

# MANUTENÇÃO E RECUPERAÇÃO DE TÚNEIS NO BRASIL

## Maintenance and Rehabilitation of Tunnels in Brazil

Anna Laura Nunes<sup>a</sup>, Marcelo Gomes Rios Filho<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Programa de Engenharia Civil, COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

<sup>b</sup> GEOPHI Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil

**RESUMO** – Os túneis são fundamentais na infraestrutura de transportes, serviços e outros setores e atividades da sociedade. Construídos com diferentes tecnologias em épocas e ambientes diversos, os túneis enfrentam muitos desafios associados ao longo período de serviço, tais como a deterioração da estrutura, intemperismo do maciço, variação das condições do entorno, evolução de requisitos de operação e segurança. A garantia do uso contínuo e eficiente desses ativos exige gestão e manutenção da estrutura, além de conhecimento técnico das suas características e comportamento no tempo. Este trabalho procura fornecer uma visão geral da importância da gestão e manutenção de túneis antigos e modernos, apresentando informações e orientações para inspeções, identificação de patologias, mecanismos de alteração da estrutura e entorno, técnicas de intervenções típicas para a solução/mitigação de problemas. O tema é finalizado com a apresentação de casos práticos de túneis históricos antigos e túneis modernos. As anomalias foram identificadas e submetidas a reparos, garantindo a maior vida útil e segurança de operação das estruturas.

**ABSTRACT** – Tunnels are fundamental in transport infrastructure, services and other sectors and activities of modern societies. Built with different techniques in different times and environments, the tunnels pose many challenges associated to long operational periods, such as the structure deterioration, material weathering, and evolution of safety requirements. Ensuring the continuous and efficient use of these assets requires management and maintenance of the structure, as well as technical knowledge of their characteristics and behavior over time. This paper provides an overview of the importance of management and maintenance of old and recent tunnels, offering guidance for inspections, and identification of pathologies, mechanisms of changes in the structure and surroundings, typical intervention techniques for the mitigation of problems. The subject is illustrated with several practical cases of old and recent tunnels. The anomalies that have been identified and treated, ensuring a longer service life and safe operation of the structures.

**Palavras Chave** – Manutenção, Inspeção, Medidas de Reabilitação.

**Keywords** – Maintenance, Inspection, Rehabilitation Measures.

## 1 – INTRODUÇÃO

Túneis são obras de arte civis que desde a antiguidade associam ousadia, inovação e finalidade que resultam em melhorias para a sociedade. Construídos com diferentes tecnologias em épocas e ambientes diversos, os túneis enfrentam muitos desafios associados ao longo do período de serviço, tais como a deterioração da estrutura, intemperismo do maciço, variação das condições do entorno, novas tecnologias e evolução de requisitos de operação e segurança.

A garantia do uso contínuo e eficiente desses ativos no presente e no futuro exige gestão e manutenção da estrutura, além de conhecimento técnico de suas características e comportamento no

---

E-mails: annalaura.aln@gmail.com (A. Nunes), marcelorios@geophi.com (M. Filho)

tempo, especialmente os túneis mais antigos muito distintos dos túneis construídos com técnicas modernas. Interessante comentar que diversos túneis romanos ainda conservam inscrições nas paredes com nomes e datas de arquitetos e responsáveis pela operação, indicando que, até mesmo na antiguidade, as atividades de inspeção e manutenção dos túneis eram importantes e regulares.

O Brasil tem um histórico riquíssimo de túneis construídos especialmente com a visão modernista do Imperador Dom Pedro II do Brasil (filho de Dom Pedro I do Brasil e IV de Portugal) a partir do século 19 com a implantação da Estrada de Ferro Barão de Mauá em 1854 e Estrada de Ferro D. Pedro II em 1858. Curiosamente, o imperador mostrava enorme interesse na construção de túneis e participava de fases importantes das obras, desde o início à inauguração, configurando um importante e inusitado ATO (Acompanhamento Técnico de Obra) de época. Muitos dos túneis construídos sob os auspícios de Dom Pedro II ainda hoje compõem as linhas ferroviárias, tendo sofrido ampliações e reabilitações diversas ao longo dos anos.

O Quadro 1 procura situar a evolução da engenharia de túneis no Brasil em relação à história de construção de túneis no mundo. Foi baseado em diversas referências históricas e atuais, destacando-se, dentre as brasileiras, o saboroso livro de Vasconcellos (1934) que viaja pela Estrada de Ferro Central do Brasil, acervos do Instituto Moreira Sales, Biblioteca Nacional, IPHAN e informações técnicas de túneis brasileiros compiladas pelo CBT (2006). Alguns exemplos da construção de túneis brasileiros dos séculos 19 e 20 são ilustrados nas Figuras 1 a 4, incluindo túneis originais da EF Dom Pedro II construídos em 1874 e 1875 e duplicados nas obras de ampliação da ferrovia em 1948.

A EF Dom Pedro II (EF Central do Brasil após a proclamação da república e hoje Linha do Centro) foi construída com 55 túneis, sendo o Túnel 22 de 552m de extensão e o Túnel 12a, também chamado Túnel Grande, com 2246m, além do Túnel da Mantiqueira de 997m de extensão, entre os Estados de São Paulo e Minas Gerais.

No início do século 20, o trecho da ferrovia na Serra do Mar foi duplicado e os 15 túneis existentes no segmento sofreram obras diversas, desde o alargamento do túnel original à construção de novo túnel paralelo ao antigo (Figuras 3 e 4), muitas vezes ligados por galerias transversais. Note-se que estes túneis ainda compõem o arranjo ferroviário da atual Linha do Centro com operação intensa de transporte de minério rumo aos portos do Rio de Janeiro e São Paulo.

Destacam-se também os 15 túneis totalizando 1350m, construídos entre 1860 e 1864 da antiga *São Paulo Railway* (EF Santos a Jundiaí) e 13 túneis escavados em rocha entre 1880 e 1884, com comprimento total de 1702m na Ferrovia Paranaguá-Curitiba, sendo o Túnel da Roça Nova o mais longo com 429m. Em 1928 inaugurou-se a construção do Ramal Mairinque-Santos (EF Sorocabana) com 31 túneis em trecho acidentado de 40km na Serra de Cubatão.

A construção de túneis urbanos no Brasil se iniciou ao fim do século 19 na cidade do Rio de Janeiro e eram destinados aos bondes elétricos, sendo o primeiro o Túnel do Rio Comprido com 200m de extensão. Foi seguido pelo Túnel Velho (Hoje Túnel Alaor Prata) em Copacabana com 180m de extensão e 6m de largura, concluído em 1892 e ampliado para 13,2m de largura em 1927. Este túnel promoveu o surgimento do Bairro de Copacabana e incentivou a escavação de mais um túnel em 1904, chamado Túnel Novo (Túnel do Leme). Em 1938, a cidade de São Paulo ganhou seu primeiro túnel rodoviário urbano, o Túnel Nove de Julho, inovando pela construção com técnica a céu aberto de túnel invertido e Método Austríaco e que é parte essencial do sistema de mobilidade atual dos paulistas.

O Brasil desde o século 19 até a atualidade investiu na construção de túneis para diversas finalidades, desde simples adutoras a túneis de desvio de rios e de adução para barragens, ferroviários, rodoviários, logísticos de minério, entre outros. Novos conceitos e tecnologias têm sido desenvolvidos e adotados para a construção, além de métodos de gestão, avaliação de riscos e procedimentos de seguradoras.

**Quadro 1 – Cronologia e evolução da engenharia de túneis no mundo e no Brasil.**

Período	Evolução de túneis
neolítico	Escavação para abrigo e extração mineral
2160 AC	Túnel de pedestres revestido de tijolos com 1km de extensão sob o Eufrates, Babilônia
700 AC	Túnel de abastecimento de água de 200 m, Jerusalém
500 AC	Túnel de abastecimento de água em calcário com 1km de extensão, <i>Samos</i>
200 AC	Túneis com técnica qanat para abastecimento de água, Oriente Médio e China
36 AC	Primeiro túnel rodoviário – em Nápoles para a Rota <i>Romana Pozzuoli</i>
Era grego-romana	Vários túneis de abastecimento de água e drenagem
Idade Média	Túneis militares
Século 17	Desenvolvimento de túneis de navegação
1679	Uso inédito de pólvora na construção de túneis de infraestrutura ( <i>Languedoc</i> , França)
1760	Construção de túneis com revestimentos estruturais em alvenaria
1811	Túnel de canal mais longo e profundo do Reino Unido ( <i>Standedge</i> )
1823	Primeiro túnel rodoviário do Reino Unido, construído sob o Castelo de <i>Reigate</i>
1826	Início da construção de túneis sem revestimento em rocha competente e com revestimentos estruturais em arco de alvenaria
1841	Conclusão do Túnel Tâmsa de Marc Brunel usando o 1º escudo de tunelamento
1858 - 1865	<i>Construção de 15 túneis da EF D. Pedro II, de Japeri a Barra do Pirai (RJ), Serra do Mar, perfurados a ponteiro, marreta e pólvora, revestidos em alvenaria de pedra</i>
1860	<i>Primeiro túnel rodoviário brasileiro na Estrada União Indústria entre Petrópolis (RJ) e Juiz de Fora (MG) próximo de Três Rios com largura provável de 7m</i>
1860 -1864	<i>Construção de 15 túneis da São Paulo Railway (EF Santos Jundiaí), Serra de Cubatão</i>
1863	Uso da técnica <i>cut-and-cover</i> para escavação do Metrô de Londres ( <i>Metrop. Line</i> )
1864	Uso de dinamite e desenvolvimento de perfuratrizes pneumáticas de rochas
1865	<i>Início da construção da Linha do Centro da EF Dom Pedro II com 20 túneis</i>
1869	Túnel com segmentos de ferro fundido escavado com 1º escudo circular, Londres
1871	Conclusão do primeiro túnel alpino, <i>Frejus</i> , França
1875	<i>Túneis do Ramal São Paulo da EF D. Pedro II</i>
1875 - 1900	<i>Construção de 18 túneis da EF Central de Pernambuco na da Serra das Russa (PE)</i>
1877 - 1879	<i>Construção dos túneis ferroviários do Ramal da Marítima (EF D. Pedro II) no Rio de Janeiro, com perfuratrizes a ar comprimido e dinamite (pioneira no Brasil)</i>
1879	Uso de ar comprimido para túneis em solo, Túnel Rio Hudson, EUA
1880	Primeira tentativa de escavação do túnel no Canal da Mancha
1880 - 1884	<i>Construção da Ferrovia Paranaguá-Curitiba com 13 túneis em rocha, incluindo o Túnel Roça Nova com 429m</i>
1881 - 1884	<i>Construção da EF Rio-Minas com 6 túneis (Túnel da Serra da Mantiqueira, 997m)</i>
1886-1887	<i>Primeiro túnel urbano no Rio de Janeiro, Túnel do Rio Comprido (Túnel Alice) para bonde elétrico com 200m</i>
1892	<i>Construção do 2º túnel urbano em Copacabana no Rio de Janeiro, Túnel Velho ou Túnel Real Grandeza (Alaor Prata) com 180m de extensão e 6m de largura</i>
1897	Primeiro túnel rodoviário submerso do Reino Unido ( <i>Blackwall</i> )
1900	Uso de concreto armado e aço e adoção de novas formas estruturais de túneis
1901	<i>Construção do túnel T30 da Linha de Centro (EF D. Pedro II) com abóbada de concreto armado (pioneira) em substituição ao trecho em cortes instáveis</i>
1904	Conclusão do primeiro trecho do túnel do Metrô de Nova York

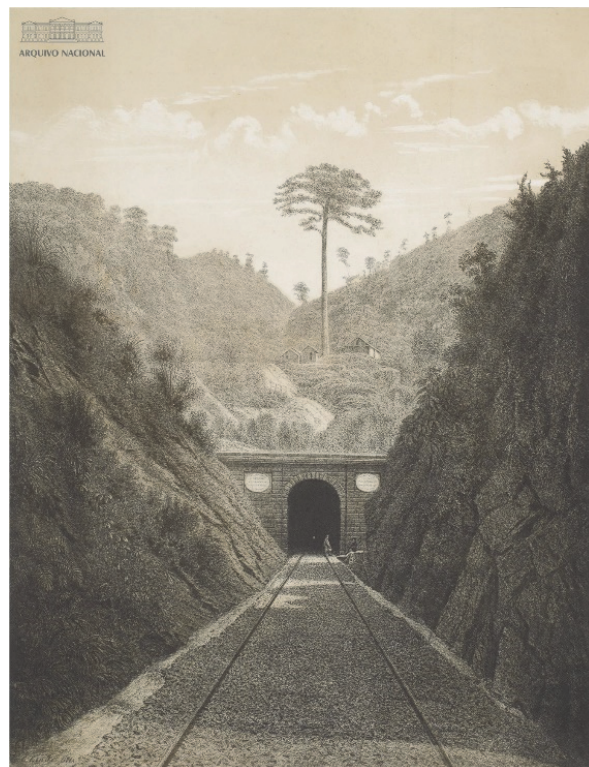
**Quadro 1 (continuação)**

<b>Período</b>	<b>Evolução de túneis</b>
1904	<i>Construção do Túnel Novo (Túnel do Leme) em Copacabana com a 1ª galeria, seguida pela 2ª galeria em 1949</i>
Século 20	Desenvolvimento de métodos mecanizados de tunelamento
1912 - 1914	<i>Duplicação da EF D. Pedro II na linha da Serra do Mar com 15 túneis, túnel alargado por 1 ou 2 lados, abertura de túnel paralelo e uso de perfuratrizes pneumáticas e escavadeiras a vapor e revestimento de concreto armado</i>
1912	<i>Conclusão do Ramal Santa Bárbara (MG) da EF Central do Brasil com 6 túneis</i>
1913	<i>Construção de 5 túneis na Serra do Mar no trecho da EF Santa Catarina (SC)</i>
1911 - 1913	<i>Construção do túnel de adução em rocha com 8,5km para desvio do Rio Pirai para o reservatório de Ribeirão das Lajes (RJ)</i>
1914	<i>Conclusão do Ramal Ouro Preto-Ponte Nova (MG) com 4 túneis, Central do Brasil</i>
1919 - 1921	<i>Construção do Túnel João Ricardo na zona portuária do Rio de Janeiro com 293m</i>
1925	<i>Início da construção da Adutora do Rio Claro (SP) com 12,7km de túneis revestidos com chapas de aço galvanizado, concluída somente em 1970</i>
1927	<i>Ampliação do Túnel Velho em Copacabana de 6,0 para 13,2m de largura</i>
1928	<i>Conclusão do trecho da EF Oeste de Minas entre Angra dos Reis e Barra Mansa (RJ), totalizando 53 túneis com 13420m da EF Central do Brasil</i>
1928 - 1937	<i>Construção do Ramal Mairinque Santos (EF Sorocabana) com 31 túneis em 40km</i>
1936	Introdução de segmentos de concreto armado ancorados
1936 - 1938	<i>Primeiro túnel rodoviário de São Paulo, Túnel 9 de Julho (Daher Elias Cutait), com técnica a céu aberto de túnel invertido e ATM (Método Austríaco)</i>
1937 - 1939	<i>Construção dos túneis em rocha da Adutora Ribeirão das Lajes com total de 2160m</i>
1940 - 1943	<i>Construção dos túneis da Via Anchieta na Serra do Mar com método americano de escoramento transversal em arcos de madeira</i>
Após 1940	Evolução de técnicas de investigações e aplicação das mecânicas de solos e rochas
1946	Mecânica de rocha aplicada pela 1ª vez ao design de suporte em arco (Terzaghi)
Anos 50	Introdução de chumbadores para rocha e revestimentos em concreto projetado
1962	Método NATM - Novo Método austríaco de tunelamento para suporte de túneis
1963	Autorização de armazenamento subterrâneo de rejeitos radioativos (AEC-US)
1968 - 1974	<i>Construção da Linha 1-Azul do Metro de São Paulo com método cut-and-cover e uso pioneiro de tuneladora EPBS</i>
1974 - 1976	<i>Obras dos túneis da Imigrantes com uso pioneiro do método NATM, túnel de 3,2km</i>
Anos 70	Desenvolvimento de revestimento segmental circular, TBM's e lamas (EPB)
1972	<i>Desenvolvido e patenteado o tirante brasileiro (Costa Nunes) em substituição ao insucesso das ancoragens importadas usadas na Rodovia dos Imigrantes</i>
1974 - 1986	<i>Construção de 115 túneis da Ferrovia do Aço totalizando 75,4km, o maior com 8640m, uso de técnicas diversas e inovadoras de tratamento de maciços</i>
1994	<i>Conclusão do Túnel do Canal da Mancha entre Reino Unido e França, Eurotunnel</i>
1995 - 1997	<i>Construção do Túnel da Covanca na Linha Amarela no Rio de Janeiro com 2 galerias de 2197m cada, uso pioneiro de concreto projetado com fibras metálicas</i>
Final século 20	Inovações: reforço de fibras, congelamento de solo, técnicas de laser e infravermelho para construção e avaliação, técnicas de previsão de recalques, análises por diferenças e elementos finitos, gestão e avaliação de riscos, métodos de proteção contra incêndio





(a) Dom Pedro II e família real no início de construção do Túnel da Mantiqueira, 1882 (IMS)



(b) Túnel grande da EF Dom Pedro II, 1864 (Arquivo Nacional)



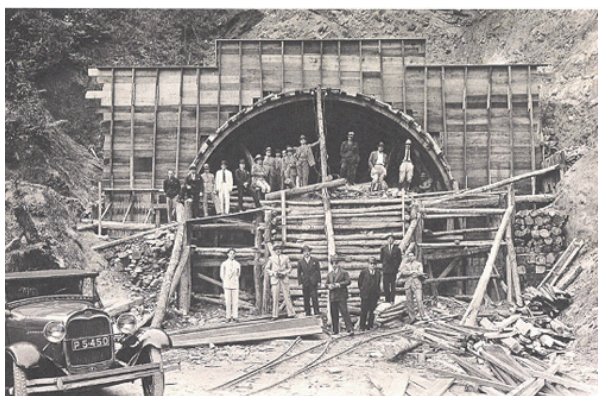
(c) Túnel Km 6 da *Minas and Rio Railway*, 1884 (M. Ferrez, Biblioteca Nacional)



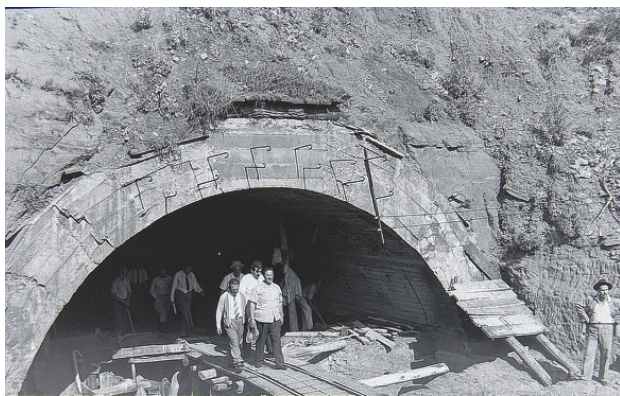
(d) Túnel do Pico do Diabo da EF Paranaguá-Curitiba, 1884 (M. Ferrez, Biblioteca Nacional)

**Fig. 1** – Túneis das Estradas de Ferro D. Pedro II, Minas e Rio e Paranaguá-Curitiba – Século 19.





(a) Túnel 22 da EF Sorocabana, 1933 (Museu da Companhia Paulista)



(b) Túnel 2 da EF Sorocabana, 1948 (Museu da Companhia Paulista)



(c) Túnel Velho, Rio de Janeiro, 1893 (Museu Histórico Nacional)



(d) Túnel João Ricardo, Rio de Janeiro, 1919 (Museu Histórico Nacional)



(e) Túnel Novo (Leme), Rio de Janeiro, 1904 (Museu Histórico Nacional)



(f) Duplicação do Túnel Novo (Leme), 1949 (Museu Histórico Nacional)

**Fig. 2** – Túneis da Estrada de Ferro Sorocabana e urbanos na cidade do Rio de Janeiro - Século 20.

Os avanços são visíveis no que tange aos novos empreendimentos de túneis. Contudo, percebe-se uma menor evolução e atenção para as atividades de manutenção dos túneis existentes, razão pela qual os autores apresentam este artigo, buscando mostrar a importância das inspeções e manutenções e técnicas de recuperação de túneis para a garantia de operação segura, menor custo de manutenção e aumento da vida útil.





(a) Túnel 25 original de 1875 - Desativado



(b) Túneis 25 de 1875 e 1948 em serviço

**Fig. 3** – Duplicação do Túnel 25 nas obras de ampliação da antiga EF Dom Pedro II (hoje Linha de Centro da EF Central do Brasil).



(a) Túnel 27 original de 1876 - Desativado



(b) Túneis 27 de 1876 e 1948 em serviço

**Fig. 4** – Duplicação do Túnel 27 nas obras de ampliação da antiga EF Dom Pedro II (hoje Linha de Centro da EF Central do Brasil).

## 2 – GESTÃO E MANUTENÇÃO DE TÚNEIS

Os túneis são fundamentais na infraestrutura de transportes, serviços e outros setores e atividades da sociedade. A garantia do uso contínuo e eficiente desses ativos no presente e no futuro exige gestão e manutenção da estrutura, além de conhecimento técnico das suas características e comportamento no tempo, especialmente os túneis mais antigos, muito distintos dos túneis construídos com técnicas modernas.

A gestão e manutenção de túneis envolvem aspectos importantes tais como:

- i. Vida útil do túnel pode ser indefinida, visto que a sua importância na infraestrutura básica dificulta, ou mesmo, impede seu fechamento a longo prazo e torna inviável sua substituição e/ou reconstrução completa no presente e no futuro;
- ii. O comportamento estrutural complexo do túnel, a interação com o maciço circundante, a ocorrência de patologias e a variabilidade original e deterioração dos materiais ao longo do tempo exigem investigações e avaliações dos materiais e desempenho tanto do túnel quanto do maciço;
- iii. Túneis antigos são considerados órfãos, visto a ausência/perda da documentação relativa aos projetos executivos e *as built* e acompanhamento de construção/operação, além do emprego de tecnologias ultrapassadas e até desconhecidas, exigindo investigações mais amplas que possam estabelecer as características da estrutura;
- iv. Os fatores externos ao túnel sofrem mudanças resultantes do desenvolvimento urbano, tais como aumento das cargas de superfície, variação do lençol freático, influências de

outras interferências subterrâneas e até possível alteração do uso/finalidade original do túnel;

- v. Deslocamentos de superfície e variações hidrológicas como a de lençol freático podem alterar as tensões do maciço do túnel, provocando a variação das tensões no túnel,
- vi. Os processos naturais de intemperismo promovem a alteração tanto das propriedades físicas e mecânicas do túnel quanto do maciço, causando perda de resistência e ganho de deformabilidade que resultam em redistribuição de tensões e potencial redução da estabilidade estrutural. Note-se que a evolução da deterioração do maciço e suas estruturas geológicas são dificilmente percebidas em túneis com revestimento.

O processo de degradação de túneis é progressivo no tempo, podendo ser acelerado pela modificação das condições originalmente previstas ou retardado por meio de ações de reabilitação e rotina de manutenção, resultando no aumento da vida útil e diferentes custos de obras de reabilitação/recuperação (Figura 5).

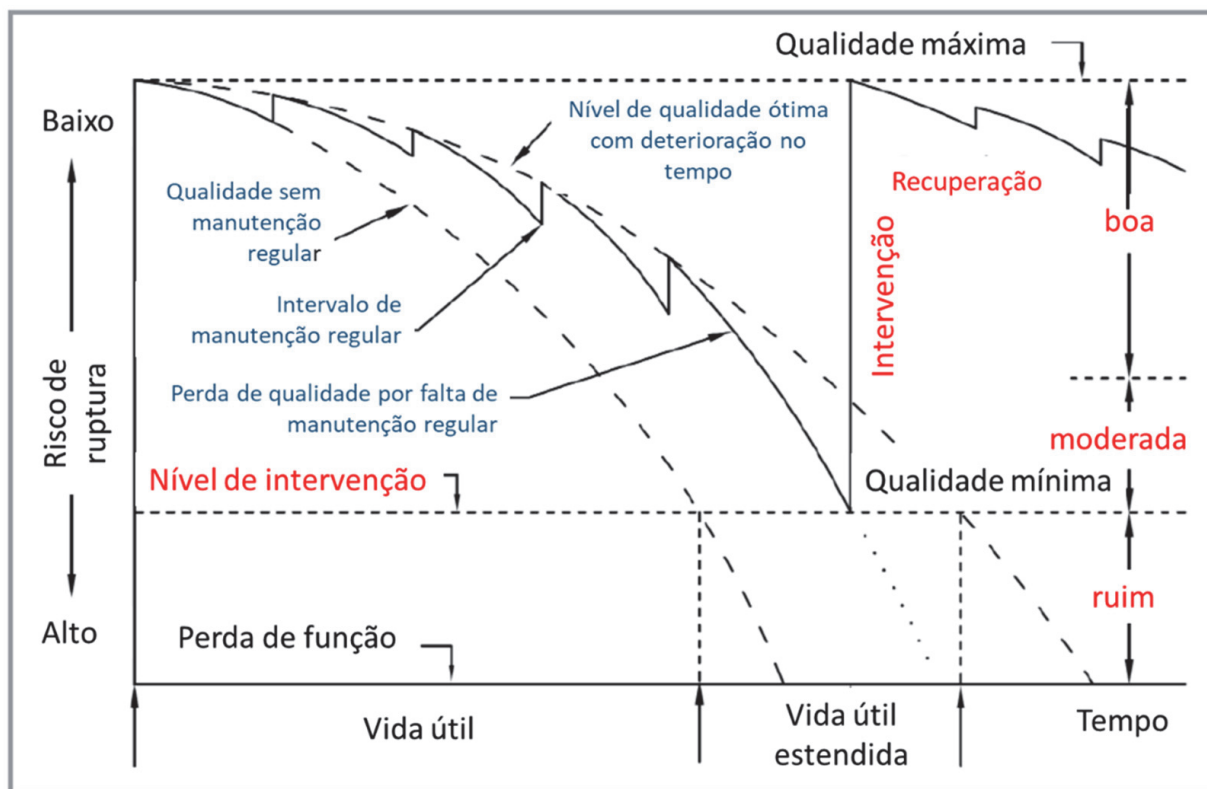
A manutenção regular do túnel garante desempenho, eficiência e segurança, minimizando gastos elevados ou desnecessários de reparo e impactos resultantes dos fechamentos e restrições de operação/tráfego para obras. Ressalte-se que a realização de obras em túneis é acompanhada de muitas dificuldades inerentes à estrutura e exige cuidados especiais quanto à seleção, projeto e planejamento, de forma a minimizar a interrupção da operação normal do túnel.

A manutenção de um túnel associa registros históricos, inspeções, intervenções e resultados de monitoramento. São 3 classes principais:

- i. Manutenção Preventiva Periódica, que corresponde às inspeções regulares realizadas no túnel para observação das condições geomecânicas, avaliação e análise de medidas de instrumentação existentes e ações de conservação e limpeza das estruturas auxiliares tais como iluminação, placas de sinalização, canaletas de drenagem, dentre outras. As inspeções regulares possibilitam a identificação de patologias e graus de ocorrência e severidade que são considerados para planejamento de ações específicas de investigações, reparos e reforços. É realizada em intervalos de tempo planejados e predefinidos, baseados nas informações técnicas de monitoramentos e inspeções anteriores;
- ii. Manutenção Corretiva Específica, que corresponde à realização de investigações, análises e ações de reabilitação e recuperação de patologias específicas, identificadas na Manutenção Preventiva. Deve ser realizada em curto espaço de tempo a ser programado após sua identificação e caracterização;
- iii. Manutenção Reativa Emergencial, que representa as ações necessárias para o controle e/ou recuperação de evento súbito não previsto no túnel e que prejudica sua operação e segurança. Visto seu caráter emergencial, deve ser executada imediatamente após sua ocorrência, não havendo prazos de planejamento e/ou programação.

Vale comentar que, frequentemente, as causas e condições da deterioração não são prontamente identificáveis e, portanto, o desempenho do túnel pode ser afetado antes das intervenções de manutenção, que passa a ser reativa ao invés de preventiva. Além disto, as intervenções objetivam a correção do problema e podem não solucionar a causa do problema. Esta situação é típica em túneis com elevada infiltração de água, sendo mais econômico tratar as surgências do que prevenir e/ou controlar a entrada de água no túnel.

Uma ferramenta indispensável para a boa gestão do túnel é a avaliação de riscos que identifica sistematicamente riscos significativos, permitindo a priorização de ações para sua minimização e gerenciamento. A necessidade de avaliação de risco dos ativos do túnel surge principalmente para satisfazer os regulamentos de segurança, que exigem que os perigos sejam identificados e avaliados e que os níveis adequados de segurança sejam mantidos/assegurados.



**Fig. 5** - Relações entre qualidade, segurança, manutenção e intervenções em função do tempo de operação do túnel (Adapt. Patterson e Perry, 1998).

Na maioria dos casos prevalece o princípio *ALARP* - *As Low As Reasonably Practicable*, no qual os riscos são reduzidos a níveis toleráveis tão baixos quanto é razoavelmente praticável (CIRIA, 2009). Vale notar que *razoavelmente praticável* é interpretado como a realização de medidas de segurança cujos custos (financeiro, tempo, dificuldades e problemas) não sejam desproporcionais aos benefícios da segurança.

Outro aspecto importante relativo à gestão de túneis se refere às estruturas desativadas e descomissionadas. Túneis podem ser desativados e fechados por diversas razões, por exemplo, atingiram sua vida útil, não são mais necessários ou não há benefícios/orçamento para a sua reabilitação. A desativação do túnel deve considerar a possibilidade de uso diferente da finalidade original no futuro e o efeito no entorno e em estruturas adjacentes na condição de deterioração e colapso não controlados.

Em túneis desativados e sob algum tipo de gestão, adota-se avaliação e manutenção mais flexíveis que as de túneis operacionais, porém atenção deve ser dada a problemas que envolvam a segurança pública e a de funcionários responsáveis pela inspeção/manutenção. Ressalte-se que as condições de trabalho podem ser mais difíceis e perigosas do que em túneis operacionais, uma vez que pode ocorrer entrada de água, depósitos de entulho, presença de vermes e riscos biológicos e o acúmulo potencial de gases nocivos. Alguns túneis ficam parcialmente inundados ou assoreados ao longo do tempo, tornando o acesso particularmente difícil, exigindo precauções e equipamentos especiais para monitorar sua condição e realizar trabalhos.

Esses efeitos também podem ocorrer em túneis desativados temporariamente, porém planejados para uso futuro. A manutenção essencial não pode ser negligenciada, visto que isto pode resultar em deterioração estrutural do túnel, dificultando ou mesmo impedindo que a estrutura seja reabilitada para funcionamento.

A deterioração do túnel pode ser mais severa e mais rápida em túneis desativados devido à redução das inspeções e avaliação das suas condições e das obras preventivas e/ou de recuperação



de anomalias. O efeito de deterioração estrutural do túnel na zona de influência, seja em superfície ou subsuperfície, deve ser avaliado para identificar os riscos associados às infraestruturas e população da área circundante.

Nos casos de túneis definitivamente desativados, sem qualquer possibilidade de uso futuro, devem ser adotadas medidas efetivas e econômicas para reduzir os riscos associados ao colapso estrutural. As medidas dependem das características do túnel como localização, profundidade, presença de infraestrutura no entorno e condições geológicas do maciço. A medida mais severa corresponde ao preenchimento completo do túnel com material resistente de baixo custo, eliminando a abertura subterrânea e o acesso para inspeções e obras. Medidas mais comuns correspondem ao fechamento das entradas do túnel e sinalização de acesso proibido.

### 3 – INSPEÇÕES DE TÚNEIS

As atividades de inspeção são essenciais para a gestão, operação, segurança e manutenção do túnel. Diversos países têm desenvolvido e regulamentado metodologias de inspeção de túneis, especialmente rodoviários e ferroviários, sendo reconhecida a contribuição do ITA *Working Group on Maintenance* (1991), que apresenta uma sequência de atividades necessárias para a identificação de colapso potencial ou ruptura ocorrida em túneis, destacando-se o conhecimento das patologias e eventos históricos, a inspeção e monitoramento periódicos global e localizado, os quais possibilitam diagnosticar tanto a ruptura quanto o potencial de sua ocorrência e as medidas preventivas e/ou corretivas, garantindo a segurança e aumento da vida útil do túnel (Figura 6).

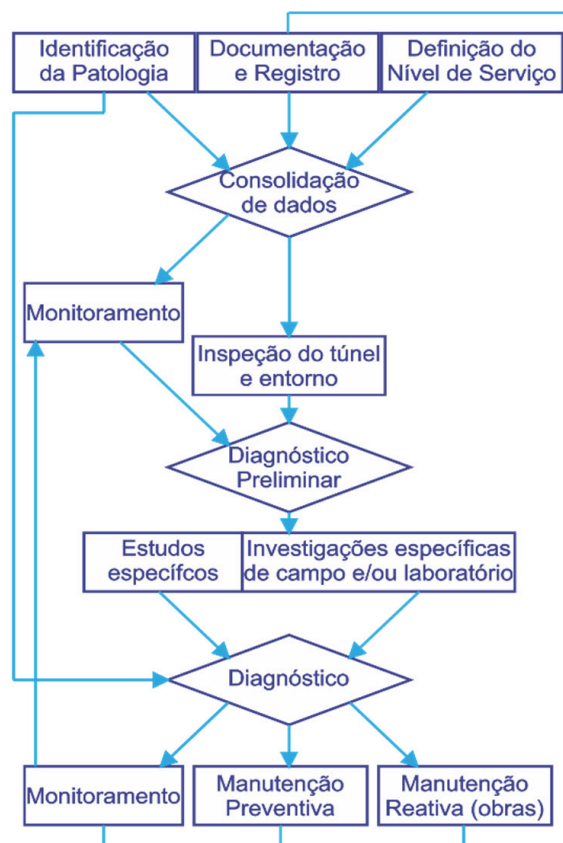
Além da *International Tunnel Association* ITA, outras referências reportam diretrizes para manutenção e inspeção de túneis, destacando-se as publicações internacionais CIRIA (2009), NCHRP (2011), CETU (2015a, 2015b), FHWA (2015), MASSDOT (2018) e SIP (2018) e ressaltando que não há diretrizes, recomendações e normas brasileiras específicas neste tema.

A inspeção eficiente de túneis exige informações e registros de todas as fases da estrutura, desde o projeto, construção até a operação, incluindo eventos de acidentes, intervenções preventivas e de recuperação e dados de monitoramento.

Os túneis modernos foram construídos obedecendo às normativas existentes e, desta forma, apresentam registros, informações e projetos das etapas de implantação e de operação. A dificuldade reside em túneis mais antigos que, na grande maioria dos casos, não contam com registros de projeto, construção, operação e obras de recuperação, dificultando a gestão e planejamento de manutenção.

A documentação básica de túnel deve apresentar os seguintes registros (CIRIA, 2009):

1. Identificação representada pelo nome ou número do túnel;
2. Dados de localização, detalhes da estrada/rota, uso da terra dentro da zona de influência;
3. Proprietário e/ou responsável pela concessão;
4. Idade do túnel, tipo, forma de construção, principais elementos e materiais estruturais, comprimento e dimensões;
5. Histórico de construção e características especiais como áreas difíceis de tunelamento, alterações no perfil do túnel, presença ou ausência de revestimento e invert e suas características;
6. Presença e localização de poços ou outras estruturas que representam riscos especiais ou exigem ações de gerenciamento particulares;
7. Dados geológicos, hidrológicos e ambientais da área;
8. Detalhes do uso do túnel, tais como ferroviário, rodoviário, frequência de tráfego, tipos e velocidades;
9. Dados de desempenho e, se existentes, restrições à operação e manutenção;
10. Detalhes da interface do túnel e interação com outras partes da infraestrutura;
11. Identificação de riscos e registro de riscos;
12. Registros de materiais perigosos se existentes;
13. Informações sobre plano de emergência;
14. Detalhes do meio externo e atividades que podem afetar o túnel;
15. Resultados atuais de inspeção e histórico de inspeções anteriores, investigações e avaliações de condições;
16. Histórico de manutenção, intervenções e outras obras;
17. Cronogramas para inspeções periódicas, manutenção e obras;
18. Informações sobre serviços e equipamentos do túnel;
19. Documentação e registros históricos de acidentes e eventos atípicos.



**Fig. 6** - Sequência de atividades de inspeção para manutenção de túneis (Adapt. ITA, 1991).

O planejamento da metodologia da inspeção deve considerar as condições de contorno, de construção e operacionais do túnel e atingir os seguintes objetivos: 1. Observação e caracterização das anomalias, patologias e problemas; 2. Identificação das causas e principais fatores de influência; 3. Avaliação da influência na estabilidade do túnel; e 4. Avaliação da evolução a médio e longo prazos.

A partir de estudo abrangente de túneis rodoviários suíços, Sandrone e Labiouse (2011) e Sandrone et al (2007) também propõem o planejamento da inspeção em função do cenário de degradação e que consiste nas análises de: 1. Condições iniciais, para estimativa do potencial de degradação; 2. Vida útil e operação do túnel; e 3. Cenários de degradação.

As inspeções visuais são essenciais para a identificação de problemas e apresentam vantagens tais como a simplicidade, rapidez e baixo custo, além de não exigirem equipamentos sofisticados e minimizarem as interferências de operação do túnel (interrupção, área de apoio, depósito de equipamentos). Contudo, a inspeção visual tem limitações inerentes à subjetividade das observações da equipe e a dependência das características visíveis das anomalias, muitas vezes presentes na interface revestimento-macizo do túnel. Desta forma, a equipe deve ser bem treinada, suficientemente experiente e familiarizada com o túnel para que a inspeção visual forneça a avaliação da condição do túnel e quaisquer alterações, inclusive indícios menores de possíveis anomalias, ainda não claramente observáveis. Note-se que a falta de continuidade da equipe e dos métodos de inspeção pode levar à redução da eficácia das inspeções e confiança nos resultados.

Em relação aos métodos e técnicas geralmente empregados para a avaliação das condições de serviço e parâmetros do túnel, o Quadro 2 apresenta algumas sugestões baseadas em CIRIA (2009), CETU (2015a) e FHWA (2015). Observa-se que a inspeção visual se associa às técnicas destrutivas e não destrutivas, simples e complexas, além dos registros de construção e manutenção dos túneis.

**Quadro 2** – Métodos recomendados para investigação direta de túneis.

Parâmetro	Formas de investigação e determinação		
	Primária	Secundária	Diversas
Espessura do revestimento	Medições em furos de sondagem (danos potenciais e infiltração de água)	Medidas em testemunhos de sondagens Ensaaios não destrutivos (radar, testes ultrassônicos)	Registros de construção e de investigação e reparos anteriores
Características dos materiais de revestimento	Ensaaios de laboratório em amostras recuperadas (testemunhos, blocos)	Ensaaios in situ (macaco plano, sobrefuração) Avaliação qualitativa em amostras recuperadas	Dados de literatura para materiais semelhantes
Tensões in situ no revestimento	Ensaio de tensões in situ (macaco plano, sobrefuração)	Ensaaios de laboratório em amostras	Dados de literatura
Condição e causas da deterioração dos materiais	Observações visuais e testes in situ simples (dureza ou som) Ensaaios de laboratório (análise petrográfica, química e física)	Medição de parâmetros ambientais (análise química de águas subterrâneas)	Resultados de investigação e reparos anteriores
Perfil do intradorso	Medição direta (técnicas tradicionais e avançadas)		Registros de construções e reparos originais
Condição do maciço rochoso	Mapeamento geológico-geotécnico	Observação do maciço e identificação de blocos rochosos instáveis	
Classificação do maciço rochoso	Mapeamento geológico-geotécnico de discontinuidades	Uso de classificações de maciço (RMR, Q, GSI)	
Condições do solo	Sondagens no interior/exterior do túnel, amostragem de janelas, ensaios de penetrômetro, tensões in situ e permeabilidade, piezometria, ensaios de laboratório em amostras	Mapas geológicos, levantamentos geotécnicos e hidrológicos da área	Registros de construções e reparos originais
Tipo de solo em contato com revestimento	Análise de amostras de sondagens internas e externas e janelas de amostragem	Análise de amostras da área	Dados geológico-geotécnicos de literatura e de reparos e construção
Interface túnel-maciço	Observação direta da interface por inspeção de furos	Levantamento indireto com técnicas de radar, ultrasom, energia acústica	
Presença de água	Observação direta da umidade no intradorso do túnel, em furos no revestimento Piezômetros internos/externos	Técnicas de condutividade	Dados da literatura e mapas hidrológicos e hidrogeológicos
Umidade/infiltrações no revestimento do túnel	Inspeção visual	Medições pontuais de teor de umidade e levantamento por condutividade, termografia, medição da vazão	Registros meteorológicos e de serviços de água da área

**Quadro 2** (continuação)

Parâmetro	Formas de investigação e determinação		
	Primária	Secundária	Diversas
Presença de poços e túneis ocultos	Registros de construção, observação das características do intradorso, entrada excessiva de água localizada, presença de depósitos acima do túnel	Fotografias aéreas (detecção de pilhas e depósitos) Ensaio de campo (radar, resistividade, sísmicos) Sondagens	Registros históricos da área e do uso da terra
Agressividade de águas subterrâneas	Amostragem e análise laboratorial de poluentes	Inferência de fontes de água e condições do solo adjacentes	Observação visual dos efeitos na estrutura

O planeamento de investigações precisa considerar aspectos técnicos e orçamentários. Haack et al (1995) recomendam a seleção de ensaios não destrutivos na inspeção de revestimento de túneis. Montero et al (2015) apresentam a análise detalhada das diversas técnicas atualmente em utilização, além de destacar as principais tendências de inspeção automatizada. Malafaia (2015) aponta que algumas técnicas devem ser priorizadas para uma inspeção primária inicial. Sugere a inspeção robotizada (apesar do custo elevado e limitações de acurácia e qualidade de imagens), termografia (inspeção de revestimentos em concreto) e GPR (inspeção de deslocamentos, escamações, vazios com água e ar, impurezas e deformidades do revestimento de concreto e zonas anômalas no maciço rochoso) e escaneamento a laser.

Vale notar também que a maioria dos métodos de investigação não destrutivos, tais como os ensaios geofísicos fornecem resultados de condutividade elétrica ou constante dielétrica que não se relacionam diretamente com propriedades físicas e mecânicas de túneis. A confiabilidade da interpretação exige quantidade e qualidade de medidas e parâmetros calibradores, obtidos geralmente de ensaios destrutivos e de sondagens.

Os autores recomendam a inspeção visual realizada por profissional capacitado e experiente e a investigação com a varredura a laser 3D no interior do túnel, que apesar de mais dispendiosa, fornece visão geral abrangente das características do túnel em curto período de tempo (sem maiores perturbações de operação) e ainda possibilita o monitoramento de convergências ao longo do tempo.

O intervalo ideal de inspeção de túneis depende do tipo, finalidade, condição estrutural, potencial de deterioração, acessibilidade do túnel e consequências dos riscos de cada estrutura. Deve ser avaliada a interação entre condição estrutural, nível de manutenção preventiva e intervalo de inspeção. Isto representa economia de esforços e de custos e melhor direcionamento da manutenção preventiva. Ressalte-se que intervalos de inspeção variados podem ser muito mais vantajosos que os intervalos fixos para túneis com condições e comportamento bem estabelecidos e conhecidos.

#### 4 – PATOLOGIAS E ANOMALIAS – CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS EM TÚNEIS

A inspeção de túnel possibilita identificar as alterações que ocorrem ao longo do tempo, a fim de estabelecer um diagnóstico da condição atual. As alterações e anomalias geralmente são as consequências de uma patologia ou mecanismo de deterioração que pode ter várias causas, entre elas:

- i. Condições geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas do maciço do túnel;
- ii. Projeto e métodos construtivos do túnel, notando que as estruturas antigas são mais susceptíveis a estes tipos de causas, visto o menor conhecimento e tecnologias rudimentares da época de construção;
- iii. Envelhecimento dos materiais, tanto do túnel quanto do maciço circundante, causados por intemperismo químico e físico.

As deteriorações se manifestam em todos os tipos de túneis, não revestidos e revestidos com segmentos de concreto e metálicos, concreto projetado, alvenaria e madeira, e ao longo da sua vida útil que se inicia durante a construção.

A partir da experiência em túneis brasileiros e inspirados nos manuais e guias de inspeção de túneis internacionais (ITA, 1991; FHWA, 2005 e 2015; CIRIA, 2009; NCHRP, 2011; CETU, 2015a, 2015b; MASSDOT, 2018; SIP, 2018), os autores procuram sumariar as principais patologias e anomalias e seus fatores de maior e menor influência no Quadro 3. A intenção dos autores é apresentar de forma sucinta, não exaustiva e nem exclusiva, um planejamento genérico de inspeção visual de distúrbios de túneis.

**Quadro 3** – Principais patologias e anomalias e possíveis fatores de influência.

Patologias e Anomalias	Fatores de Influência							
	Área			Construção			Serviço	
	MAC	AAG	AMB	PRO	MCO	MAT	OPE	MMP
<i>Distúrbios devidos à água</i>								
Infiltração	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>I</b>			<b>I</b>		<b>I</b>
Concreção	<b>I</b>	<b>D</b>	<b>I</b>			<b>D</b>		<b>I</b>
Eflorescência de cimento/concreto	<b>I</b>	<b>D</b>				<b>I</b>		<b>I</b>
Intemperismo	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>I</b>			<b>D</b>		<b>D</b>
<i>Distúrbios devidos ao meio circundante</i>								
Cavidades	<b>D</b>	<b>I</b>						
Deterioração de portal	<b>I</b>	<b>D</b>	<b>I</b>		<b>I</b>			<b>I</b>
Instabilidade de taludes	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>I</b>					
<i>Distúrbios de seções sem revestimento</i>								
Maciço e blocos rochosos instáveis	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>I</b>		<b>I</b>			<b>I</b>
Descontinuidades instáveis	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>I</b>		<b>I</b>			<b>I</b>
<i>Distúrbios do revestimento</i>								
Desplacamento		<b>I</b>	<b>I</b>		<b>I</b>	<b>D</b>	<b>D</b>	<b>I</b>
Esfoliação		<b>I</b>			<b>I</b>	<b>D</b>		<b>I</b>
Lascamento sob compressão	<b>D</b>				<b>I</b>	<b>I</b>		
Lascamento por corrosão reforços		<b>D</b>		<b>I</b>	<b>I</b>			<b>I</b>
Deterioração de cimento interblocos		<b>D</b>	<b>I</b>	<b>I</b>	<b>I</b>	<b>D</b>		<b>I</b>
Deterioração do concreto projetado		<b>D</b>	<b>I</b>		<b>I</b>	<b>I</b>		<b>I</b>
Dilatação de concreto projetado		<b>D</b>	<b>I</b>		<b>I</b>	<b>I</b>		
<i>Distúrbios de sistemas de drenagem interna/superficial e impermeabilização</i>								
Deterioração de dreno no intradorso		<b>I</b>	<b>I</b>	<b>I</b>	<b>D</b>	<b>I</b>	<b>I</b>	<b>D</b>
Deterioração de dreno externo		<b>I</b>		<b>I</b>	<b>D</b>	<b>I</b>		<b>I</b>
Deterioração de canaletas		<b>I</b>		<b>I</b>	<b>D</b>	<b>I</b>		<b>I</b>



**Quadro 3** (continuação)

Patologias e Anomalias	Fatores de Influência							
	Área		Construção			Serviço		
	MAC	AAG	AMB	PRO	MCO	MAT	OPE	MMP
Deterioração de membrana impermeável		<b>I</b>			<b>D</b>	<b>I</b>		<b>I</b>
Deterioração de painel impermeável		<b>I</b>		<b>I</b>	<b>I</b>	<b>I</b>		<b>I</b>
<i>Distúrbios na estrutura do túnel</i>								
Rachaduras horizontais	<b>D</b>							<b>I</b>
Rachaduras diagonais	<b>D</b>							<b>I</b>
Rachaduras verticais	<b>D</b>							<b>I</b>
Rachaduras de contração					<b>I</b>	<b>I</b>		<b>I</b>
Rachaduras curvas, <i>crescent-shaped</i>					<b>D</b>			<b>I</b>
Deformação de abóbada	<b>D</b>			<b>I</b>	<b>I</b>	<b>I</b>		<b>I</b>
Abaulamento	<b>I</b>	<b>I</b>		<b>I</b>	<b>D</b>	<b>D</b>		<b>I</b>
Desvio de blocos de alvenaria					<b>D</b>			<b>I</b>
Deterioração de invert	<b>I</b>	<b>I</b>		<b>I</b>	<b>I</b>		<b>I</b>	<b>I</b>
Ruptura de arco	<b>I</b>	<b>I</b>			<b>I</b>	<b>I</b>		<b>I</b>
<i>Distúrbios devidos à construção</i>								
Cavidades resultantes de escavação	<b>I</b>				<b>D</b>			<b>I</b>
Vazios na interface revest-macizo					<b>D</b>	<b>I</b>		
Estrutura alveolar ( <i>Honeycombing</i> )					<b>D</b>			
Deterioração de juntas de concreto				<b>I</b>	<b>D</b>			
Fatores de Influência: <b>MAC</b> : Maciço circundante (litologia, fraturamento, alívio de tensões, intemperismo); <b>AAG</b> : Ação da água (pressão, intemperismo, erosão, transporte, depósito); <b>AMB</b> : Ambiente (clima, sismo, ataques químicos e bioquímicos); <b>PRO</b> : Projeto (técnicas antigas, inadequadas); <b>MCO</b> : Método construtivo (escavação, reforço, revestimento, drenagem); <b>MAT</b> : Tipos de materiais (alvenaria, pedra de cantaria, blocos de concreto, drenos e mantas); <b>OPE</b> : Operação (Reações químicas, tráfego, incêndio, inundação); <b>MMP</b> : Monitoramento e manutenção preventiva. <b>I</b> : Influência importante; <b>D</b> : Influência dominante.								

No Quadro 3 as patologias e anomalias são listadas em grupos distintos de distúrbios e os fatores de influência são divididos em 3 categorias principais, as quais são subdivididas em classes com a avaliação da sua influência classificada como importante I e dominante D, resultando em:

- i. *Região* formada por 3 classes de fatores de influência:
  1. Características do MACiço **MAC** (litologia, fraturamento, estruturas geológicas críticas, alívio de tensões na escavação e início da operação e intemperismo);
  2. Ação da Água **AAG** (características hidrogeológicas do maciço, pressões de água, fluxo no túnel com erosão, transporte e depósito de materiais e intemperismo); e
  3. Características AMBientais **AMB** (clima, variação de estação e temperatura, pluviosidade, sismos e ataques químicos e bioquímicos);
- ii. *Construção* com 3 classes de fatores de influência representadas por:

1. PROJeto **PRO** (Ausência/pouco conhecimento da engenharia de túneis, comuns nas estruturas antigas, inadequação às condições do maciço e investigações geotécnicas insuficientes);
  2. Métodos CONstrutivos **MCO** (Técnicas de escavação inadequadas e mal executadas, conhecimento insatisfatório do comportamento de reforços e revestimento com execuções atrasadas em relação a frente de escavação e drenagem e mão de obra, ATO-Acompanhamento Técnico de Obra e fiscalização não qualificadas);
  3. MATeriais empregado no túnel **MAT** (Tipos e características dos materiais de suporte, reforço e revestimento, notadamente o uso de alvenaria em blocos de rocha, pedra de cantaria, tijolos e blocos de concreto, além dos materiais dos sistemas de drenagem e impermeabilização);
- iii. *Serviço* correspondente às condições de operação do túnel e divididas em 2 classes:
1. OPERação **OPE** (ação de reações químicas por sulfatos, álcalis e especialmente carbonatação de concreto, danos provocados pelo tráfego como poluição e acidentes e eventos extremos tais como inundações e incêndios); e
  2. Monitoramento e Manutenção Preventiva **MMP** (deficiência/ausência de sistemas de monitoramento do túnel e de atividades de manutenção preventiva).

## 5 – INTERVENÇÕES DE RECUPERAÇÃO

As intervenções de recuperação em túneis devem ser avaliadas considerando diversos fatores além dos custos envolvidos, destacando-se tipo da anomalia, condições de acesso, duração da obra, restrições de fechamento da via/túnel, desempenho, eficiência, durabilidade a longo prazo, obstrução/acessibilidade para inspeções e manutenção futuras.

A seleção da técnica de reparo também deve considerar as condições existentes da área de reparo e das áreas vizinhas, histórico de construção e manutenção do túnel, características e materiais do túnel, características e infraestruturas (especialmente subterrâneas) próximas ao túnel, condições geológicas e hidrológicas do maciço e clima. Túneis antigos, patrimoniados ou não, ainda demandam maiores esforços para a conservação da arquitetura e elementos históricos, tornando mais complexa a tarefa de recuperação sem perda e destruição das suas características. As alternativas de intervenções de recuperação são numerosas (ITA, 1993, 2001, 2010; FHWA, 2005, 2015; Celestino, 2005; Bilfinger, 2005; CIRIA, 2009; NCHRP, 2011; CETU, 2015; MASSDOT, 2018). Ifitmie (2001), por exemplo, propõe diversas medidas de reabilitação para prolongação da vida útil de túneis antigos na Europa.

As obras de recuperação de túnel podem ser classificadas em:

- i. Reparos corretivos representados por tratamentos localizados do revestimento com a substituição do material deteriorado (reparo de área e profundidade reduzidas, tipicamente de 1m<sup>2</sup> e 30mm), selagem de trincas com resinas e natas de cimentos, proteção contra a corrosão dos reforços metálicos e recuperação de drenos avariados;
- ii. Reparos estruturais correspondentes às intervenções para aumento da resistência e integridade estrutural do maciço do túnel e do sistema de suporte e revestimento, variando desde a substituição do revestimento, execução de um segundo revestimento até a introdução de reforços tais como tirantes, chumbadores, cambotas e longarinas.

Note-se o uso frequente de tirantes e chumbadores ancorados. A injeção dos bulbos com nata de cimento apresenta vantagens de custos mais atraentes e maior proteção contra a corrosão da barra de aço, porém de difícil instalação em abóbadas e com períodos elevados de cura e ganho de resistência. A ancoragem com resina tem vantagens de fácil execução, mesmo em furos de abóbada e áreas de acesso restrito/difícil, ganho de resistência rápido, mas com custos mais elevados e limitada a maciços rochosos.

Em relação a túneis em rocha não revestidos, as intervenções corretivas abrangem a remoção de lascas e blocos em processo de desprendimento, estabilização com telas metálicas e ancoragens sistemáticas e/ou localizadas nas áreas fraturadas e com estruturas geológicas e aplicação de concreto projetado (Hoek et al, 1994; Hoek, 2007, Singh e Goel, 2006; Feng, 2017).

A partir da recuperação de túneis brasileiros antigos e modernos, os autores destacam o uso de concreto projetado com e sem fibras metálicas e sintéticas para os reparos corretivos e estruturais. O reforço do túnel com concreto projetado também pode ser associado a ancoragens, telas metálicas e outros elementos estruturais. A adição de fibras metálicas e sintéticas ao concreto projetado tem sido muito adotada para o aumento da resistência e ductibilidade do material.

O dimensionamento da camada de concreto projetado é impreciso e geralmente realizado por meio de classificações de maciços rochosos, tais como sistemas RMR (Bieniawski, 1989) e Q (Grimstad e Barton, 1993; Barton e Grimstad, 2014) e alguns modelos semi-empíricos baseados na observação e experiências passadas. Entretanto, o uso da técnica em túneis é bem-sucedido, principalmente quando se considera os mecanismos de comportamento do revestimento em concreto projetado sob as solicitações do maciço (Stacey, 2001; ITA, 2006a e 2006b).

Os mecanismos de comportamento do revestimento em concreto projetado podem ocorrer individualmente e/ou combinados, sendo os principais (Figura 7a):

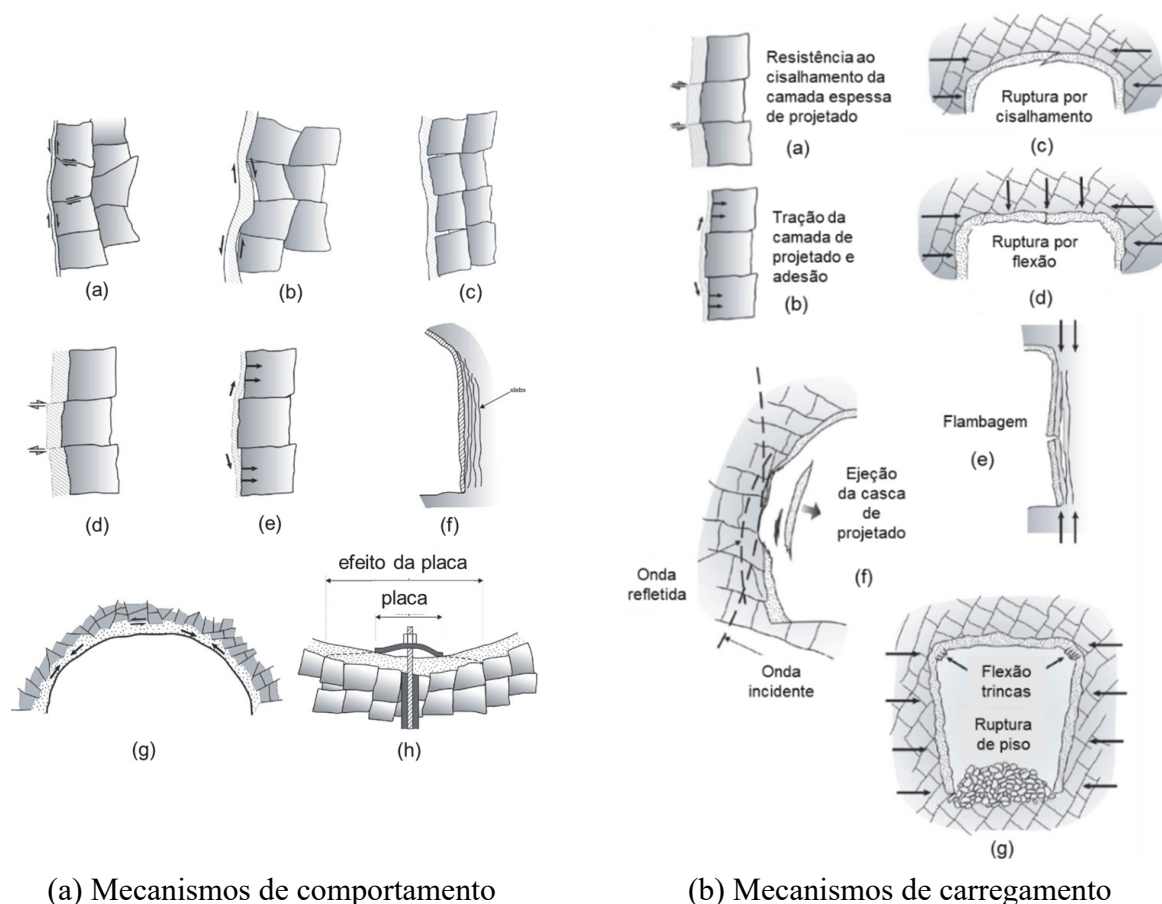
- i. Aumento do imbricamento de blocos que conta com vários sub-mecanismos tais como:
  1. Imbricamento promovido pela adesão do projetado com a rocha e prevenção de mobilização de cisalhamento na interface devido à resistência à tração do projetado, impedindo a rotação do bloco (a);
  2. Desenvolvimento de resistência ao cisalhamento na interface projetado-rocha, produzido pela irregularidade da superfície da interface (b);
  3. Penetração de concreto projetado nas fraturas e juntas (c);
  4. Prevenção do deslocamento de bloco devido à resistência cisalhante (d) e resistência à tração (e) do projetado;
- ii. Restrição e/ou eliminação da formação de lascas delgadas de rocha resultantes de altas tensões na parede do túnel e aumento da resistência à flambagem (f).
- iii. Promoção do efeito de arqueamento, visto que a deformação do maciço induz tensões no suporte de concreto projetado que apresenta resistência e rigidez flexural (g);
- iv. Interação das ancoragens no concreto projetado com o aumento da área de influência das placas de ancoragens (h).
- v. Resistência à tração e à flexão do concreto projetado para suportar o estufamento da camada, provocado pelo deslocamento de material fraturado do maciço, as quais são aumentadas quando adicionadas tela eletrosoldada e fibras;
- vi. Selagem do maciço e proteção contra a exposição aos ciclos de molhagem e secagem, contribuindo para a redução da alteração da rocha.

O desempenho satisfatório do revestimento de concreto projetado se deve a esses mecanismos, que respondem direta e indiretamente às solicitações do maciço no revestimento do túnel, destacando-se (Figura 7b):

- i. Carregamento localizado: deslocamento de bloco induz tensões cisalhantes na camada de concreto projetado rígida e bem aderida (a) e tensões pontuais na camada de projetado com trinca (b);
- ii. Carregamento distribuído: deformação do maciço induz tensões na camada de concreto projetado com adesão perfeita, podendo desenvolver mecanismos de ruptura por cisalhamento (c), flexão (d), flambagem (e) ou tração, e suas combinações podem produzir a fragmentação explosiva do projetado (f).
- iii. Carregamento por flexão, comuns em túneis de mineração com concreto projetado aplicado nas paredes e teto e raramente no piso, que não confinado pode se deformar com maior convergência no nível do piso do que no nível do teto, provocando a flexão do projetado (g).
- iv. Carregamento por pressão de água em túnel não/pouco drenado.

Em adição ao desempenho satisfatório, os autores consideram que a técnica de concreto projetado para reabilitação de túneis apresenta as seguintes vantagens:

- i. Aplicação em áreas de acesso limitado e em superfícies irregulares;
- ii. Fácil aplicação em camadas finas ou de espessura variável, sem uso de fôrmas;
- iii. Material autoportante, usados como suportes temporários ou permanentes;
- iv. Excelente adesão aos diferentes materiais;
- v. Boa penetração em irregularidades superficiais devido ao lançamento sob pressão;
- vi. Proteção adicional contra danos de incêndios no concreto projetado quando adicionadas fibras metálicas e sintéticas;
- vii. Custos mais reduzidos em relação a outras técnicas corretivas;
- viii. Versatilidade de aplicação em túneis com intervalos de tempo de obras reduzidos e com mão de obra também reduzida, além de túneis antigos com gabaritos muito restritos.



**Fig. 7 – Mecanismos de comportamento e carregamento do revestimento em concreto projetado (mod. ITA, 2006a).**

O conjunto formado pelos tipos frequentes de distúrbios em túneis, os mecanismos de comportamento sob as solicitações dos maciços no revestimento e as vantagens inerentes levaram os autores a selecionarem frequentemente o concreto projetado com e sem fibras para as obras de reabilitação dos túneis antigos e recentes apresentados neste trabalho.

## 6 – TÚNEL MARINHOS - 1910

### 6.1 – Histórico e características

O Túnel Marinhos se localiza no Km 554 do Ramal Paraopeba da Linha de Centro da EF Central do Brasil, localizado próximo à cidade de Brumadinho, MG. O levantamento de documentos históricos forneceu poucas informações sobre o Túnel Marinhos, chamado Tunnel 02 do Ramal Paraopeba com extensão de construção de 198,9m e linha singela com bitola de 1,6m (Vasconcellos, 1934). Infere-se que o túnel foi construído na década de 1910 e fazia parte da antiga Estrada de Ferro Oeste de Minas, criada em 1872 e que se ligava à Estrada de Ferro D. Pedro II.

O túnel de traçado geométrico retilíneo e seção transversal com formato arcoretangular foi construído conforme os procedimentos típicos da época, sendo clássicos o emprego de portais em concreto com detalhes arquitetônicos e revestimento interno espesso de alvenaria de pedra de cantaria argamassada nas paredes laterais ao longo da extensão do túnel e alvenaria de bloco de concreto argamassado na abóbada.

A operação ferroviária no Túnel Marinhos foi desativada após a conclusão do trecho em linha dupla, implantado no corte realizado no maciço rochoso do túnel, em algum momento entre 1934 a 1965 (Figura 8), muito possivelmente antes da unificação administrativa das estradas de ferro pertencentes à União, que passaram a ser administradas pela Rede Ferroviária Federal S.A. em 1957. Conclui-se que o Túnel Marinhos não constitui ativo operacional do Ramal Paraopeba desde, no mínimo, 1957 e, portanto, desde a gestão da RFFSA não foram realizadas ações de manutenção.



**Fig. 8** – Túnel Marinhos visto da estação após corte do maciço para a obra da variante de 2 vias.

A Estação Ferroviária de Marinhos de 1919 é classificada como patrimônio ferroviário pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN), contudo o Túnel Marinhos não faz parte do acervo. Desde 1998, a Prefeitura de Brumadinho tem realizado obras de recuperação da estação (sem muito sucesso) e em 2019 resolveu unir o túnel ao acervo histórico da área quilombola, visando a exploração turística. Por este motivo, o Túnel Marinhos foi objeto de inspeção para a determinação da qualidade estrutural e condições de serviço com fins de aproveitamento turístico.

O maciço do túnel é formado por ortogneisses de qualidade variando de Classe III a V, com ocorrência de áreas muito metamorfizadas e alteradas, além de diversas famílias de fraturas, que condicionam rupturas por escorregamento e queda de blocos recentes e antigas, cujas cicatrizes são observadas na face do talude próximo ao emboque do túnel (Figura 9a). A qualidade mecânica do maciço rochoso tende a se reduzir no sentido do emboque para o desemboque, tendo sido





(a) Maciço do emboque com cicatriz de ruptura

(b) Ruptura do maciço e desemboque

**Fig. 9** – Emboques do Túnel Marinhos no maciço com corte vertical para implantação da via dupla com cobertura muito reduzida.

identificada cicatriz de ruptura antiga no maciço, que provocou o colapso deste trecho do Túnel Marinhos (Figura 9b).

## 6.2 – Patologias e anomalias

A inspeção visual do Túnel Marinhos possibilitou a identificação de diversas patologias nos emboques inferior e superior e ao longo do intradorso da estrutura, atualmente com 170,0m de extensão (GEOPHI, 2020a).

As principais anomalias e distúrbios presentes no emboque são:

- i. Cobertura de solo muito reduzida e taludes laterais do acesso ao túnel com cicatrizes de ruptura no lado esquerdo e erosão nos lados direito e esquerdo do espelho, indicativas de passagem desordenada de água, não controlada pela canaleta (Figura 10a);
- ii. Portal do emboque tem a seção frontal revestida em blocos de concreto monolítico, sem trincas ou fissuras, contudo, a lateral esquerda do espelho sofreu a perda da telha canal (bica) e marquise arquitetônicas superiores e de blocos, muito provavelmente devido à ruptura do talude. Manchas de passagem de água de chuvas são concentradas na lateral esquerda do portal (Figura 10b).

As anomalias observadas no intradorso do túnel são:

- i. Estado de conservação precário da alvenaria da abóbada e paredes laterais próximas ao emboque com trinca aberta ao longo da seção com deslocamento de blocos. A trinca coincide com o trecho de pouca cobertura de maciço sobre o túnel e representa elevado potencial de colapso do emboque do túnel (Figura 11a);
- ii. Infiltrações de água expressivas e manchas de carbonatação na abóbada e paredes em toda a extensão, com deterioração e perda de argamassa entre blocos (Figura 11b);
- iii. Presença de trincas horizontais persistentes na região da interface parede-abóbada (popularmente chamada de rim) com extensão de 15m na lateral direita e 30m na lateral direita no lado emboque (Figura 12a) e abertas com 60m de extensão nas 2 laterais do lado desemboque (Figura 12b), além das trincas longitudinais no vértice da abóbada com infiltração excessiva de água e com tendência a seccionar a abóbada das paredes e a própria abóbada;
- iv. Sem sistema de drenagem interna devido ao depósito de sedimentos carregados pela percolação de águas de chuva para o interior, com espessura crescente de até 0,6m na

direção do desemboque, indicado pelo nicho (Figura 13) e retenção de água no trecho mais central do túnel.

A anomalia observada no desemboque corresponde ao colapso de cerca de 28,0m de túnel, restando seção muito reduzida da parede lateral direita e seção mais longa da parede lateral esquerda com trinca horizontal aberta e deslocada do prumo. Nesta parede ainda é visível o coroamento do nicho completamente soterrado pelo material colapsado do túnel e pela cobertura de maciço originalmente existente sobre o túnel (Figura 14a).

O colapso do emboque original deve ter favorecido rupturas consecutivas deste trecho, atingindo a extensão atual do túnel com 170,0m de comprimento, inferior ao originalmente construído e igual a 198,9m. Ressalte-se que as condições estruturais atuais de embocadura do túnel são críticas com abóbada instável pela perda do efeito de arco, além das trincas abertas na abóbada e paredes laterais (Figura 14b).



(a) Cobertura reduzida e cicatrizes de ruptura e erosões e depósitos de blocos e solo



(b) Perda de blocos e bica e marquise de drenagem do espelho

**Fig. 10** – Emboque com rupturas de talude e erosões nas laterais com perda de elementos arquitetônicos do espelho.



(a) Trinca aberta persistente na abóbada com deslocamento dos blocos próxima do emboque



(b) Infiltrações expressivas na abóbada e paredes com deterioração e perda de argamassa

**Fig. 11** – Intradorso em alvenaria de blocos de concreto na abóbada e de rocha nas paredes com trincas abertas, infiltração de água e perda de argamassa entre blocos.





(a) Trincas no trecho do emboque



(b) Trincas no trecho do desemboque

**Fig. 12** – Trincas horizontais semi abertas e abertas persistentes na região dos rins das paredes e trinca longitudinal na abóbada, com perda de cimentação entre blocos.



(a) Nicho limpo de 1,5m de altura – emboque



(b) Nicho com 0,6m de depósito de finos –desemboque

**Fig. 13** – Depósito de sedimentos carregados pelas chuvas no interior do túnel com espessura crescente na direção do desemboque.

Não há registros sobre o colapso do emboque superior do túnel. Interpreta-se que a ruptura do emboque original tenha sido iniciada após o corte do maciço para a implantação da variante da ferrovia, que resultou no desconfinamento do túnel.

A inspeção realizada indicou que as condições atuais do Túnel Marinhos são críticas em função da sua deterioração ao longo de décadas correspondentes a sua desativação da operação regular do Ramal Paraopeba. Além da descaracterização arquitetônica da época de construção, o túnel não apresenta condições estruturais para operação ferroviária, circulação de pessoas e outros fins. Os custos de reabilitação da estrutura serão elevados e sem garantias da conservação histórica do túnel. Desta forma foi recomendada a desativação oficial do túnel com a proibição de circulação e permanência de pessoas no interior e entorno do túnel e o fechamento dos emboques com sinalização clara de entrada proibida e/ou risco de queda de blocos.



(a) Trinca horizontal aberta e deslocada do eixo na parede e nicho soterrado



(b) Trincas nas paredes e perda da alvenaria e do efeito de arco da abóbada

**Fig. 14** – Desemboque remanescente do colapso com paredes laterais com trincas abertas e deslocadas e vista do coroamento do nicho soterrado por sedimentos e detritos.

## 7 – TÚNEL 7 - 1931

### 7.1 – Histórico e características

O Túnel 7 se localiza no trecho ferroviário na Serra de Santos, em relevo de serras e escarpas de inclinação superior a 45° no Domínio da Serra do Mar a 1000m de altitude, sob altas pluviosidades médias anuais (2000mm) e episódios prolongados de chuvas, envolvendo intensa atividade de movimentações de massa.

O Túnel 7 compõe o conjunto de 31 túneis construídos no trecho de apenas 40km do histórico Ramal Mairinque - Santos da antiga Estrada de Ferro Sorocabana (EFS), entre 1928 e 1937. A importância desta nova linha de comunicação entre São Paulo e Santos era extrema, devido aos problemas ocasionados pelas altas tarifas de transporte ferroviário, impostas pela ferrovia *São Paulo Railway*, também chamada de Inglesa, que detinha o monopólio de transporte de mercadorias de exportação e importação provenientes e destinadas ao Porto de Santos.

As obras da ferrovia foram iniciadas em 1928 com cortes, aterros, túneis, viadutos e pontes em serra e planalto, cobrindo todas as direções do ramal. Em dezembro de 1937 foi iniciado o tráfego regular de trens de carga, seguido de passageiros em julho de 1938. Esta ferrovia representa um marco na engenharia brasileira em função dos desafios impostos pela Serra do Mar. Ela se caracterizou pela revolução nos processos ferroviários de construção. Os túneis escavados em solo foram revestidos com concreto armado espesso. Os túneis em rocha foram escavados por meio de cunhas e barras de aço batidas com britadores, evitando-se ao máximo o uso de explosivos em função da natureza do terreno.

O Túnel 7 foi construído em 1931 em terreno montanhoso constituído de maciço em solo e alteração de rocha granitoide-migmatítica com declividade acentuada em área com intenso padrão de percolação de água (Figura 15). Apresenta seção em ferradura com dimensões nominais de 9,0m de largura e 7,5m de altura e cerca de 94km de extensão em traçado curvo com 2 linhas ferroviárias de bitola mista. Possui canaletas de drenagem laterais, 3 nichos e revestimento em concreto armado espesso em toda a sua extensão. Os espelhos dos emboques são em concreto com detalhes arquitetônicos típicos da época e distintos para o emboque (Figura 16a) e desemboque (Figura 16b), no sentido crescente do Túnel 31 para Túnel 1 da ferrovia. Não há registros técnicos referentes ao projeto executivo, construção e inspeções periódicas do Túnel 7.





**Fig. 15** - Túnel 7 escavado em encosta de solo e rocha com cobertura variável sendo muito reduzida no desemboque.



(a) Emboque com espelho assimétrico e muro



(b) Desemboque com espelho simétrico

**Fig. 16** - Túnel 7 com espelhos dos emboques apoiados em blocos de concreto e cobertura variável.

## 7.2 – Patologias e anomalias

A inspeção do Túnel 7 permitiu a identificação de várias anomalias (GEOPHI, 2017a):

- i. O espelho do emboque apresenta trincas abertas e fechadas coincidentes com as juntas de concretagem, trincas inclinadas críticas e manchas de infiltração de água (Figura 17a);
- ii. O espelho do desemboque apresenta trincas abertas e fechadas coincidentes com as juntas de concretagem e trincas inclinadas críticas e já abertas, incluindo a trinca no bloco de fundação no lado direito (jusante do talude), indicativas da movimentação da encosta e infiltrações na abóbada (Figura 17b);
- iii. O intradorso do túnel apresenta trincas semi abertas horizontais com maior densidade na lateral direita em contato com a encosta e trincas ao longo da seção em ferradura em vários trechos do túnel com passagem de água e deterioração do revestimento de concreto (Figura 18).





(a) Trincas inclinadas e de juntas - Emboque



(b) Trincas inclinadas e de juntas - Desemboque

**Fig. 17** – Espelhos dos emboques com trincas nas juntas de concretagem e trincas inclinadas semi abertas e abertas, indicativas da movimentação da encosta e infiltrações excessivas.



(a) Trincas longitudinais e no perímetro da seção

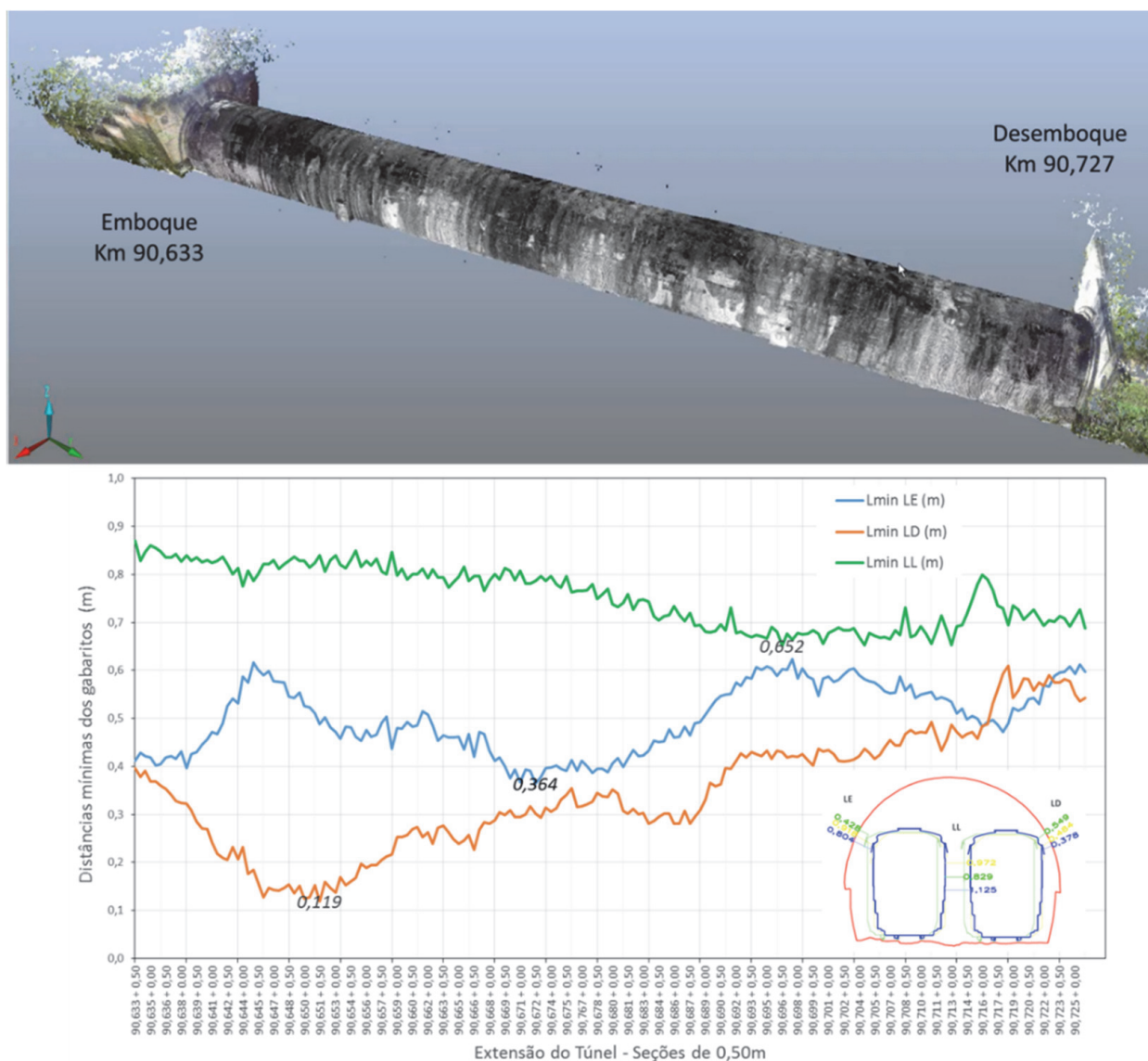


(b) Trincas abertas na parede e abóbada

**Fig. 18** – Intradorso do túnel com trincas semi abertas e abertas horizontais na região dos rins, longitudinais na abóbada e ao longo da seção em ferradura com infiltrações excessivas no lado de montante da encosta.

A inspeção visual foi acompanhada de investigação por varredura a laser 3D para o levantamento topográfico tridimensional e determinação das dimensões atuais das seções do Túnel 7. Esta técnica permite o levantamento das seções internas com resolução de 0,1mm e o traçado do túnel ao longo da extensão e verificação de compatibilidade de medidas entre seções.

A varredura a laser 3D é essencial para o dimensionamento de estruturas de reforço a serem executadas no intradorso do túnel, visto que determina a distância disponível entre o revestimento original e os gabaritos das locomotivas. A análise das 186 seções do túnel é resumida na relação entre distâncias mínimas entre revestimento e locomotivas, obtendo-se o valor crítico de 11,9cm na lateral direita (Figura 19). Esta análise ainda indica os trechos do túnel com maiores deslocamentos provocados pelos esforços da encosta, tal como o trecho inicial do emboque do Túnel 7.



**Fig. 19** – Reconstituição do Túnel 7 por varredura a laser 3D e variação da distância livre entre revestimento e 3 tipos de locomotivas.

### 7.3 – Intervenções de recuperação e reforço

Os tratamentos necessários para a recuperação e reforço do Túnel 7 foram selecionados considerando as condições e características do túnel antigo, tais como distância livre reduzida entre o gabarito das locomotivas e galeios e conformação geométrica das seções ao longo do túnel, tráfego intenso no trecho, preservação máxima da arquitetura e materiais originais dos emboques, além do difícil acesso ao túnel e área muito restrita para canteiro de obras.

#### 7.3.1 – Intervenções corretivas

As medidas corretivas selecionadas correspondem à:

- Implantação de sistema de drenagem superficial na encosta do túnel composto por escadarias hidráulicas com de 0,80 x 0,50m nas cristas dos taludes e descidas laterais;
- Tratamento dos espelhos dos emboques com limpeza, remoção de vegetação e selagem das trincas abertas com resina epóxi;

- iii. Implantação de sistema de drenagem profunda na lateral direita (montante da encosta) do intradorso do túnel composto por 2 linhas de drenos horizontais profundos a 1,0m e 3,5m do piso, com comprimento de 15,0m e espaçados de 3,0m.
- iv. Instalação de drenos barbacãs de PVC com diâmetro de 40mm e comprimento de 0,70m nos pontos de surgência de água não eliminados pelo sistema de drenagem profunda;
- v. Limpeza e recuperação das canaletas de drenagem internas ao túnel.

### 7.3.2 – *Intervenções de reforço*

A maior dificuldade atual em se dimensionar o sistema de reforço de túneis antigos reside na ausência de diretrizes básicas ou normativas técnicas. As referências sobre este tema são baseadas na experiência de projetistas em casos de escavações subterrâneas específicos. A Internacional Tunneling Association - ITA por meio do Grupo 12, responsável pelo tema Manutenção e Reparos de Túneis, enfatiza a complexidade do assunto e a dificuldade em se estabelecer critérios para projetos desta natureza. Desta forma, o projeto de recuperação e reforço do Túnel 7 foi desenvolvido considerando métodos de dimensionamento empíricos consagrados pela Engenharia de Túneis e método numérico por elementos finitos.

Os métodos empíricos considerados para o dimensionamento do reforço do Túnel 7 foram os amplamente utilizados na prática: 1. Método Q (Grimstad e Barton, 1993 e Barton e Grimstad, 2014); 2. Método RMR (Bieniawski, 1989); e 3. Método RMi (Palmström, 1996a, 1996b, 2009).

Ressalte-se que os métodos empíricos são baseados em propriedades do maciço no qual será escavado o túnel. Eles não atendem diretamente à condição de recuperação de túnel já construído e em operação por longo tempo. Entretanto, podem ser empregados desde que o projetista tenha em consideração o fato de que a solicitação da escavação não será a mesma encontrada na abertura inicial do túnel e que as propriedades do entorno também são alteradas pela redistribuição de tensões do material e do revestimento inicial já executado na escavação inicial, padrão de fluxo e a deterioração intrínseca do maciço.

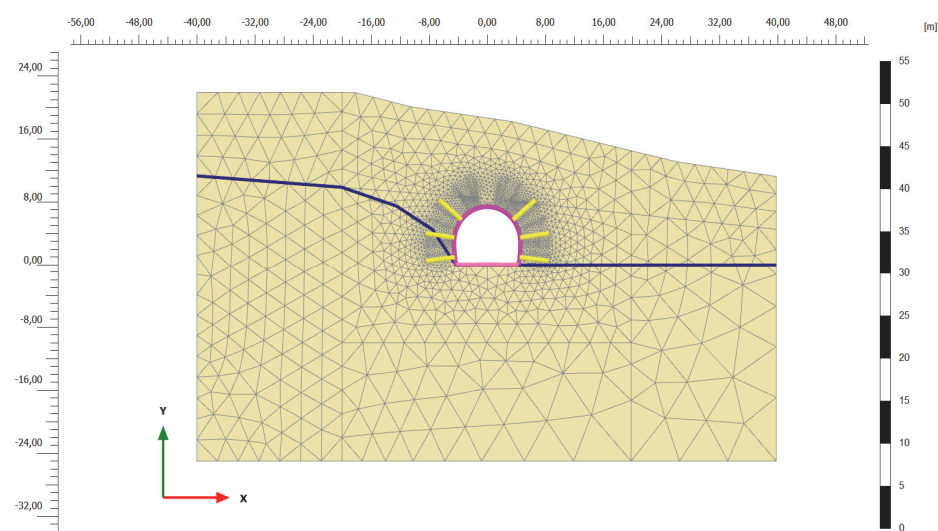
O dimensionamento dos sistemas de reforço/revestimento por meio de cada método empírico possibilitou a seleção daquele capaz de atender aos 3 métodos, chumbadores sistemáticos com 4,0m de comprimento, espaçados de 1,5m e concreto projetado de 10,0cm de espessura.

O dimensionamento do revestimento e suporte por meio de análises numéricas foi realizado com o programa 2D de elementos finitos PLAXIS 2017, considerando as condições de resistência e deformabilidade do maciço e do túnel e do sistema de reforço/revestimento. O revestimento em concreto projetado foi modelado por elementos do tipo *plate*, aplicados com adesão total à abóbada do túnel. Os chumbadores foram modelados por elementos do tipo *anchor*. Os resultados são apresentados na Figura 20.

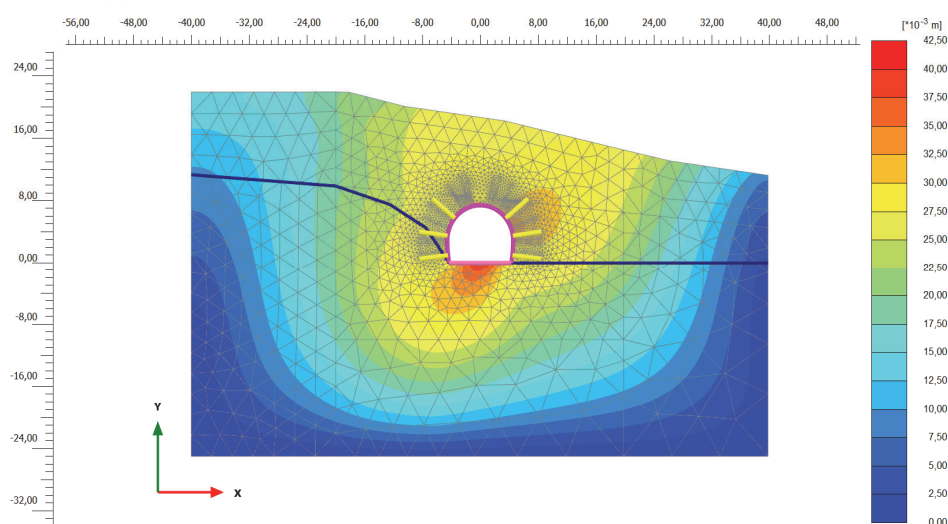
A modelagem numérica do túnel tem geometria idêntica à do Túnel 7 com seção em ferradura de 9,0m de largura e 7,5m de altura (Figura 20a). O estado de tensões natural do maciço rochoso foi estimado em função do modelo gravitacional ( $\sigma_v = \gamma \cdot z$ ) com peso específico total igual a 24kN/m<sup>3</sup>. A superfície do maciço do túnel foi inferida por meio da varredura a laser 3D, representando, portanto, a topografia da encosta. Nas análises admitiu-se o rebaixamento da linha freática até a cota de piso do túnel. As análises numéricas foram desenvolvidas considerando 10cm de espessura de concreto projetado com fibras e variações do arranjo de leques dos chumbadores espaçados de 1,5 e 3,0m e distribuição regular no perímetro do túnel e distribuição otimizada nas laterais e comprimentos do chumbador iguais a 3,0 e 4,0m.

Os resultados das análises permitiram escolher um sistema representado pelo arranjo otimizado de chumbadores em leque de 3,0x3,0m com comprimento igual a 4,0m nas laterais do túnel, associado ao concreto projetado com fibras metálicas com 10,0cm de espessura, apresentados em função dos campos de deslocamento e tensão (Figura 20b e 20c).

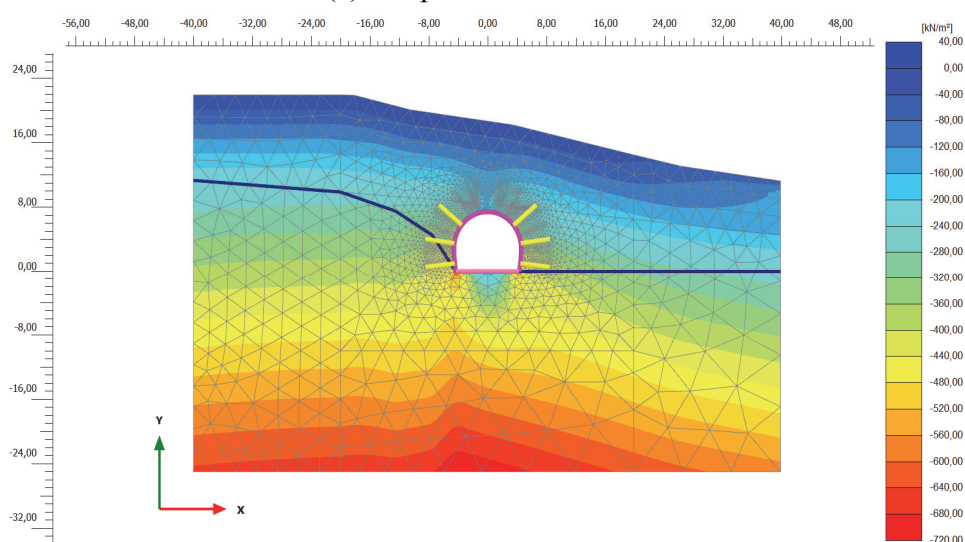




(a) Malha de 4904 elementos com sistema de reforço/revestimento



(b) Campo de deslocamentos



(c) Campo de tensões

**Fig. 20** – Análises numéricas do sistema de reforço/revestimento do Túnel 7 com 10cm de concreto projetado e chumbadores em leque de 3,0x3,0m com 4,0m de comprimento em arranjo otimizado.

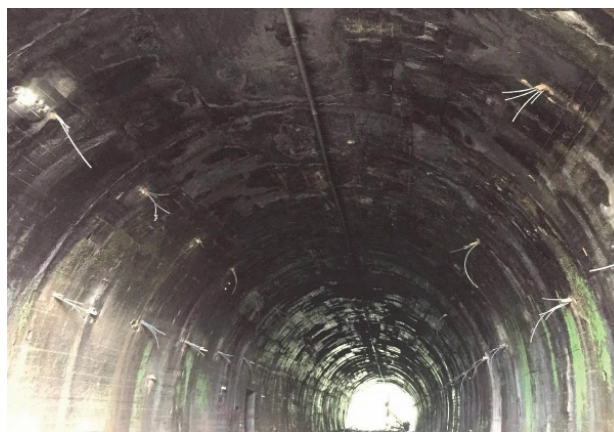
Os resultados das análises numéricas do sistema de reforço/revestimento do Túnel 7 fornecem um deslocamento máximo de 40mm com tensão efetiva máxima de 715kN/m<sup>2</sup>, sob condição de saturação do maciço com sistema de drenagem interna no túnel. O Fator de Segurança global atingido com este sistema é igual a 3,9, considerado bastante confortável para operação do túnel.

Desta forma, as intervenções selecionadas para reforço sistemático ao longo de toda a extensão do Túnel 7 são:

- i. Instalação de leques sistemáticos de chumbadores de 3,0x3,0m em arranjo otimizado nas laterais direita e esquerda, executados em furos com diâmetro de 0,075m inclinados de 10° com a horizontal e comprimento de 4,0m, com barras de aço CA50 tratadas contra corrosão e rosqueadas com 22mm de diâmetro e injetados com calda de cimento de Fator A/C = 0,5 pelo método ascendente do fundo para boca do furo (Figura 21).
- ii. Aplicação de revestimento em concreto projetado com fibras metálicas com espessura de 10cm na abóbada e laterais direita e esquerda (Figura 22).



(a) Perfuração dos chumbadores otimizados



(b) Chumbadores preparados para fase de injeção

**Fig. 21** - Perfuração e preparo dos chumbadores para injeções com nata de cimento, em arranjo otimizado nas laterais do túnel.



**Fig. 22** - Aplicação de concreto projetado sem fibras metálicas, substituídas por tela eletrosoldada pela empreiteira.



## 8 – TÚNEL T31 - 1945

### 8.1 – Histórico e características

O Túnel T31 se situa na Linha de Centro, Estrada de Ferro Central do Brasil, próximo à cidade de Barbacena em Minas Gerais. Tem extensão de 370,6m em linha singela com bitola de 1,60m. O traçado geométrico corresponde a trecho reto e em raio de curva aberta. O formato é arcoretangular com 4,30m de largura, 5,45m de altura de parede e 2,15m de raio da abóbada, totalizando 7,60m de altura (Figura 23).



(a) Emboque com cobertura reduzida

(b) Desemboque com cobertura desprezível

**Fig. 23** - Túnel T31 com espelhos simétricos em blocos de concreto e muros de gravidade antigos para estabilização dos cortes da encosta.

Foi escavado em maciço de solo e rocha do tipo ortognaisse e concluído em 1945, conforme os processos executivos da época, sendo clássicos o emprego de portais em concreto com detalhes arquitetônicos e revestimento interno espesso em concreto nas paredes laterais com abóbada em alvenaria de blocos de concreto. Parte do túnel em rocha não é revestida.

Apresenta uma estrutura particular representada pela janela de ventilação na abóbada com 10m de extensão, localizada a 67m de distância do desemboque. Nos emboques, com nenhuma ou reduzida cobertura, foram construídos muros de gravidade em concreto para a estabilização dos cortes, na época da implantação da ferrovia.

### 8.2 – Patologias e anomalias

A inspeção do túnel permitiu a detecção de diversas anomalias tanto nos portais dos emboques quanto no intradorso revestido e não revestido (GEOPHI, 2017b).

As principais anomalias dos emboques são:

- i. Espelho do emboque com trincas abertas inclinadas e trincas horizontais coincidentes com as juntas de concretagem, além de pontos de infiltração de água com manchas de carbonatação. As trincas inclinadas são críticas e ocorrem na parte superior do espelho no lado direito e na parte inferior no lado esquerdo, indicando a ação de esforços de instabilização do maciço. O trincamento do espelho se propaga para o interior do túnel, incluindo a área da abóbada (Figura 24a);
- ii. Espelho do desemboque também apresenta trinca aberta inclinada na lateral esquerda que se propaga para o interior do túnel, configurando uma trinca longitudinal persistente e



(a) Emboque com trincas inclinadas nas 2 laterais



(b) Desemboque com trincas na lateral esquerda

**Fig. 24** – Espelhos com trincas inclinadas abertas nas laterais com propagação para o intradorso do túnel e trincas horizontais nas juntas de concretagem e pontos de infiltração de água.

trincas horizontais coincidentes com as juntas de concretagem, além de pontos de infiltração de água com manchas de carbonatação (Figura 24b).

As principais anomalias encontradas no intradorso do túnel são:

- i. Trincas persistentes, abertas ou recompostas por cimento, na região do contacto parede-abóbada (rim), ao longo de todo túnel e em ambas laterais, direita e esquerda e trincas nas seções da abóbada. A infiltração de água com manchas de carbonatação, especialmente na abóbada, é severa e persiste ao longo do túnel (Figura 25);
- ii. Trincas horizontais e inclinadas nas paredes laterais com tendência de propagação para o contacto paredes-abóbada (rim), indicando os esforços do maciço contra o túnel;
- iii. Desprendimento potencial de blocos rochosos e surgência crítica de água na região não revestida, indicando a necessidade de execução de chumbadores localizados e implantação de sistema de drenagem profunda para alívio das pressões de água no entorno do túnel (Figura 26).



(a) Trincas nas regiões de rim e na abóbada



(b) Trinca inclinada aberta na lateral do emboque

**Fig. 25** – Intradorso do túnel com trincas longitudinais abertas no contacto paredes-abóbada, trincas inclinadas na parede lateral e trincas nas seções da abóbada com infiltrações de água.





**Fig. 26** – Potencial de desprendimento de bloco e infiltrações contínuas no trecho não revestido.

### 8.3 – Intervenções corretivas

Os tratamentos necessários para recuperação foram seleccionados considerando os condicionantes do Túnel T31, tais como distância livre reduzida entre gabarito da locomotiva e galeios e conformação geométrica das seções ao longo do túnel, tráfego intenso no trecho, melhoria do nível de conforto do maquinista em relação à passagem pelo túnel e preservação máxima da arquitetura e materiais originais dos espelhos de emboques de 1945.

Desta forma, as medidas de engenharia para os 2 emboques são:

- i. Selagem das trincas com resina epóxi;
- ii. Aplicação de camada de resina para recobrimento, impermeabilização e proteção.

As medidas corretivas para tratamento do intradorso são:

- i. Selagem das trincas com resina epóxi nas paredes próximas ao emboque;
- ii. Tratamento sistemático em toda extensão do túnel com aplicação de tela eletrosoldada Q196 fixada com grampos curtos em total de 4 grampos/m<sup>2</sup> e aplicação de concreto projetado (fck maior ou igual a 25MPa), por via úmida ou seca, com fibras sintéticas de polietileno (6kg/m<sup>3</sup>) na região compreendida desde 1,5m abaixo do contato parede-abóbada, seguindo por toda abóboda até 1,5m abaixo do contato parede-abóbada do lado oposto. A camada de concreto projetado com fibras tem espessura de 10,0cm, aplicado em duas camadas de 5,0cm (Figuras 27 e 28);
- iii. Implantação de sistema de drenagem profunda com linhas de drenos horizontais profundos (DHP), a 0,75m do nível do trilho, com comprimentos e espaçamentos de 18m e 10m na lateral direita e 12m e 15m na lateral esquerda;
- iv. Instalação de barbacãs de diâmetro de 50mm com 0,70m de comprimento localizados em pontos de surgência de água na abóbada e paredes laterais;



- v. Instalação de chumbadores de resina localizados para fixação de blocos de rocha potencialmente instáveis na região de rocha exposta no interior do túnel.



(a) Tela eletrosoldada sistemática na região de rim



(b) Reforço com tela na parede degradada

**Fig. 27** – Instalação sistemática de tela eletrosoldada na região de contacto parede-abóbada (rim) e tela de reforço ao longo da parede com deterioração excessiva.



(a) Aplicação de concreto projetado



(b) Concreto projetado na área da janela

**Fig. 28** – Aplicação de concreto projetado com fibras no intradorso do túnel.



## 9 – TÚNEL PORTO SUDESTE - 2011

### 9.1 – Histórico e características

O Túnel do Porto Sudeste é um corredor logístico, inédito em portos de minério de ferro do Brasil, que liga os pátios de estocagem ao píer das instalações industriais do Porto Sudeste do Brasil S.A. (PSB), na Ilha da Madeira, Itaguaí, Estado do Rio de Janeiro.

Foi escavado em maciço de granito com diques de diabásio e apresenta forma arcoretangular, seção plena de 209m<sup>2</sup>, 1720m de extensão, 11m de altura e largura nominal de 20,5m (vão máximo de 24,0m), o que representa o maior vão livre de túneis de transporte já projetados e construídos no Brasil (Figuras 29 a 31). A escavação do túnel foi executada por meio da técnica *drill and blasting* (Fogo cuidadoso de contorno com cordel detonante) com escavação simultânea do emboque e desemboque e seção de projeto parcializada em abóboda e rebaixo e concluída em setembro de 2011 com cerca de 380.000m<sup>3</sup> de material escavado. O túnel comporta as vias das correias transportadoras e pista rodoviária para veículos pesados.

O projeto executivo da escavação e tratamento do túnel foi elaborado em função das investigações geológico-geotécnicas da área que permitiram a classificação dos maciços rochosos segundo o Sistema RMR – Rock Mass Rating (Bieniawski, 1989). Há o predomínio de maciços



(a) Construção – Março 2011



(b) Conclusão – Setembro 2011

**Fig. 29** – Túnel do Porto Sudeste com vistas gerais do emboque.



(a) Construção – Março 2011



(b) Conclusão – Setembro 2011

**Fig. 30** – Túnel do Porto Sudeste com vistas gerais do desemboque.





**Fig. 31** – Túnel com 20,5m de largura com correias transportadoras e pista de veículos pesados.

rochosos Classe II, seguidos por maciços Classe III e IV. Maciços Classe I e V com extensão limitada somente foram encontrados na região de emboque e desemboque, respectivamente.

O maciço rochoso apresenta diversas estruturas geológicas tais como xenólitos de biotita gnaiss, diques de basalto subverticais com argila e veios carbonáticos, fraturas persistentes preenchidas por carbonato e faixas alteradas de biotita, sendo em sua maioria causadoras de distúrbios no túnel.

Os tratamentos foram definidos em função das classes de maciços rochosos e constituídos por reforço com leques de chumbadores de resina executados com barras CA50 em diâmetro de furo de 25mm e comprimento de 4,5m com arranjos variáveis e revestimento em concreto projetado com fibra metálica com espessuras de 12,5 a 25,0cm.

## 9.2 – Patologias e anomalias

O Túnel do Porto Sudeste tem sido regularmente vistoriado desde o início de operação para a identificação de anomalias e patologias e realização das obras corretivas, especialmente relativas às surgências de água.

Em 2015 foram realizadas obras corretivas e de reforço no trecho vizinho ao desemboque (Estacas 77 e 76) devido à presença de fissuras longitudinais paralelas ao eixo do túnel, coincidentes com os falhamentos geológicos do maciço rochoso, com 27,0m de comprimento x 2,4m de largura. O trecho foi tratado com tela eletrosoldada Q-396, 18 chumbadores de resina com 4,5m de comprimento e revestimento em concreto projetado de 10,0cm de espessura.

Em vistoria de 2019 foram observadas (GEOPHI, 2020b):



- i. Ocorrência de 2 juntas nos trechos da Estaca 51m (Junta J1), Estaca 69m (Junta J2) com abertura variando de reduzida a fechada, com desenvolvimento paralelo ao eixo do túnel e pouca surgência de água (Figura 32);
- ii. Presença de junta no trecho da Estaca 71m (Junta J3), próximo ao desemboque, com indícios de possível deslocamento e de elevada persistência, com início na parede lateral direita, passando pela abóbada e atingindo a parede lateral esquerda com infiltrações. É a junta mais crítica, visto a sua extensão e proximidade da área de desemboque do túnel, que promove o maior desconfinamento da estrutura geológica (Figura 33).



(a) Junta J1 sub paralela – E 51



(b) Junta J2 com inclinação para lateral – E 69

**Fig. 32** – Juntas J1 e J2 sub paralelas ao eixo do túnel com abertura variando de reduzida a fechada e surgências de água localizadas.



(a) Junta J3 vista para o desemboque



(b) Junta J3 vista do desemboque

**Fig. 33** – Junta J3 inclinada em relação ao eixo do túnel com início na parede lateral direita e final na parede lateral esquerda – Estaca 71.

A inspeção específica revelou que as juntas são relacionadas a diques de diabásio fraturados e veios de biotita espessos mapeados durante a execução do túnel.

A qualidade do concreto projetado no trecho da Junta J3 foi avaliada por meio de ensaios de Martelo Schmidt do tipo N com 2,207kJoules de energia, executados nos locais com e sem infiltração de água. O rebote médio foi igual a 16 (resistência à compressão inferior a 10MPa) para o concreto projetado com infiltrações de água indicando a sua deterioração e igual a 30 (resistência

à compressão de 26MPa) para o concreto sem infiltração, e, portanto, com qualidade estrutural adequada.

A inspeção visual foi complementada com levantamento por varredura a laser 3D ao longo de toda a extensão do túnel (Figura 34). Os resultados da varredura 3D indicaram uma diferença reduzida de gabarito da seção do túnel no trecho da Junta J3, confirmando a suspeita de movimentação da junta e corroborando a decisão de se realizar obras de reforço.

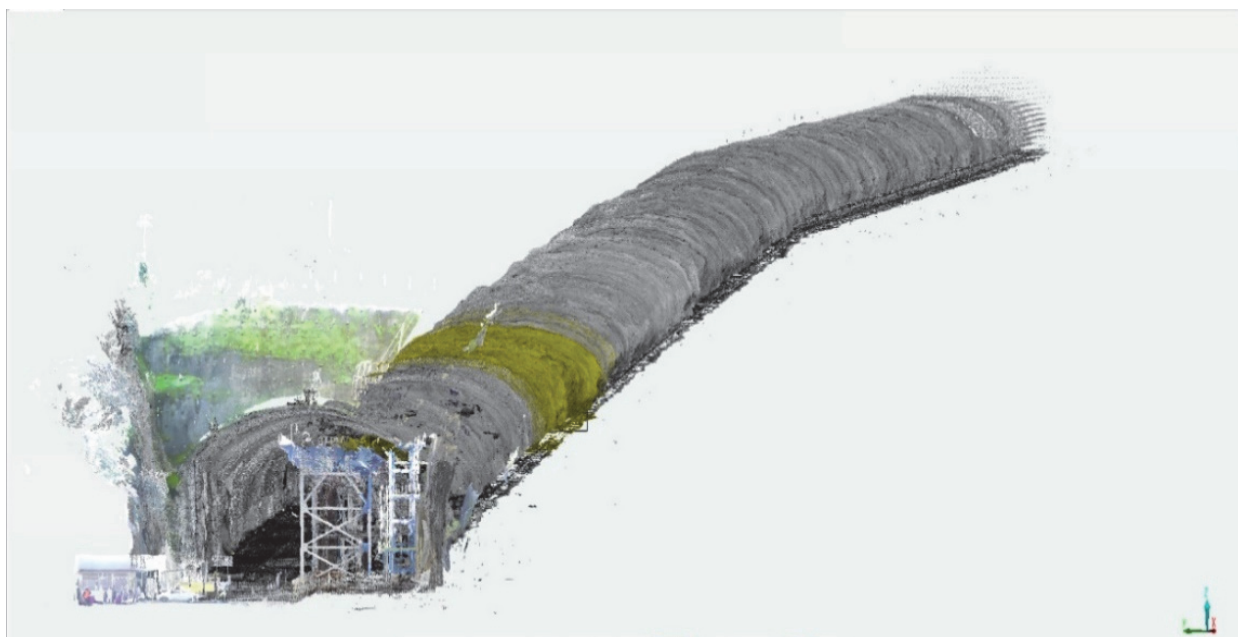
### 9.3 – Intervenções de recuperação e reforço

A recuperação e reforço do Túnel Porto Sudeste foram condicionados principalmente pela operação das correias transportadoras de minério para o píer, exigindo sua proteção especial e gestão cuidadosa dos períodos de realização das obras em relação ao funcionamento das correias.

#### 9.3.1 – Intervenções corretivas

As medidas corretivas visaram a redução/eliminação das infiltrações e surgências de água no intradorso do túnel e são representadas por:

- i. Implantação de sistema de drenagem profunda com drenos horizontais profundos DHP's com comprimento de 6,0m e diâmetro de 50mm com arranjos de leque de 3,0 x 10,0m para o trecho da Junta J1 e 4,0 x 6,0m para os trechos das Juntas J2 e J3;
- ii. Instalação de drenos barbacãs de PVC com diâmetro de 40mm e comprimento de 0,70m nos pontos de surgência de água não eliminados pelo sistema de drenagem profunda;
- iii. Instalação de instrumentação interna para monitoramento periódico dos trechos das Juntas J1, J2 e J3 por meio de medidas de convergência interna em seções distribuídas uniformemente ao longo da extensão das juntas.



**Fig. 34** – Reconstrução do túnel por varredura a laser 3D.

#### 9.3.2 – Intervenções de reforço

As medidas de reforço foram adotadas para os trechos da Junta J2 e principalmente da Junta J3, devido aos indícios de deslocamento e maior desconfinamento promovido pela proximidade do desemboque do túnel. O reforço do trecho da Junta J3 resulta em restrição aos movimentos

potenciais dos trechos vizinhos e, desta forma, é possível reduzir o reforço necessário para o trecho da Junta J2 e da Junta J1.

De forma análoga ao Túnel 7, o projeto de reforço com chumbadores e concreto projetado para o trecho da Junta J3 foi desenvolvido considerando as recomendações empíricas de Grimstad & Barton (1993), baseadas nas cotas/classes do maciço preconizadas pelo Sistema de Classificação de maciços rochosos Q e análises numéricas pelo Método de Elementos Finitos.

Adotando-se a Classe Pobre de maciço com Cota Q de 2 e *span* igual a 24,0m e razão entre *span* e ESR igual a 24,0m ( $ESR = 1,0$ ), o reforço corresponde à instalação de chumbadores sistemáticos com 6,0m de comprimento com espaçamento variando de 1,7 a 2,1m com camada de 9 a 12cm de espessura de concreto projetado com fibras ou espaçamento variando de 1,3 a 1,6m sem camada de concreto projetado. Adotou-se, preliminarmente e a favor da segurança, o sistema formado por chumbadores de 6,0m de comprimento com espaçamento igual a 2,0m e camada de concreto projetado de 10cm de espessura.

As análises numéricas foram realizadas com o objetivo de otimizar o reforço dimensionado empiricamente. Foi utilizado o programa 2D de elementos finitos PLAXIS 2017, considerando os parâmetros do maciço rochoso Classe III, determinados com o auxílio do *software* RocLAB (Rocscience). Os principais resultados das análises são apresentados na Figura 35.

O revestimento em concreto projetado foi modelado por elementos do tipo *plate*, aplicados com adesão total à abóbada do túnel e chumbadores modelados por elementos do tipo *anchor*. A malha de 15.776 elementos foi elaborada com a geometria do túnel de seção arcoretangular com 24,0m de largura e 11,0m de altura (Figura 35a).

O estado de tensões natural do maciço rochoso foi estimado em função do modelo gravitacional com peso específico total igual a  $27\text{kN/m}^3$ . A superfície do maciço do túnel considerada para as análises numéricas foi simplificada a partir do perfil geológico-geotécnico.

As simulações foram realizadas considerando a aplicação do revestimento em concreto projetado com fibras sintéticas com 10cm de espessura e instalação dos chumbadores com leques em arranjos, espaçamentos e comprimentos variáveis, a fim de investigar o arranjo ótimo a ser adotado para o reforço do túnel.

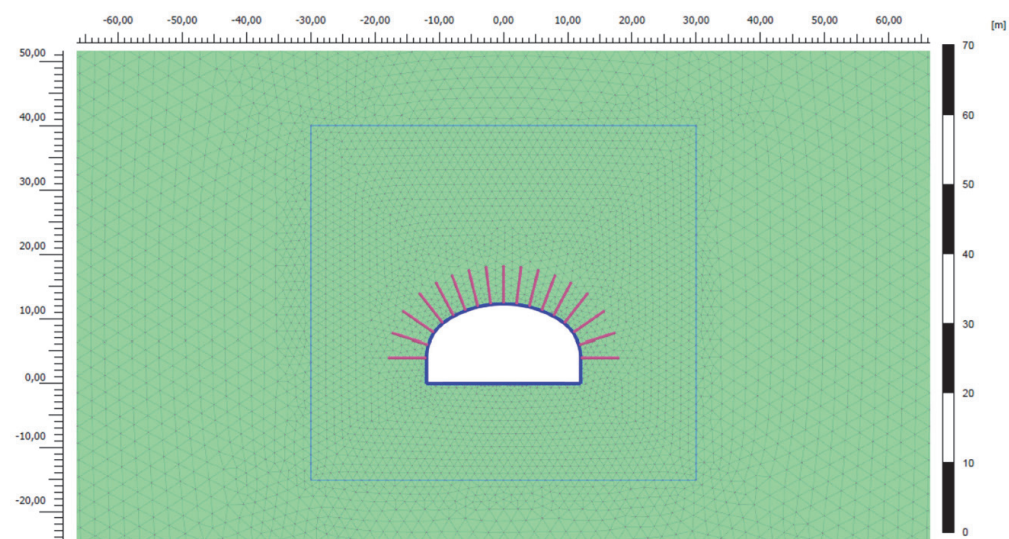
As análises indicaram que o arranjo ótimo corresponde ao sistema de concreto projetado de 10cm e leque de chumbadores de 6,0m de comprimento em arranjo sistemático de  $2,0 \times 3,0\text{m}$ , cujos resultados são resumidos em função dos campos de deslocamento (Figura 35b) e de tensão (Figura 35c).

Desta forma, as medidas de reforço implementadas são:

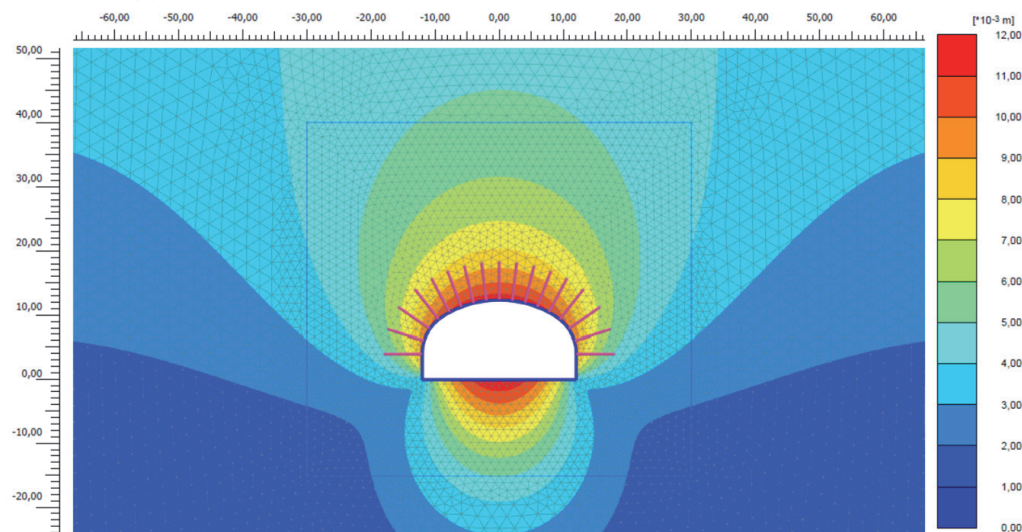
- i. Reforço para o trecho da Junta J2 com chumbadores de resina com 6,0m de comprimento e arranjos em leque de  $2,0 \times 6,0\text{m}$  e recomendação de aplicação de concreto projetado com fibras de polietileno com espessura de 10cm (Figura 36a);
- ii. Reforço para o trecho da Junta J3 com chumbadores de resina de 6,0m de comprimento e arranjo em leque de  $2,0 \times 3,0\text{m}$  e aplicação obrigatória de concreto projetado com fibras de polietileno com espessura de 10cm (Figura 36b e Figura 37).

Os chumbadores de resina são executados com barras de aço nervuradas e tradas contra a corrosão, de 32,0mm de diâmetro nominal e carga de trabalho igual a 200kN. O concreto projetado com fibra de polietileno ( $6\text{kg/m}^3$ ) é aplicado em 2 camadas de 5,0cm, totalizando 10cm de espessura.

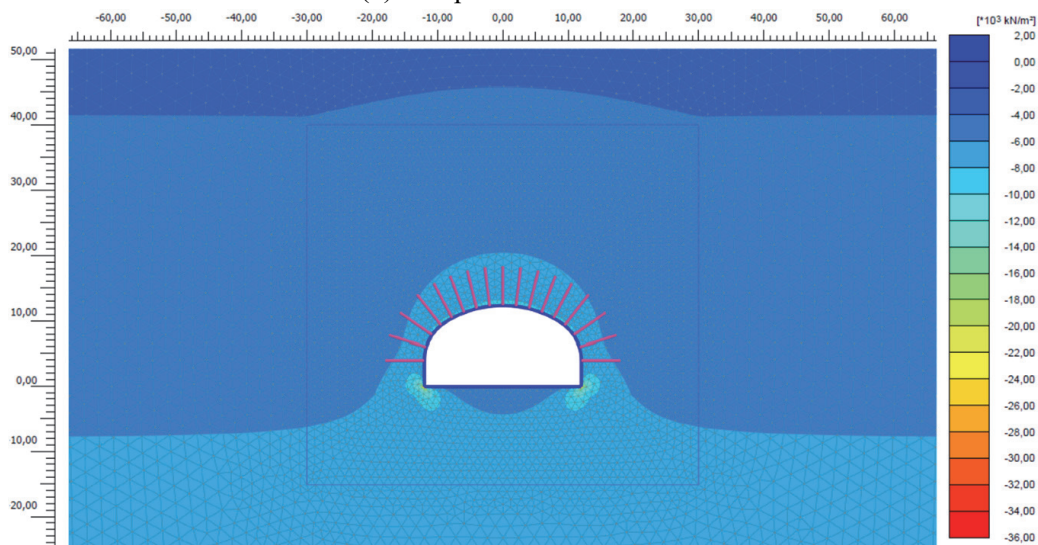




(a) Malha de 15776 elementos com sistema de reforço/revestimento



(b) Campo de deslocamentos



(c) Campo de tensões

**Fig. 35** – Análises numéricas do sistema de reforço/revestimento do túnel com 10cm de concreto projetado e chumbadores em arranjo 2,0 x 3,0m com 6,0m de comprimento.



(a) Chumbadores e drenos profundos – Junta J2



(b) Chumbadores e drenos profundos – Junta J3

**Fig. 36** – Execução dos leques de chumbadores e drenos horizontais profundos.



(a) Vista geral



(b) Detalhe dos leques de chumbadores e drenos

**Fig. 37** – Obras de reforço e drenagem profunda concluídas no trecho da Junta J3.

## 10 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os túneis são fundamentais na infraestrutura de transportes, serviços e outros setores e atividades da sociedade. A garantia do uso contínuo e eficiente desses ativos exige gestão e manutenção da estrutura, além de conhecimento técnico das características e comportamento ao longo da operação. O processo de degradação de túneis é progressivo no tempo e se inicia no momento da sua construção. Pode ser acelerado pela modificação das condições originalmente previstas ou retardado por meio de ações de reabilitação e rotina de manutenção, resultando no aumento da vida útil e diferentes custos de obras corretivas e de recuperação.

A manutenção e inspeção regulares do túnel garante desempenho, eficiência e segurança, minimizando gastos elevados ou desnecessários de reparo e impactos resultantes dos paralisações e restrições de operação/tráfego para obras.

O planejamento da metodologia da inspeção deve considerar as condições de contorno, de construção e operacionais do túnel e identificar as anomalias e patologias com suas causas principais, avaliando a influência na estabilidade do túnel e a evolução a médio e longo prazos.

As inspeções visuais são essenciais para a identificação de problemas e apresentam vantagens tais como simplicidade, rapidez e baixo custo, além de não exigirem equipamentos sofisticados e minimizarem as interferências de operação do túnel. Contudo, tem limitações inerentes à



subjetividade das observações da equipe e a dependência das características visíveis das anomalias. Novas tecnologias têm auxiliado e complementado a inspeção visual, destacando-se a varredura a laser 3D, que apesar de mais dispendiosa, fornece visão geral abrangente das características do túnel em curto período de tempo e ainda possibilita o monitoramento de convergências ao longo do tempo.

As intervenções de recuperação em túneis devem ser avaliadas considerando, além dos custos envolvidos, tipo da anomalia, condições de acesso, duração da obra, restrições de fechamento da via/túnel, desempenho e durabilidade a longo prazo, obstrução/acessibilidade para inspeções e manutenção futuras. Vão desde reparos corretivos a estruturais, destacando-se o uso de concreto projetado com fibras pelo comportamento mecânico, custos e diversas vantagens executivas.

Por fim, este trabalho não tem a pretensão de exaurir um tema tão abrangente quanto a manutenção para gestão e operação de túneis e sim de contribuir com técnicas, métodos e experiências e incentivar e valorizar a atividade no Brasil.

## 11 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições e parcerias de Luiz Jacques de Moraes (in memoriam) e Guilherme Jacques de Moraes (JACMINAS), Tiago Barros e Paulo Ragone (MRS Logística), Lucas Oliveira Neno e Sérgio Figueira (PORTO SUDESTE DO BRASIL) e os incentivos de Tarcísio Celestino (USP), Jorge Almeida e Sousa (Univ. Coimbra) e Alberto Sayão (PUC-Rio) para a elaboração do trabalho.

## 12 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barton, N.; Grimstad, E. (2014). *Forty Years with the Q-System in Norway and Abroad*. Geoteknikk, pp. 4.1 – 4.25.
- Bieniawski, Z. T. (1993). *Classification of Rock Masses for Engineering: The RMR System and Future Trends*. Comprehensive Rock Engineering – Principles, Practice & Projects, V3, pp. 553-573, Pergamon Press.
- Bilfinger, W. (2005). *Impermeabilization Versus Drainage – Some Considerations Regarding Lining Loads*. Felsbau Rock and Soil Engineering, Vol. 3, pp. 55-61.
- CBT (2006). *Túneis do Brasil – Tunneling in Brazil*. Ed. Celestino et al., DBA Artes Gráficas, Comitê Brasileiro de Túneis, CBT, 322 p.
- Celestino, T.B. (2005). *Shotcrete and Waterproofing for Operational Tunnels*. Working Group N°12 Shotcrete Use, 5p.
- CETU (2015a). *Road Tunnel Inspection Guide Book 1*. Centre d'Etudes des Tunnels, Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement et Direction des Routes, France, 132 p.
- CETU (2015b). *Road Tunnel Inspection Guide Book 2*. Centre d'Etudes des Tunnels, Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement et Direction des Routes, France, 140 p.
- CIRIA (2009). *Tunnels inspection assessment and maintenance*. Report C671, Construction Industry Research and Information Association, 504 p.
- Feng, X. (2017). *Rock Mechanics and Engineering, V4: Excavation, Support and Monitoring*. CRC Pres, 728 p.
- FHWA (2005). *Highway and Rail Transit Maintenance and Rehabilitation Manual*. Federal Highway Adm. and Federal Transit Adm., FHWA-IF-05-017, Washington, DC, 276 p.
- FHWA (2015). *Tunnel Operations, Maintenance, Inspection and Evaluation Manual, TOMIE Manual*, Federal Highway Adm. and Federal Transit Adm., Bergeson & Ernst, 263 p.



- GEOPHI (2017a). *Projeto de Recuperação e Reforço do Túnel 7 da RUMO Logística, Serra de Santos, Km 90,630 – Km 90,727*. Relatório Técnico GPHI-PJ69-MC-414-14-001-R2, Geophi Engenharia, 94 p.
- GEOPHI (2017b). *Projeto Executivo de Recuperação do Túnel T31, Linha do Centro, MRS - Km 372 + 056*. Relatório Técnico GPHI-PJ80-MC-414-14-401-R0, Geophi Engenharia, 36 p.
- GEOPHI (2020a). *Avaliação das Condições Geotécnicas do Túnel Marinhos, Ramal Paraopeba, MRS - Km 554+000*. Relatório Técnico GPHI-PJ127-RT-414-00-001-R2, Geophi Eng., 29 p.
- GEOPHI (2020b). *Projeto Executivo de Recuperação do Túnel do Porto Sudeste*. Relatório Técnico GPHI-PJ99-MC-414-03-001-R2, Geophi Engenharia, 57 p.
- Grimstad, E.; Barton, N. (1993). *Updating of the Q-System for NMT*. Proc. Int. Symp. On Sprayed Concrete, Eds Kompen, Opsahl and Berg, Norwegian Concrete Assoc., Norway, pp. 43-66.
- Haack, A.; Schreyer, J.; Jackel, G.S. (1995). *State-of-the-art of Non-destructive Testing Methods for Determining the State of a Tunnel Lining*. Tunnelling and Underground Space Technology, 10, pp. 413-431.
- Hoek, E; Kaiser, P. K.; Bawden W. F. (1994). *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. A.A. Balkema. Rotterdam. Brookfield, 235 p.
- Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering*, Rocscience, 341 p.
- Iftimie, T. (2001). *Prolongation de la durée de vie des tunnels anciens par des travaux de réhabilitation. - Progress in Tunnel after 2000*. AITES-ITA World Tunnel Congress - Milano, SIG - Società Italiana Gallerie, STS - Swiss Tunnelling Society, V2, pp. 603-610.
- ITA (1991). *Report on the Damaging Effects of Water on Tunnels during Their Working Life*. Working Group on Maintenance, Tunnelling and Underground Space Tech., V6, pp. 11-76.
- ITA (1993). *Shotcrete for Rock Support: a summary report on the state of the art in 15 countries*. Tunneling and Underground Space Technology, V8, N4, pp 441 – 470.
- ITA (2001). *Study of methods for repair of tunnel linings*. Working Group No 6 Maintenance and Repair, 81 p.
- ITA (2006a). *Shotcrete for rock support – A summary report on state-of-the-art - Part A*. Report from the Working Group N°12 Shotcrete Use, 8 p.
- ITA (2006a). *Shotcrete for rock support – A summary report on state-of-the-art - Part B*. Report from the Working Group N°12 Shotcrete Use, 57 p.
- ITA (2010). *Shotcrete for rock support – A summary report on state-of-the-art - Part B*. Report from the Working Group N°12 Shotcrete Use, 15 p.
- Malafaia, A. (2015). *Inspeção de Túneis Ferroviários e as Limitações Impostas pela Operação*. Monografia, Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, IME, Rio de Janeiro, 12 p.
- MASSDOT (2018). *Tunnel Inspection Handbook, 2018 Edition*. Massachusetts Department of Transportation, 322 p.
- Montero, R; Victores, J.G; Martínez, S.; Jardón, S.A.; Balaguer, C. (2015). *Past, present and future of robotic tunnel inspection*. Automation in Construction, RoboticsLab, University Carlos III of Madrid, Spain, 20 p., <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.02.003>.

- NCHRP (2011). *Best Practices for Roadway Tunnel Best Practices for Roadway Tunnel Design, Construction, Maintenance, Inspection, And Operations*. Project 20-68A, National Cooperative Highway Research Program, 186 p.
- Palmström, A. (1996a). *Characterizing Rock Masses by the R<sub>Mi</sub> for Use in Practical Rock Engineering – Part 1: The development of the Rock Mass index (R<sub>Mi</sub>)*. Journal of the Tunneling and Underground Space Technology, V 11, n. 2, pp. 175-188.
- Palmström, A. (1996b). *Characterizing Rock Masses by the R<sub>Mi</sub> for Use in Practical Rock Engineering – Part 2: Some practical applications of the Rock Mass index (R<sub>Mi</sub>)*. Journal of the Tunneling and Underground Space Technology, V 11, n. 3, pp. 287-303.
- Palmström, A. (2009). *Combining the RMR, Q, and R<sub>Mi</sub> classification systems*. Tunnelling and Underground Space Technology Vol. 24, pp 491-491; [www.rockmass.net](http://www.rockmass.net).
- Patterson, D.; Perry, J. (1998). *Geotechnical data and asset management systems for highways*. Proc. Conf. Maintenance Engineers, Nottingham, Surveyor and Municipal Journal, London, 8p.
- Sandrone, F.; Labiouse, V. (2011). *Identification and analysis of Swiss National Road tunnels pathologies*. Tunnelling and Underground Space Technology, 26, pp. 374–390.
- Sandrone, F.; Labiouse, V.; Mathier, J.F. (2007). *Data Collection for Swiss Road Tunnels Maintenance*. Geomechanik und Tunnelbau, 8 p.
- Singh, B.; Goel, R. (2006). *Tunnelling in Weak Rocks*. Elsevier Geo-Engng Book Series V5, 489 p.
- SIP (2018). *Infrastructure Maintenance Renovation and management*. Cross-Ministerial Innovation Promotion Program, Japão, 64 p.
- Stacey, T.R. (2001). *Membrane support mechanisms, loading mechanisms, desired membrane performance, and appropriate testing methods*. Proc. Colloquium Shotcrete and Membrane Support, S. Afr. Inst. Min. Metall., 20 p.
- Vasconcellos (1934). *Vias Brasileiras de Comunicação – Estrada de Ferro Central do Brasil – Linha do Centro e Rammaes*. 5ª ed., Imprensa Nacional, Brasil, 525 p.