

Métodos de verificação para manutenção em pontes ferroviárias de aço

Roger Pieri¹, Vinicius Barichello², Felipe Abiz³ e Helena Szortika Quadros⁴

¹ Finger & Sommer Engenharia e Consultoria Ltda / Engenharia Civil / pieri@fingersommer.com

² MRS Logística S.A. / Engenharia Civil / vinicius.barichello@mrs.com.br

³ Finger & Sommer Engenharia e Consultoria Ltda / Engenharia / abiz@fingersommer.com

⁴ Finger & Sommer Engenharia e Consultoria Ltda / Engenharia / quadros@fingersommer.com

Resumo

A infraestrutura ferroviária do Brasil surgiu no século XIX, principalmente com a construção de pontes em aço. As ferrovias trazem grandes benefícios para a sociedade tais como: competitividade, baixo custo de transporte, sustentabilidade, além de serem um patrimônio histórico nacional. Devido a isso sua conservação e manutenção tem extrema relevância para a infraestrutura brasileira. Mostrando como estudo de caso um exemplo de ponte da malha ferroviária Linha do Centro, a qual pertenceu à Estrada de Ferro Central do Brasil, ligação entre Rio de Janeiro e Belo Horizonte. O objetivo é apresentar os principais métodos de inspeção e ensaios para verificar as manifestações patológicas em pontes ferroviárias de aço. Para inspeção visual utilizou-se VANT (veículo aéreo não tripulado), e com acesso por corda fez-se registros fotográficos dos elementos estruturais. Por meio do acesso por corda também foram realizados ensaios não-destrutivos e destrutivos para verificar a qualidade dos elementos, sendo os ensaios não-destrutivos: líquido penetrante (NBR 15691; NBR 16450) e velocidade de pulso ultrassônico, ambos para verificar a qualidade da solda referente a descontinuidades; medição de espessura de película seca (NBR 10443) e aderência de película seca (NBR 11003), as quais visam avaliar alguma deficiência na película de tinta, barreira que promove a proteção anticorrosiva do substrato e o ensaio destrutivo para caracterização mecânica do aço (ASTM A 370) por meio de extração de corpo de prova. Os ensaios não destrutivos se mostraram eficientes para verificação de falhas nos elementos analisados e o ensaio destrutivo teve relevância fundamental visto a falta de caracterização do aço na ponte vistoriada, sendo estes dados necessários para a realização de projetos de recuperação e manutenção. Os métodos de verificação são fundamentais para manutenção da estrutura a fim de garantir sua eficiência estrutural.

Palavras-chave

Pontes de aço; pontes ferroviárias; ensaios em aço; manifestações patológicas; métodos de inspeção; manutenção de pontes.

Introdução

A Revolução Industrial teve início no século XVIII, na Inglaterra, e com a mecanização dos sistemas de produção houve intensificação no volume de mercadorias produzidas, resultando na necessidade de transportá-las com rapidez. As ferrovias colaboraram para atender a demanda do mercado, sendo o meio de transporte mais utilizado na época. Através do investimento dos empresários ingleses, George Stephenson criou a primeira

locomotiva a vapor (DUFFY, 1981). No Brasil, em 1828 começaram as primeiras iniciativas nacionais em relação a construção de ferrovias. A primeira ferrovia do país foi a Estrada de Ferro Mauá construída após a concessão do Governo Imperial para o empreendedor Irineu Evangelista de Sousa. (SANTOS et al., 2009).

Segundo a ANTT (2017), o governo federal implementou ações práticas direcionadas a privatizações, concessões e delegação de serviços públicos de transporte a Estados, Municípios e iniciativa privada, a fim de contribuir com a melhora de oferta e da qualidade do serviço oferecido. Atualmente a malha ferroviária Brasileira possui 30.576km de extensão, sendo 7.492km em bitola 1,6m, 23.027km em bitola 1m e 510km em bitola mista.

As ferrovias trazem grandes benefícios para a sociedade tais como: competitividade, baixo custo de transporte, sustentabilidade, além de serem um patrimônio histórico nacional. Devido a isso sua conservação e manutenção tem extrema relevância para a infraestrutura brasileira.

As estruturas em geral sofrem pela ação do clima, a qual é contribuinte direto para o surgimento de manifestações patológicas relacionadas com diversas causas de deterioração, sendo elas: poluição, umidade, agressividade do meio, uso indevido, variações bruscas de temperatura, entre outras. Conforme Pravia e Betinelli (2016), as manifestações patológicas mais comuns em estruturas de aço são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Manifestações patológicas comumente em estruturas de aço

Manifestações patológicas no aço	Principais causas
Corrosão localizada	Deficiência de drenagem das águas pluviais e de detalhes construtivos, permitindo o acúmulo de umidade e de agentes agressivos.
Corrosão generalizada	Ausência de proteção contra o processo de corrosão.
Deformações excessivas	Sobrecargas ou efeitos térmicos não previstos no projeto original, ou ainda, deficiências na disposição de travejamentos.
Flambagem local ou global	Uso de modelos estruturais incorretos para verificação da estabilidade, ou deficiências no enrijecimento local de chapas, ou efeitos de imperfeições geométricas não consideradas no projeto e cálculo.
Fratura e propagação de fraturas	Falhas iniciadas por concentração de tensões, devido a detalhes de projeto inadequados, defeitos de solda, ou variações de tensão não previstas no projeto

FONTE: PRAVIA e BETINELLI (2016).

Os principais agentes agressivos que têm influência no tempo de vida útil das construções são: envelhecimento dos componentes da estrutura, ações ambientais e agentes externos como poluentes, produtos químicos e água contaminada.

Diante da importância da malha ferroviária para o desenvolvimento industrial do país, e da necessidade de conservação das obras de artes especiais (OAE) vinculadas a essa

infraestrutura implantada, surge a necessidade de averiguar as condições de uso dessas, por meio de inspeções corriqueiras.

Portanto, esse trabalho tem como objetivo apresentar os principais métodos de inspeção e ensaios para verificar as manifestações patológicas em pontes ferroviárias de aço, mostrando como estudo de caso um exemplo de ponte da malha ferroviária Linha do Centro a qual pertenceu à Estrada de Ferro Central do Brasil, ligação entre Rio de Janeiro e Belo Horizonte.

Metodologia

As avaliações de viadutos e pontes ferroviárias existentes são realizadas a partir de métodos de inspeção/verificação que contemplam a execução de inspeção visual, ensaios destrutivos e não-destrutivos. Dentro deste item serão apresentados os métodos de verificação utilizados para inspeção de pontes de aço, apesar das pontes geralmente serem constituídas de estruturas mistas de aço e concreto. Este trabalho se deterá apenas a relatar os ensaios e verificações realizadas nas estruturas de aço, e também será descrito o estudo de caso demonstrado como exemplo.

Métodos de Verificação

Inspeção visual

Este método de inspeção visa identificar manifestações patológicas, avaliar seus danos e realizar melhorias no projeto a fim de aumentar a vida útil dos viadutos e pontes ferroviárias inspecionadas.

A inspeção visual é o primeiro passo a ser realizado, e tem como objetivo identificar as áreas afetadas por manifestações patológicas, sendo essas as que merecerão maior atenção com desenvolvimento de ensaios não-destrutivos e ensaios destrutivos quando for necessário para melhor entendimento do problema. O processo de visualização permite determinar se o problema se apresenta de maneira isolada ou de forma generalizada na estrutura.

Os elementos da estrutura devem ser analisados de maneira diferenciada e isoladamente, para que possa se obter um mapeamento correto e detalhado das manifestações patológicas encontradas no local, tomando-se nota de possíveis sinais de corrosão de armadura (manchas, extensão, grau de degradação, entre outras), falhas estruturais (dimensão e intensidade do problema), danos como fissuras, trincas, porosidade e falhas nas soldas entre elementos (localização, direção, dimensão, entre outras), ou seja, qualquer anomalia que seja identificada.

BROOMFILED (1997) cita que, antes de analisar a estrutura com ensaios, deve ser feita a inspeção visual. Os registros podem ser realizados por meio de fotografias e croquis com indicação das localizações das manifestações patológicas. No entanto, como as obras inspecionadas se tratam de OAE, muitas vezes não é possível inspecionar visualmente por terra. Diante disso foram utilizados dois recursos para que todos os elementos fossem verificados sem exceções, sendo eles: uso de VANT para fotos aéreas possibilitando conhecer o entorno do ambiente e em lugares de difícil acesso e acesso por corda para verificar os elementos com grande detalhamento.

O VANT oferece suporte nas atividades desenvolvidas para verificação do estado de conservação das estruturas analisadas de maneira rápida e eficiente, e tem sido muito

empregado para inspeção e monitoramento (ZHANG E ELAKSHER, 2012; MITISHITA ET AL.,2014; THEMISTOCLEOUS et al.,2014). Na Figura 1a é ilustrada uma vista aérea extraída com o uso do VANT do entorno no local da ponte estudo de caso deste trabalho. O acesso por corda se faz necessário para auxiliar na inspeção visual, pois em muitas situações devido a altura e/ou localização dos elementos somente através desse método de verificação se consegue realizar os registros fotográficos adequados, além de auxiliar na execução dos ensaios que serão descritos nos próximos itens. Na Figura 1b pode ser visto uma foto de um exemplo de inspeção realizada com auxílio do acesso por corda.



**Figura 1 – (a) Foto realizada com VANT do ambiente de entorno da obra;
(b) Inspeção realizada através de acesso por corda**

Após a inspeção visual, foram realizados ensaios nas áreas com maior agravamento das manifestações patológicas para verificar a qualidade dos elementos das pontes ferroviárias de aço discutidas neste trabalho.

- *Ensaios Não-destrutivos*

Existem várias técnicas para definir a qualidade e as propriedades do material sem causar danos a estrutura. Para pontes de aço são executados ensaios não destrutivos, principalmente para verificar a qualidade de solda e para averiguar falhas na película de tinta que protege o aço. Entre os ensaios realizados estão: líquido penetrante e velocidade de pulso ultrassônico, ambos para analisar descontinuidades nos elementos de solda; e medição de espessura de película seca e aderência de película seca, para encontrar inconsistências na película de proteção do aço. A seguir serão detalhados esses ensaios específicos de acordo com as regulamentações prescritivas salientando os métodos de execução.

- *Ensaio de Líquido Penetrante*

O Ensaio de Líquido Penetrante tem como objetivo detectar possíveis falhas nas conexões soldadas da estrutura, através da aplicação de duas substâncias no local de análise. A primeira será absorvida pela estrutura, chamada de Líquido Penetrante, e a segunda irá evidenciar os locais onde houve acúmulo da primeira, chamada de Revelador. Através deste procedimento é possível observar os locais onde há presença de poros, buracos, trincas e falhas na estrutura. O ensaio de líquido penetrante foi realizado segundo as recomendações das normas: NBR 15691(ABNT, 2009) e NBR 16450 (ABNT, 2016). Na Figura 2 pode-se perceber a realização do ensaio, a cor rosada

é o Líquido Penetrante que foi aplicado previamente à aplicação do Revelador de cor esbranquiçada sobreposto.



Figura 2 – Aplicação do Líquido Penetrante e do Revelador sobre chapas de aço soldadas

O procedimento irá gerar a aparição de pequenas marcas rosadas (Líquido Penetrante) em meio à superfície branca (Revelador). Essas marcas representam os locais onde há acúmulo do Líquido Penetrante, podendo representar falhas na solda. As indicações de falhas mais comuns estão demonstradas da Figura 3.

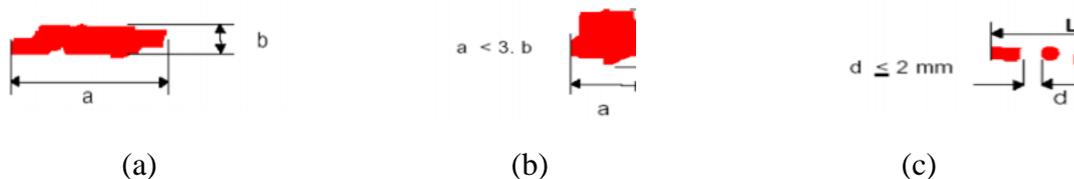


Figura 3 – (a) Falha na solda como Linha Contínua; (b) Falha na solda como Arredondada; (c) Falha na solda como Linha intermitente



Figura 4 – Exemplos de falhas em ensaios de LP - Linha contínua (vermelho), Arredondada (azul) e Linha Intermitente (verde).

As indicações em linha contínua podem ser causadas por trincas, dobras, riscos ou marcas de ferramentas. Trincas geralmente aparecem como linhas sinuosas, dobras de forjamento ou com a aparência de linha finas. As indicações arredondadas são causadas por porosidade ou por trinca muito profunda, resultante da grande quantidade de penetrante que é absorvida pelo revelador. As indicações em linha intermitente podem ser causadas por trincas, dobras, riscos ou marcas de ferramentas. Quando a peça é retrabalhada por esmerilhamento, martelamento, forjamento, usinagem, entre outros,

porções de discontinuidades abertas à superfície podem ficar fechadas. Na Figura 4 podem ser vistos alguns exemplos de falhas encontradas por meio deste ensaio.

- *Ensaio de Medição de Espessura de Película Seca*

O ensaio de medição de espessura de película seca é utilizado para verificação da espessura do recobrimento, ou seja, qualquer tipo de camada não magnética e nem condutora sobre uma base de metal ou alumínio. Pode ser medido em todo material fabricado de metal magnético ou não magnético que recebe uma camada, seja de tinta, verniz, plástico, papel, porcelana, esmalte, cobre, zinco, cromo, pó e materiais com tratamento anódico. O ensaio seguiu as recomendações do método não destrutivo tipo B da NBR 10443 (ABNT, 2008).

Para garantir a confiabilidade dos resultados, alguns cuidados são necessários, tais como: a medição, sempre que possível, deve ser feita em superfícies planas, caso não seja possível, o aparelho deve ser ajustado conforme a curvatura da superfície analisada; as medidas são influenciadas por campos magnéticos fortes, tais como de equipamentos de solda, eletroímãs, proximidade de cabos elétricos, entre outros.

- *Ensaio de Aderência de Película Seca*

O ensaio de aderência de película seca pode ser feito de duas formas, com corte em “x” ou corte em grade. O tipo de corte varia de acordo com a espessura da película. Acima de 70 μm é feito o ensaio em “x” e abaixo é feito em grade. A ferramenta de corte também varia de acordo com o tipo de corte. Em caso de corte em “x”, a NBR 11003 (ABNT, 2009) especifica lâmina de aço, com aproximadamente 17 mm de largura e ângulo de corte de $19^\circ \pm 2^\circ$. Na Figura 5 está ilustrada a realização do ensaio de aderência de película seca.



Figura 5 – Ensaio de Aderência de Película Seca

- *Ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico*

Esse ensaio caracteriza-se em um método não destrutivo, que tem por objetivo a detecção de defeitos ou discontinuidades internas presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos. Tais defeitos são caracterizados pelo próprio processo de fabricação da peça ou componente a ser examinado como, por exemplo, bolhas de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, microtrincas em forjados, escórias em uniões soldadas e muitos outros. Os ensaios foram realizados segundo duas normas. Para as conexões soldadas seguiram-se as recomendações do AWS D1.1/D1.1M (2010). Para as chapas metálicas, seguiram-se as recomendações da ASTM A-435 (2012).

O ensaio consiste na utilização de um equipamento capaz de gerar ondas ultrassônicas. As ondas se propagam em um meio elástico em direção à peça a ser ensaiada e, se for encontrado algum tipo de descontinuidade, é gerado um eco de reflexo na tela do aparelho de ultrassom, caracterizando uma peça não conforme.

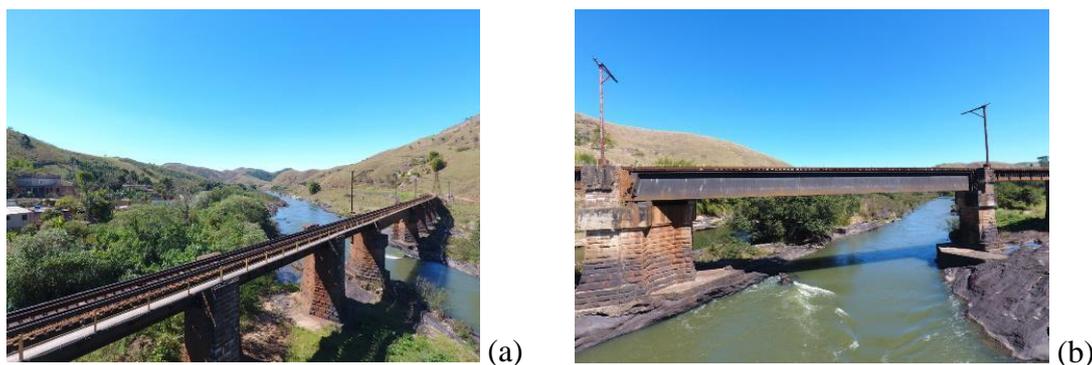
Ensaios destrutivos

Ensaios destrutivos provocam danos a elementos da estrutura a fim de possibilitar ensaios em laboratório. O Ensaio de Caracterização Mecânica do Aço tem como objetivo determinar a resistência e o comportamento das seções existentes, através da aplicação de esforços normais de tração até seu rompimento. Este procedimento permite verificar o bom ou mau funcionamento do aço em questão, analisando sua resistência e deformabilidade, além da caracterização. O Ensaio de Caracterização Mecânica do Aço foi realizado segundo as recomendações da norma ASTM A370 (2017).

Estudo de caso

Descrição da “Ponte Paraíso”

A “Ponte Paraíso” é uma ponte ferroviária metálica, com 194 metros, que pertence à Linha do Centro, antiga Central do Brasil localizada no km 135+350 sobre o rio Paraíba do Sul no município de Valença no estado do Rio de Janeiro. A ponte possui 10 vãos, sendo nove formados por um sistema de vigas contraventadas e um de viga caixão. As vigas contraventadas tem vão de 17,20 m e a viga caixão 35,20 m sendo que todas as ligações são do tipo soldadas. Os encontros são de alvenaria de pedra com arco de concreto armado e os outros nove pilares foram construídos em alvenaria de pedra tipo cantaria. Conforme relatos históricos foi inaugurada em 1866, porém foi registrado em 1943 a passagem do primeiro trem de minério sobre o vão principal da Ponte do Paraíso. A Figura 7 foi registrada a partir do voo do VANT para o reconhecimento da região da ponte e inspeção de elementos de difícil acesso.



**Figura 7 – (a) Foto realizada com VANT da parte superior da ponte;
(b) Foto realizada com VANT do vão com estrutura em caixão**

Na inspeção cadastral foram coletados dados referentes às características dos elementos estruturais que compõem a ponte, localização dos encontros e pilares, média de tráfego de trem, levantamento geométrico e relatório fotográfico de toda a estrutura que é representado nas Figuras 8 e 10.



Figura 8 – Planta da vista superior da Ponte Paraíso

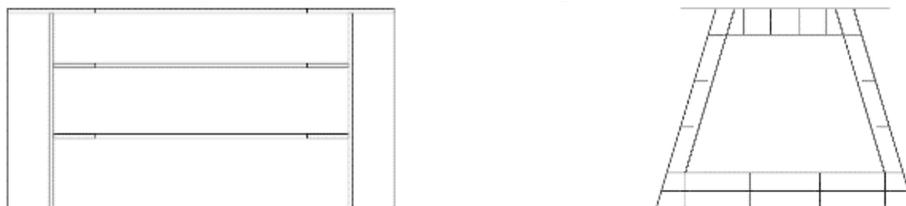


Figura 9 – Croqui das seções transversais



Figura 10 – Croqui do perfil longitudinal

A inspeção rotineira visa determinar o estado de conservação da ponte, essa contempla ensaios destrutivos e não-destrutivos, a fim de avaliar as características dos materiais presentes, assim como uma possível solução para futura restauração. As propriedades mecânicas e a composição do aço utilizado na construção, foram obtidas a partir dos ensaios e análises laboratoriais das amostras retiradas.

Resultados

- Ensaios Não-destrutivos

Os ensaios de líquido penetrante foram realizados tanto nas vigas contraventadas quanto na estrutura em caixão. Em todos os vãos foi encontrada a presença de corrosão superficial na estrutura, e também porosidade na solda entre as chapas de aço. Em um dos vãos da ponte de aço foi encontrada uma fissura (Figura 11) na chapa de aço a qual ficou evidenciada através do ensaio de líquido penetrante.



Figura 11 – Detalhe da chapa e solda com a presença de fissura

No ensaio espessura de película seca foram realizadas medições em 160 pontos na OAE analisada, os quais apresentaram variação média de película entre 108 μ m a 191 μ m, sendo esses superiores a 70 μ m que segundo NBR 11003 (ABNT, 2009) especifica para

que os cortes para o ensaio de aderência de película seca sejam realizados em forma de “x”. Para o ensaio de aderência de película seca, os resultados variaram entre as classificações X₄ e X₃, sendo o X₄ a pior situação segundo a NBR 11003 (ABNT, 2009).

No ensaio de velocidade de pulso ultrassônico foram analisadas seis conexões soldadas ao longo da estrutura e duas chapas metálicas, nos lados direito e esquerdo da viga caixão. Dois dos seis ensaios foram reprovados nas soldas em enrijecedores pela inspeção.

- Ensaio Destrutivo

Como resultado da caracterização mecânica do aço obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de caracterização do aço

Amostra	Dimensões (mm)	Seção (mm ²)	Limite de Escoamento		Limite de Resistência		Along. 50mm (%)
			Carga (Kgf)	LE (Mpa)	Carga (Kgf)	LR (Mpa)	
CP 1 - caixão	12,75 x 12,96	165,24	6046	358	8628	512	40,3
CP2 - caixão	12,89 x 12,59	162,28	5862	354	8560	517	40,7
CP3 - vão 1	12,77 x 12,74	162,68	5419	326	9138	550	34,1
CP 4 - vão 3	12,65 x 12,88	162,93	6169	371	9258	557	35,0

Os resultados apresentados sugerem que o tipo de aço estrutural presente na obra é do tipo ABNT MR250 ou ASTM A36, que são aços de média resistência. Segundo as especificações da NBR 7007 (ABNT, 2016), os aços apresentam a tensão de escoamento de 250 MPa e a tensão de ruptura de 400 MPa. Esse tipo de aço não apresenta resistência à corrosão, o que indica a necessidade de monitoramento e manutenção da pintura para garantir uma maior vida útil da estrutura.

Conclusões

O ensaio de líquido penetrante mostrou em todos os vãos que há presença de corrosão superficial na estrutura e que há também porosidade na solda. Em um dos vãos há presença de uma fissura na chapa de aço. No ensaio espessura de película seca a variação média de película foi entre 108µm a 191µm, sendo esses superiores a 70 µm que segundo NBR 11003 (ABNT, 2009) especifica cortes para o ensaio de aderência em forma de “x”. Para o ensaio de aderência de película seca, os resultados variaram entre as classificações X₄ e X₃, sendo o X₄ a pior situação segundo a NBR 11003 (ABNT, 2009). No ensaio de velocidade de pulso ultrassônico dois dos seis ensaios foram reprovados nas soldas em enrijecedores pela inspeção. O aço estrutural presente na obra é do tipo ABNT MR250 ou ASTM A36, que são aços de média resistência, o qual não apresenta resistência à corrosão, indicando a necessidade de monitoramento e manutenção da pintura para garantir uma maior vida útil da estrutura. Os ensaios não destrutivos se mostraram eficientes para verificação de falhas nos elementos analisados. O ensaio destrutivo teve relevância fundamental visto a falta de caracterização do aço na ponte vistoriada, sendo estes dados necessários para a realização de projetos de recuperação e manutenção. Os métodos de verificação são fundamentais para manutenção da estrutura a fim de garantir sua eficiência estrutural.

Agradecimentos

Agradecemos a MRS Logística S.A. e a Finger & Sommer Engenharia e Consultoria Ltda pelos dados fornecidos.

Referências

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A370-17, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- _____. ASTM A-435 - Standard Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Steel Plates (Especificação Padrão para Análise de Ultrassom em Chapas de Aço) da ASTM – American Society for Testing and Materials (Associação Americana de Testes e Materiais). 2012.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS D1.1/D1.1M – Structural Welding Code - Steel.2010.
- ANTT - Agencia Nacional de Transportes Terrestres, acessado em 11/03/2018 <http://portal.antt.gov.br/index.php/content/view/4751/Ferroviaria.html>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7007: Aço-carbono e aço microligado para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural — Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. NBR 10443. Tintas e vernizes - Determinação da espessura da película seca sobre superfícies rugosas - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. NBR 11003. Tintas — Determinação da aderência. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. NBR 15691. Ensaios não destrutivos - Líquido penetrante - Prática padronizada. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. NBR 16450. Ensaios não destrutivos — Líquido penetrante — Qualificação de procedimento. Rio de Janeiro, 2016.
- BLOG LOGÍSTICA, acessado em 11/03/2018 e publicado em 16/03/2016 <https://www.bloglogistica.com.br/mercado/infografico-a-malha-ferroviaria-brasileira/>
- BROOMFIELD, J. P. Corrosion on Steel in Concrete, 1.a edição. Londres, E. & FnSpon, 1997.
- DUFFY, M. C. (1981). George Stephenson and the introduction of rolled railway rail. *Journal of Mechanical Working Technology*, 5(3–4), 309–342. [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(81\)90046-2](https://doi.org/10.1016/0378-3804(81)90046-2)
- MITISHITA, E.; EDUARDO, J.; GRAÇA, N. DE.; CENTELHO, J.; MACHADO, A. (2014) O Uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) em Aplicação de Mapeamento Aerofotogramétrico. XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA. Gramado-RS. Anais...
- PRAVIA, Z. M. C.; BETINELLI, E. A (2016). Falhas em estruturas metálicas: Conceitos e estudos de caso. Curso de Engenharia Civil da FEAR –UPF.
- SANTOS, M. B., LOPES, C. P., & CLARO, J. A. C. D. S. (2009). Processo de Inovação e o Empreendedorismo no Brasil: o caso Mauá. *RAI - Revista de Administração E Inovação*, 6, 66–82. <https://doi.org/10.5585/rai.v6i1.313>
- THEMISTOCLEOUS, K; NEOCLEOUS, K; PILAKOUTAS, K; HADJIMITSIS, D.G. (2014). Damage assessment using advanced non-intrusive inspection methods: Integration of Space, UAV, GPR and Field Spectroscopy. Second international conference on remote sensing and geoinformation of the environment.
- ZHANG, C.; ELAKSHER, A. (2012). An Unmanned Aerial Vehicle-Based Imaging System for 3D Measurement of Unpaved Road Surface Distresses1. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 27, No. 2, pp. 118-129