

# INSPEÇÃO DE TÚNEIS FERROVIÁRIOS E AS LIMITAÇÕES IMPOSTAS PELA OPERAÇÃO

Aline Malafaia Caetano

## RESUMO

As atividades de inspeção são essenciais à gestão de qualquer estrutura de Engenharia. Com vistas a se assegurar vida útil e segurança operacional, inspeções são necessárias nos diversos tipos de túneis, com a utilização de diversas metodologias e técnicas. A operação ferroviária traz limitações particulares, dificultando a seleção da metodologia e técnica a serem utilizadas, a fim de se atender às necessidades operacionais. À luz dessas limitações, este trabalho analisa a prática usualmente aplicada a túneis de diversos propósitos no mundo. O produto final é a análise crítica de sua aplicabilidade ao contexto da operação ferroviária.

## ABSTRACT

*Inspection activities are essential part of any Engineering structure management. In order to ensure service life and operational safety, inspection activities are needed in every purpose tunnel, using a large variety of methodologies and techniques. Railway operation brings particular constrains, making harder the selection of the methodology and technique to be used. Looking on these constrains, the present study analyses the practice currently used for several purpose tunnels in the world. The final result is a critical analyses of its applicability to the railway operation context.*

## 1. INTRODUÇÃO

Em qualquer obra ou equipamento em operação, as atividades de inspeção são essenciais à garantia de sua vida útil e seu funcionamento adequado. Inspeções podem ser preventivas ou corretivas. As inspeções preventivas antevêm falhas e significam investimentos mais baixos. Já as inspeções corretivas implicam em investimentos adicionais de manutenção corretiva.

Um Plano de Inspeção é necessário, tanto no período de implantação, quanto no período de operação. Neste último, além de em muito maior quantidade e frequência, possui forte interdependência com o planejamento operacional e o volume de produção.

Quando trata de uma obra subterrânea ferroviária, a complexidade da atividade aumenta devido às diversas restrições impostas pelo contexto *obra subterrânea e operação ferroviária*.

Na busca de uma contribuição efetiva à redução de custos, o presente trabalho tem foco específico em inspeções preventivas de túneis ferroviários em operação. É feita uma análise crítica das metodologias e técnicas atualmente em uso no mercado mundial de inspeção de túneis, considerando-se as restrições e condicionantes importas pelo contexto em questão.

O trabalho se desenvolve com uma descrição com base bibliográfica e prática. Num segundo momento, é realizada a análise crítica dessa descrição, abordando-se as principais condicionantes decorrentes do contexto operacional ferroviário e comparando-se com a experiência mundial e a realidade específica de cada país mencionado. Dessa forma, o trabalho contribui com conceitos a serem considerados na seleção e no planejamento eficaz de metodologia e técnicas.

## 2. INSPEÇÃO DE TÚNEIS

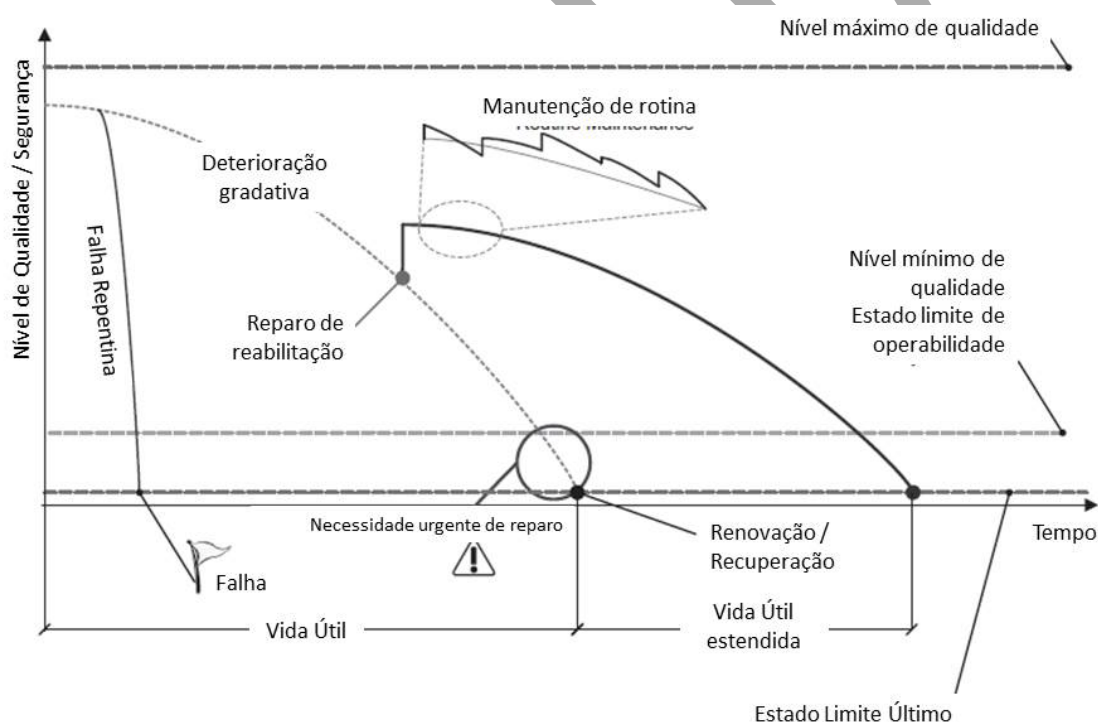
Obras subterrâneas em geral apresentam complexidades não comuns às obras a céu aberto. A dificuldade de acesso, as incertezas geológico-geotécnicas e a inacessibilidade à região interna da estrutura são os principais fatores que diferenciam os túneis das demais estruturas de engenharia.

Tais características reforçam a importância das atividades de inspeção preventiva durante o período operacional dos túneis. Richards (1998) já destacava o quanto um programa de inspeção devidamente estruturado e planejado pode prolongar a vida útil da obra subterrânea por meio da antecipação de problemas e do planejamento de intervenção de reabilitação.

No contexto de túneis, as falhas podem ocorrer tanto no maciço (rochoso ou não rochoso) quanto no revestimento interno. Por isso, as atividades de inspeção podem ter dois focos distintos: a verificação das condições (geológico-geotécnicas, geomecânicas e hidrológicas) do maciço e a verificação das condições (de integridade) do material de revestimento (concreto armado, concreto projetado, aço ou até alvenaria e madeira, no caso de estruturas muito antigas).

## 2.1. Conceito

O processo de degradação de túneis é gradual, podendo ser acelerado pela modificação das condições originalmente previstas ou retardado com ações de reabilitação e rotina de manutenção. A **Figura 1**, adaptada de F. Sandrone (2011), ilustra esse processo.



**Figura 1:** Evolução, no tempo, do nível de qualidade de um túnel e o efeito da prática de manutenção durante sua vida útil.

As atividades de inspeção, portanto, se constituem na base para a gestão da estrutura quanto à sua operabilidade, segurança e manutenção. É por meio dessas atividades que serão monitoradas as *condições de contorno*, definida a *rotina de manutenção preventiva* e identificada a eventual necessidade de *intervenções de reparo*.

A prática mundial tem mostrado a importância de as atividades de inspeção fazerem parte de um programa, envolvendo o planejamento e alternadas etapas de inspeção de campo e

escritório para interpretação de dados e tomada de decisão. Com esse conceito, será utilizado o termo *metodologia* para esse conjunto de atividades e *técnica* para a aplicação de uma técnica ou prática específica em campo.

Em estruturas subterrâneas, o planejamento da metodologia de inspeção é primordial. Devido às limitações de acesso, esse planejamento deve envolver, além da definição de agenda, o detalhamento das atividades a serem desenvolvidas no interior da estrutura. A otimização das atividades passa pela definição de *o que inspecionar*, com base no estudo dos problemas mais frequentes na estrutura em questão e em outras de realidades similares.

O planejamento da metodologia de inspeção baseia-se na definição prévia de *o que inspecionar* e deve levar em conta alguns fatores essenciais:

- As *condições de contorno* devem ser sempre verificadas nas inspeções, preferencialmente com base em análise paramétrica das condições iniciais de contorno. Por exemplo, novas surgências de água são de ocorrência frequente após longo período do túnel em operação. Richards (1998) chama atenção para o fato de que “nem todos os defeitos são óbvios”; e isso se aplica a todo tipo de falha em uma estrutura escondida no subterrâneo.
- A *realidade da época de construção* da construção da estrutura, que pode implicar em características específicas, não observadas em outras circunstâncias. Um bom exemplo desse caso são os túneis construídos no Japão durante a Segunda Guerra, que apresentam maior ocorrência de percolação de água, provavelmente devido à dificuldades no fornecimento dos materiais de construção (Akira Inokuma, 1996).
- As *condições operacionais* são um dos fatores mais influentes na estabilidade e segurança de obras de engenharia em operação. Essas são de consideração primordial na pré-análise de planejamento das inspeções preventivas: tipo de operação, condições ambientais decorrentes da operação, acidentes ou incidentes operacionais, dentre outros exemplos.

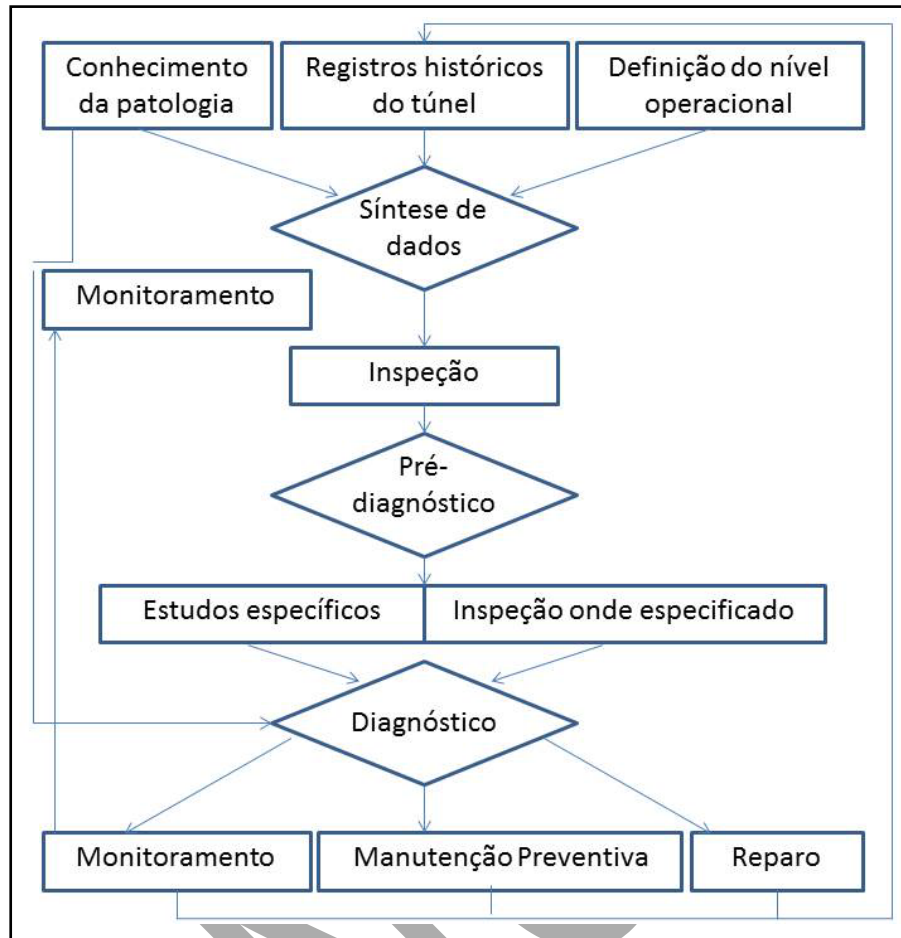
Por fim, a metodologia deve ser tal que se alcance um diagnóstico com (F. Sandrone, 2011):

- Descrição dos problemas e sua extensão / quantificação;
- Identificação de suas causas e dos principais fatores que contribuem para seu agravamento;
- Avaliação de sua influência na estabilidade do túnel e de sua evolução no longo prazo.

## 2.2. Metodologias e técnicas

Diversos autores descrevem metodologias já em uso por concessionárias e países na prática das inspeções; outros, sugerem novas metodologias. A seguir, são destacadas algumas das metodologias encontradas na bibliografia científica.

A **Figura 2** retrata a metodologia proposta em (ITA Working Group on Maintenance, 1991). Vale destacar a previsão de atividades de escritório, além das de campo: o conhecimento da patologia e duas etapas de análise do monitoramento. É interessante também a previsão de investigações complementares para suportar o diagnóstico final.



**Figura 2:** Passo a passo para investigação de falhas em túneis, conforme proposto em (ITA Working Group on Maintenance, 1991).

F. Sandrone (2011) propõe o baseamento do planejamento na análise do cenário de degradação, cujo conceito é sumarizado em:

- Análise das condições iniciais, para estimativa do potencial de degradação;
- Análise da vida útil e operação do túnel, para estimativa;
- Análise dos cenários de degradação.

Como parte de qualquer metodologia adotada, deve ser selecionada ao menos uma técnica a ser utilizada nas atividades *in situ*. Essa seleção definirá os recursos a serem aplicados nessa etapa.

A tradicional técnica manual ainda é amplamente utilizada em túneis destinados a todo tipo de propósito. No entanto, diversas outras técnicas têm sido desenvolvidas para aplicação na inspeção de túneis. Elas podem ser agrupadas de acordo com diferentes critérios:

- (i) Quanto ao grau de interferência com a estrutura:
  - Destrutivas
  - Não destrutivas

A utilização de técnicas não destrutivas é objetivo de toda inspeção. Sempre que possível, elas são utilizadas em larga escala, ficando as inspeções parcialmente destrutivas para casos específicos e mais críticos, como quando é necessária a extração de amostras para ensaios em laboratório.

- (ii) Quanto ao grau de automação:
- Não automatizadas
  - Semi automatizadas
  - Automatizadas

As técnicas mecanizadas têm sido desenvolvidas e aplicadas há anos. É crescente a aplicação de técnicas originalmente desenvolvidas para outros propósitos, mas que têm se mostrado interessantemente adequadas à investigação de túneis, geralmente ainda dependentes de recursos humanos. No entanto, inúmeros esforços são atualmente investidos na busca de técnicas totalmente automatizadas.

- (iii) Quanto ao objeto da inspeção:
- Inspeção do maciço
  - Inspeção do revestimento

Quanto ao objeto a ser inspecionado, a seleção de técnicas está diretamente ligada às características do túnel, bem como ao planejamento prévio e à análise dos problemas de provável ocorrência no contexto em estudo.

Esses agrupamentos não são exclusivos nem exaustivos. Na Tabela 1, são listadas as principais técnicas atualmente em utilização, agrupadas de acordo com a técnica:

Existe atualmente significativo esforço no sentido de aprimorar as técnicas não destrutivas robotizadas. O foco tem sido a otimização das investigações com imagem (TLS e visual robotizado) e georadar. As principais linhas de avanço são descritas por R. Montero (2015), além das abordagens de (J.G. Victores, 2011), (Pejic, 2013), (Seung-Nam Yu, 2007) e (Weixing Wang, 2014).

### **3. Inspeção de túneis ferroviários**

Da mesma forma pela qual o desenvolvimento industrial trouxe a necessidade de uma malha de corredores logísticos, o crescimento econômico vem exigindo cada vez maior ocupação desses corredores. A consequência direta do aumento de demanda é o encolhimento das janelas operacionais, reduzindo as faixas destinadas à manutenção e aumentando o risco de negligência das inspeções periódicas na via permanente ferroviária.

No caso de túneis ferroviários, esse cenário é ainda agravado por fatores característicos dessa utilização, que restringem ou retardam o processo de inspeção: limitações de tempo, espaço e a necessidade de dois tipos de inspeção – inspeção da estrutura / maciço e inspeção da via. É, portanto, relevante toda análise que identifique metodologias e técnicas que atendam às necessidades específicas desse contexto – tema pouco abordado em trabalhos públicos.

**Tabela 1:** Técnicas atualmente utilizadas, organizadas de acordo com seu princípio operativo

<b>Princípio operativo</b>	<b>Técnica</b>
Visual	Humano
	Robotizado
Análise de resistência	Reflexão física: Martelo Schmidt (“Schmidt Hammer”)
	Penetração: Ensaio Windsor (“Windsor Probe”)
	Macaco Plano (“Flat Jack Testing”)
Análise de ondas sonoras	Sônico (“impact-echo test, hammer blows”)
	Ultrasônico
Magnético	“Magnetic Flux Leakage”
	“Magnetic Field Disturbance method”
Elétrico	Medida de resistência
	Medida de potencial
Termográfico	
Radar	GPR air-coupled
	GPR ground-coupled
Radiográfico	Raios X
	Raios gama
	Raios nêutron
Endoscópico	
Eletromagnético	laser (TLS)

### 3.1. Contexto e restrições

#### 3.1.1. Restrição de tempo

O primeiro fator restritivo específico de túneis em sistemas de transporte é o tempo. Principalmente no caso de transporte ferroviário, a operação tende a ser regular. Paradas operacionais ou reprogramações implicam em perda de volume (carga ou passageiros) transportado e, conseqüentemente, receita. Em malhas ramificadas, pode ser possível o replanejamento da operação de modo a se absorver total ou parcialmente essa perda.

Richards (1998) destaca que a inevitável interrupção da operação associada às atividades de inspeção em túneis requer um balanço adequado entre frequência e abrangência. Fica, então, reforçada a necessidade de planejamento detalhado dessa importante etapa da manutenção preventiva.

No Brasil, os trechos de maior ocupação com transporte ferroviário de carga dispõem de apenas duas horas de janela entre trens. Em geral, semanalmente é disponibilizada faixa de 4h para manutenção programada. Nos trechos em linha dupla, as faixas podem ser maiores (podendo chegar a mais de um dia), mas implicam na reprogramação da operação. Solicitações específicas podem ser feitas para faixas maiores. Estes dois últimos casos não são muito bem aceitos pela equipe operacional, devendo ser utilizados apenas em casos extremos.

A. Haack (1995) sugere que equipamentos / veículos de inspeção devem utilizar velocidade mínima de 5km/h para se alcançar agilidade. Atualmente, com o aumento da demanda e diminuição ainda maior da disponibilidade de linha, pode ser necessária uma velocidade ainda maior. Não se pode deixar de lado o fato de que, acima de critérios, a relação entre velocidade e inspeção completa está diretamente ligada à extensão e complexidade da estrutura em questão.

### 3.1.2. Restrição de espaço

Outro limitador característico de túneis ferroviários é o espaço. O *span*, ou abertura máxima, de um túnel ferroviário é comumente estreito, dimensionada apenas à passagem da composição (entre 2 e 3m, no caso de linhas singelas). Essa abertura estreita se constitui, portanto, num limitador do tipo de equipamento a ser utilizado na inspeção.

### 3.1.3. Agressividade do ambiente

O ambiente interno de túneis ferroviários é caracterizado pela concentrada poluição com óxidos (emitidos na passagem das composições), temperatura alta (devido à baixa circulação de ar e às próprias emissões da operação) e umidade alta (pelas próprias características geológico-geotécnicas do maciço). Tais características influenciam a seleção do tipo de equipamento a ser utilizado e o tempo de permanência humana.

Além de ser um limitador, a agressividade do ambiente de túneis ferroviários é um fator relevante no planejamento da inspeção. A intensidade com que eles se revelam orientará “o que” inspecionar e com que frequência. F. Sandrone (2011) destaca que, juntamente com as características ambientais gerais, a agressividade do meio é apontada como causa principal dos problemas em túneis de quase todos os países por ele estudados. As reações químicas do contato, tanto do maciço quanto do concreto de revestimento, com a água e os óxidos acabam por acelerar o processo de degradação.

A agressividade do ambiente está diretamente ligada aos padrões de tráfego (planejamento operacional) e à forma com que as emissões são removidas (sistema de ventilação), como sugere (F. Sandrone, 2011).

O ambiente operacional de uma ferrovia também sofre, caracteristicamente, com vibrações intensas e constantes. Esse também é um fator agressivo à estrutura (maciço e/ou revestimento) dos túneis ferroviários. Exemplos disso são os túneis Fukuoka e Rebunhama, no Japão. Dentre outras causas, o deslocamento do revestimento de concreto foi associado à vibração dos trens em operação. (Toshihiro 2003)

As limitações e características próprias de túneis ferroviários reforçam a necessidade de objetividade, agilidade e segurança – fatores determinantes do sucesso da inspeção. E o pré-planejamento fica ainda mais evidente como etapa indispensável para que o tempo no interior

do túnel seja reduzido. A seguir, são discutidas as metodologias e técnicas para túneis em geral, sob a ótica de sua aplicabilidade específica a túneis ferroviários.

### **3.2. Análise crítica das metodologias**

Quando se fala em metodologias, fala-se de uma grande diversidade de procedimentos que envolvem atividades analíticas, em escritório, e de coleta de dados *in situ*. Dificilmente um procedimento será classificado como “errado”.

Frente às limitações já discutidas, impostas pela operação ferroviária, tal procedimento exige a necessidade de algumas etapas: Estudo do contexto; Planejamento das atividades *in situ*; Inspeção primária, de análise global; Inspeção secundária, de análise detalhada, com foco específico.

A inexistência de uma ou mais dessas etapas não inviabiliza as atividades de inspeção, mas tende a torná-las menos eficazes ou improdutivas.

### **3.3. Análise crítica das técnicas**

Em sua análise, A. Haack (1995) destaca requisitos para a seleção de ensaios não destrutivos na inspeção de revestimento de túneis envolvendo abrangência do ensaio, aplicabilidade, acessibilidade, independência da operação, resistência aos efeitos operacionais. (R. Montero, 2015) apresenta uma análise detalhada das diversas técnicas atualmente em utilização, além de destacar as principais tendências no tema “inspeção robotizada”.

Utilizando-se dos requisitos listados por A. Haack (1995), da análise atualizada de (R. Montero, 2015) e, principalmente, considerando-se as limitações impostas pela operação ferroviária em túneis, pode-se comentar sobre sua aplicabilidade:

#### *3.3.1. Técnicas de aplicação em inspeção primária:*

- *Inspeção visual robotizada*: Vale a pena ser usado como primeira inspeção, apesar de cara. Ressalta-se que as conclusões podem ser influenciadas pelas limitações de acurácia e qualidade das imagens;
- *Termografia*: de aplicação interessante e, em geral, viável para a inspeção do revestimento de concreto;
- *GPR*: aplicável para a pesquisa de deslocamentos / escamações, vazios com presença de água e ar, impurezas e deformidades do revestimento de concreto e zonas anômalas no maciço rochoso. Especificamente o GPR “ground-coupled” é mais recomendado para a inspeção secundária, devido à sua baixa velocidade;
- *Scaneamento a laser (TLS – “Terrestrial Laser Scanning”)*: Sua grande vantagem é sua capacidade de gravação de grande volume de dados (pontos) com alta acurácia em um curto período de tempo, comparado às demais técnicas.

#### *3.3.2. Técnicas de aplicação em inspeção secundária:*

- *Inspeção visual com recurso humano*: por ser demorada, arriscada quanto à segurança do inspetor e de resultado subjetivo, recomenda-se a utilização com foco em pontos específicos selecionados a partir da inspeção primária;
- *Martelo Schmidt (“Schmidt Hammer”)*: por se tratar de atividade demorada, recomenda-se utilização em com necessidade de detalhamento da resistência de superfície e subsuperfície;



- *Ensaio sônico, como o “impact-echo test” e o “hammer blows”, ou ultrassônico:* quando detectada a necessidade de detalhamento de defeitos como vazios e escamações no concreto;
- *Ensaio magnético, como o “Magnetic Flux Leakage”, ou elétrico:* quando detectada a necessidade de controle de corrosão de armadura;
- *Endoscopia:* quando detectada a necessidade de inspeção detalhada do interior das paredes / maciço da estrutura.

### 3.3.3. Técnicas de aplicação não interessante:

- *Ensaio de penetração (“Windsor Probe Test”):* Determina a resistência de um ponto específico, é pontualmente destrutivo e lento;
- *Ensaio com macaco plano (“Flat Jack Testing”):* Determina a resistência de um ponto específico; é pontualmente destrutivo e lento. A aplicação a túneis ferroviários é interessante apenas em casos específicos identificados na inspeção primária, quando necessária a verificação do estado de tensões da estrutura / maciço.
- *Radiografia:* O acesso exclusivamente ao interior da estrutura, não permite a investigação completa da estrutura pelos dois lados, além de o longo tempo de exposição à radiação demandar grande esforço para se garantir a segurança do inspetor e do público envolvido.

Como contribuição adicional, vale observar o comparativo entre três técnicas – georadar (GPR), termografia e multispectro – apresentado por Richards (1998).

### 3.4. Inspeção da via

Como citado anteriormente, a inspeção de túneis ferroviários abrange dois focos: o túnel e a via. Os dois focos, quando combinados, se constituem no Plano de Inspeção. A inspeção da via se constitui em um fator específico e essencial à operabilidade de estruturas ferroviárias. As técnicas em utilização já são amplamente conhecidas e praticadas em trechos a céu aberto, e não são objeto do presente estudo.

Cabe apenas destacar a importância de se atentar às limitações de espaço impostas pela estrutura subterrânea. Obviamente, o momento crucial de se garantir gabarito para a passagem de EGPs (equipamentos de grande porte) de inspeção e manutenção de via é a fase de projeto.

Nem sempre essa compatibilidade é garantida, principalmente em se tratando de túneis antigos. Nesses casos, é necessária a avaliação prévia dos equipamentos a serem utilizados ou até a adaptação de alguns deles.

### 3.5. Experiência mundial em inspeção de túneis ferroviários

Uma importante contribuição à análise crítica de metodologias e técnicas aplicáveis à inspeção de túneis ferroviários é o compartilhamento de experiências em curso nas diversas realidades ao redor do mundo. A Tabela 2 apresenta breve descrição do que vem sendo praticado em túneis ferroviários em alguns países.

Observa-se ser um conceito preferencial a inspeção em duas etapas: primária e secundária, onde se tem primeiramente uma análise ampla e, posteriormente, seu detalhamento. Um conceito bastante válido também é a associação à inspeção da via ou à passagem da

composição. Logicamente, esses critérios possuem total relação com o tipo de problema recorrente em cada localidade.

**Tabela 2:** Prática mundial em túneis ferroviários

País	Metodologia	Frequencia	Técnica(s)
<u>Suíça</u> (F. Sandrone, 2011)	1) Análise das condições iniciais (“potencial de degradação”) 2) Análise do período operacional (“taxa de degradação”) 3) Definição da “probabilidade de falha” Priorização de intervenções *Banco de dados de 122 túneis		
<u>República Tcheca</u> (A. Haack, 1995)		inspeção frequente: mensal ou anual  grandes inspeções: a cada 5 anos	Visual
<u>França</u> (A. Haack, 1995)			georadar, ultrassom, termografia infravermelha / scanner
<u>Noruega</u> (A. Haack, 1995)	inspeção contínua, associada à inspeção de via	inspeção detalhada sob demanda (queda de blocos);  anual (zonas com perigo potencial);  a cada 5 anos (todos os túneis)	
<u>Japão</u> (Toshihiro Asakura, 2003)	inspeção primária (verificação de deformações) inspeção secundária (investigação detalhada de deformações).		
<u>Hungria</u> (A. Haack, 1995)		a cada 2 anos: manutenções com “bate-choco” *inspetores de via (visita frequente) reportam qualquer anormalidade referente ao túnel	

### 3.6. Discussão

É simples concluir, além de ser evidenciada pela prática mundial, a necessidade de uma metodologia estruturada de inspeção, que inclua atividades prévias e posteriores às atividades de campo.

Uma contribuição importante ao programa de inspeções é o histórico dos dados construtivos e operacionais do túnel. F. Sandrone (2011) reforça a necessidade de conhecimento detalhado do grau de degradação da estrutura, cuja análise da evolução subsidiará a tomada de decisão quanto à manutenção preventiva. Nos casos mais críticos, esse dado orientará a priorização de intervenção.

Em função da idade de muitos dos túneis atualmente existentes, em geral, não se dispõe dessa informação. Nesse caso, uma “inspeção zero”, que busque identificar o impacto decorrente da realidade construtiva e operacional ocorrido até o momento passará a ser a referência para as inspeções a seguir.

### 4. Conclusão

Frente às limitações adicionalmente impostas pela operação ferroviária à inspeção de túneis, fica clara a necessidade de:

- 1) *Conhecimento Prévio* – na medida do possível e dos dados disponíveis:
  - a. Condições geológico-geotécnicas locais originais;
  - b. Condições hidrogeológicas locais originais;
  - c. Condições operacionais de projeto;
  - d. Atualização do status das condições (a), (b) e (c), com as variações ocorridas ao longo do tempo;
  - e. Condições de construção;
  - f. Histórico de manutenções realizadas.
- 2) *Análise do conhecimento prévio* – com propósito de se definir o objeto de inspeção, identificando:
  - a. Problemas de possível ocorrência na estrutura;
  - b. Prováveis gatilhos desencadeadores desses possíveis problemas.
- 3) *Planejamento das atividades in situ* – definição detalhada de:
  - a. O que inspecionar;
  - b. Com que frequência inspecionar;
  - c. Qual será o tempo necessário no interior do túnel e as solicitações de faixa a serem repassadas ao CCO;
  - d. A necessidade de infraestrutura (equipamentos e pessoal) necessária, inclusive apoio e procedimentos de Saúde e Segurança, não esquecendo os itens ventilação e iluminação;
  - e. A(s) técnica(s) de inspeção a ser(em) utilizada(s).
- 4) *Atividades in situ* – desenvolvimento conforme planejamento;
- 5) *Análise e conclusões* – serviço de escritório com verificação comparativa entre as expectativas traçadas nas etapas (2) *Análise do conhecimento prévio* e os dados coletados nas (4) *Atividades in situ*.
- 6) *Inspeção adicional* – eventualmente, pode ser necessário o retorno ao campo, antes da próxima inspeção programada, para compreensão de algum dado não esperado resultante da etapa (5) *Análise e Conclusões*.

As etapas descritas compõem a metodologia de inspeção proposta para o foco *túneis* do Plano de Manutenção de Infraestrutura Ferroviária, um documento que abrange todos os componentes da infraestrutura ferroviária. Em termos conceituais, essas são as etapas a serem desenvolvidas para que inspeções seguras sejam asseguradas, com o mínimo de interferência com a operação e o máximo de eficiência.

A seleção da técnica a ser utilizada em campo é função do “tipo de problema” a ser estudado. As seguintes técnicas convivem de forma mais apropriadas com as limitações características de túneis ferroviários: Inspeção visual robotizada, Termografia, GPR; Scaneamento a laser (TLS – “Terrestrial Laser Scanning”).

### **Agradecimentos**

Agradeço à Vale S.A. a oportunidade de realização do curso de Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária de Carga, especialmente representada por aqueles que me indicaram para dele participar – Roberto Di Biase e João Cunhalima, bem como o meu atual gerente – Edmundo Ferraz – e demais colegas da GEPRO. Agradeço ao IME as instruções e direcionamento dados durante o curso, por meio dos professores Manoel Mendes e Luis A. Silveira Lopes. Por fim, agradeço ao meu orientador, Jorge Spada as discussões conceituais e comentários.

### **Referências**

- A. Haack, J. 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, 413–431.
- Akira Inokuma, S. I. (1996). Road Tunnels in Japan: Deterioration and Countermeasures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2, 305-309.
- Chia-Han Lee, Y.-C. C.-T.-H. (2013). Application and validation of simple image-mosaic technology for interpreting cracks on tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 34, 61–72.
- F. Sandrone, V. L. (2011). Identification and analysis of Swiss National Road tunnels pathologies. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, 374–390.
- ITA Working Group on Maintenance. (1991). Report on the Damaging Effects of Water on Tunnels During Their Working Life. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 6, 11-76.
- J.G. Victores, S. M. (2011). Robot-aided tunnel inspection and maintenance system by vision and proximity sensor integration. *Automation in Construction*, 20, 629–636.
- Lei Xiang, H.-l. Z.-h.-q. (2013). GPR evaluation of the Damaoshan highway tunnel: A case study. *NDT & E International*, 59, 68–76.
- M. Boccione, A. C. (2007). A measurement system for quick rail inspection and effective track maintenance strategy. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21, 1242–1254.
- Marco Macchi a, n. M. (2012). Maintenance management of railway infrastructures based on reliability analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 104, 71–83.
- Pejic, M. (2013). Design and optimisation of laser scanning for tunnels geometry inspection. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 199–206.
- R. Montero, J. V. (2015). Past, present and future of robotic tunnel inspection. *Automation in Construction*.
- Richards, J. A. (1998). Inspection, Maintenance and Repair of Tunnels: International Lessons and Practice. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13, 399-375.
- Seung-Nam Yu, J.-H. J.-S. (2007). Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel. *Automation in Construction*, 16, 255–261.
- Tai-Tien Wang a, J.-J. J.-H.-S. (2010). Profile-image method for measuring tunnel profile – Improvements and procedures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25, 78–90.
- Toshihiro Asakura, Y. K. (2003). Tunnel maintenance in Japan. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18, 161–169.
- Weixing Wang, W. Z. (2014). Applications of terrestrial laser scanning for tunnels: a review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1 (5), 325-337.