	PR	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	NP
F.7	Anomalia com risco de choque elétrico													
F.8	Falta de EPC's – barreiras, sinalização, guarda-corpo													
F.9	Deficiência no SPDA - isoladores, para-raios, resistência de aterramento, continuidade													
F.10	Faltam dispositivos de segurança dos equipamentos													
F.11	Anomalias na iluminação													

G. ANOMALIAS ADVERSAS														
Nº	ANOMALIA	NA	NE	PV	PR	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	NP
G.1														
G.2														
G.3														
G.4														
G.5														
G.6														
G.7														

SITUAÇÃO

NA: item não aplicável

NE: anomalia não existente

PV: anomalia verificado pela primeira vez

PR: anomalia resolvido

DI: anomalia diminuiu

PC: anomalia permaneceu constante

AU: anomalia aumentou

NI: item não inspecionado (informar motivo)

MAGNITUDE

I – insignificante: anomalia que pode ser mantido sob observação do operador.

P – pequena: anomalia pode ser resolvido/ encaminhado pelo próprio operador.

M – média: anomalia apenas pode ser resolvido com apoio da equipe de manutenção / gerência regional.

G – grande: anomalia que apenas pode ser resolvida através empresa especializada.

NÍVEL DE PERIGO

0 – nenhum: não compromete a segurança/funcionamento do túnel, mas que indica descaso e/ou falta de manutenção.

1 – atenção: não compromete a segurança/funcionamento do túnel a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada.

2 – preocupante: possibilidade de comprometimento da segurança/funcionamento do túnel, devem ser tomadas providências.

3 – máximo: risco crítico de segurança/comprometimento do funcionamento do túnel.

G. ANOMALIAS ADVERSAS														
Nº	ANOMALIA	NA	NE	PV	PR	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	NP
G.8														
G.9														
G.10														

Fonte: o Autor, 2024

SITUAÇÃO

NA: item não aplicável
 NE: anomalia não existente
 PV: anomalia verificado pela primeira vez
 PR: anomalia resolvido
 DI: anomalia diminuiu
 PC: anomalia permaneceu constante
 AU: anomalia aumentou
 NI: item não inspecionado (informar motivo)

MAGNITUDE

1 – insignificante: anomalia que pode ser mantido sob observação do operador.
 P – pequena: anomalia pode ser resolvido/ encaminhado pelo próprio operador.
 M – média: anomalia apenas pode ser resolvido com apoio da equipe de manutenção / gerência regional.
 G – grande: anomalia que apenas pode ser resolvida através empresa especializada.

NÍVEL DE PERIGO

0 – nenhum: não compromete a segurança/funcionamento do túnel, mas que indica descaso e/ou falta de manutenção.
 1 – atenção: não compromete a segurança/funcionamento do túnel a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada.
 2 – preocupante: possibilidade de comprometimento da segurança/funcionamento do túnel, devem ser tomadas providências.
 3 – máximo: risco crítico de segurança/comprometimento do funcionamento do túnel.

