



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MARIANA CAMPOS CASTRO E SILVA**

**PROPOSTA DE *CHECKLIST* PARA INSPEÇÃO EM TÚNEIS DE TRANSFERÊNCIA  
HÍDRICA COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DE RISCO**

**FORTALEZA**

**2022**

MARIANA CAMPOS CASTRO E SILVA

PROPOSTA DE *CHECKLIST* PARA INSPEÇÃO EM TÚNEIS DE TRANSFERÊNCIA  
HÍDRICA COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DE RISCO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Civil do  
Centro de Tecnologia da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mariana Vela Silveira

FORTALEZA

2022

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 checklist para inspeção em túneis de transferência hídrica como ferramenta de avaliação de risco / Mariana Campos Castro e Silva. – 2022.  
89 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Profa. Dra. Mariana Vella Silveira.

1. Proposta. 2. Checklist. 3. Inspeção. 4. Túneis de transferência hídrica. 5. Avaliação de risco. I. Título.  
CDD 620

---

MARIANA CAMPOS CASTRO E SILVA

PROPOSTA DE *CHECKLIST* PARA INSPEÇÃO EM TÚNEIS DE TRANSFERÊNCIA  
HÍDRICA COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO DE RISCO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Civil do  
Centro de Tecnologia da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 11/02/2022

BANCA EXAMINADORA

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mariana Vela Silveira (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>o</sup> Dr. <sup>o</sup> Francisco Chagas da Silva Filho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Me. Eloi Angelo Palma Filho  
Presidente do Comitê Brasileiro de Túneis (CBT)

A todas e todos que não desistiram de seus sonhos.

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço aos meus pais, Daniella e Edinardo, por serem minha base em todos os momentos de vitórias e derrotas, por todo o apoio na busca pelo sonho de ser engenheira civil formada na UFC e por me proporcionarem condições para estudar.

Agradeço à minha orientadora, professora Mariana Vela Silveira, que me conduziu brilhantemente durante este trabalho, sempre com gentileza e paciência. Obrigada por ter me recebido tão bem em 2019, quando me ofereci para fazer pesquisa voluntária, e por todos os outros trabalhos que me orientou antes de finalmente, chegar a esse.

Agradeço ao professor Luis Gonzaga Rodrigues Filho, coordenador do Projeto Literatura Engenharia e Reflexões (LER). Projeto no qual tive o prazer de ajudar a iniciar e tenho muito orgulho do que representa e do poder de transformação que possui. Obrigada por todos os conselhos e por ser um professor que pensa fora da caixa.

Agradeço ao professor Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos, por ter sido essencial na minha passagem como monitora. Obrigada por sempre estar aberto às minhas ideias e por abrir meus olhos para a perspectiva dos docentes, realmente não é fácil ser 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 e proporcionarem estrutura para desenvolver minha pesquisa. Os agradecimentos se estendem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

Agradeço a todos os profissionais que encontrei nos meus estágios na Caixa Econômica Federal, na RPG & Reinfra Consultoria e na TPF Engenharia, por todos os ensinamentos e por fazerem parte da formação dessa jovem engenheira.

Agradeço aos meus amigos Felipe, Carlos, Larissa Katley, Tereza, Everton, Ranielly, Luciany, Rayssa, Alexandre, Brenda, Caio, Larissa Maria, Yuri, Gabriel, Igor, Sasaki, Greyson, Matheus e Lucas Matheus, vocês são parte disso também, obrigada por tudo!

E acima de tudo, agradeço a Deus, sem ele nada disso seria possível.

“A água de boa qualidade é como a saúde ou a liberdade: só tem valor quando acaba.”  
(Guimarães Rosa)

## RESUMO

Atualmente, é possível realizar o monitoramento remoto das obras de engenharia, porém, sempre será essencial a avaliação *in loco*, através das inspeções em campo. Uma das ferramentas que auxiliam em uma inspeção e, conseqüentemente, no processo de avaliação de riscos, é o *checklist*, que consiste em uma lista de verificação, orientando o profissional acerca de pontos de atenção na estrutura cuja existência deve ser verificada. A utilização dessa ferramenta em barragens já é bem estabelecida. Os túneis, estruturas de estudo deste trabalho, são utilizados para passagem direta através de certos obstáculos. Os riscos apresentados em obras subterrâneas se mostram relevantes, visto que se lida com materiais geológicos, já que riscos são inerentes a toda e qualquer atividade que envolva fenômenos ou materiais da natureza. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo propor um *checklist* para inspeção em túneis de transferência hídrica, como uma ferramenta de avaliação de risco. Foi realizada inicialmente uma revisão da literatura acerca dos túneis de transferência hídrica, buscando questões geológicas, geotécnicas, econômicas, sociais e ambientais, para o completo entendimento da dinâmica da estrutura. Além disso, desenvolveu-se levantamentos acerca de acidentes ocorridos em túneis e de *checklists* já existentes para inspeção nesse tipo de estrutura. O *checklist* desenvolvido neste trabalho consiste em uma planilha, previamente formatada para impressão e utilização em campo, que apresenta 9 seções: Identificação; Legenda dos atributos; Infraestrutura; Revestimento do túnel; Água; Sistema de drenagem; Instrumentação; Segurança no trabalho; Problema adversos. Para cada um dos problemas propostos no documento foram disponibilizados espaços para marcação dos atributos relacionados com a situação das anomalias, sua magnitude e o nível de perigo de cada uma, permitindo uma análise crítica em campo. A divisão do *checklist* em seções mostrou-se uma forte aliada na busca por um documento abrangente, que atenda ao maior número possível de aspectos que cercam a estrutura.

**Palavras-chave:** Proposta. *Checklist*. Inspeção. Túneis de transferência hídrica. Avaliação de risco.

## ABSTRACT

Currently, it is possible to carry out remote monitoring of engineering works, however, on-site evaluation through field inspections will always be essential. One of the tools that assist in an inspection and, consequently, in the risk assessment process, is the checklist, which consists of a checklist, guiding the professional about points of attention in the structure whose existence must be verified. The use of this tool in dams is already well established. The tunnels, structures studied in this work, are used for direct passage through certain obstacles. The risks presented in underground works are relevant since it deals with geological materials. Risks are inherent to any activity that involves phenomena or materials of nature. In this context, the present work aims to propose a checklist for inspection in water transfer tunnels, as a risk assessment tool. Initially, a review of the literature on water transfer tunnels was conducted, seeking geological, geotechnical, economic, social, and environmental issues, to fully understand the dynamics of the structure. In addition, surveys were developed about accidents that occurred in tunnels and existing checklists for inspection in this type of structure. The checklist developed in this work consists of a spreadsheet, previously formatted for printing and field use, which has nine sections: Identification; Attribute legend; Infrastructure; Tunnel lining; Water; Drainage system; Instrumentation; Safety at work; Adverse problem. For each of the problems proposed in the document, spaces were made available for marking the attributes related to the situation of the anomalies, their magnitude, and the level of danger of each one, allowing a critical analysis in the field. The division of the checklist into sections proved to be a strong ally in the search for a comprehensive document that meets the greatest possible number of aspects surrounding the structure.

**Keywords:** Proposal. Check list. Inspection. Water transfer tunnels. Risk assessment.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Representação do Ciclo Hidrológico .....  | 19 |
| Figura 2 - Canal do Cinturão das Águas do Ceará. ....  | 20 |
| Figura 3 - Adutora do Pajeú, em Pernambuco.....  | 21 |
| Figura 4 - Estação Elevatória de água tratada .....  | 21 |
| Figura 5 - Esquema de instalação dos sifões. ....  | 22 |
| Figura 6 – Obras do Túnel Cuncas I.....  | 23 |
| Figura 7 - Processo de gerenciamento dos riscos .....  | 25 |
| Figura 8 - Estágios evolutivos da instabilidade em obras subterrâneas .....                      | 26 |
| Figura 9 - Tipos de ruptura em túneis escavados em rocha .....                                   | 27 |
| Figura 10 - Extensômetro do Túnel do Mato Forte, Portugal .....                                  | 32 |
| Figura 11 - Dados gerais apresentados no <i>Checklist</i> de inspeção em barragens.....          | 37 |
| Figura 12 - Legenda dos atributos do <i>checklist</i> de inspeção em barragens.....              | 37 |
| Figura 13 - Trecho do <i>checklist</i> de inspeção em barragens.....                             | 39 |
| Figura 14 – Dados gerais solicitados no <i>checklist</i> da COGERH.....                          | 40 |
| Figura 15 – Legenda dos atributos do <i>checklist</i> da COGERH .....                            | 40 |
| Figura 16 – Trecho do <i>checklist</i> da COGERH para uma estação de bombeamento .....           | 41 |
| Figura 17 - Etapas da metodologia para confecção do <i>checklist</i> .....                       | 43 |
| Figura 18 – Localização do Túnel Milagres .....  | 45 |
| Figura 19 - Túnel Milagres em execução .....   | 47 |
| Figura 20 – Relação entre o tempo de sustentação e a extensão do vão sem suporte em túneis ..... | 49 |
| Figura 21 - Túnel Milagres finalizado .....  | 50 |
| Figura 22 - Interior do túnel Cuncas I .....   | 52 |
| Figura 23 – Seção típica 3 dos túneis do CAC.....  | 54 |
| Figura 24 - Seção típica 4 dos túneis do CAC.....  | 55 |
| Figura 25 - Interior do Túnel Veneza .....   | 57 |
| Figura 26 - Seção do túnel do Eixão das Águas .....  | 59 |
| Figura 27 – Tratamento executivo do túnel de desvio, no trecho em siltito.....                   | 64 |
| Figura 28 - Aspecto final do tratamento no túnel da UHE Mauá.....                                | 65 |
| Figura 29 - Desabamento ocorrido em janeiro de 2021 .....  | 66 |
| Figura 30 - Intervenção da prefeitura ocorrida em 2019 .....                                     | 66 |
| Figura 31 - Bombeiros fazendo o resgate do trabalhador.....                                      | 67 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 32 - Cratera aberta devido ao desabamento do túnel. ....                  | 69 |
| Figura 33 - Parâmetros de risco para <i>checklist</i> de inspeção em túneis..... | 70 |
| Figura 34 - Trecho do <i>checklist</i> de inspeção em túneis.....                | 71 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Identificação dos riscos no sistema de abastecimento hídrico ..... | 24 |
| Tabela 2 - Efeitos introduzidos pela água em túneis .....                     | 30 |
| Tabela 3 – Resumo dos instrumentos utilizados em obras subterrâneas .....     | 34 |
| Tabela 4 - Classificação geomecânica de Bieniawski .....                      | 49 |
| Tabela 5 – Divisão das 31 sub-bacias do Nordeste Setentrional .....           | 53 |
| Tabela 6 - Caracterização dos túneis do CAC .....                             | 56 |
| Tabela 7 - Síntese descritiva do Eixão das Águas .....                        | 59 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |  |
|--------|--|
| ABMS   | Associação Brasileira de Mecânica dos Solos                        |
| ABNT   | Associação Brasileira de Normas Técnicas                           |
| ADECE  | Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará                      |
| ACI    | American Concrete Institute  |
| ANA    | Agência Nacional de Águas  |
| BNDES  | Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social               |
| CAC    | Cinturão das Águas do Ceará  |
| CBT    | Comitê Brasileiro de Túneis  |
| COGERH | Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará                 |
| CONJUR | Consultor Jurídico   |
| CPP    | Concreto projetado sem fibras                                      |
| CPRF   | Concreto projetado reforçado com fibras                            |
| DHP    | Dreno horizontal profundo  |
| EPC    | Equipamentos de Proteção Coletiva                                  |
| EPI    | Equipamentos de Proteção Individual                                |
| ETA    | Estação de tratamento de água                                      |
| HSE    | Health and Safety Executive  |
| ISO    | International Organization for Standardization                     |
| ITA    | International Tunneling and Underground Space Association          |
| NATM   | New Austrian Tunelling Method                                      |
| NBR    | Norma Brasileira   |
| OMS    | Organização Mundial da Saúde                                       |
| PISF   | Projeto de Integração do Rio São Francisco                         |
| RQD    | Rock Quality Designation   |
| RMF    | Região Metropolitana de Fortaleza                                  |
| RMR    | Rock Mass Rating   |
| Sabesp | Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo              |
| SODF   | Secretaria de Estado de Obras e Infraestrutura do Distrito Federal |
| SPDA   | Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas                  |
| SRH    | Secretaria de Recursos Hídricos                                    |
| UHE    | Usina Hidrelétrica   |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>15</b> |
| <b>1.1 Objetivos.....</b>   | <b>17</b> |
| <i>1.1.1 Objetivo geral .....</i>   | <i>17</i> |
| <i>1.1.2 Objetivos específicos .....</i>                                    | <i>17</i> |
| <b>1.2 Estrutura do trabalho .....</b>                                      | <b>17</b> |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>  | <b>18</b> |
| <b>2.1 Oferta hídrica.....</b>  | <b>18</b> |
| <b>2.2 Infraestrutura hídrica .....</b>                                     | <b>19</b> |
| <b>2.3 Túneis.....</b>  | <b>22</b> |
| <b>2.4 Riscos .....</b>   | <b>23</b> |
| <i>2.4.1 Riscos ao abastecimento .....</i>                                  | <i>24</i> |
| <i>2.4.2 Riscos em túneis.....</i>  | <i>24</i> |
| <i>2.4.3 Monitoramento em túneis .....</i>                                  | <i>30</i> |
| <b>2.5 Uso de Checklist em inspeções .....</b>                              | <b>35</b> |
| <b>3 METODOLOGIA.....</b>   | <b>42</b> |
| <b>4 RESULTADOS .....</b>   | <b>44</b> |
| <b>4.1 Túneis de transferência hídrica existentes no Brasil.....</b>        | <b>44</b> |
| <i>4.1.1 Transposição do Rio São Francisco .....</i>                        | <i>44</i> |
| <i>4.1.2 Cinturão das Águas do Ceará .....</i>                              | <i>52</i> |
| <i>4.1.3 Eixão das Águas do Ceará .....</i>                                 | <i>58</i> |
| <i>4.1.4 Túneis da UHE Mauá .....</i>                                       | <i>62</i> |
| <b>4.2 Acidentes ocorridos em túneis .....</b>                              | <b>65</b> |
| <i>4.2.1 Túnel do Tibaú.....</i>  | <i>65</i> |
| <i>4.2.2 Vicente Pires .....</i>  | <i>67</i> |
| <i>4.2.3 Projeto Sanegran .....</i>   | <i>68</i> |
| <i>4.2.4 Cuncas I .....</i>   | <i>68</i> |
| <i>4.2.5 Túnel da Linha 4 do Metrô de São Paulo.....</i>                    | <i>69</i> |
| <b>4.3 Checklists de inspeção em túneis .....</b>                           | <b>70</b> |
| <b>4.4 Proposta de Checklist para túneis de transferência hídrica .....</b> | <b>71</b> |
| <b>5 CONCLUSÃO.....</b>   | <b>74</b> |
| <b>5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>                           | <b>76</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>77</b> |

**APÊNDICE A – *CHECKLIST* PARA INSPEÇÃO EM TÚNEIS DE TRANSFERÊNCIA  
HÍDRICA ..... 84**

## 1 INTRODUÇÃO

A forma como a engenharia civil lida com os riscos vem mudando à medida que novas tecnologias são desenvolvidas. No entanto, apesar das inúmeras vantagens que essas ferramentas certamente oferecem, como por exemplo o monitoramento remoto das estruturas, não se pode substituir o hábito de ir até o local e observar o estado de conservação, a dinâmica do seu entorno e como está se dando a relação entre a estrutura e o ambiente ao redor, seja em áreas urbanizadas ou não.

Dessa forma, as inspeções em campo são uma importante ferramenta de gerenciamento de riscos, sendo possível realizar um mapeamento dos problemas que estão ocorrendo na estrutura, classificá-los e priorizá-los em um plano de ação bem estruturado, prosseguindo assim para a solução dessas anomalias. É possível também constatar os primeiros sinais de problemas que atualmente não representariam expressiva gravidade, mas caso não sejam solucionados, podem evoluir e resultar em sérias adversidades.

Sendo assim, gerenciar os riscos não significa eliminá-los inteiramente, algo impossível, mas sim uma estruturação que possibilite a existência desses riscos de forma controlada, preparando-se de forma proativa para o maior número de possibilidades de ocorrência, em escalas maiores ou menores de magnitude. Um bom exemplo de gerenciamento de risco ocorre nas barragens, estruturas que podem acumular ou conter substâncias como a água ou misturas provenientes do processo de beneficiamento de minérios.

Após dois acidentes de proporções gravíssimas, ocorridos em Mariana (MG) em 2015 e Brumadinho (MG) em 2019, diversos setores ligados a essas estruturas se mobilizaram para propor e implantar medidas de incremento na segurança, seja na parte legislativa, normativa, ambiental, na capacitação de profissionais, no reforço de estruturas, como também no fortalecimento da relação entre instituições acadêmicas e as empresas responsáveis pelas barragens, através do incremento no desenvolvimento de estudos relacionados a essas estruturas.

Percebe-se então um fator que vem acompanhando o desenvolvimento da engenharia através dos séculos: deve-se aprender com os erros. Infelizmente, muitas vezes o despertar para a existência de certas problemáticas ocorre apenas após a ocorrência de incidentes e, em um estudo de gestão de risco, o conhecimento desse histórico é fator necessário para o desenvolvimento de ferramentas de avaliação consistentes e apropriadas.

Uma dessas ferramentas é o *checklist*, um documento que consiste basicamente em uma lista de verificação, orientando acerca de um passo a passo que deve ser realizado para a

execução de um processo, com a função de reforçar ao profissional responsável acerca de certos procedimentos que devem ser realizados ou pontos que devem ser verificados.

Em uma inspeção de campo, o *checklist* apresenta a segunda função, orientando o engenheiro que está realizando a visita sobre pontos de atenção na estrutura cuja existência deve ser averiguada. Além de constatar a presença de manifestações patológicas, é possível também que o profissional classifique-as quanto a magnitude, ao nível de perigo que representam à estrutura e aos arredores, e expor um histórico dos problemas a cada visita, comunicando se foram observados outras vezes ou se é algo sendo reportado pela primeira vez.

Os túneis, por sua vez, são alternativas utilizadas para passagem direta através de certos obstáculos que podem ser elevações, rios, canais e áreas densamente povoadas, por exemplo. No entanto, todos os benefícios apresentados por essas estruturas podem ser contestados pela sociedade, frente à recorrência de eventos como rupturas em maciço subterrâneo, até mesmo em espaços urbanos, gerando casos de acidentes que vêm ocorrendo não apenas no Brasil, mas também em outros países. Os riscos apresentados em obras subterrâneas se mostram relevantes, visto que se lida com materiais geológicos que, por mais detalhada que seja a investigação em campo e no laboratório, ainda existe a possibilidade de alguma ocorrência não prevista na obra (COELHO, 2014).

Tendo como exemplo os túneis de adução, através das boas práticas de operação e manutenção, esse tipo de estrutura deve ser inspecionada a cada 10 anos de atividade, devido aos efeitos da ação da água (HIBBARD INSHORE, s.d.). Sendo assim, a prática de inspeções no período correto e o uso de um *checklist* efetivo seriam ferramentas importantes para uma maior durabilidade da estrutura.

Nesse contexto, o presente trabalho busca, a partir de levantamentos bibliográfico e documental, propor um *checklist* para inspeção em túneis de transferência hídrica que seja objetivo e abrangente na apresentação das possíveis ocorrências que podem ser prejudiciais para a continuidade da realização da função dessa estrutura e para a segurança daqueles que residem e trabalham em seu entorno.

## **1.1 Objetivos**

### ***1.1.1 Objetivo geral***

O presente trabalho tem como objetivo propor um *checklist* para inspeção em túneis de transferência hídrica como ferramenta de avaliação de risco.

### ***1.1.2 Objetivos específicos***

O estudo tem como objetivos específicos:

- a) Realizar um levantamento acerca dos túneis de transferência hídrica no Brasil, com destaque para aqueles pertencentes à região Nordeste e, mais precisamente, ao estado do Ceará, abordando questões históricas, projeto e construção, condições geotécnicas e características estruturais;
- b) Realizar um levantamento acerca de casos de acidentes em túneis, dos pontos de vista nacional e regional;
- c) Realizar um levantamento acerca de *checklists* existentes para inspeção em túneis de transferência hídrica, dos pontos de vista nacional e regional;
- d) Apresentar uma proposta de *checklist* para inspeção em túneis de transferência hídrica.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está estruturado em cinco seções, incluindo a seção introdutória. Na seção um é apresentada a problemática abordada, além dos objetivos gerais e específicos. Na segunda seção apresenta-se uma revisão bibliográfica que aborda o contexto da problemática de forma mais geral. Na terceira encontra-se a metodologia adotada para a obtenção dos resultados desejados. Em seguida prossegue-se para a quarta seção, que consiste na abordagem dos resultados da pesquisa desenvolvida, analisando-os. Por último, na quinta seção, são expostas as conclusões obtidas a partir do estudo realizado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

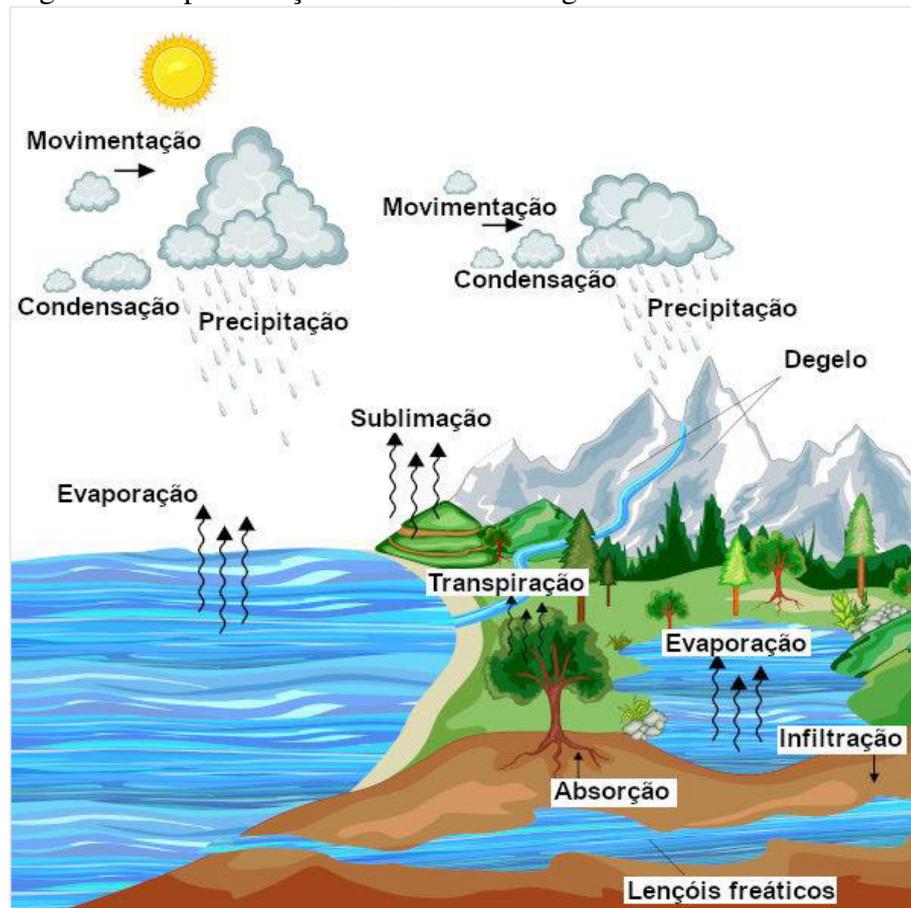
### 2.1 Oferta hídrica

Dentre os recursos naturais disponíveis, a água ocupa lugar de destaque, sendo indispensável para a sobrevivência no planeta. No Brasil, a ocupação de seu território pelos portugueses está diretamente ligada a esse recurso, visto que as comunidades se estabeleceram primeiramente na faixa litorânea já que o escoamento da produção de açúcar fazia-se através do oceano Atlântico (BRANCO, 2006). A utilização cada vez maior dos recursos hídricos é caracterizada historicamente por conflitos e problemas relacionados à degradação da qualidade da água, mas também a carência cada vez maior desse recurso em diversos lugares pelo mundo. (FREITAS, s.d.).

Devido ao aumento populacional e conseqüente aumento da demanda pela água, tem-se avaliado a oferta hídrica disponível, objetivando a manutenção, como também a sustentabilidade das atividades de cada região (BRANCO, 2006). A água captada para abastecimento pode se apresentar de três formas: meteórica, superficial e subterrânea (BRASIL, s.d.). A Figura 1 apresenta a dinâmica complexa do ciclo hidrológico, onde as águas meteóricas seriam aquelas que provêm das chuvas, passando pelo processo de evaporação e absorção pelas plantas. Observa-se também o escoamento do fluido nos mananciais, tendo-se então as águas superficiais. Já aquelas que se infiltram na terra, abastecendo o lençol freático, seriam as águas subterrâneas. Por não penetrarem no solo e, portanto, o acesso ser facilitado, as águas superficiais são atualmente a principal fonte de abastecimento do planeta, no entanto a sua distribuição se dá de forma irregular pelos territórios (LAMON, 2019).

Atualmente, o Brasil é detentor de cerca de 12% da disponibilidade de água doce no mundo, sendo essa água distribuída de maneira não uniforme pelo território, onde grande parte está concentrada nas regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste. Destaca-se o considerável volume de água presente na Região Hidrográfica Amazônica, detentora de 80% de toda a água doce nacional, sendo caracterizada por uma baixa densidade demográfica e diminuta demanda hídrica (JADE; FERREIRA, 2018). Em contrapartida, na região semiárida, por exemplo, mais de 28 milhões de pessoas, distribuídas em cerca de 1100 municípios entre o norte de Minas Gerais e o nordeste brasileiro, enfrentam períodos críticos de longas estiagens (BRASIL, s.d.).

Figura 1 - Representação do Ciclo Hidrológico



Fonte: Santos (s.d.)

## 2.2 Infraestrutura hídrica

A irregularidade na distribuição dos recursos hídricos acarreta a necessidade de investimento em infraestrutura hídrica, para que seja realizado o transporte de água dos lugares com certa abundância para aqueles que apresentam escassez ou que a demanda hídrica é maior do que a oferta existente, contando com uma rede de reservatórios para armazenamento. Dessa forma, na região semiárida pode-se destacar a Transposição do Rio São Francisco, uma obra que transporta as águas desse rio por cerca de 477 km para diversos estados da Região Semiárida (BRASIL, s.d.).

Além dessa obra com impactos à nível nacional, no estado do Ceará, um dos 4 estados beneficiados com a Transposição, tem-se o Cinturão das Águas, que é responsável pela distribuição da água que chega da Transposição pelo estado (BRASIL, s.d.).

A infraestrutura hídrica apresenta estruturas auxiliares como canais, adutoras, estações elevatórias, sifões e túneis, além de diversas outras, que formam partes importantes de

um todo, o sistema de abastecimento hídrico. Dessa forma, o bom desempenho do transporte da água depende do correto funcionamento de cada elemento. Os canais (Figura 2) são sistemas de transporte e distribuição de água, objetivando irrigação de plantios, geração de energia e fornecimento hídrico para as cidades (LONAX, 2020).

Figura 2 - Canal do Cinturão das Águas do Ceará.



Fonte: Ceará (2021).

As adutoras (Figura 3) seriam um conjunto de tubulações, conexões e dispositivos com função semelhante ao canal, com o escoamento da água podendo ser realizado de forma forçada, utilizando-se de motobombas (SANEINFRA, s.d.). Já nas estações elevatórias (Figura 4) o conjunto de motobombas é parte obrigatória, além das válvulas e acessórios interligados com um poço ou reservatório, objetivando transportar a água para níveis mais elevados (HELLER; PÁDUA, 2010).

Figura 3 - Adutora do Pajeú, em Pernambuco



Fonte: Nill Júnior (2020).

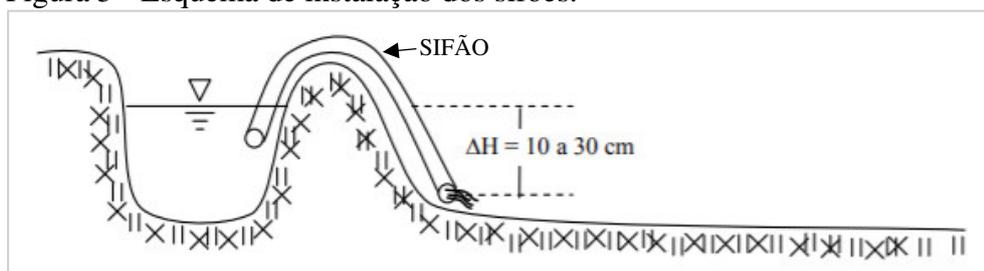
Figura 4 - Estação Elevatória de água tratada



Fonte: Partner Engenharia e Gerenciamento LTDA (s.d.).

Outra estrutura com princípio de funcionamento complexo é o sifão, que consiste no método mais comum para conduzir a água vinda de canais secundários e terciários. São de fácil instalação, não afetam a estabilidade do canal e permitem bom controle da vazão derivada. São condutos forçados de forma parcial e estão situados acima do plano de carga efetiva. Para funcionar, um sifão deve estar previamente cheio de líquido e funciona devido ao desvio entre o nível d'água do reservatório e a saída, conforme mostra a Figura 5 (COSTA, 2006).

Figura 5 - Esquema de instalação dos sifões.



Fonte: Costa (2006).

### 2.3 Túneis

Os túneis são passagens abertas artificialmente em formações rochosas ou sob o solo objetivando, por exemplo, oferecer mobilidade aos transportes ferroviário e rodoviário, o acesso a minas de exploração e ao escoamento de água. Além de superar obstáculos como zonas montanhosas, existem outras barreiras que podem ser vencidas pelos túneis como cursos d'água fluviais e marinhos e zonas urbanas densamente edificadas (ZANELATO, 2003).

O desenvolvimento da engenharia de túneis modernos no Brasil se iniciou nas décadas de 1950 e 1960 com a construção dos sistemas de metrô nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, além dos túneis subterrâneos de usinas hidrelétricas que também já estavam sendo construídos (ROCHA, 2012).

Desde então, vem sendo adotados diversos métodos construtivos para túneis no país e entre os mais utilizados estão o *New Austrian Tunneling Method* (NATM), o *Tunnel Boring Machine* (TBM) e o *Tunnel Liner*. A adoção de um desses métodos é resultado das condições geológicas do local, relacionado com a solução que se mostra mais segura e economicamente praticável (ZANELATO, 2003). Observa-se então que a natureza é um fator determinante para esse tipo de obra e, segundo a ABNT NBR 6122 (ABNT, 2019), os riscos são inerentes a toda e qualquer atividade que envolva materiais da natureza.

Atualmente, os túneis fazem parte de grandes obras de infraestrutura hídrica no país, como a Transposição do Rio São Francisco, conforme observa-se na Figura 6 as obras de execução do Túnel Cuncas I, um dos túneis da Transposição.

Figura 6 – Obras do Túnel Cuncas I



Fonte: Engenharia Compartilhada (2014).

## 2.4 Riscos

O risco seria a possibilidade de arcar com as consequências da ocorrência de um evento ou de circunstâncias e incertezas, e teria duas componentes: a primeira se refere à probabilidade de sua ocorrência e a segunda, à grandeza ou severidade do efeito que não se espera. Em obras subterrâneas, em razão de suas incertezas, a probabilidade da existência de eventos críticos está sempre presente, sendo, portanto, essencial o controle dos riscos existentes durante todo o ciclo de vida da estrutura (COELHO, 2014).

Dessa forma, o processo de controle de riscos consiste em avaliar, controlar, mitigar, planejar e fornecer diretrizes para o prosseguimento desses processos, fornecendo base para tomadas de decisão. Segundo a ABNT NBR ISO 31000 (ABNT, 2018) os seguintes procedimentos devem orientar essa tomada de decisão.

- Avaliação: identificação e avaliação das informações sobre o risco;
- Análise: definição da origem e sua probabilidade de ocorrência, além da mitigação das consequências, atribuindo parâmetros de probabilidade de ocorrência;
- Aceitação: após a redução dos parâmetros a valores aceitáveis, prossegue-se para a aceitação do risco;
- Tratamento: seleção e implementação de soluções de tratamento.
- Comunicação: as informações sobre o risco são selecionadas e compartilhadas com todos os envolvidos, dando embasamento para a tomada de decisão do gestor.

### 2.4.1 Riscos ao abastecimento

Segundo Souza (2008) o meio mais eficaz de assegurar a qualidade do sistema de abastecimento de água é através de uma gestão de avaliação de risco, abrangendo desde a fonte. Ainda de acordo com o trabalho, é possível observar que a segurança hídrica está vinculada ao conhecimento da análise de risco em sistemas de abastecimento de água. Esses riscos são classificados em riscos de curto, médio e longo prazo e são chamados de “eventos de perigo” pelo autor. Dentre os eventos de perigo apresentados, destaca-se na Tabela 1 aqueles que estão diretamente relacionados às estruturas descritas anteriormente.

Tabela 1 - Identificação dos riscos no sistema de abastecimento hídrico

| <b>Componente do Sistema</b> | <b>Evento de Perigo</b>   |
|------------------------------|---|
| Manancial Superficial        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inexistência de restrição ao uso não nobre, juntamente com suas terras marginais, na área de captação;</li> <li>- Existência de focos de poluição, tais como moradores, caça, corte de madeira, atividades agropecuárias;</li> <li>- Lançamento de esgoto, lixão, na área de captação;</li> <li>- Acidentes com carga perigosa.</li> </ul>   |
| Área de Captação             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Acesso de pessoas/animais;</li> <li>- Curtos-circuitos hidráulicos;</li> <li>- Floração de algas;</li> <li>- Falhas mecânicas, elétricas ou estruturais;</li> <li>- Tubulação com vazamento;</li> <li>- Tomada d'água exposta e sujeita a violações.</li> </ul>  |
| Estação de Tratamento        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Variação da vazão;</li> <li>- Processos unitários de tratamento inadequados;</li> <li>- Equipamentos obsoletos ou ineficientes;</li> <li>- Deficiência nas dosagens dos produtos químicos;</li> <li>- Formação de subprodutos;</li> <li>- Utilização de produtos e materiais não certificados;</li> <li>- Localização imprópria ou proteção imprópria contra águas de inundações.</li> </ul> |

Fonte: Adaptado de Souza (2008).

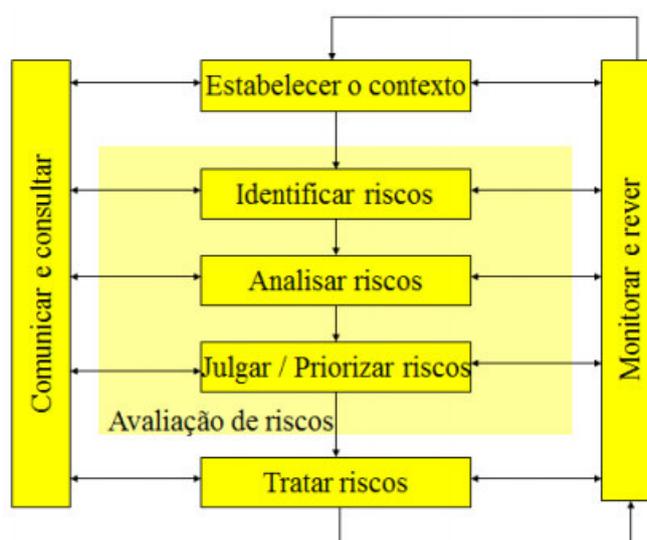
### 2.4.2 Riscos em túneis

Especificamente para a fase de avaliação dos riscos geológicos em túneis, deve-se detectar o risco através de análises dos dados apresentados pela instrumentação do túnel, como

também em visitas ao local, através de inspeções de segurança auxiliadas com a disposição de um *checklist* adequado. A detecção rápida é crucial para que seja implementada de forma eficiente uma ação corretiva, retornando os indicadores de risco para valores aceitáveis (COELHO, 2014).

Segundo Coelho (2014), hoje a indústria de construção subterrânea apresenta uma realidade caracterizada por diversos fatores, estando dentre eles os métodos construtivos de alto risco e cronogramas com prazo estreito, aumentando o nível de risco na construção e operação do empreendimento. Torna-se necessário, portanto, a implementação de um plano de gerenciamento de risco em cada obra, a fim de obter níveis aceitáveis para essas ameaças. A Figura 7 fornece um esquema didático de como funciona esse gerenciamento e suas diversas etapas.

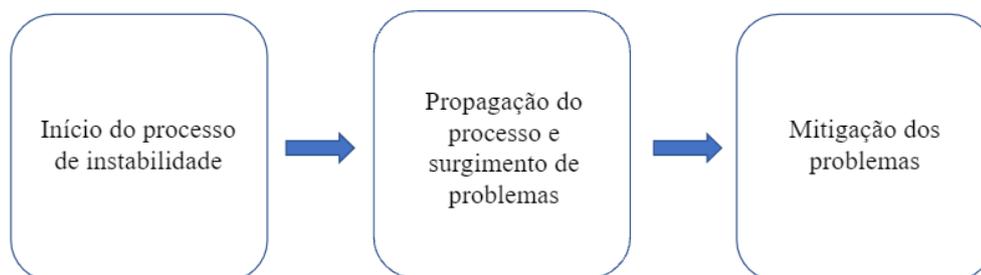
Figura 7 - Processo de gerenciamento dos riscos



Fonte: Coelho, 2014

Ainda segundo Coelho (2014), as obras subterrâneas estão predispostas a apresentar três estágios evolutivos do processo de instabilidade, conforme mostra o esquema da Figura 8. Destaca-se que esses estágios não incluem a ruptura, mas sim casos em que os indícios de que está se desenvolvendo um processo de instabilidade são notados anteriormente aos eventos em que a perda total de estabilidade leva à ruptura.

Figura 8 - Estágios evolutivos da instabilidade em obras subterrâneas



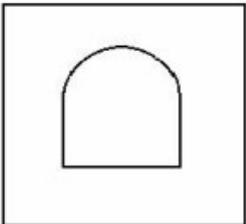
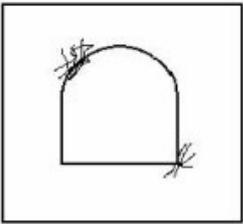
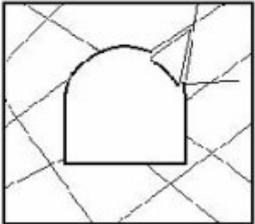
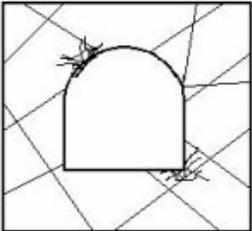
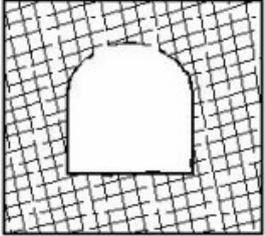
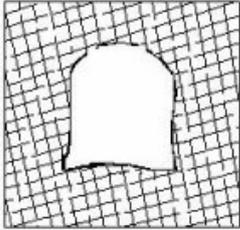
Fonte: Adaptada de Coelho (2014)

Segundo Ribeiro Neto e Kochen (2000), a maioria dos acidentes geológicos são causados pelo não reconhecimento antecipado de situações hidrogeológicas e/ou geotécnicas desfavoráveis e, além disso, é importante salientar a existência de aspectos que dificultam o estudo geológico. Dentre eles estão as complexidades geológicas e a profundidade do túnel, assim como limites de orçamento em investigações geológicas, impostos pelo cliente; má interpretação dos dados obtidos, principalmente do mapeamento geológico-geotécnico na face de escavação e nas paredes do túnel e a limitação do tempo de pesquisa antes e durante a execução da obra, fazendo com que o plano de investigação seja executado em uma única etapa, sendo que uma investigação executada em fases poderia trazer mais informações e ser mais efetiva.

O *Health and Safety Executive* (HSE) analisou no ano de 1996, 39 acidentes ocorridos entre os anos de 1973 e 1994, que foram classificados em cinco causas principais de ruptura: causas geológicas não prognosticadas; erros de projeto, especificação e planejamento; erros numéricos ou de cálculo; erros de construção e erros de controle e gerenciamento (Health and Safety Executive, 1996 apud Coelho, 2014).

Segundo Gomes (2012), o modo de escavação e a posição da linha freática causam o rearranjo do estado de tensões no maciço, ocasionando mecanismos de ruptura do mesmo. A Figura 9 traz um resumo dos tipos de ruptura em maciços rochosos em diferentes condições e, conseqüentemente, sob diferentes níveis de tensão *in situ*.

Figura 9 - Tipos de ruptura em túneis escavados em rocha

|                       | NÍVEIS DE TENSÕES BAIXOS  | NÍVEIS DE TENSÕES ELEVADOS   |
|-----------------------|---|--|
| ROCHA MACIÇA          |  <p>Maciço rochoso com tensão <i>in situ</i> baixa. Resposta linear elástica praticamente sem ruptura</p>  |  <p>Maciço rochoso com tensão <i>in situ</i> elevada. Nos limites da abertura, em pontos de concentração de tensões, iniciam-se fenômenos de lascamento, deslocamento e esmagamento que se propagam ao maciço circundante.</p>  |
| ROCHA FRATURADA       |  <p>Maciço rochoso fraturado com tensão <i>in situ</i> baixa. Os blocos ou cumhas formadas pela interseção de diaclases com diferentes orientações, soltam-se e escorregam devido à ação da gravidade.</p>   |  <p>Maciço rochoso fraturado com tensão <i>in situ</i> elevada. A ruptura ocorre como resultado do deslizamento segundo as superfícies das diaclases e pelo esmagamento e fendilhamento dos blocos rochosos.</p>   |
| ROCHA MUITO FRATURADA |  <p>Maciço rochoso muito fraturado com tensão <i>in situ</i> baixa. A superfície da abertura rompe como resultado do emaranhado de pequenos blocos ou cumhas, formados pela quantidade de discontinuidades que o maciço apresenta. A ruptura pode propagar-se facilmente, se não for controlada.</p> |  <p>Maciço rochoso muito fraturado com tensão <i>in situ</i> elevada. O maciço circundante à abertura rompe por deslizamento nas superfícies das discontinuidades e por esmagamento de pequenos blocos de rocha. Este tipo de ruptura tende a provocar o levantamento da soleira e forte convergência das paredes laterais.</p> |

Fonte: HOEK *et al* (1995) apud Coelho (2014).

Dentre as anomalias geológicas que podem surgir de forma inesperada, causando rupturas e/ou colapsos em túneis, estão as falhas, que são fraturas encontradas nos maciços de rocha e são formadas pela ação de agentes internos existentes. Ocorre maior probabilidade de

se encontrar falhas em áreas sob expressiva presença de formação tectônica, mas também podem existir em regiões já estabilizadas (COELHO, 2014).

Outra anomalia que merece atenção consiste em juntas, que são fraturas ao longo das quais não houve movimento perceptível dos blocos de rocha paralelamente ao plano de fratura (LUVIZOTTO, 2019). As juntas definem o estado de fragmentação do maciço, sendo importante a definição dos chamados domínios homogêneos, ou seja, da área em que o elemento de rocha apresenta características semelhantes. Esse levantamento deve ser realizado na fase de escavação, definindo os domínios presentes e a posição e orientação do bloco unitário (COELHO, 2014).

As juntas facilitam o desmonte do maciço, mas devido a condição fraturada, prejudicam a retirada de blocos intactos, além de gerarem a necessidade de escoramentos. Além disso, permitem a infiltração de água, e juntamente, a ação acelerada da erosão. Ressalta-se que quando as juntas estão orientadas na direção dos planos principais das anomalias, verifica-se que as regiões de maior instabilidade serão, de forma predominante, nas paredes laterais e na abóboda do túnel, ou seja, seu teto (COELHO, 2014).

Martins (2016) discute o efeito da água subterrânea nas fases de projeto, escavação e exploração de túneis. Segundo este trabalho, na fase de projeto a água pode originar alterações no próprio projeto como por exemplo a mudança na geometria prevista do túnel. Já na fase de construção, acarreta instabilidade, inundações, deformação, podendo ocasionar atrasos na construção e até mesmo levar a estrutura ao colapso. Outra consequência da presença de água no período de construção é a dificuldade para a aplicação da primeira camada de concreto projetado, visto que impede a aderência do material.

A água presente no maciço tenderá a fluir para o interior da cavidade do túnel após a escavação, essa tendência ocorre devido a alteração do percurso natural provocada pelo processo de escavação do túnel. Para tal a água utiliza como caminho de percolação as fissuras ou diaclases existentes nas rochas e os vazios entre as partículas do solo no meio em que percola. É necessário então caracterizar o regime hidrogeológico com as origens da água, seus movimentos, pressão, sentido e locais com existência de água próximos a área do traçado do túnel (lagoas, rios ou canais, por exemplo), ainda na fase de projeto (MARTINS, 2016).

Com relação aos fenômenos de natureza química, as rochas mais sujeitas às ações de desgaste químico por ação natural, chamada de meteorização, são as que se encontram na entrada dos túneis, em túneis de pouca cobertura (Cornejo, 1989 apud MARTINS, 2016). A meteorização é mais propícia de ocorrer em rochas que possuem os minerais magnésio, cálcio e ferro em sua constituição, originando, após um grande período, uma argila de granulometria

muito fina quando em contato com a água. Dá-se então a conversão de rocha em grãos de argila, e quando exposta à umidade atmosférica ou à água subterrânea poderão dar origem a fenômenos de expansão, erosão interna e conseqüentemente fissuração e abertura de fendas, que podem levar ao desprendimento e queda de blocos de rocha. (MARTINS, 2016)

Martins (2016) resume os efeitos produzidos pela água em túneis em 19 tipos, sendo eles: (i) Efeitos causados pela dificuldade de remoção e transporte; (ii) Instabilização, com risco de queda de material; (iii) Levantamento do nível hidráulico; (iv) Modificação do ciclo de produção; (v) Danificação de equipamentos e redução do nível de segurança dos operários; (vi) Efeitos elétricos; (vii) Perturbação da utilização de explosivos; (viii) Degradação das condições de aplicação de concreto projetado; (ix) Fendilhação do revestimento; (x) Corrosão de armaduras; (xi) Infiltrações e/ou manchas de umidade; (xii) Oxidação em elementos construtivos de fixação; (xiii) Condicionamento na escolha da geometria do túnel devido à presença de água; (xiv) Efeito da água nos sistemas de drenagem; (xv) Efeitos provocados pela água por abaixamento do nível freático; (xvi) Deformações e subsidências; (xvii) Evitar formação de gelo no interior do túnel; (xviii) Controle de qualidade da água; (xix) Medidas de prevenção de danos ambientais e no abastecimento de água a populações.

Destacando alguns pontos, a presença de água tornaria mais difícil a remoção dos escombros resultantes da escavação, diminuiria a resistência do material e aumentaria o risco de desabamentos. Além disso, em túneis escavados em solo, devido ao gradiente hidráulico, é comum o estabelecimento de zonas preenchidas por água após a retirada do material fino, sendo um fenômeno mais comum na soleira do túnel. É ressaltado também os efeitos que a presença de água pode acarretar ao ciclo de execução do túnel, pois é possível ocorrer avarias em equipamentos, acidentes graves, realização de trabalhos suplementares, condições de escavação não favoráveis, dentre outras, que geram atrasos na obra.

Tratando-se da utilização de explosivos, a água pode preencher os furos de colocação dos explosivos e inibir a atuação do cordão de detonação, além de existir a possibilidade de o próprio poder explosivo de alguns agentes químicos visto que a água preencheria os vazios existentes nesses materiais. Ademais, a água também atuaria nas armaduras, através de ataque químico realizado pelos seus minerais na presença de oxigênio, provocando a oxidação, que possui efeito a longo prazo, diminuindo a seção das armaduras e conseqüentemente redução de sua resistência (MARTINS, 2016).

Os minerais presentes na água podem produzir efeitos adversos até no próprio sistema de drenagem, visto que a ação química desses constituintes tem a capacidade de gerar problemas nos equipamentos de bombeamento, assim como em sistemas intermediários de

drenagem. E o controle de qualidade da água é um ponto importante quando se trata de túneis de transferência hídrica, visto que existe um risco de contaminação e agressividade química existente entre a água presente no solo e os túneis pois a água contaminada presente no solo pode contaminar os fluídos em transporte (MARTINS, 2016).

Esses efeitos foram distribuídos por Martins (2016) na fase de escavação e construção, e em outra etapa, a de plena funcionalidade do túnel. A distribuição também levou em conta o material de composição do túnel, diferenciando em estruturas em solo e em rocha, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Efeitos introduzidos pela água em túneis

| <b>Material</b> | <b>Escavação e Construção</b>                        | <b>Exploração/Funcionalidade</b> |
|-----------------|--|----------------------------------|
| <b>Solos</b>    | 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18  | 2, 6, 9, 10, 11, 12, 14, 16      |
| <b>Rochas</b>   | 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 | 2, 6, 9, 10, 11, 12, 14, 16      |

Fonte: Adaptada de Martins (2016).

A norma ABNT NBR ISO 31000: 2018 - Gestão de Riscos - Princípios e diretrizes, afirma que a gestão de riscos se baseia na obtenção da maior quantidade de informações possíveis, através de fontes como dados históricos, experiências, retroalimentação, opiniões de especialistas e previsões. No caso dos dados históricos, estão presentes também os acidentes já ocorridos no passado. A importância de conhecer esse tipo de ocorrência reside no fato de que são informações que podem contribuir para as medidas de gestão de risco adotadas.

A abordagem preventiva praticada através do uso do *checklist* em inspeções, abrange também o estudo dos acidentes ocorridos anteriormente nos túneis. Quanto mais conhecerem-se as falhas ocorridas no passado, principalmente as suas causas, mais abrangente será o checklist, pois poderão ser incluídos para verificação das manifestações patológicas que ocasionaram esses eventos danosos.

### **2.4.3 Monitoramento em túneis**

Mesmo em projetos de boa qualidade, por mais que exista um controle dos níveis de risco, a possibilidade de que ocorra um comportamento inadequado da estrutura do túnel

sempre irá existir. Portanto, é necessária a realização de monitoramento constante durante todas as fases da estrutura, desde seu projeto até a pós-execução, de forma a não se estabelecer uma inconsciência acerca dos riscos existentes. Na fase de escavação esse monitoramento tem como finalidade complementar e não substituir as ações de acompanhamento, como o mapeamento geológico e as demais informações do campo, mas sim garantir que os recalques e distorções provocados pela escavação estejam dentro dos limites de segurança aceitáveis (COELHO, 2014).

Segundo o *US Army Corps of Engineers* (1978) e Quiralte (1997) citados por Coelho (2014), dentre as medidas de monitoramento está o acompanhamento dos dados obtidos através de instrumentos localizados no túnel, como piezômetros, extensômetros e inclinômetros. Essa instrumentação objetiva justamente detectar antecipadamente as condições que podem causar instabilidade do túnel, além de determinar o desempenho dos elementos de sustentação na fase de operação e controlar a evolução das cargas e deformações de forma a prever possíveis anomalias.

Segundo Carreira (2014), dentre as razões para monitorar, avaliar e interpretar os dados adquiridos através da instrumentação em túneis estão a verificação de parâmetros de projeto, controle de qualidade, avaliação da eficácia do método construtivo etc. Já segundo Hashi (2018), o monitoramento e a instrumentação têm importância crucial nas obras atuais e são um dos fundamentos da construção moderna de túneis. Esses fundamentos seriam:

- a) Maciço circundante;
- b) Sistemas de suporte;
- c) Monitoramento e instrumentação.

É comum a adoção de equipamentos de monitoramento já antes da escavação do túnel, contribuindo para a caracterização de uma situação de referência e posterior conhecimento de sua evolução ao longo de toda a vida útil da estrutura. São utilizados medidores de deformações verticais e horizontais, os extensômetros e inclinômetros, respectivamente, além de níveis piezométricos para medição da pressão interna no solo (COELHO, 2014).

A Figura 10 mostra um exemplo de extensômetro, instalado no Túnel do Mato Forte, em Portugal.

Figura 10 - Extensômetro do Túnel do Mato Forte, Portugal



Fonte: Epos (2002).

Além disso, segundo Ferreira (2020), em túneis escavados em rocha é importante o monitoramento de medidas de convergência das paredes do túnel, que podem ser aferidas através de extensômetros em fita. Esse tipo de instrumento é utilizado para medir distâncias entre pontos de referência em função do tempo, da distância da face, além de outros fatores, os quais são distribuídos nas seções de interesse no túnel. Ressalta-se também que a instalação dos pontos de referência pode se dar em seções com ou sem suportes, e no caso positivo, as medições podem atestar, além da estabilidade do terreno, a eficiência do suporte.

Outro instrumento utilizado para medidas de convergência é a estação total, que permite leituras a grandes distâncias com precisão milimétrica. São então realizadas leituras de deslocamentos em função do tempo, permitindo a observação da dinâmica dos movimentos da estrutura (FERREIRA, 2020).

Em túneis escavados em rocha, outra importante grandeza a ser monitorada são as tensões no túnel, já que muitas vezes, devido a esforços tectônicos por exemplo, a tensão horizontal é maior do que a tensão vertical em um local a ser escavado, existindo uma tensão acumulada na rocha. As tensões induzidas, ou seja, as tensões redistribuídas após a escavação, podem ser medidas no interior da massa de rocha ou em sua superfície através de células de carga, extensômetros mecânicos e por medidores de deformação do tipo *strain gauges* (FERREIRA, 2020).

Recomenda-se também a instalação da chamada instrumentação externa, que consiste na instalação de marcos topográficos superficiais na região dos emboques e

tassômetros nas mesmas regiões, ambos para medição de recalques no túnel durante e após as escavações. Além disso, a frequência de leitura é diária durante a escavação, passando a ser mensal posteriormente (FERREIRA, 2020).

O nível freático em materiais permeáveis é determinado com a utilização de medidores de nível de água, enquanto os piezômetros de Casagrande ou elétricos, são utilizados para medição da carga de pressão (piezométrica) em determinada profundidade. Enquanto as células de pressão já mencionadas anteriormente podem também auxiliar na determinação das pressões exercidas sobre os revestimentos, sendo instaladas em qualquer dos contatos entre revestimento, tratamento e maciço (FERREIRA, 2020).

É importante destacar que são definidos níveis de atenção e de alerta para alguns instrumentos. No caso do Túnel Milagres, localizado na Transposição do Rio São Francisco, foram definidos esses níveis para as deformações medidas nas seções de convergência. O nível de alerta foi definido como a deformação equivalente a 1/1000 do vão do túnel e o nível de atenção, como o valor correspondente a 70% do nível de alerta. Dessa forma, quando a leitura do extensômetro atinge algum desses valores, devem ser adotadas medidas para conter as deformações, como instalação de reforço (FERREIRA, 2020).

Atualmente os equipamentos a laser são os mais utilizados para vistorias e reparação de túneis já em operação. Esses equipamentos realizam um levantamento tridimensional, onde a estação irradia um impulso laser cujo tempo de ida e volta é convertido em distância. Dessa forma obtém-se uma densa nuvem de pontos coordenados, sendo possível mapeamento de trincas, obtenção de seções transversais e até mesmo de imagens termográficas do túnel. A vantagem do uso desse tipo de dispositivo reside no fato da rapidez da obtenção de dados quando comparado a equipamentos ópticos (FERREIRA, 2020).

A Tabela 3 resume os principais instrumentos utilizados para monitoramento de obras subterrâneas, expondo o que cada uma mede, descrevendo-os e apresentando a função de cada instrumentação.

Tabela 3 – Resumo dos instrumentos utilizados em obras subterrâneas

| <b>Instrumento</b>                 | <b>Medida</b> | <b>Descrição</b>  | <b>Objetivo</b>   |
|------------------------------------|---------------|---|---|
| Medidor de convergência e recalque | Deformação    | Pinos metálicos e equipamento de levantamento óptico/laser  | Avaliar as deformações da seção de escavação, medindo os recalques dos pinos e as distâncias entre eles           |
| Pino de recalque                   | Deformação    | Pinos de cobre instalados em pilares das estruturas que se deseja monitorar, e equipamentos de levantamento óptico  | Medir recalques nas estruturas afetadas pela construção do túnel  |
| Marco ou placa superficial         | Deformação    | Pinos metálicos   | Medir movimentos verticais e horizontais do terreno e de estruturas   |
| Extensômetro de fita               | Deformação    | Pinos fixos ancorados nas paredes e teto, e cinta de aço com dispositivo para aplicação de tensão   | Avaliar as deformações da seção da escavação, medindo as distâncias entre eles                                    |
| Extensômetro de haste              | Deformação    | Barra de aço em furo radial ancorada no fundo do furo, sendo possível assim medir o deslocamento relativo entre o topo da barra e a parede ou teto do túnel | Medir movimentos do maciço ao redor do túnel, avaliando a convergência da seção                                   |
| Tassômetro                         | Deformação    | Barra de aço em furo vertical ancorada no fundo do furo, sendo possível assim medir o deslocamento relativo entre o topo da barra e a superfície            | Medir movimentos verticais do maciço acima do túnel e recalques na superfície                                     |
| Inclinômetro                       | Deformação    | O sensor móvel desce ao longo do tubo-guia, onde faz-se leituras ao longo da profundidade. Essas leituras são transmitidas ao indicador digital portátil    | Medir movimentos horizontais do maciço adjacente ao túnel e os recalques e em superfícies de terreno e estruturas |
| Medidor de nível d'água            | Pressão       | Tubo perfurado em toda a sua extensão, inserido em furo no terreno envolto de areia e selado na extremidade superior  | Medir o nível freático em terrenos permeáveis sem presença de artesianismo  |

Fonte: Adaptado de Ferreira (2020).

## 2.5 Uso de *Checklist* em inspeções

Os túneis são estruturas complexas, que resultam da alteração do equilíbrio do maciço, que deve ser reestabelecido rapidamente e monitorado de forma contínua. Esse monitoramento pode ser feito com auxílio de equipamentos de última geração, ensaios em campo e em laboratório e através de inspeções frequentes na estrutura, com o uso de *checklists*.

Para diminuir cada vez mais a influência da subjetividade nos resultados propostos por um *checklist*, é preciso que estes sejam objetivos, produzidos após amplo estudo acerca do objeto de avaliação. E deve-se levar em consideração que os *checklists* são formulados para guiar o processo, sendo um meio auxiliar e não um produto final na avaliação de uma estrutura (CASTRO, 2015).

*Checklists* são ferramentas utilizadas em diversas áreas. Na medicina, por exemplo, a Organização Mundial da Saúde (OMS) lançou um desafio global chamado “Cirurgias Seguras Salvam Vidas”, que promovia a implementação de um *checklist* cirúrgico que lembraria a equipe médica de ações simples, porém fundamentais para a segurança do paciente durante o procedimento. No trabalho de GAMA (2019) foi demonstrada a relação significativa entre casos em que o *checklist* não foi preenchido totalmente e o aumento de infecções adquiridas no local da cirurgia.

Na aeronáutica os *checklists* também são utilizados para garantir o cumprimento de medidas de segurança. Após a análise de dados estatísticos, foi possível observar a ocorrência de acidentes em aeronaves de pequeno porte onde um dos fatores que contribuíram para o acontecimento consiste no uso inadequado do *checklist* (SCARIOT, 2020)

Em segurança do trabalho, o uso de *checklists* auxilia na identificação dos riscos a que o profissional está submetido no cumprimento de uma determinada função, além de verificar a obediência às condições de segurança pré-determinadas pelo local de trabalho, como o uso de equipamentos de segurança. É uma forma de proteção para o trabalhador e para a própria empresa (UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, 2020)

Na engenharia civil são amplamente utilizados em inspeções de segurança em residências simples, assim como em edifícios e até mesmo em estruturas com maior complexidade. O uso dessa ferramenta norteia quais pontos devem receber maior atenção no momento da vistoria de um profissional. Nas barragens, por exemplo, existe uma cultura bem consolidada de utilização dos *checklists* como ferramenta de vistoria.

Existem diversos tipos de inspeção. Exemplificando para outra estrutura hídrica, as barragens, as quais possuem uma elevada oferta de bibliografia existente, assim como ampla

gama de orientações de segurança, a Agência Nacional de Águas (ANA) publicou em 2011 a Resolução 742, que trata dos procedimentos necessários para que sejam realizadas inspeções em campo, prevendo também dois tipos de inspeção:

- a. Inspeção de segurança regular;
- b. Inspeção de segurança especial.

A inspeção de segurança regular é realizada com periodicidade determinada pela classificação da barragem de acordo com a Categoria de Risco e Dano Potencial Associado, possuindo uma metodologia bem definida do que deve ser feito antes, durante e depois da ida a campo. Inicia-se com a análise dos documentos existentes, como projetos, métodos construtivos e registros dos instrumentos instalados. Além disso, consulta-se métodos de controle de qualidade, de operação e manutenção, Plano de Ação e Emergência da estrutura e relatórios de inspeções anteriores identificando os objetivos da inspeção e caracterizando potenciais problemas que podem ser encontrados (ANA, s.d.)

A inspeção de segurança especial, por sua vez, ocorre apenas para verificação de anomalia considerada grave ou na sequência de ocorrências especiais, devendo ser realizada por equipe multidisciplinar. Existem também outros tipos de inspeção, sendo as citadas anteriormente obrigatórias para barragens localizadas em rios da União e recomendadas para as barragens que se encaixem em outras situações (ANA, s.d.).

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, a utilização de listas de verificação, chamadas de *checklists*, para orientar o processo de inspeção visual, prevendo a checagem de pontos da estrutura que devem receber atenção. No próprio manual é apresentado um modelo de *checklist* para inspeção regular, que se inicia com o preenchimento de informações gerais da barragem como seu nome, coordenadas, nome do profissional responsável pela vistoria, dentre outras, conforme ilustra a Figura 11.

Figura 11 - Dados gerais apresentados no *Checklist* de inspeção em barragens

| DADOS GERAIS - CONDIÇÃO ATUAL                                   |                       |
|---|-----------------------|
| 1 - Nome da Barragem:   |                       |
| 2 - Coordenadas: ___° ___' ___" S    ___° ___' ___" O    Datum: |                       |
| 3 - Município/Estado :  |                       |
| 4 - Vistoriado Por:   | Assinatura:           |
| 5 - Cargo:  |                       |
| 6 - Data da Vistoria: / /                                       | Vistoria N.º: /       |
| 7 - Cota atual do nível d'água:                                 |                       |
| 8 - Bacia:  | Curso d'água barrado: |
| 9 - Empreendedor:   |                       |

Fonte: ANA (s.d).

Logo depois é apresentada uma legenda (Figura 12), tratando primeiramente do aspecto da situação de cada item. Dessa forma, a sigla “NA” deve ser atribuída a um item que não é mais aplicável, ou seja, quando item examinado não é pertinente à barragem inspecionada. A legenda também apresenta a classificação da magnitude e do nível de risco, que devem ser atribuídos a cada um dos pontos apresentados no *checklist* (ANA, s.d).

Figura 12 - Legenda dos atributos do *checklist* de inspeção em barragens

**Legenda:**

| SITUAÇÃO:   | MAGNITUDE:         | NÍVEL DE PERIGO (NP) |
|---|--------------------|----------------------|
| NA - Este item Não é Aplicável                    | I - Insignificante | 0 - Nenhum           |
| NE - Anomalia Não Existente                       | P - Pequena        | 1- Atenção           |
| PV - Anomalia constatada pela Primeira Vez        | M - Média          | 2- Alerta            |
| DS - Anomalia Desapareceu                         | G- Grande          | 3- Emergência        |
| DI - Anomalia Diminuiu                            |                    |                      |
| PC - Anomalia Permaneceu Constante                |                    |                      |
| AU - Anomalia Aumentou                            |                    |                      |
| NI - Este item Não foi Inspeccionado (Justificar) |                    |                      |

Fonte: ANA (s.d).

Com relação à magnitude, são apresentadas 4 classificações de acordo com relevância da anomalia, indo de insignificante (I) até grande (G) relevância para a segurança da estrutura. Da mesma forma procede-se para a classificação do nível de perigo (NP) da barragem,

também com 4 atributos, iniciando com o uma observação que não apresenta nenhum nível de perigo para a barragem - valor zero - mas que pode ser entendida como descaso ou má conservação, passando pelo nível de perigo classificado como “Atenção” - valor 1 – para algo que compromete a segurança da barragem a curto prazo mas deve ser controlado e monitorado, nível de perigo “Alerta” – valor 2 - para uma observação que acarreta em risco à segurança, devendo ser tomadas medidas para a eliminação do problema. O último nível seria relacionado com uma anomalia que causa risco de ruptura iminente, caracterizando uma situação fora de controle. Para esses casos atribui-se valor 3 à coluna correspondente ao NP (ANA, s.d).

Prossegue-se então para a análise da infraestrutura operacional da estrutura, necessitando da análise de questões relacionadas à documentação existente, ao material direcionado para manutenção, segurança no trabalho, infraestrutura de proteção do entorno da barragem, dentre outros aspectos. Após essa seção inicia-se a apresentação da estrutura de fato, sendo o *checklist* dividido de acordo com subáreas da barragem e as respectivas anomalias que podem estar presentes, conforme mostra um trecho do *checklist* na Figura 13.

Figura 13 - Trecho do *checklist* de inspeção em barragens

|              |  |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |
|--------------|--|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|
| <b>A.</b>    | <b>INFRAESTRUTURA OPERACIONAL</b>                  |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |
| 1            | Falta de documentação sobre a barragem             | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 2            | Falta de material para manutenção                  | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 3            | Falta de treinamento do pessoal                    | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 4            | Precariedade de acesso de veículos                 | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 5            | Falta de energia elétrica                          | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 6            | Falta de sistema de comunicação eficiente          | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 7            | Falta ou deficiência de cercas de proteção         | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 8            | Falta ou deficiência nas placas de aviso           | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 9            | Falta de acompanhamento da Adm. Regional           | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 10           | Falta de instrução dos equipamentos hidromecânicos | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| Comentários: |  |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |
| <b>B.</b>    | <b>BARRAGEM</b>                                    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |
| <b>B.1</b>   | <b>PARAMENTO DE MONTANTE</b>                       |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |
| 1            | Presença de vegetação                              | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 2            | Erosão nos encontros das ombreiras                 | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 3            | Ocorrência de fissuras no concreto                 | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 4            | Ferragem do concreto exposta                       | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 5            | Deterioração da superfície do concreto             | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 6            | Juntas de dilatação danificadas                    | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| Comentários: |  |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |
| <b>B.2</b>   | <b>CRISTA</b>                                      |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |
| 1            | Movimentos diferenciais entre blocos               | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 2            | Ocorrência de fissuras no concreto                 | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 3            | Ferragem do concreto exposta                       | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 4            | Deterioração da superfície do concreto             | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 5            | Juntas de dilatação danificadas                    | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 6            | Corrosão no parapeito (guarda-corpo)               | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 7            | Corrosão nos postes de iluminação                  | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| 8            | Corrosão no pórtico                                | NA | NE | PV | DS | DI | PC | AU | NI | I | P | M | G |
| Comentários: |  |    |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |

Fonte: ANA (s.d.).

A Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH), também desenvolveu *checklists* para barragens, além de outras estruturas hídricas como canais, sifões e estações elevatórias. Conforme pode-se observar adiante, onde é apresentado o *checklist* para uma estação de bombeamento, existem semelhanças nas estruturas dos documentos da ANA e da COGERH. O segundo inicia-se também com a solicitação de informações gerais da estrutura (Figura 14), prosseguindo para a legenda dos atributos de classificação quanto a situação, a intensidade e o nível de perigo das anomalias (Figura 15).

Figura 14 – Dados gerais solicitados no *checklist* da COGERH

| <b>DADOS GERAIS:</b>   |  |
|------------------------|--|
| EB:                    |  |
| Nº. funcionários:      |  |
| Município:             |  |
| Utilização (adução):   |  |
| <b>PÓS-CHECK_LIST:</b> |  |
| Vistoriado por:        |  |
| Função:                |  |
| Data da vistoria:      |  |
| Visto Gerente:         |  |

Fonte: Adaptado de COGERH (2018).

Figura 15 – Legenda dos atributos do *checklist* da COGERH

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

Fonte: Adaptado de COGERH (2018).

Ademais, conforme a Figura 16, o *checklist* da COGERH também possui subdivisões que apresentam as anomalias divididas de acordo com partes da estrutura e para verificação de problemas relacionados com a infraestrutura organizacional, abordando questões relacionadas com a parte burocrática e as condições dos materiais de manutenção, além de treinamentos para os trabalhadores que exercem funções na estrutura.

Figura 16 – Trecho do *checklist* da COGERH para uma estação de bombeamento

**CHECK\_LIST - ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO**

| LOCALIZAÇÃO / PROBLEMA  |  | SITUAÇÃO |    |    |    |    |    |    |   | INTENSIDADE |   |   | NP |
|---|--|----------|----|----|----|----|----|----|---|-------------|---|---|----|
| <b>A.</b>   | <b>INFRAESTRUTURA OPERACIONAL</b>  |          |    |    |    |    |    |    |   |             |   |   |    |
| 1   | falta de documentação na EB (livro de ocorrência, manuais e fichas de operação e manutenção) | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G |    |
| 2   | falta de material para manutenção/ operação básica .   | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G |    |
| 3   | falta de treinamento operacional pessoal   | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G |    |
| 4   | precariedade de acesso de veículos   | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G |    |
| 5   | sistema de comunicação deficiente  | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G |    |
| 6   | falta ou deficiência de cercas de proteção   | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G |    |
| 7   | falta de acompanhamento da adm. regional   | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G |    |
| 8   | deficiência na segurança patrimonial da estação de bombeamento                               | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G |    |
| <i>Observação</i> problema diverso detectado no item (descrever item-situação) ou outros problemas existentes não enumerados acima  |  |          |    |    |    |    |    |    |   |             |   |   |    |
| <b>B.</b>   | <b>PRÉDIO DA ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO</b>  |          |    |    |    |    |    |    |   |             |   |   |    |
| 1   | deficiência na pintura geral   | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G | 2  |
| 2   | problemas nas paredes do prédio  | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G | 2  |
| 3   | revestimento com problemas   | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G | 2  |
| 4   | existência de goteiras   | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G | 2  |
| 5   | presença de fissuras no concreto   | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G |    |
| 6   | problema na ferragem da estrutura  | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G | 2  |
| 7   | problemas em portas e janelas  | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G | 1  |
| 8   | falta tomadas e interruptores  | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G |    |
| 9   | deficiência no piso / telhado  | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G | 2  |
| 11  | problema na cobertura do prédio  | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G | 2  |
| 12  | presença de drenagem/ umidade na estação   | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G | 2  |
| 13  | ferrugem nas partes metálicas (quadros, janelas, portas, etc)                                | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G | 2  |
| 14  | problemas na iluminação externa  | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G | 2  |
| 15  | Deficiência na drenagem da cobertura da estação  | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G | 2  |
| 16  | Deficiência na proteção anticorrosiva nos barriletes de entrada na casa de bombas            | NE       | PV | PR | DI | PC | AU | NI | I | P           | M | G | 1  |
| <i>Observação</i> problema diverso detectado no item (descrever item-situação) ou outros problemas existentes não enumerados acima. |  |          |    |    |    |    |    |    |   |             |   |   |    |

Fonte: Adaptado de COGERH (2018).

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho possui natureza bibliográfica e abordagem qualitativa. Foi realizada inicialmente uma revisão da literatura acerca dos túneis de transferência hídrica, apresentando fatores pertinentes para a caracterização e entendimento completo de sua dinâmica, como questões geológicas, geotécnicas, econômicas, sociais e ambientais. A pesquisa bibliográfica envolveu, além disso, um levantamento sobre acidentes ocorridos nesse tipo de estrutura, assim como a busca e apresentação de *checklists* existentes para inspeção nesse em tuneis e outras estruturas.

A busca foi feita prioritariamente de forma online, abrangendo livros, periódicos, trabalhos acadêmicos e notícias. Atentou-se para o uso de palavras-chave efetivas, aumentando a precisão da pesquisa. Foram inseridas nos buscadores online frases que abrangiam temas mais gerais e gradativamente aprofundava-se para frases cada vez mais específicas. Dentre os buscadores utilizados cita-se: *Google*, *Google Scholar*, *Mendeley*, *Scielo*, Periódicos Capes, Biblioteca Digital de Teses e Dissertações, além das bibliotecas virtuais da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS), do *International Tunneling and Underground Space Association* (ITA) e publicações do Comitê Brasileiro de Túneis (CBT).

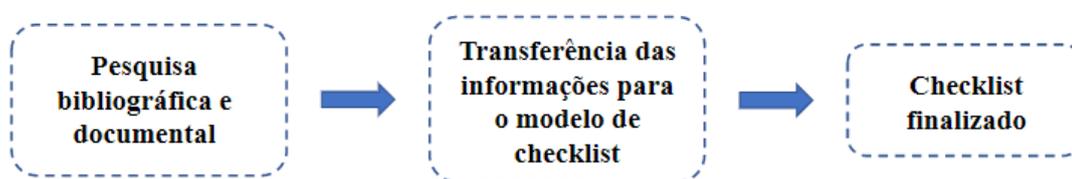
Com relação às informações retiradas de notícias, é importante ressaltar a atenção direcionada para uma busca realizada de forma crítica, atestando a veracidade das informações e priorização de sites com elevada confiabilidade, como periódicos nacionais e regionais.

Neste trabalho seguiu-se o modelo de *checklist* adotado pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) em estruturas como canais e adutoras, com as modificações necessárias para os túneis de transferência hídrica. O arquivo constitui uma planilha, previamente formatada para impressão e utilização em campo, que se inicia com as informações necessárias para identificação da estrutura como localização, número de funcionários e função do túnel no sistema.

Outras informações requeridas no preenchimento do *checklist* se tratam da identificação do responsável pela vistoria, sua função, a data de ocorrência da inspeção e o visto do gerente. Segue-se então para a legenda das classificações que foram atribuídas a cada problema observado, que estão divididas em três classes: situação, magnitude e nível de perigo. Na classe de situação, o responsável irá avaliar o contexto do problema, como por exemplo se ele existe ou não, foi resolvido, diminuiu, dentre outros atributos que são preenchidos na área apropriada através de códigos.

Na classe de magnitude, foi analisada a significância do problema em questão, indo desde um problema que pode ser classificado como insignificante, até um problema de grandes dimensões. No nível de perigo, como o próprio nome sugere, deve-se classificar a adversidade de acordo com sua gravidade, e conseqüentemente do seu nível de comprometimento da segurança da própria estrutura e de vidas humanas. Para problemas que não afetam a segurança atribui-se um valor 0, valor esse que pode chegar até 4, onde se tem risco crítico de segurança. A Figura 17 mostra um modelo esquemático da metodologia utilizada para o desenvolvimento do *checklist*.

Figura 17 - Etapas da metodologia para confecção do *checklist*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Túneis de transferência hídrica existentes no Brasil

Este tópico apresenta os resultados do levantamento acerca dos túneis de transferência hídrica existentes no Brasil.

#### *4.1.1 Transposição do Rio São Francisco*

A Transposição do Rio São Francisco, também chamado de Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF), já era discutida desde o século XIX, quando o engenheiro cearense Marcos de Macedo apresentou a proposta em 1847 ao imperador Dom Pedro II. Depois de inúmeros debates, principalmente acerca dos impactos ambientais que a transposição poderia acarretar ao rio, o projeto entrou em execução em 2008 (DEMENSTSHUK, 2014).

O intuito seria estabelecer uma ligação entre a Bacia do São Francisco, com relativa abundância hídrica, e as bacias localizadas no Nordeste Setentrional, que apresentam preocupante escassez hídrica. Esse caminho é realizado através de dois eixos, o Norte e o Leste (BNDES, s.d). O Eixo Leste apresenta cerca de 217 km e transporta a água do São Francisco para os estados de Pernambuco e Paraíba através de três trechos chamados de metas. As metas 1L, 2L e 3L apresentam 16, 167 e 34 km respectivamente. Já o Eixo Norte foi projetado com 160 km e tem como objetivo atender cidades dos estados do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte, também distribuído em 3 metas: 1N, 2N e 3N com 260, 39 e 81 km respectivamente. Dentre as diversas estruturas que auxiliam para que a água chegue até esses locais, a transposição conta com 4 túneis (BRASIL, 2016).

Os túneis do PISF são: Cuncas I (15.250 m), Cuncas II, (4.000 m), Milagres (818 m) e Giancarlo Lins Cavalcanti (3.000 m) (BRASIL, 2016). Devido a disponibilidade considerável de informações, evidencia-se aqui os túneis Milagres e Cuncas I.

#### 4.1.1.1 Túnel Milagres

O túnel Milagres está localizado na Meta 1N, entre as cidades de Verdejante (PE) e Penaforte (CE) sob uma área de adensamento populacional (Figura 18), e apresenta 9 m de diâmetro. Possui seção em formato arco-retângulo e base plana com raio aumentando em direção à base. Além disso, a sua altura interna é de 9,60 m e largura máxima de 10 m (FERREIRA, 2020).

Figura 18 – Localização do Túnel Milagres



Fonte: Ferreira (2020).

Segundo Ferreira (2020) a metodologia de escavação do túnel Milagres seguiu o *New Austrian Tunneling Method* (NATM), sendo definido como um método observacional que acompanha as variações de tensões e deformações do terreno, onde essas deformações ocorrem como resultado da perda do equilíbrio existente no maciço antes da escavação. A execução de um túnel com o método NATM é realizado passo a passo, em que as etapas devem ser repetidas sempre que necessário:

- i) Investigações geotécnicas do maciço e condições subterrâneas;
- ii) Avaliação de parâmetros mecânicos do solo e rocha, baseados nos resultados de ensaios, bem como na experiência prévia;
- iii) Análises de estabilidade do túnel e do revestimento de concreto projetado;

- iv) Planejamento e avaliação de métodos de escavação e suporte para as diferentes classes de maciço;
- v) Supervisão de estabilidade pelo mapeamento geotécnico e monitoramento durante a construção;
- vi) Análise dos resultados das medições.

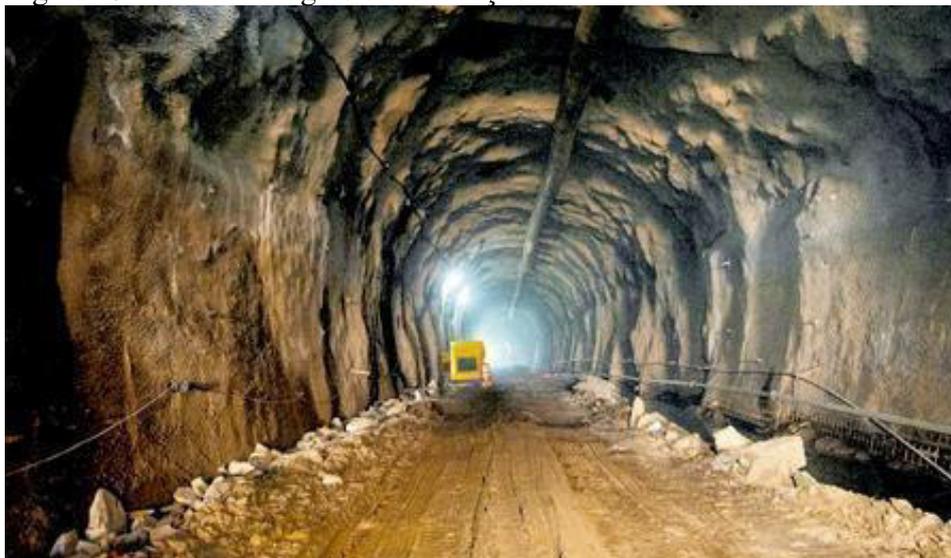
A estrutura de um túnel executado com o NATM é composta de concreto projetado, cambotas metálicas, juntamente com tirantes e enfilagens. Para a escavação são utilizados explosivos, através de uma detonação controlada, permitindo a desagregação desde solos até rochas sãs (ESTANQUEIRO; SALVI, 2020). O concreto projetado teria a função de evitar cargas assimétricas sobre o revestimento, e porções de rochas soltas (também chamadas de “choco”) seriam fixadas (SINGH; GOEL, 2006 apud FERREIRA, 2020).

A utilização do aço como suporte provém do fato de que é um material com desejáveis propriedades mecânicas e de sua considerável resistência ao intemperismo. Além disso, a sua utilização abriu caminho para a possibilidade de construção de seções transversais maiores com escavação plena, otimizando o uso de equipamentos e melhorando a perfuração. Dessa forma, foi possível elevar a taxa de avanço e reduzir custos (FERREIRA, 2020).

De acordo com Ferreira (2020), as obras do túnel Milagres se iniciaram no ano de 2007, sendo escavado em rocha predominantemente do tipo filito, com graus de alterações distintos. Ressalta-se que existiam deformações de convergência do solo classificadas como desprezíveis a muito significativas. Essas últimas poderiam contribuir para o aumento de risco de rupturas no intradorso do túnel, que seria a sua face interna côncava. Na Figura 19 é possível observar o túnel ainda em sua fase de execução.

As obras que foram realizadas no túnel consistiram em serviços de escavação e tratamento dos trechos de transição do emboque e desemboque, como também do intradorso do túnel. O projeto consistia em duas seções de escavação para aplicação do tratamento do filito, com uso do concreto para revestimento do piso e de concreto projetado reforçado com tela metálica, tirantes, chumbadores, drenos barbacãs e drenos horizontais profundos (DHP) (FERREIRA, 2020).

Figura 19 - Túnel Milagres em execução



Fonte: Okariri (2018).

Através da análise por meio de softwares descobriu-se a existência de áreas formadas por possíveis interseções entre as descontinuidades no maciço do túnel apresentando fator de segurança igual a zero, ou seja, existia a possibilidade de ocorrerem rupturas na abóboda durante e após as escavações (FERREIRA, 2020).

Descontinuidade consiste em uma quebra mecânica ou fratura presente em um maciço rochoso, e sua origem pode ser natural ou artificial devido ao desmonte da rocha pelos explosivos. São elas que governam o comportamento mecânico do maciço por serem menos resistentes e, por isso, a classificação das descontinuidades é um fator fundamental na análise da estabilidade de escavações subterrâneas e a céu aberto (FRIORI; CARMIGNANI, 2009).

Segundo Maciel Filho e Nummer (2014), diferentemente dos solos, os maciços rochosos não possuem um sistema de classificação geomecânica aceito por toda a comunidade técnica. O que existem são diferentes tipos de classificação que levam em consideração aspectos diversos, como por exemplo o estado de alteração da rocha, sua resistência à compressão simples, a espessura das camadas e o espaçamento entre as fraturas.

No entanto, vários autores vêm tentando estabelecer sistemas de classificação dos maciços rochosos levando em consideração a estabilidade desses maciços quando parte de obras de engenharia, mais precisamente os túneis. Dentre essas, destaca-se aqui a Classificação de Bieniawski (1976), também chamada de Sistema RMR – de “*Rock Mass Rating*” – sendo aprimorada à medida que são obtidas mais informações com casos práticos (MACIEL FILHO; NUMMER, 2014).

Essa classificação baseia-se na atribuição de pesos a seis parâmetros que teriam contribuição significativa no comportamento dos maciços rochosos. O somatório dos pesos

atribuídos a cada um dos parâmetros constitui o índice RMR, o qual, por sua vez, corresponde uma das cinco classes de qualidade dos maciços (BIENIAWSKI, 1976 apud MACIEL FILHO; NUMMER, 2014). Os parâmetros utilizados são:

2. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
3. RQD (“*Rock Quality Designation*”);
4. Espaçamento das descontinuidades;
5. Condição das descontinuidades;
6. Influência da água;
7. Orientação das descontinuidades.

Para que seja realizada a classificação, o maciço recebe uma divisão em regiões estruturais, as zonas, sendo classificadas separadamente. Ressalta-se que, caso o peso relacionado à condição das descontinuidades não possa ser determinado, visto que depende de uma descrição detalhada das juntas, o que pode muitas vezes não ocorrer, deve-se então escolher uma descrição mais próxima possível da realidade (MACIEL FILHO; NUMMER, 2014).

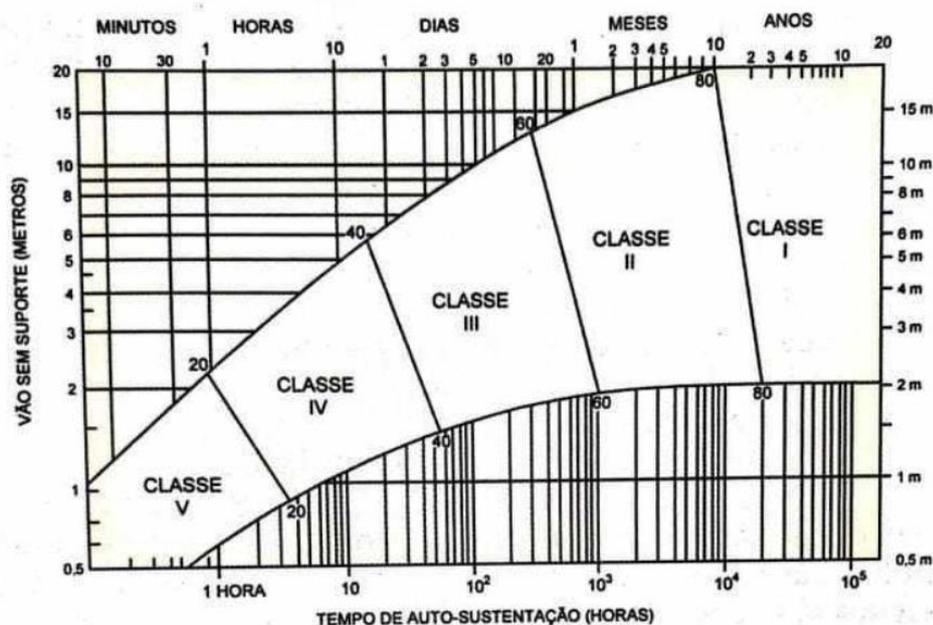
A Tabela 4 mostra a classificação abordada, que está dividida em cinco classes de acordo com o índice RMR. É apresentada também, de acordo com cada categoria, uma indicação do tempo médio em que o maciço tem capacidade de se sustentar quando escavado em vãos não revestidos em túneis, que pode ser observada de forma gráfica na Figura 20. É importante ter uma estimativa desse período pois é nele que ocorre a colocação do suporte no túnel, caso contrário, é possível a ocorrência do colapso da abertura (MACIEL FILHO; NUMMER, 2014).

Tabela 4 - Classificação geomecânica de Bieniawski

| Peso global                              | 100-81                   | 80-61                  | 60-41                    | 40-21                      | < 21                       |
|--|--------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Classe                                   | I                        | II                     | III                      | IV                         | V                          |
| Descrição                                | Maciço rochoso muito bom | Maciço rochoso bom     | Maciço rochoso razoável  | Maciço rochoso fraco       | Maciço rochoso muito fraco |
| Tempo médio para sustentação sem suporte | 20 anos para 15 m de vão | 1 ano para 10 m de vão | 1 semana para 5 m de vão | 10 horas para 2,5 m de vão | 30 minutos para 1 m de vão |
| Coesão da massa rochosa (kPa)            | > 400                    | 300-400                | 200-300                  | 100-200                    | < 100                      |
| Ângulo de atrito da massa rochosa (°)    | > 45                     | 35-45                  | 25-35                    | 15-25                      | < 15                       |

Fonte: Adaptado de Bieniawski (1989) apud Maciel Filho; Nummer (2014).

Figura 20 – Relação entre o tempo de sustentação e a extensão do vão sem suporte em túneis



Fonte: Bieniawski (1974) apud Estanqueiro; Salvi (2020).

Com relação ao processo de aplicação dessa classificação ao túnel Milagres, de acordo com Ferreira (2020), foram realizadas investigações através de sondagens mistas e chegou-se à classificação, que consistia em classes de maciço III e IV, sendo rochas de menor capacidade de sustentação e por isso necessitam de maior aparato de reforço. A escavação ocorreu em duas frentes, com retirada de 120 m<sup>3</sup> de material e uso da técnica de bate choco na

frente escavada, abóbodas e paredes, para retirada de blocos de rochas que se encontravam com risco de cair (NARESI JÚNIOR, 2010).

A execução do túnel foi concluída em 2018 (Figura 21), porém, antes disso, em cada avanço da frente de escavação eram realizadas investigações para classificação do maciço e conseqüentemente determinar a necessidade ou não de material para auxiliar na sustentação. Em caso positivo, optava-se pela utilização de cambotas metálicas, arcos invertidos, tirantes com resinas e uso do concreto projetado com fibras (FERREIRA, 2020).

Figura 21 - Túnel Milagres finalizado



Fonte: Nill Júnior (2018).

#### 4.1.1.2 Túnel Cuncas I

Já o túnel Cuncas I, também presente na transposição do rio São Francisco, é o maior túnel de transferência hídrica da América Latina. No decorrer dos seus aproximados 15 km de extensão, ele interliga as cidades de São José de Piranhas (PB) a Mauriti (CE) com o objetivo de dar vazão a 83.000 litros de água por segundo. O túnel apresenta 9 metros de altura e largura, com seções cuja área varia entre 57 e 73 m<sup>3</sup> para os trechos em rocha, e entre 71 e 80 m<sup>3</sup> para os trechos em solo, atravessando uma serra no município de Monte Horebe (PB) (CRISPIM, 2018). Além disso, foi constatado através de investigações geotécnicas, a presença de rochas sedimentares no emboque, juntamente com arenitos e siltitos (QUEIROZ et al. 2016).

Próximo à região central do túnel foi concebido outro túnel de acesso com 2,02 km de comprimento e seções semelhantes à do Cuncas I. A partir desse túnel foi possível estabelecer mais duas frentes de serviço além das duas que já estavam em vigência – no emboque e no desemboque respectivamente – elevando substancialmente a produtividade da obra (QUEIROZ et al. 2016).

Conforme o estudo de Queiroz et al (2016), como a função do túnel é de transporte hídrico, suas seções foram concebidas de modo que fossem atendidos critérios hidráulicos. Um exemplo disso é o fato de que quando em operação, a lâmina d'água deve ser igual ou inferior a 75 % do diâmetro equivalente do túnel.

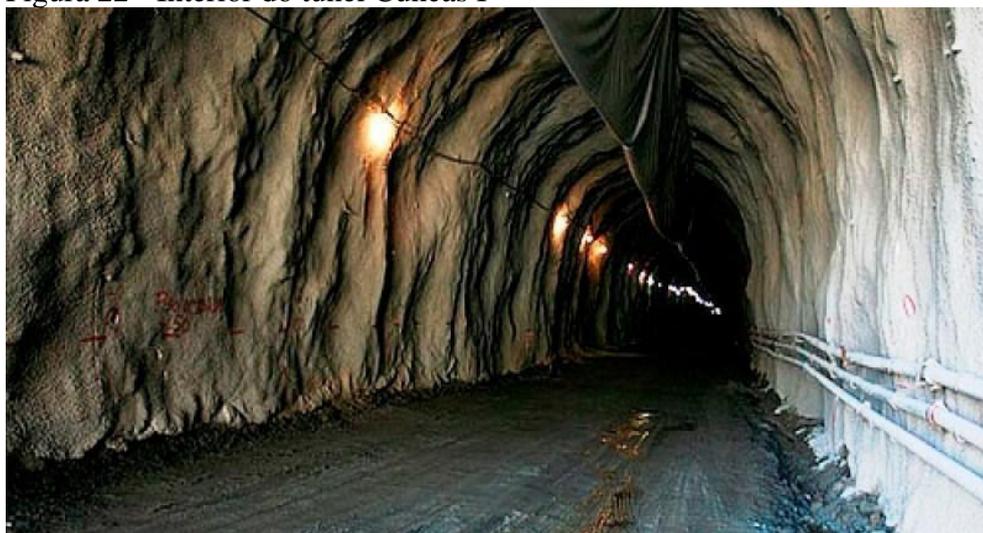
Ainda de acordo com o estudo, que trata de análise estatística simplificada para túneis em rocha, a sequência de eventos geológicos que formaram o arcabouço por onde se desenvolve o túnel sugere a existência de tensões residuais elevadas em algumas direções. Foi então utilizado um *software* chamado Unwedge® para realizar análises de estabilidade de blocos de rocha, ou seja, a partir da geometria e orientação de uma dada seção do túnel e das combinações das descontinuidades presentes na litologia desta seção, foram definidos os blocos potencialmente instáveis (QUEIROZ et al. 2016).

Desta forma, foram então determinados os fatores de segurança para cada um dos blocos analisados sem a instalação de suporte. Concluiu-se que para o túnel Cuncas I, 30,7% das combinações de fraturas são inseguras sem suporte (fator de segurança menor que 1,5), contra 69,3% com fatores de segurança maiores que 1,5 e, portanto, se manteriam sem auxílio de suporte. Além disso, para os casos em que o fator de segurança é menor que 1,5, ou seja, são instáveis mesmo com o uso de equipamento de sustentação considerado mais seguro, a percentagem de ocorrências foi de 0,7% (QUEIROZ et al. 2016).

Apesar dessa pequena parcela das combinações indicar instabilidade mesmo com a sustentação, é necessário o acompanhamento contínuo de campo para que se atente à existência de descontinuidades críticas durante o trabalho da frente de escavação, sendo necessário até desviar o percurso do túnel para que se evite possíveis rupturas. Além disso, o piso do túnel poderia ser revestido em concreto armado para preservar a integridade da rocha e evitar o risco de erosão e arraste hidráulico (QUEIROZ et al. 2016).

É possível observar o interior do túnel Cuncas I na Figura 22.

Figura 22 - Interior do túnel Cuncas I



Fonte: Cariri Ligado (2014).

#### ***4.1.2 Cinturão das Águas do Ceará***

O Cinturão das Águas do Ceará (CAC) se iniciou em 2013 e foi concebido para aduzir a água da Transposição do Rio São Francisco que chega à cidade de Jati (CE) para as Sub-bacias do Nordeste Setentrional (Tabela 5) através de estruturas como canais, adutoras, túneis e sifões (OLIVEIRA, 2017).

A obra é dividida em 5 lotes, dos quais 3 (lotes 1,2 e 5) já se encontram concluídos e em operação, no chamado Trecho Emergencial. Esses lotes levam a água da cidade de Jati para o Riacho Seco, em Missão Velha (CE). De lá a água passa pelo Rio Jaguaribe e, por fim, segue até o Açude Castanhão, abastecendo a Região Metropolitana de Fortaleza (UCHOA; SRH, 2021).

Os lotes 3 e 4, com 32% e 11,5% já executados até julho de 2021, respectivamente, vão transportar os recursos hídricos para a região do Cariri e apresentam previsão de conclusão para o ano de 2024. O lote 3, em especial, tem natureza emergencial para a região, visto que a realidade é de uma fraca recarga nos aquíferos que alimentam os poços profundos da Região Metropolitana do Cariri. O lote 4, por sua vez, também possui função emergencial, porém alimentando o açude Orós, na tentativa de garantir a segurança hídrica das regiões local e Metropolitana de Fortaleza (UCHOA; SRH, 2021).

Além disso, o CAC também abastecerá os municípios da região do Alto Jaguaribe por meio de sistemas adutores executados no Programa Malha d'Água, conduzindo a água para cidades com elevada vulnerabilidade hídrica como Araripe, Campos Sales e Salitre (UCHOA; SRH, 2021).

Tabela 5 – Divisão das 31 sub-bacias do Nordeste Setentrional

| <b>ID</b> | <b>SUB-BACIA</b>                     |
|-----------|--------------------------------------|
| 1         | Alto Piancó (Curemas)                |
| 2         | Baixo Piancó (jusante Curemas)       |
| 3         | Alto Piranhas                        |
| 4         | Médio Piranhas PB                    |
| 5         | Médio Piranhas RN                    |
| 6         | Baixo Piranhas                       |
| 7         | Alto Paraíba                         |
| 8         | Médio/Baixo Paraíba                  |
| 9         | Alto Apodi                           |
| 10        | Baixo Apodi                          |
| 11        | Alto Salgado                         |
| 12        | Baixo Salgado                        |
| 13        | Alto Jaguaribe                       |
| 14        | Médio Jaguaribe (Salgado-Castanhão)  |
| 15        | Banabuiú                             |
| 16        | Médio Jaguaribe (Castanhão-Banabuiú) |
| 17        | Baixo Jaguaribe                      |
| 18        | Alto Pajeú                           |
| 19        | Baixo Pajeú                          |
| 20        | Alto Navio                           |
| 21        | Baixo Navio                          |
| 22        | Alto Moxotó                          |
| 23        | Baixo Moxotó                         |
| 24        | Terra Nova                           |
| 25        | Alto Brígida                         |
| 26        | Médio Brígida jusante Chapéu         |
| 27        | Alto Santo Antônio                   |
| 28        | Médio Brígida jusante Santo Antônio  |
| 29        | Alto São Pedro                       |
| 30        | Médio São Pedro jusante Entremontes  |
| 31        | Baixo Brígida                        |

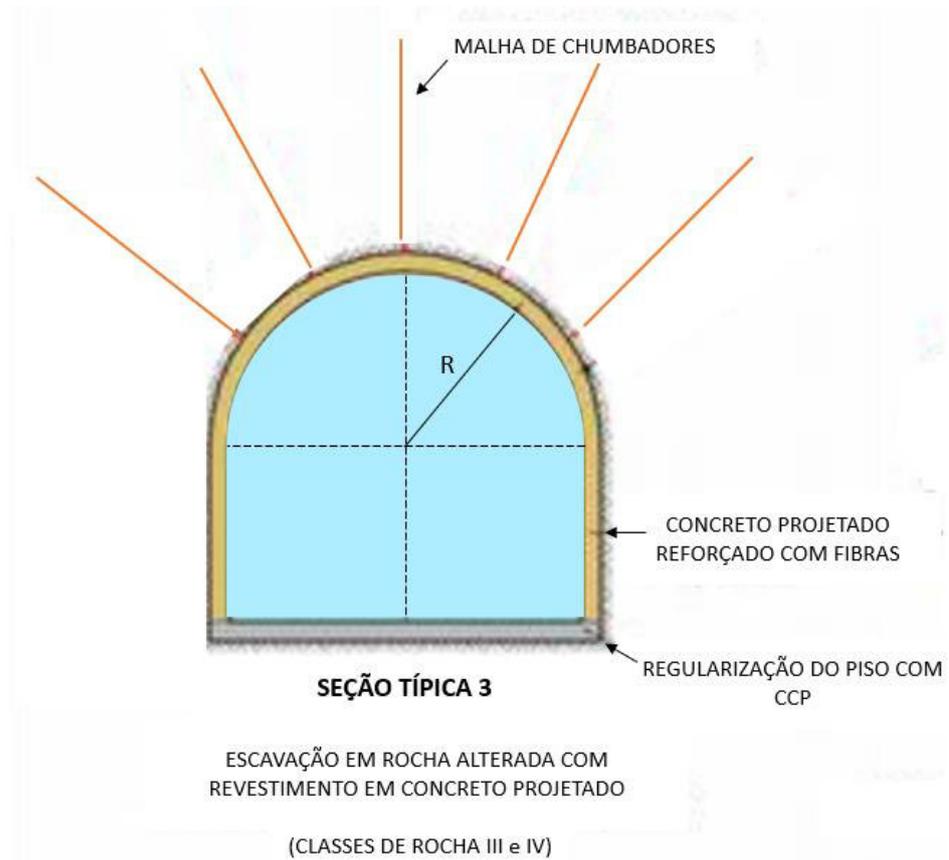
Fonte: Adaptada de Cid (2016).

O trecho emergencial do CAC inicia-se pelo Lote 1, a partir do reservatório Jati, o qual guardará até 27 milhões de m<sup>3</sup> de águas vindas da Transposição do Rio São Francisco. (DICELLI, 2019). Logo depois, essas águas passam pelos túneis Sítio Alto 1 (463,37 m) e Sítio Alto 2 (583,7 m), pertencentes ao Lote 2 até finalmente chegar ao Túnel Veneza, no Lote 5, o maior túnel de transferência hídrica do CAC, com 2.322,36 m (UCHOA; SRH, 2021).

Inicialmente foram consideradas 4 seções tipo para os túneis do CAC, mas após otimização e considerando a realidade da obra no campo, ficaram estabelecidas apenas as seções tipo 3 e 4 (SRH, 2012). A primeira, é aplicada para túneis escavados em maciços de

classes III e IV, sendo caracterizada pela aplicação sistemática de chumbadores em malha com espaçamento a cada 2 cm, além da aplicação de concreto projetado reforçado com fibras (CPRF) em uma camada com espessura de 10 cm, conforme mostra a Figura 23 (SRH, s.d.).

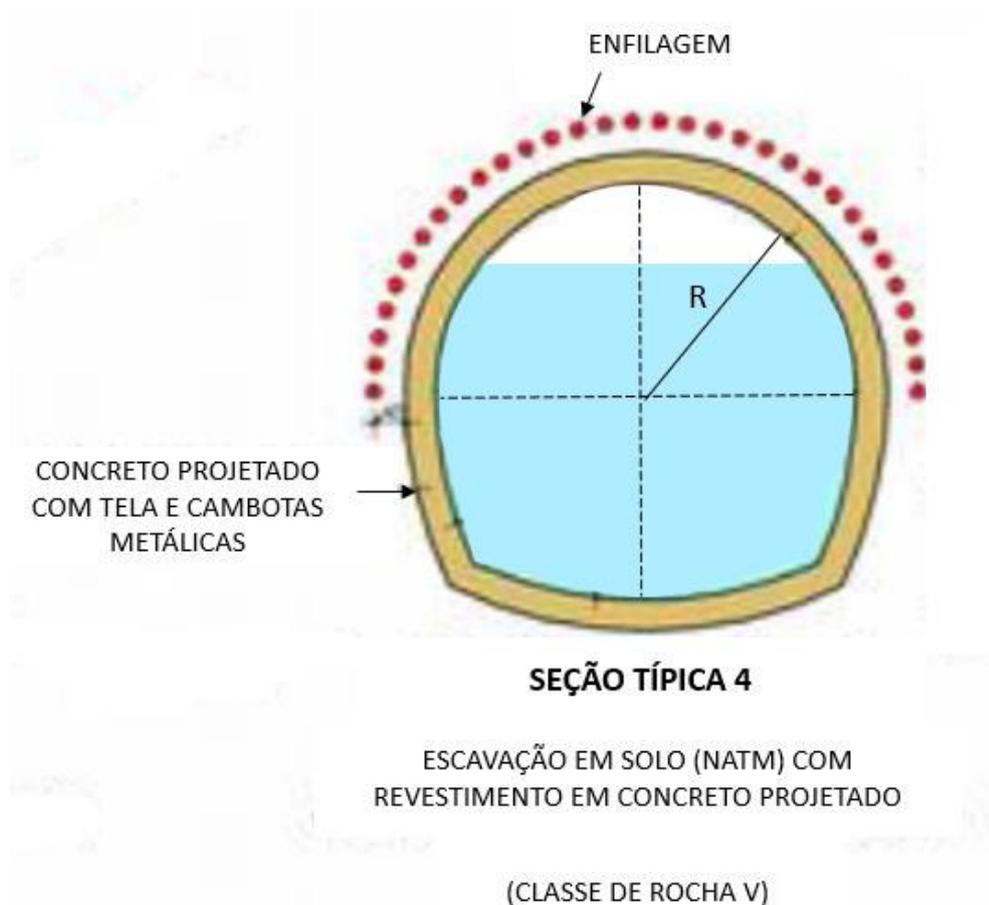
Figura 23 – Seção típica 3 dos túneis do CAC



Fonte: Adaptado de SRH (s.d.).

Já a seção 4, como mostra a Figura 24, ficou estabelecida para maciços de classe V, onde seria utilizado concreto projetado com tela metálica, uso de cambotas metálicas treliçadas com espaçamento a cada 60 cm ou 80 cm, além de enfilagem com tubo Schedule 40 injetado ou concreto projetado sem fibras (CPP) bulbo contínuo com barra metálica a cada 40 cm (SRH, s.d.).

Figura 24 - Seção típica 4 dos túneis do CAC



Fonte: Adaptado de SRH (s.d.).

No caso do Cinturão das Águas, o perfil geotécnico apresentado pelos túneis resultou de investigações diretas, executadas ao longo do eixo e de suas seções transversais. A partir dessas informações foram então feitas as respectivas classificações. De acordo com a Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (SRH), os túneis do CAC foram numerados de acordo com o que mostra a Tabela 6. Os túneis de 1 a 6 foram determinados como classe V e os túneis de 7 e 9, como classes III e IV, respectivamente. Ressalta-se que essa classificação leva em consideração a classe predominante nos túneis, sendo provável deparar-se com a presença de trechos com outras classes em uma mesma estrutura. Já para o túnel 8, não foi possível obter a informação acerca de sua classe predominante (SRH, 2012).

Tabela 6 - Caracterização dos túneis do CAC

| Número | Túnel        | Classe | Extensão (m) | Litologia    |
|--------|--------------|--------|--------------|--------------|
| 1      | Sítio Alto 1 | V      | 645          | Arenito      |
| 2      | Sítio Alto 2 | V      | 790          | Arenito      |
| 3      | Veneza       | V      | 2538         | Arenito      |
| 4      | Cabaceira    | V      | 210          | Arenito      |
| 5      | Arajara      | V      | 419          | Arenito      |
| 6      | Boa Vista    | V      | 377          | Arenito      |
| 7      | Cruzeiro     | III    | 412          | Metassiltito |
| 8      | Pai Mané     | -      | 280          | Metassiltito |
| 9      | Carnaúba     | IV     | 290          | Metassiltito |

Fonte: Adaptada de Secretaria de Recursos Hídricos do SRH (2012).

A enfilagem tem como objetivo a estabilização da abóboda através da execução de uma câmara cônica acima da geratriz superior e na frente de escavação. A estabilização se dá pelo enrijecimento do solo local e arqueamento dos esforços de empuxo, e deve ser de natureza provisória, apenas até que seja executada a estrutura permanente de contenção e revestimento. A execução da enfilagem exige precisos controles de locação, direcionamento e comprimento (TECNOGEO GROUND, s.d).

De acordo o projeto básico, não houve necessidade de utilizar contenção especial para execução das escavações dos emboques dos túneis. O monitoramento do túnel ocorre através de pinos de aço com porca poliéster, para medição de deslocamentos, e piezômetro. (SRH, 2012).

Dentre os túneis do CAC evidencia-se o Túnel Veneza (Figura 25), o maior do projeto. Está localizado no Trecho 1, totalmente gravitário, do Lote 5 do CAC, no município de Missão Velha (CE) (SOHIDRA, s.d.). Segundo o Estudo de Impacto Ambiental do CAC, elaborado pela VBA Tecnologia e Engenharia S/A em 2012, a opção pelo túnel veio da necessidade de otimização do transporte da água, que se daria através da interceptação da região da Serra da Mãozinha, um testemunho da Chapada do Araripe.

Figura 25 - Interior do Túnel Veneza



Fonte: Gazeta do Cariri (2017).

Esse túnel apresenta 2.322,36 m de comprimento e seção transversal composta, ou seja, retangular na parte inferior e teto em arco. Foi escavado em duas frentes de serviço partindo de lados opostos, utilizando a metodologia NATM (G1 CE, 2017). E, assim como os outros túneis do CAC, seu sistema de drenagem consiste em drenos horizontais profundos (DHP) (RODRIGUES, 2016).

Um conceito criado no Estudo de Impacto Ambiental do CAC foi o de risco paleontológico, que consiste no nível da probabilidade de ocorrência de fósseis identificáveis a olho nu em função do tipo de formação geológica. A Serra da Mãozinha está localizada na formação geológica Santana, essa formação apresenta risco paleontológico alto, pois é parte constituinte de um dos mais importantes sítios paleontológicos do mundo, a Bacia Sedimentar do Araripe (VBA TECNOLOGIA E ENGENHARIA, 2012).

Observa-se a importância de desenvolver estudos nessa esfera, pois obras como o CAC interferem de forma profunda no ambiente em que estão se estabelecendo, e dentre muitos outros impactos, desenvolve atividades de escavação que inevitavelmente podem se deparar com achados paleontológicos importantes. Dessa forma, nem todo risco traz consigo algo necessariamente prejudicial, já que, por definição, nada mais é do que um efeito da incerteza nos objetivos, sendo esse efeito um desvio em relação ao esperado (ABNT NBR ISO 31000, 2018).

### *4.1.3 Eixão das Águas do Ceará*

Enquanto o CAC transporta as águas da Transposição do Rio São Francisco que chegam ao Açude Jati para o Açude Castanhão, o Eixão das águas é uma obra de infraestrutura hídrica que leva a água do Castanhão para a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) e o Complexo Industrial e Portuário do Pecém, ao norte do estado, beneficiando uma população de cerca de três milhões de habitantes (ADECE, 2014).

O projeto se inicia imediatamente a jusante da barragem do açude Castanhão, captando vazão diretamente da tubulação da tomada d'água do reservatório. O transporte é feito até o Açude Pacoti e daí até o reservatório Gavião, do qual foi prevista uma nova captação de onde partiria uma adução mista, ou seja, parte gravitativa e parte recalçada, até a ETA Oeste em Fortaleza. O percurso total do projeto é de aproximadamente 256 km (SRH, s.d.).

O Eixão das Águas integra-se a outros projetos de irrigação da margem esquerda do rio Jaguaribe e das zonas baixas do vale do rio Banabuiú. Na passagem pelo açude Curral Velho, se integra ao Projeto de Irrigação de Tabuleiro de Russas, atendendo parte das suas demandas hídricas e, após passagem pela Serra do Félix, a adução realiza by-pass com o açude Pacajús (SRH, s.d.).

A vazão máxima de dimensionamento do Eixão é de 22,0 m<sup>3</sup>/s e sua execução foi dividida em 5 trechos (SRH, s.d.). A Tabela 7 mostra uma síntese descritiva dos trechos, com seus respectivos subtrechos, pontos iniciais e finais, comprimentos e componentes principais.

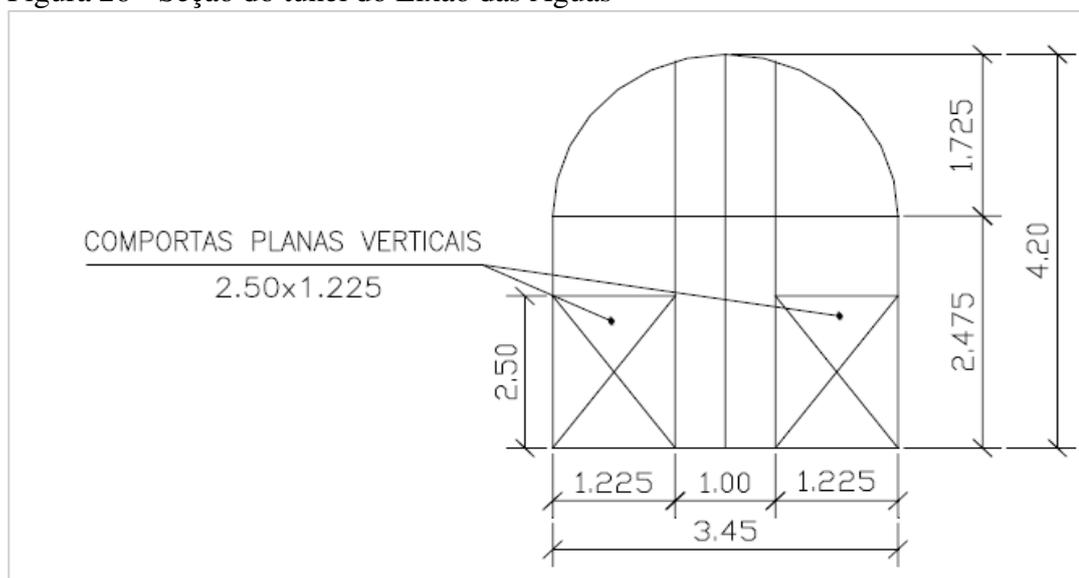
No subtrecho 4.3 pode-se observar a existência de um túnel escavado em rocha, construído para ampliar a capacidade do sistema de ligação entre os açudes Riachão e Gavião. O túnel possui cerca de 1.075 m de comprimento e foi executado paralelamente a um túnel já existente. O novo túnel apresenta uma seção transversal composta de 3,45 m de base por 4,20 m de altura, e foi construído em uma etapa, utilizando o Método NATM. É revestido em concreto e possui comportas tipo vagão em sua entrada para controle do fluxo hídrico, e sua vazão de dimensionamento foi de 15 m<sup>3</sup>/s. A Figura 26 mostra a seção do túnel projetado (SRH, s.d.).

Tabela 7 - Síntese descritiva do Eixão das Águas

| Trecho | Subtrechos | Descrição                            | Comprimento (km) | Componentes principais  |
|--------|------------|--------------------------------------|------------------|---|
| 1      | 1.3 e 1.4  | Açude Castanhão - Açude Curral Velho | 54,7             | Estação elevatória<br>Adutoras da estação elevatória<br>Canais Adutores<br>Adutoras de sifões |
| 2      | -          | Açude Curral Velho - Serra do Félix  | 45,9             | Canais Adutores<br>Adutoras de sifões   |
| 3      | -          | Serra do Félix - Açude Pacajús       | 56,3             | Canais Adutores<br>Adutoras de sifões   |
| 4      | 4.1        | Açude Pacajus- Açude Pacoti          | 27,5             | Aquedutos<br>Canais Adutores<br>Adutoras de sifões  |
|        | 4.2        | Açude Pacoti - Açude Riachão         | 0,8              | Canais Adutores   |
|        | 4.3        | Açude Riachão - Açude Gavião         | 5,6              | Túnel<br>Canais Adutores  |
| 5      | 1          | EEE1 - ETA                           | 18,8             | Adutoras  |
|        | 2          | EEE1 - reservatório apoiado          | 15,4             | Reservatórios   |
|        | 3          | -                                    | 20,9             | Estação elevatória  |

Fonte: Adaptada de Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (s.d.).

Figura 26 - Seção do túnel do Eixão das Águas



Fonte: SRH (s.d.).

Segundo a Secretaria de Recursos Hídricos (s.d.), nenhum estudo de sondagem geotécnica foi realizado ao longo do eixo do túnel, e a visualização da rocha foi possível apenas nas áreas do emboque e desemboque. Além disso, o corte do túnel, cuja rocha é granítica, foi realizado com auxílio de explosivos, e de acordo com o cronograma de execução das obras do Trecho 4 do Eixão das Águas, a execução do túnel escavado em rocha, juntamente com equipamentos hidromecânicos estava previsto para ter 120 dias de duração.

O emboque do túnel, ou seja, a entrada à montante, ocorre no prolongamento do canal do açude Riachão. Já o desemboque, a saída a jusante do túnel, realiza-se na região do canal de ligação do açude Gavião. Foi determinado na especificação de projeto que o desmonte da rocha com explosivos deveria ocorrer de forma que deveria respeitar os limites estabelecidos no projeto sem comprometer as condições geotécnicas do maciço, as estruturas de concreto e as edificações circundantes (SRH, s.d.).

Foi estabelecido também que deveriam ser realizados testes com pequenas cargas instantâneas de explosivos para a obtenção de parâmetros a serem utilizados no dimensionamento dos chamados planos de fogo, ou seja, como seriam postas em prática as explosões. Esses testes seriam fundamentais também para definir a equação preliminar de propagação das vibrações, a qual seria ajustada ao longo das escavações (SRH, s.d.).

Outra determinação consiste na sequência de escavação, onde deveria ser garantido que ocorresse a seco e as estruturas de concreto juntamente com as comportas e a proximidade de um túnel já existente em paralelo, deveriam condicionar os planos de fogo, bem como os avanços na escavação. Os primeiros 30 m de escavação deveriam ser executados com avanços curtos, iniciando-se com 1,60 m e passando-se a 2,40 m, podendo ser realizados avanços de 3,0 m após esses trechos considerados críticos (SRH, s.d.).

Com relação aos equipamentos de furação, seria preferível, segundo a SRH (s.d.), a utilização de equipamentos do tipo jumbo ou perfuratrizes manuais, com características para operarem em locais com espaço reduzido e que utilizem, exclusivamente, circulação de água para o expurgo dos furos realizados.

Após a detonação dos explosivos e eliminação dos respectivos gases do método, é importante também que fosse realizada a remoção de todos os fragmentos ou blocos de rochas que podem estar soltos na abóbada e nas paredes, é a chamada remoção do choco. Após esse processo seria então removido o entulho. Recomendou-se que fossem realizadas vistorias semanais nos trechos já escavados para que seja realizada essa remoção (SRH, s.d.).

É importante ressaltar que, com exceção dos trechos de emboque e desemboque do túnel, a abóbada e as paredes mais ao centro do túnel inicialmente não necessitariam de suportes

e conseqüentemente, de revestimento. Após estudos acerca do comportamento do maciço, que envolvem o mapeamento geológico, foi determinado que essa condição poderia ser requerida em alguns locais, sendo estão utilizados concreto projetado e tirantes (SRH, s.d.).

O atirantamento e a aplicação do concreto projetado com fibras deveriam ser executados após a retirada do entulho. A projeção do concreto deve ser realizada antes da instalação dos dutos de ar e água, rede de iluminação e detonação. Já os tirantes, segundo especificação do projeto, teriam ancoragem de resina e, através do mapeamento geotécnico, seriam determinados quais locais possuiriam possível queda de blocos soltos resultantes de intercessão de fraturas da rocha, contatos litológicos ou até mesmo eventuais caixas de fraturas (SRH, s.d.).

Foi determinado que os tirantes e chumbadores deveriam ser fabricados em barras de aço CA-50 redondo e encruado a frio, de alta resistência e carga de escoamento mínima de 50 km/mm<sup>2</sup>. Além disso, as roscas e os sistemas de ancoragem deveriam ser laminados, e os filetes e as placas de apoio deveriam ter espessura compatível com os esforços aplicados e de conformação, permitindo uma distribuição homogênea dos esforços (SRH, s.d.).

Os acessórios metálicos, dentre eles os tirantes, deveriam receber proteção anticorrosiva e o comprimento da ancoragem deveria ser de no mínimo 0,60 m, sendo um valor suscetível à alteração de acordo com os resultados do ensaio de arrancamento, após a definição de qual seria a aderência específica resina-rocha. Ademais, na ancoragem, deveriam ser empregadas cápsulas de resina de pega rápida até o completo preenchimento do furo de ancoragem (SRH, s.d.).

Decorrido o tempo de pega, seria então colocada a placa de apoio diretamente sobre a rocha, seguida da instalação da porca e do aperto, com um torque aplicado através de torquímetro calibrado ou equipamento pneumático. Nesse processo deveria se ter atenção a irregularidades no comportamento dos tirantes como *creep* visível, esmagamento da rosca, deformação excessiva da placa (SRH, s.d.).

A execução do concreto projetado deveria se dar após preparação da superfície da rocha com jato de água e ar comprimido, e todo o processo deveria seguir a Norma ACI 506-66 do *American Concrete Institute*. O concreto deveria ser composto por cimento Portland comum ou de pega rápida que obedecesse às Especificações EB-1 e EB-2 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), além de água, areia e brita com a possibilidade de uso de aditivos (SRH, s.d.).

Em determinados trechos do túnel foram colocados ser colocados drenos, que seriam executados inicialmente a partir da perfuração do trecho em questão, indo até a

profundidade máxima de 1 m. Após essa etapa, seria então introduzido um trecho de PVC até a metade do furo, com fixação e vedação desse tudo com argamassa de concreto, de tal modo que a água escoe pelo mesmo (SRH, s.d.).

Foi previsto também a opção pelo uso de injeção de preenchimento no emboque, mais especificamente nas regiões de contato entre o túnel e as estruturas de concreto, como também ao longo do túnel, em regiões onde fosse constatada a possibilidade de perda de água através de fraturas ou fendas na rocha (SRH, s.d.).

#### **4.1.4 Túneis da UHE Mauá**

A Usina Hidrelétrica Governador Jayme Canet Júnior, chamada anteriormente de Usina Hidrelétrica Mauá, como o próprio nome sugere, está localizada em Mauá, no Paraná. Possui potência instalada de 363 MW, uma energia capaz de atender ao consumo de cerca de um milhão de pessoas. Sua operação iniciou em 2012 e a barragem da Usina foi construída no rio Tibagi (CONSÓRCIO CRUZEIRO DO SUL, 2011)

Os dois túneis presentes na Usina foram a solução encontrada para desviar as águas do rio Tibagi, possibilitando a construção da barragem da usina. Estão localizados em uma região com forte presença de siltitos da Formação Rio Bonito, Grupo Guatá, que possuem composição mineralógica de grãos de quartzo, plagioclásio e mica branca juntamente com uma matriz siltico-argilosa. A conjuntura apresentada, juntamente com o processo diagenético heterogêneo tornam a rocha existente fortemente suscetível a alteração e ao intemperismo (ANDRIOLO *et al*, 2013).

Situados na margem direita da barragem, cada um dos túneis apresenta seção arco-retangular, com 72,3 m<sup>2</sup> de área, 9 m de diâmetro e 313 e 360 m de comprimento cada um. São formados pelas chamadas rochas brandas, ou de baixa resistência, que são materiais geológicos de características mecânicas deficitárias, com grau de erodibilidade alto. São materiais de transição entre solo e rocha e, portanto, representam um desafio para os processos tradicionais de construção de túneis (ANDRIOLO *et al*, 2013).

As escavações dos túneis foram inicialmente executadas em siltitos, uma rocha classificada como sedimentar, e ao final, inteiramente em diabásios, uma rocha magmática. Segundo Andriolo (2013), foi observado no contato entre essas duas litologias um ganho na qualidade mecânica da rocha branda, atribuído ao calor provocado pela intrusão ígnea. As rochas sedimentares são mais suscetíveis ao intemperismo e à erosão, além de possuírem menores resistências mecânicas quando comparadas às rochas ígneas.

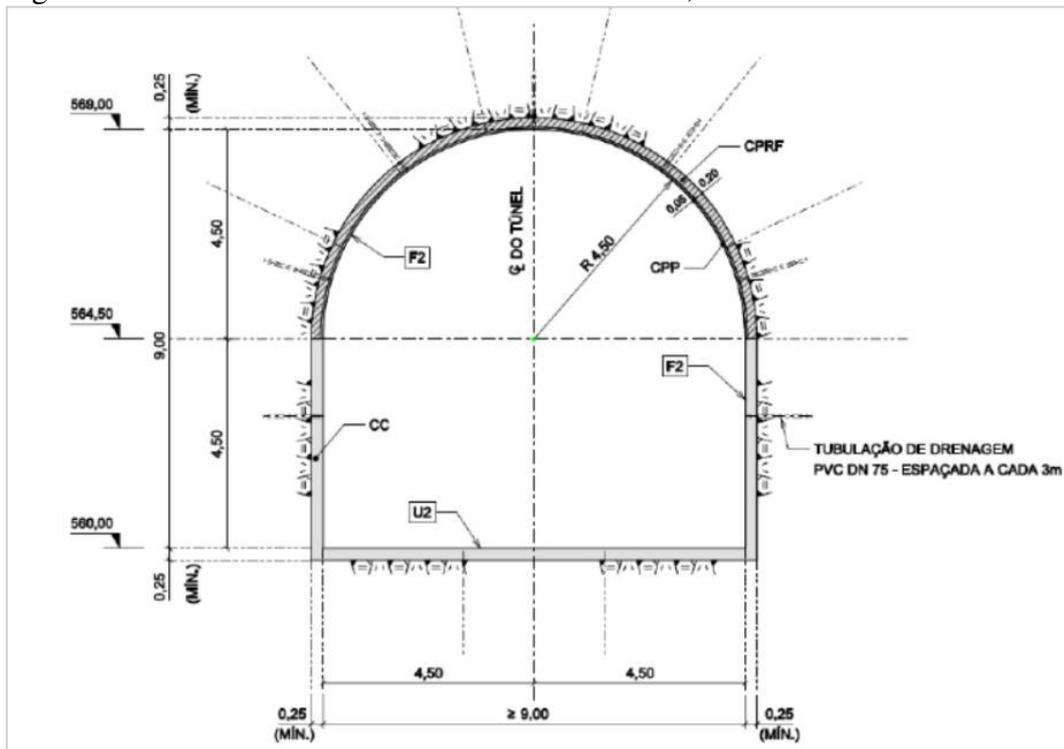
Quanto ao projeto executivo, a concepção inicial previa paredes de 25 cm de espessura, compostas por concreto convencional armado com tela e fck de 20 MPa no trecho vertical. Já no teto dos túneis, previu-se 20 cm de espessura com tratamento composto por concreto projetado reforçado com fibra de aço e 5 cm de concreto projetado sem fibra, além de chumbadores com 3 metros de comprimento espaçados em 3 m e drenos a cada 3 m (ANDRIOLO *et al*, 2013).

Porém, o uso de concreto convencional apresentou dificuldades de implementação devido a colocação de formas na extensão total do túnel, acarretando também em custos elevados e prolongamento do tempo de execução da obra. Portanto, substituiu-se o uso do concreto convencional nas paredes por concreto projetado reforçado com fibra de aço, tela metálica e chumbadores, com as mesmas especificações de espaçamento e uso de drenos utilizadas na abóboda. Com a adoção do concreto projetado foi possível reduzir o tempo de execução dos tratamentos e gerar economia, pois o concreto projetado contorna as saliências das rochas mantendo a espessura controlada, enquanto o concreto convencional preenche todas as reentrâncias, aumentando o volume de concreto utilizado (ANDRIOLO *et al*, 2013).

Já os contatos silito-diabásio mapeados estavam situados no piso dos túneis. O tratamento em concreto projetado foi executado até que o contato estivesse situado 2 m abaixo do piso do túnel de desvio. Na região de tomada do túnel, o revestimento foi executado em concreto convencional, permanecendo o restante sem revestimento (ANDRIOLO *et al*, 2013).

A Figura 27 mostra o tratamento previsto do túnel de desvio do trecho em silito.

Figura 27 – Tratamento executivo do túnel de desvio, no trecho em siltito



Fonte: VLB Engenharia (2007) apud Andriolo *et al.* (2013).

A construção dos túneis se deu em cerca de 6 meses, através do Método *Drilling and Blasting* (Perfuração e Desmonte) que faz parte da metodologia NATM e consiste na tunelagem em rocha, com o uso de explosivos, normalmente aplicado em regiões com instabilidades. Caracteriza-se essencialmente por ciclos de perfuração da rocha, preenchimentos dos furos executados com explosivos e tratamentos eventuais do maciço, além de execução do suporte tipicamente em concreto projetado com auxílio de chumbadores, sistemas de ancoragem ou cambotas metálicas (TRAVAGIN, 2012). A Figura 28 mostra o aspecto final do tratamento em um dos túneis de desvio, anteriormente ao início da operação.

Figura 28 - Aspecto final do tratamento no túnel da UHE Mauá



Fonte: Andriolo *et al.* (2013).

## 4.2 Acidentes ocorridos em túneis

Este tópico apresenta os resultados do levantamento acerca dos casos de acidentes ocorridos em túneis. Ressalta-se que, apesar do *checklist* produzido ser voltado para túneis em operação, também serão expostos incidentes ocorridos em túneis ainda na fase de execução, a fim de se ter um conhecimento amplo sobre os riscos a que esse tipo de estrutura pode estar exposta.

### 4.2.1 Túnel do Tibaú

Uma das ocorrências mais recentes se deu no Túnel do Tibaú, que consiste em uma ligação entre o mar e a Lagoa de Piratinga, na cidade de Niterói (RJ). Em janeiro de 2021, mais de 220 m<sup>3</sup> de rocha desabaram no Túnel, mais especificamente na galeria principal, devido às fortes chuvas na região (Figura 29). Houve até uma tentativa de contenção realizada pela prefeitura em 2019, mas não foi efetiva na solução do problema (Figura 30). Dessa forma, após o desabamento, foram então realizados trabalhos de monitoramento e estudos topográficos para elaboração de relatório de proposição de estabilidade juntamente com planilha orçamentária (O FLUMINENSE, 2021).

Figura 29 - Desabamento ocorrido em janeiro de 2021



Fonte: Sodré (2021).

Figura 30 - Intervenção da prefeitura ocorrida em 2019



Fonte: Neves (2020).

O incidente ocorreu meses depois de a Prefeitura ter iniciado uma obra na área que teria o objetivo de desobstruir a passagem e reforçar a estrutura após outro desabamento ocorrido dois anos antes (O FLUMINENSE, 2021). A empresa contratada pela prefeitura para fazer a desobstrução após o desabamento ocorrido em 2021 afirmou que as condições do tempo e possíveis novos desabamentos impediam o trabalho, representando um elevado risco de acidentes para os trabalhadores que viessem atuar diretamente na área (SODRÉ, 2021).

A obstrução do túnel pelos blocos de rocha provenientes do desabamento tem como consequência o impedimento da passagem de água do mar para a lagoa, provocando o aumento da temperatura na lagoa e a mortandade de peixes (MORAIS, 2021)

#### 4.2.2 Vicente Pires

Em dezembro de 2020, três operários se acidentaram durante a remoção de rochas do local escavado para a construção das galerias de águas pluviais, na Rua 8 do Setor Habitacional Vicente Pires, no Distrito Federal. Segundo informações, um dos funcionários estava trabalhando na fragmentação de rochas utilizando um equipamento chamado martelete. A vibração e o aquecimento provocados por essa ferramenta podem ter sido as causas da explosão (SODF, 2020). Na Figura 31 pode-se observar o resgate do trabalhador pelo corpo de bombeiros da região.

Figura 31 - Bombeiros fazendo o resgate do trabalhador



Fonte: Meneses (2020).

O túnel estava sendo escavado através do método *Tunnel Liner*, que consiste em um método de construção não destrutivo, ou seja, não é necessário abrir longas valas ou interromper o tráfego, sendo utilizado costumeiramente para a construção de galerias de águas pluviais, dentre outros tipos de obras. A execução desse método se dá através de chapas de aço corrugado para revestir e sustentar permanentemente a escavação, permitindo escavar com avanços sucessivos correspondentes à largura das chapas. (SODF, 2020).

### **4.2.3 Projeto Sanegran**

Em 1982, a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) executava a maior obra de saneamento de São Paulo, o projeto Sanegran. A escavação era realizada através do *New Austrian Tunneling Method* (NATM), que exige mão de obra intensiva. Os operários utilizavam explosivos para avançar nas escavações em Barueri, na Grande São Paulo, onde o emboque do túnel apresentava seis metros de diâmetro, até que se depararam com a existência do fundo de um lago acima do trajeto do túnel (AGÊNCIA ESTADO, 2007).

O lago estava localizado próximo à margem esquerda do Rio Tietê e o mapa da região, produzido para a realização da obra, não apontava a presença de água no local. A utilização dos explosivos fez com que o túnel inundasse de forma repentina, resultando na morte de 9 trabalhadores (AGÊNCIA ESTADO, 2007).

Segundo Kochen (2007) citado por Agência Estado (2007), em 40% dos casos de rupturas e colapsos em túneis, os desastres aconteceram devido a imprevistos geológicos. Destaca ainda que a maior lacuna no conhecimento atual da engenharia de túneis consiste em determinar a probabilidade ou risco de uma determinada anomalia geológica ocorrer. Este tipo de falha ocorre quando os responsáveis pelo projeto, construção e supervisão não previram deficiências no método construtivo em uso, para as condições de solo efetivamente encontradas.

### **4.2.4 Cuncas I**

O Túnel Cuncas I, já apresentado anteriormente, também passou por ocorrências. Em abril de 2011, durante a construção do túnel, após um alerta sonoro, os operários deixaram o local. Em seguida a estrutura sofreu um desabamento parcial e após o ocorrido foram tomadas medidas de preenchimento do solo na região afetada (O TEMPO, 2013). Foi informado que os trabalhadores ouviram um barulho, saíram correndo de dentro do túnel e, minutos depois, um bloco de pedras desabou em cima de algumas máquinas (DIÁRIO DO NORDESTE, 2011).

Em nota, a assessoria de comunicação do Ministério da Integração Nacional informou que o deslizamento ocorrido na entrada do túnel aconteceu devido à consistência não uniforme do solo encontrado no local. Advertiu-se também que, nas escavações de túneis em solo podem ocorrer imprevistos geológicos que induzem a ruptura de teto e, conseqüentemente, no desprendimento de terra (DIÁRIO DO NORDESTE, 2011).

#### 4.2.5 Túnel da Linha 4 do Metrô de São Paulo

É importante ressaltar a ocorrência de acidentes em outros tipos de túneis, além daqueles com a função de transferência hídrica, alguns com graves consequências. Um dos mais relevantes ocorridos no Brasil se deu em 12 de janeiro de 2007 na Linha 4 do Metrô de São Paulo, com 7 vítimas fatais, onde o túnel desabou e abriu uma cratera que engoliu equipamentos, veículos e até residências, conforme pode ser observado na Figura 32 (CRUZ, 2017).

Figura 32 - Cratera aberta devido ao desabamento do túnel.



Fonte: Mobilize Brasil (2012).

O gerente da construção afirmou que no dia anterior ao acidente ocorreu uma aceleração no rebaixamento do teto do túnel e que após os engenheiros avaliarem a situação, funcionários da obra prepararam a colocação de barras de suporte, mas não foi possível concluir o serviço até o momento do ocorrido. Ainda segundo outro funcionário da obra, na noite anterior ao acidente, o túnel apresentou rachaduras, que foram cobertas com concreto (AGÊNCIA BRASIL, 2017).

A causa indicada para o desabamento, segundo as testemunhas e o laudo técnico apresentado no julgamento ocorrido em 2016, foi a existência de rochas de material menos resistente alojadas abaixo de outras mais firmes, um fator que impediu que fossem descobertas e, portanto, impossibilitou um eventual ajuste no projeto (CONJUR, 2016).

### 4.3 Checklists de inspeção em túneis

Tratando-se agora do uso de *checklists* para túneis, Pires *et al* (2016) apresenta uma proposta de otimização dos processos de inspeção em monitoramento para túneis escavados em rocha, que consiste em um *checklist* automatizado com auxílio da ferramenta *Excel* onde foram considerados parâmetros de risco para túneis revestidos e não revestidos (Figura 33), sendo atribuídos pesos a cada um desses parâmetros. Portanto, quanto maior a gravidade, maior o peso da anomalia. O mesmo procedimento foi realizado para a frequência das manifestações patológicas.

Figura 33 - Parâmetros de risco para *checklist* de inspeção em túneis

| <b>Túneis Revestidos</b>                   | <b>Túneis Não Revestidos</b> |
|--|------------------------------|
| Fratura                                    | Fissura                      |
| Choco                                      | Desplacamento                |
| Deformações                                |                              |
| Flecha                                     |                              |
| Infiltração                                |                              |
| Percolação D'Água                          |                              |
| Problemas de Drenagem                      |                              |
| Presença de Fungos e Outros Microrganismos |                              |
| Estalactites                               | Eflorescências               |
| Integridade do Sistema de Ventilação       |                              |
| Integridade da Instalação Elétrica         |                              |

Fonte: Pires *et al.* (2016).

Inicia-se o preenchimento do *checklist* com a classe do maciço, obtida através do método de Bienawski (1973). Na sequência, deve-se identificar as anomalias presentes como fraturas, choco, flechas, problemas de drenagem e percolação de água. Existindo a anomalia, prossegue-se para a informação acerca de sua frequência (baixa, média e alta) e sua gravidade. Com relação à esta última, o termo de atribuição da gravidade pode variar de acordo com a manifestação patológica. Para fraturas, por exemplo, escolhe-se entre os termos “maciço”, “bloco”, “irregular” e “britado” (PIRES *et al*, 2016).

O produto final gerado consiste em uma matriz de risco que sinalizará a necessidade manutenção de acordo com os pesos atribuídos para cada aspecto. Na Figura 34 pode-se observar a estrutura do *checklist* apresentado, juntamente com a matriz de risco, cujas cores representam que tipo de manutenção se enquadra em cada anomalia presente: verde para

manutenção preventiva, amarelo para manutenção corretiva e vermelho para manutenção emergencial (PIRES *et al.* 2016).

Figura 34 - Trecho do *checklist* de inspeção em túneis

**Check List de Inspeção**

| 1. Identificação |                                      |
|------------------|--------------------------------------|
| 1.1              | Trecho                               |
| 1.2              | Subtrecho                            |
| 1.3              | Quilômetro                           |
| 1.4              | Denominação                          |
| 1.5              | Data da Inspeção                     |
| 1.6              | Engenheiro Responsável pela Inspeção |

| 2. Informações Gerais |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| 2.1                   | Projetista                |
| 2.2                   | Construtora               |
| 2.3                   | Data de Conclusão da Obra |
| 2.4                   | Método Construtivo        |

| 3. Características da Obra |                            |
|----------------------------|----------------------------|
| 3.1                        | Comprimento Total (metros) |
| 3.2                        | Largura (metros)           |
| 3.3                        | Traçado em Planta          |
| 3.4                        | Altura (metros)            |
| 3.5                        | Profundidade (metros)      |

| 4. Superestrutura |  |
|-------------------|--|
| 4.1               | Classificação do Maciço                      |
| 4.2               | Revestido                                    |
| 4.3               | Fratuza                                      |
| 4.4               | Choco  |
| 4.5               | Deformações                                  |
| 4.6               | Flecha                                       |
| 4.7               | Infiltração                                  |
| 4.8               | Percolação D'água                            |
| 4.9               | Problemas de Drenagem                        |
| 4.10              | Presença de Fungos ou Outros Microorganismos |
| 4.11              | Estalactites                                 |
| 4.12              | Integridade do Sistema de Ventilação         |
| 4.13              | Integridade da Instalação Elétrica           |

| Classe I - Maciço  |       | Frequência |                | Gravidade |  |
|--|-------|------------|----------------|-----------|--|
| Sim <input type="radio"/> Não <input checked="" type="radio"/> |       |            |                |           |  |
| <input checked="" type="checkbox"/>                            | ALTO  | ALTO       | Maciço         |           |  |
| <input checked="" type="checkbox"/>                            | ALTO  | ALTO       | Blocos         |           |  |
| <input checked="" type="checkbox"/>                            | BAIXO | BAIXO      | Anomalia Grave |           |  |
| <input checked="" type="checkbox"/>                            | ALTO  | ALTO       | Alteração Geom |           |  |
| <input checked="" type="checkbox"/>                            | BAIXO | BAIXO      | Sem Comprome   |           |  |
| <input checked="" type="checkbox"/>                            | BAIXO | BAIXO      | Anomalia Grave |           |  |
| <input checked="" type="checkbox"/>                            | BAIXO | BAIXO      | Falhas na Bomb |           |  |
| <input checked="" type="checkbox"/>                            | BAIXO | BAIXO      | Sem Comprome   |           |  |
| <input checked="" type="checkbox"/>                            | BAIXO | BAIXO      | Anomalia Grave |           |  |
| <input checked="" type="checkbox"/>                            | BAIXO | BAIXO      | Semi Forçada   |           |  |
| <input checked="" type="checkbox"/>                            | ALTO  | ALTO       | Ventilação     |           |  |

| Baixo | Médio   | Alto     | Matriz de Risco |
|-------|---------|----------|-----------------|
| Verde |         |          |                 |
|       | Amarelo |          |                 |
|       |         | Vermelho |                 |
| Verde |         |          |                 |
|       | Amarelo |          |                 |
| Verde |         |          |                 |
|       | Amarelo |          |                 |
| Verde |         |          |                 |
|       |         | Vermelho |                 |

Fonte: Pires *et al.* (2016).

Ao final da inspeção em campo, o profissional vai obter a situação geral do túnel, sendo possível identificar se a estrutura necessita de manutenção ou não. Ressalta-se que por ser uma ferramenta digital, é possível confeccionar um banco de dados com históricos anteriores da situação do túnel, acompanhando a evolução das manifestações patológicas presentes (PIRES *et al.* 2016).

#### 4.4 Proposta de *Checklist* para túneis de transferência hídrica

Apresenta-se no Apêndice A a proposta de *checklist* para inspeção em túneis de transferência hídrica, que teve como base a estrutura dos *checklists* desenvolvidos pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) para estruturas hídricas como canais, aquedutos, sifões e estações de bombeamento. Observa-se que foi utilizado também a mesma

metodologia dos *checklists* para barragens proposto pela Agência Nacional de Águas (ANA) de classificação das metodologias identificadas.

O *checklist* é composto por 9 seções, a saber: (a) Identificação; (b) Legenda dos atributos; (c) Infraestrutura; (d) Revestimento do túnel; (e) Água; (f) Sistema de drenagem (g) Instrumentação; (h) Segurança no trabalho e (i) Problema adversos.

Na seção (a) Identificação, é necessário preencher as informações gerais dos túneis, com o nome do túnel inspecionado, o trecho, o subtrecho e o quilômetro correspondentes. Então deve ser preenchida a data de realização e o responsável técnico pela inspeção. Após essa etapa, o *checklist* contém uma seção (b. legenda dos atributos) dedicada à legenda dos atributos relacionados com a situação das anomalias, sua magnitude e o nível de perigo de cada uma, de forma semelhante à apresentada na Figura 12.

Segue-se então para as anomalias referentes à infraestrutura do entorno do túnel (seção c. Infraestrutura), iniciando com a anomalia referente à falta de documentação (livro de ocorrência, manuais e fichas de operação e manutenção), e seguindo para a falta de material para manutenção/operação básica, falta de treinamento operacional pessoal, precariedade de acesso de veículos ao túnel, sistema de comunicação deficiente e abordando questões como o desmatamento irregular nas faixas de domínio da estrutura, presença de animais pastando, ocupação social irregular e ausência de placas de aviso no entorno.

Em seguida, na seção (d) Revestimento do túnel, o *checklist* apresenta anomalias possíveis no revestimento do túnel, citando deslocamento, trincas, fissuras e rachaduras, presença de infiltrações, ferrugem exposta, deformações, presença de fungos e outros micro-organismos, eflorescências, presença de choco e deficiência no recobrimento das juntas.

Como o *checklist* se aplica para túneis de transferência hídrica, é importante que seja abordada a questão da qualidade da água que está passando pela estrutura. Dessa forma, foi inserida a seção (e) Água, dedicada apenas a esse tema, onde devem ser verificadas a presença de macrófitas, objetos estranhos e animais mortos no corpo hídrico, além da existência de odor ou coloração inapropriada na água, existência de captação de água não registrada ou em desconformidade, assoreamento, despejo de resíduos não registrado e turbidez da água.

Ainda na questão da água, parte-se para a seção (f) Sistema de drenagem, trazendo anomalias como a obstrução dos drenos, existência de vazamentos excessivos, juntas com vazamentos e falhas na proteção anticorrosiva.

Como ressaltado anteriormente, a instrumentação é uma parte importante para o monitoramento do túnel e, portanto, devem ser constantemente vistoriadas para garantir o bom funcionamento e a confiabilidade dos resultados apresentados. Dessa forma, inseriu-se no

*checklist* a seção (g) Instrumentação, dedicada apenas à verificação dos instrumentos que podem estar presentes na estrutura, apresentando anomalias como equipamentos danificados, furto de equipamentos, equipamentos desprotegidos, ausência de limpeza dos instrumentos, acúmulo de água ou presença de vegetação em seu entorno, má conservação das placas de identificação, descalibração dos equipamentos, presença de animais ou lixo ao seu redor, além da ocorrência de fita métrica danificada e sensores sem funcionamento.

A penúltima seção do *checklist* é dedicada à segurança no trabalho (seção h), já que mesmo após a construção, podem existir operadores no túnel, então são abordadas anomalias como a falta de treinamento de operadores, falta de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) e Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC), extintores vencidos, sinalização vertical/horizontal deficiente, falta de uniforme para os operadores, problemas com risco de choque elétrico, dentre outros.

Para cada uma das anomalias foram disponibilizados espaços para marcação dos atributos e orienta-se que caso seja observado um problema adverso ao que está apresentado no *checklist*, ele deve ser descrito na seção (i) Problemas adversos, ao final do documento. No Apêndice A é apresentado o modelo de *checklist* para utilização em inspeções em túneis de transferência hídrica.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho pretendeu desenvolver um *checklist* para inspeção em túneis de transferência hídrica a partir de uma pesquisa bibliográfica realizada predominantemente de forma online, consultando notícias, trabalhos acadêmicos, periódicos e livros.

Para a confecção do *checklist*, definiu-se quatro objetivos específicos. O primeiro consistiu no levantamento bibliográfico acerca de túneis no Brasil, priorizando aqueles que estão presentes na região Nordeste e, mais precisamente, no estado do Ceará, local que possui diversas obras de infraestrutura hídrica. Abordou-se as questões históricas, de projeto e execução, além das condições geotécnicas e estruturais das estruturas. Verificou-se que o maior túnel de transferência hídrica da América Latina se encontra no nordeste brasileiro, o Cuncas I.

Além disso, a seção em arco-retângulo predomina entre os túneis estudados. Percebeu-se a utilização do método de execução NATM nos túneis da região Nordeste, uma metodologia que acompanha as variações de tensão e deformações do maciço e segue um passo a passo de execução. Observa-se também a utilização recorrente de tirantes, enfilagens, cambotas metálicas e chumbadores, além do revestimento em concreto projetado, que foi reforçado com fibras e telas metálicas em algumas estruturas.

Em seguida, realizou-se um outro levantamento bibliográfico, mas voltado para os casos de acidentes em túneis, dos pontos de vista nacional e regional. A partir das informações obtidas, foi possível observar que ocorreram incidentes de variadas magnitudes, sendo alguns deles com vítimas fatais. Consta-se que no Túnel do Tibaú e no túnel da Linha 4 do metrô de São Paulo foram adotadas medidas paliativas que não se mostraram suficientes para garantir a segurança da estrutura.

No caso do túnel do metrô, teve-se como resultado um acidente de expressiva proporção, com vítimas fatais e danos materiais sérios. Mas as consequências podem se estender também para impactos ambientais, como foi observado na situação do Túnel do Tibaú, já que a sua obstrução provocou o aquecimento de um corpo hídrico e a mortandade de peixes na região.

Em Vicente Pires percebeu-se que a utilização de determinados equipamentos pode se mostrar inapropriada em alguns tipos de escavação, trazendo até mesmo questões como a importância da consciência acerca da segurança no trabalho, sendo fundamental a utilização de equipamentos apropriados pelos trabalhadores, a vigilância e o acompanhamento das atividades realizadas por profissionais capacitados.

Ainda dentro dessa questão, ressalta-se a relevância do uso da aparelhagem de alerta nesse tipo de obra, visto no incidente ocorrido no túnel Cuncas I, onde o alarme sonoro avisou os trabalhadores alocados nas escavações de que algo crítico estava acontecendo, todos se encaminharam para fora do túnel e não ocorreram vítimas graves nesse incidente.

No entanto, o desconhecimento provocado pela ausência de informações de qualidade para basear o projeto e a execução desse tipo de estrutura, infelizmente, demonstra-se algo comum a vários dos casos apresentados. Ao analisar o incidente do Projeto Sanegran, essa realidade fica bastante evidente, pois segundo o que se apurou, a inundação ocorreu devido a um mapa que não mostrava a existência de um lago acima de um trecho do trajeto do túnel e a inundação repentina provocada pelo uso de explosivos nas escavações tirou a vida de 9 pessoas.

Os modelos de *checklists* encontrados foram importantes para o conhecimento acerca da estrutura desse tipo de documento, as informações básicas para a identificação do trecho inspecionado e, assim como todas as revisões bibliográficas, também contribuíram para a coleta de informações sobre possíveis manifestações patológicas que se aplicavam aos túneis e poderiam ser inseridas no *checklist* em produção.

No *checklist* resultante do desenvolvimento desse trabalho, levou-se em consideração todas as informações apuradas durante as revisões bibliográficas e na análise de modelos existentes desse tipo de documento. O estudo dessas informações foi realizado de forma que fossem extraídos pontos críticos que deveriam ser verificados pelo profissional em campo durante as inspeções.

Evidencia-se que o *checklist* proposto não se limita a apenas informar a existência ou não da manifestação patológica, mas também é solicitado que o profissional classifique as anomalias de acordo com a sua situação, sua magnitude e seu nível de perigo. Tem-se aí um documento robusto que permite uma análise crítica dos problemas em campo.

A divisão do *checklist* em seções mostrou-se uma forte aliada na busca por um documento abrangente, que atenda ao maior número possível de aspectos que cercam a estrutura. Além disso, destaca-se o segmento do documento que se dedica à instrumentação do túnel, reiterando a importância da manutenção desses equipamentos para o preciso monitoramento da estrutura em todas as fases de sua vida útil.

Sendo assim, ressalta-se novamente que a aplicação dessa ferramenta consiste em um auxílio para a determinação do estado da estrutura, além do fato de que deve ser preenchida por profissionais qualificados, que avaliem de forma consistente a existência das manifestações patológicas indicadas no documento, seus respectivos graus de magnitude e perigo e analisem a evolução ou involução as anomalias.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

a) Acredita-se que, para pesquisas futuras, o *checklist* seja aperfeiçoado de forma que também possa se conectar a uma matriz de risco, ou até mesmo a uma matriz GUT (Gravidade, Urgência e Tendência). Desse modo, seria uma ferramenta cada vez mais poderosa de avaliação dos riscos, participando também da hierarquização das anomalias;

b) Também é considerado importante como tema para estudos mais aprofundados a aplicação do *checklist* desenvolvido neste trabalho em um túnel de transferência hídrica, visto que poderia ser realizada uma avaliação de sua eficácia em um caso real e a possível necessidade de adequações.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA ESTADO. Solo é responsável por 40% das rupturas em túneis de SP. **Estadão**, 2007. Disponível em: <https://brasil.estadao.com.br/noticias/geral,solo-e-responsavel-por-40-das-rupturas-em-tuneis-de-sp,20070121p15320>. Acesso em: 15 set. 2021.

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

ÁGUA METEÓRICA. *In*: GLOSSÁRIO Geológico Dinâmico Ilustrado. Brasília: Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos, 2001. Disponível em: [http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/agua\\_meteorica.htm](http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/agua_meteorica.htm). Acesso em: 11 jan. 2022.

ANDRIOLO, M. V. *et Al.* Revestimento com concreto projetado em túneis de rocha branda – o exemplo da UHE Mauá. XXIX Seminário Nacional de Grandes Barragens, Comitê Brasileiro de Barragens, Porto de Galinhas: Pernambuco, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 31000**: Gestão de riscos – Diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

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

BNDES. PISF: Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional. **BNDES**, [200-]. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/transparencia/desestatizacao/processos-em-andamento/pisf>. Acesso em: 8 out. 2021.

BRANCO, O. E. de A. **Avaliação da disponibilidade hídrica: conceitos e aplicabilidade**. Juiz de Fora, 2012. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/engsanitariaeambiental//files/2012/04/Disponibilidade-H%c3%addrica.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Projeto de Integração do Rio São Francisco. **Ministério do Desenvolvimento Regional**, [201-]. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/projeto-sao-francisco>. Acesso em: 11 jan. 2022.

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. 2022.

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](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm). Acesso em: 1 out. 2021.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Semiárido Brasileiro**. [201-] Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/rede-mcti/insa/semiario-brasileiro>. Acesso em: 21 jan. 2022.

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. 2021.

BRASIL. **Resolução nº 742, de 17 de outubro de 2011**. Estabelece a periodicidade, qualificação da equipe responsável, conteúdo mínimo e nível de detalhamento das inspeções de segurança regulares de barragem, conforme art. 9º da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010. Brasília. Agência Nacional de Águas, [2011]. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2011/742-2011.pdf>. Acesso em: 1 out. 2021.

CARIRI LIGADO. Maior túnel da Transposição está 94,4% pronto entre Paraíba e Ceará. **Cariri Ligado**, 2014. Disponível em: <https://www.caririligado.com.br/maior-tunel-de-transposicao-esta-944-pronto-entre-paraiba-e-ceara/>. Acesso em: 10 out. 2021.

CARREIRA, W. **Análise dos deslocamentos do maciço, em túnel executado pelo Método NATM**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-26082015-165940/publico/Dissertacao\\_WILLIANCARREIRA.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-26082015-165940/publico/Dissertacao_WILLIANCARREIRA.pdf). Acesso em: 21 set. 2021.

CASTRO, B. A. O poder do *checklist*. **Zeev**, c2021. Disponível em: <https://blog.zeev.it/checklist/>. Acesso em: 16 jun. 2021.

CEARÁ. COGERH investiu 22,6 milhões em Infraestrutura Hídrica em 2021. **Ceará**, 2021. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2021/12/29/cogerh-investiu-226-milhoes-em-infraestrutura-hidrica-em-2021/>. Acesso em: 23 jan. 2022.

CID, D. C. **Impactos das mudanças de clima na alocação de água na Bacia Estendida do São Francisco: demandas**. Salvador, 2016. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/11730727/>. Acesso em: 27 nov. 2021.

COELHO, A. M. **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. 2021.

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

CONSÓRCIO CRUZEIRO DO SUL. **A Usina**. c2011. Disponível em: <http://www.consorciocruzeirodosul.com.br/a-usina>. Acesso em: 17 set. 2021.

CONSULTOR JURÍDICO. Desabamento em obra do metrô de São Paulo era imprevisível, diz juíza. **Conjur**, 2016. Disponível em: <https://www.conjur.com.br/2016-out-18/desabamento-obra-metro-sp-imprevisivel-juiza>. Acesso em: 24 set. 2021.

COSTA, Raimundo Nonato Távora. **Sifões**. Notas de aula da disciplina de hidráulica aplicada do curso de graduação em engenharia civil da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006. Disponível em: <http://www.gpeas.ufc.br/disc/sifoes.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2022.

CRISPIM, M. A nova vida de assentados da Transposição do São Francisco. **Eco Nordeste**, 2018. Disponível em: <https://agenciaeconordeste.com.br/a-nova-vida-de-assentados-da-transposicao-do-sao-francisco/>. Acesso em: 20 out. 2021.

CRUZ, E. P. Passados 10 anos, ninguém foi condenado por acidente no Metrô de São Paulo. **Agência Brasil**, 2017. Disponível em: [https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2017-01/passados-10-anos-ninguem-foi-condenado-por-acidente-no-metro-de-sao-paulo#:~:text=O%20acidente%20ocorreu%20por%20volta,em%20que%20ele%20se%20encontrava](https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2017-01/passados-10-anos-ninguem-foi-condenado-por-acidente-no-metro-de-sao-paulo#:~:text=O%20acidente%20ocorreu%20por%20volta,em%20que%20ele%20se%20encontrava.). Acesso em: 23 set. 2021.

DEMENSTSHUK, M. A Transposição, um projeto dos tempos do Império. **A Pública**, 2014. Disponível em: <https://apublica.org/2014/02/transposicao-um-projeto-dos-tempos-imperio/>. Acesso em: 8 out. 2021.

DIÁRIO DO NORDESTE. Obra de túnel entre CE e PB desaba. **Diário do Nordeste**, 2011. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/regiao/obra-de-tunel-entre-ce-e-pb-desaba-1.313597>. Acesso em: 17 set. 2021.

DICELLI, G. A premência pela Água: o Cinturão que vai trazer o São Francisco. **O Povo**, 2019. Disponível em: <https://especiais.opovo.com.br/cinturaodasaguas/>. Acesso em: 19 jul. 2021.

EQUIPE começou a desobstrução do túnel Tibau (...) [Niterói], 15 set. 2020. Twitter: @RodrigoNeves\_. Disponível em: [https://twitter.com/\\_rodrigoneves\\_/status/1305973650349326339](https://twitter.com/_rodrigoneves_/status/1305973650349326339). Acesso em: 20 set. 2021.

ENGENHARIA COMPARTILHADA. **Transposição na PB avançam e maior túnel da América é perfurado**. 2014. Disponível em: [https://engenhariacompartilhada.com.br/Noticia/Exibir/605059\\_transposicao-na-pb-avancam-e-maior-tunel-da-america-e-perfurado](https://engenhariacompartilhada.com.br/Noticia/Exibir/605059_transposicao-na-pb-avancam-e-maior-tunel-da-america-e-perfurado). Acesso em: 15 fev. 2022.

EPOS. **Concepção/Construção do Túnel de Mato Forte, no Sublânço Bucelas/Arruda dos Vinhos, da A 10 – Auto-Estrada Bucelas/Carregado/IC 3**. 2002. Disponível em: <https://www.epos.pt/portfolio/instrumentacao-no-tunel-do-mato-forte/>. Acesso em: 24 set. 2021.

ESTANQUEIRO, L. de A.; SALVI, L. **Análise do processo de escavação de túneis pela ótica do New Austrian Tunneling Method – NATM**. Núcleo do Conhecimento, 2020. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/escavacao-de-tuneis>. Acesso em: 8 out. 2021.

FERREIRA, L. de A. **Análise da instrumentação do Túnel Milagres, obra integrante da Transposição do Rio São Francisco**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/48468/48468.PDF>. Acesso em: 24 set. 2021.

FREITAS, E de. Processo de povoamento brasileiro. **Brasil Escola**, [201-]. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/brasil/o-processo-povoamento-brasileiro.htm>. Acesso em: 11 jan. 2022.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas; aplicações na estabilidade de taludes**. Ed. UFPR, 2009. 2 ed. 604 p.

G1 CE. Maior túnel do Cinturão das Águas é concluído no Cariri. **G1**, 2017. Disponível em: <https://g1.globo.com/ceara/noticia/maior-tunel-do-cinturao-das-aguas-e-concluido-no-cariri.ghtml>. Acesso em: 30 jul. 2021.

GAMA, C. S. **Uso do checklist de cirurgia segura da organização mundial da saúde como estratégia de redução de complicações e mortalidade em cirurgias colorretais: uma análise de duas realidades, Brasil x Canadá**. 2019. Dissertação (Mestrado em Enfermagem) – Escola de Enfermagem, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/31465/1/VERS%c3%83O%20FINAL%20DISSERTA%c3%87%c3%83O-BRENO-SANTOS-DE-ARA%c3%9aJO.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2021.

GOMES, D. (2012). **Gestão de Riscos na Construção de Túneis e Obras Subterrâneas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/2095/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 28 set. 2021.

HASHI, H. H. **Diretrizes para auditoria em projetos de obras de construção de túneis rodoviários**. 2018. Monografia (Especialização em Auditoria de Obras Públicas Rodoviárias) – Instituto Serzedello Corrêa, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2018. Disponível em: [https://bdm.unb.br/bitstream/10483/21126/1/2018\\_MarcosHiraidiHashi\\_tcc.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/21126/1/2018_MarcosHiraidiHashi_tcc.pdf). Acesso em: 23 set. 2021.

HELLER, IL; PÁDUA, V. L. de. **Abastecimento de água para consumo humano**. 2ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. 2 v.

HIBBARD INSHORE. **Inspeção de Túneis**. c2013. Disponível em: <https://www.hibbardinshore.com/inspecao-de-tuneis-cerpch/>. Acesso em: 15 fev. 2022.

JADE, L; FERREIRA, Luiz Cláudio. Onde está a água no Brasil? **Empresa Brasil de Comunicação**, 2018. Disponível em: <https://www.ebc.com.br/especiais-agua/agua-no-brasil/>. Acesso em: 4 jan. 2022.

LAMON, G. P. S. Água Superficial e Subterrânea. **Revista TAE**, São Paulo, ano 8, n. 48, abr./mai. 2019. Disponível em: <https://www.revistatae.com.br/Artigo/166/agua-superficial-e-subterranea>. Acesso em: 11 jan. 2022.

LONAX. Como funciona a construção de canais? **LONAX**, 2019. Disponível em: <https://lonax.com.br/blog/como-funciona-a-construcao-de-canais-entenda-gora/#:~:text=Basicamente%2C%20o%20objetivo%20principal%20de,e%20social%20de%20uma%20regi%C3%A3o>. Acesso em: 17 jan. 2022.

LUVIZOTTO, G. L. **Fraturas: juntas e falhas (e conceitos básicos de reologia)**. Notas de aula da disciplina de geologia estrutural e geotécnica da Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2019. Disponível em: [http://www.rc.unesp.br/igce/petro/estrutural/Estrutural\\_Unesp/Aulas\\_Teoricas\\_files/Aula\\_frat\\_uras\\_juntas\\_veios\\_simples\\_atual.pdf](http://www.rc.unesp.br/igce/petro/estrutural/Estrutural_Unesp/Aulas_Teoricas_files/Aula_frat_uras_juntas_veios_simples_atual.pdf). Acesso em: 20 set. 2021.

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

MARTINS, R. N. J. **Efeito da água subterrânea no projeto, escavação e exploração de túneis**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e

Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/20361>. Acesso em: 21 set. 2021.

MENESES, C. Acidente com operário no DF foi causado por explosivos. **Metrópoles**, 2020. Disponível em: <https://www.metropoles.com/distrito-federal/acidente-com-operario-no-df-foi-causado-por-explosivos>. Acesso em: 13 set. 2021.

MOBILIZE BRASIL. SP: Metrô e Via Amarela são condenados por acidente em obra. **Mobilize Brasil**, 2012. Disponível em: <https://www.mobilize.org.br/noticias/1352/sp-metro-e-via-amarela-sao-condenados-por-acidente-em-obra.html>. Acesso em: 24 set. 2021.

MORAIS, R. Obra de desobstrução do Túnel do Tibau. **A Tribuna**, 2021. Disponível em: <https://www.tribunarj.com.br/obra-desobstrucao-do-tunel-do-tibau-continua-paralisada/>. Acesso em: 20 set. 2021.

NARESI JÚNIOR, L. A. **Abatimento de Choco**. Naresi – Fundações e Geotecnia, 2010. Disponível em: <https://sites.google.com/site/naresifundacoesgeotecnias/112-execucao-de-bate-choco#:~:text=GENERALIDADES%3A,escava%C3%A7%C3%B5es%20ap%C3%B3s%20dismonte%20de%20rocha>. Acesso em: 11 out. 2021.

NILL JÚNIOR. O blog e a história: quando a Adutora do Pajeú nos salvou da crise. **Blog do Nill Júnior**, 2020. Disponível em: <https://nilljunior.com.br/o-blog-e-a-historia-quando-a-adutora-do-pajeu-nos-salvou-da-crise/>. Acesso em: 17 jan. 2022.

O FLUMINENSE. Túnel do Tibau desmorona em Niterói. **O Fluminense**, 2021. Disponível em: <https://www.ofluminense.com.br/cidades/niteroi/2021/01/1163887-tunel-do-tibau-desmorona-em-niteroi.html>. Acesso em: 18 set. 2021.

OKARIRI. Túnel Milagres foi concluído, mas transposição do São Francisco foi adiada mais uma vez. **Okariri**, 2018. Disponível em: <https://www.okariri.com/cariri/tunel-milagres-foi-concluido-mas-transposicao-do-sao-francisco-foi-adiada-mais-uma-vez-confira/>. Acesso em: 10 out. 2021.

O TEMPO. Transposição do descaso: túnel tem de ser refeito após obra desabar. **O Tempo**, 2013. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/hotsites/transposi%C3%A7%C3%A3o-do-descaso/tunel-tem-de-ser-refeito-apos-obra-desabar-1.725660>. Acesso em: 15 set. 2021.

PARTNER ENGENHARIA E GERENCIAMENTO LTDA. Estação Elevatória de Água. [201-]. Disponível em: <https://www.partnerenge.com.br/estacao-elevatoria-de-agua/>. Acesso em: 17 jan. 2022.

PIRES, P. J. M.; MENEQUETE, D. S.; SALGADO, N. G. de P. Otimização dos processos de inspeção em monitoramento para túneis em rocha. **Mosaicum**, Bahia, v. 23, n.1. jan./jun. 2016. ISSN 1808-589X. Disponível em: <https://revistamosaicum.org/index.php/mosaicum/issue/view/10>. Acesso em: 30 set. 2021.

QUEIROZ, I. B. de.; MORAVIA, M. G.; NEGRO JUNIOR, A. Análise Estatística Simplificada para Projeto de Túneis em Rochas Fraturadas. Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, CBMR/ABMS e ISRM, Belo Horizonte: Minas Gerais, 2016.

RIBEIRO NETO, F.; KOCHEN, R. **Segurança, ruptura e colapso de túneis urbanos em NATM**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

ROCHA, H. C. Panorama do mercado brasileiro de túneis: passado, presente e futuro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 54, 2012, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: IBRACON, 2012. Disponível em: [http://www.ibracon.org.br/eventos/54cbc/Infra/ibracon\\_2012rev1hugo.pdf](http://www.ibracon.org.br/eventos/54cbc/Infra/ibracon_2012rev1hugo.pdf). Acesso em: 15 fev. 2022.

RODRIGES, A. Pela primeira vez, comporta libera água do São Francisco para o Riacho Seco, em Missão Velha. **Diário do Nordeste**, 2021. Disponível em: <https://diarionordeste.verdesmares.com.br/regiao/pela-primeira-vez-comporta-libera-agua-do-sao-francisco-para-o-riacho-seco-em-missao-velha-1.3031669>. Acesso em: 27 jul. 2021.

SCARIOT, P. A. M. **Segurança operacional em aeronaves de pequeno porte da aviação civil brasileira: uso do Checklist**. 2020. Monografia (Graduação em Ciências Aeronáuticas) – Universidade do Sul de Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/15901/1/Monografia%20Pedro%20Afonso%20Martinelli%20Scariot.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2021.

SANEINFRA. Estação elevatória de água. **SANEINFRA**, c1998. Disponível em: <https://www.planetasaneamento.com.br/estacao-elevatoria-agua>. Acesso em: 11 jan. 2022.

SANEINFRA. Projeto de adutora de água. **SANEINFRA**, c1998. Disponível em: <https://www.planetasaneamento.com.br/projeto-adutora-agua>. Acesso em: 11 jan. 2022.

SANTOS, V. S. dos. Ciclo da Água. **Mundo Educação**, c2022. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/biologia/ciclo-agua.htm>. Acesso em: 17 fev. 2022.

SECRETARIA DE ESTADO E OBRAS E INFRAESTRUTURA DO DISTRITO FEDERAL. Acidente com explosivo fere operário em Vicente Pires. **SODF**, 2020. Disponível em: <https://www.so.df.gov.br/acidente-com-explosivo-fere-operario-em-vicente-pires/>. Acesso em: 13 set. 2021.

SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E TRABALHO (ADECE). **Eixão das Águas**. 2014. Disponível em: <https://www.adece.ce.gov.br/2014/06/11/canal-da-integracao/>. Acesso em: 30 jul. 2021.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ. **Cinturão de Águas do Ceará: apresentação do projeto**. [200-]. Disponível em: <http://www.cbhbanabuiu.com.br/wp-content/uploads/2018/03/Apresentacao-CAC.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2021.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ. **Nota de Esclarecimento nº 4: Concorrência Pública Nacional. Objeto: Licitação do tipo Menor Preço para execução das obras de implantação do 1º Trecho Jati/ Rio Cariús do projeto Cinturão de Águas do Ceará – CAC**. 2012. Disponível em: <http://licita.seplag.ce.gov.br/pub/181168/Nota%20de%20Esclarecimento%2004.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2021.

SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS *et Al.* **Eixo de Integração Castanhão – Fortaleza. Parte IV – Projetos Executivos**. Ceará: SRH, v. 1, [200-]. Tomo 3.

SOUZA, R. M. G. L. de. **Princípios e Métodos Utilizados em Segurança da Água para Consumo Humano**. São Paulo, 2008. Disponível em: [https://www.saude.sp.gov.br/resources/cve-centro-de-vigilancia-epidemiologica/areas-de-vigilancia/doencas-ocasionadas-pelo-meio-ambiente/doc/seguranca\\_agua.pdf](https://www.saude.sp.gov.br/resources/cve-centro-de-vigilancia-epidemiologica/areas-de-vigilancia/doencas-ocasionadas-pelo-meio-ambiente/doc/seguranca_agua.pdf). Acesso em: 17 jan. 2022.

SOARES, A. L.; UCHOA, N.; COGERH. COGERH investiu 22,6 milhões em Infraestrutura Hídrica em 2021. **Ceará**, 2021. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2021/12/29/cogerh-investiu-226-milhoes-em-infraestrutura-hidrica-em-2021/>. Acesso em: 11 jan. 2022.

SODRÉ, L. Desobstrução do Túnel do Tibau em Piratininga só será retomada em abril. **O Globo**, 2021. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/rio/bairros/desobstrucao-do-tunel-do-tibau-em-piratininga-so-sera-retomada-em-abril-1-24851309>. Acesso em: 18 set. 2021.

SUPERITENDÊNCIA DE OBRAS HIDRÁULICAS. **Cinturão de Águas do Ceará – CAC**. [200-]. Disponível em: <https://www.sohidra.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/40/2011/10/cac-descricao-lucena-17.08.pdf>. Acesso em: 19 set. 2021.

TECNOGEO GROUND. **Enfilagem/DHPs/injeções de consolidação (obras de túneis)**. [201-]. Disponível em: <https://www.tecnogeo.com.br/enfilagem-dhps-injecoes-consolidacao-obras-tuneis/>. Acesso em: 18 set. 2021.

TRAVAGIN, V. B. **Subsídios para escolha do método construtivo de túneis**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/347/1/CT\\_PPGE\\_C\\_M\\_Travagin%2C%20Vin%2C%20Bernardino\\_2012.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/347/1/CT_PPGE_C_M_Travagin%2C%20Vin%2C%20Bernardino_2012.pdf). Acesso em: 17 set. 2021.

UCHOA, L.; SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. Obras do Cinturão das Águas recebem aporte financeiro para dar continuidade ao projeto. **Ceará**, 2021. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2021/07/19/obras-do-cinturao-das-aguas-recebem-aporte-financieiro-para-dar-continuidade-ao-projeto/>. Acesso em: 19 jul. 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. **Checklist de Inspeção de Segurança**. c2020. Disponível em: <https://www.segurancadotrabalho.ufv.br/checklist-de-seguranca/>. Acesso em: 16 jun. 2021.

VBA TECNOLOGIA E ENGENHARIA S/A. **Estudo de Impacto Ambiental - EIA/RIMA do Projeto do Trecho I (Jati-Cariús) do CAC**. 2009. Disponível em: <http://www.csbhsalgado.com.br/wp-content/uploads/2012/04/CAC.pdf>. Acesso em: 20 set. 2021.

ZANELATO, E. A. **Escavação de túneis – métodos construtivos**. 2003. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2003. Disponível em: [https://www.academia.edu/24407825/ELIESER\\_ANTONIO\\_ZANELATO\\_ESCAVA%2C%2087%2C%2083O\\_DE\\_T%2C%209ANEIS\\_M%2C%2089TODOS\\_CONSTRUTIVOS?auto=download](https://www.academia.edu/24407825/ELIESER_ANTONIO_ZANELATO_ESCAVA%2C%2087%2C%2083O_DE_T%2C%209ANEIS_M%2C%2089TODOS_CONSTRUTIVOS?auto=download). Acesso em: 15 fev. 2022.

## APÊNDICE A – CHECKLIST PARA INSPEÇÃO EM TÚNEIS DE TRANSFERÊNCIA HÍDRICA

| IDENTIFICAÇÃO           |  |
|-------------------------|--|
| <b>Túnel</b>            |  |
| <b>Trecho</b>           |  |
| <b>Subtrecho</b>        |  |
| <b>Quilômetro</b>       |  |
| <b>Data da inspeção</b> |  |
| <b>Responsável</b>      |  |

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

**Observação: problema diverso detectado no item (descrever item-situação) ou outros problemas existentes não enumerados, na seção G**











| G. PROBLEMAS ADVERSOS |          |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |    |
|-----------------------|----------|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|---|----|
| Nº                    | PROBLEMA | 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                   |          |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |    |
| G.8                   |          |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |    |
| G.9                   |          |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |    |
| G.10                  |          |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |    |
| G.11                  |          |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |    |
| G.12                  |          |    |    |    |    |    |    |    |   |   |   |   |    |

Observação: inserir mais itens, caso seja necessário