



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



## Ações de Inspeção e Monitoramento Estrutural em Pontes e Viadutos de uma Ferrovia Brasileira

Alberto B. Colombo<sup>1</sup>, Alfredo P. C. Neto<sup>2</sup>, Ritermayer M. Teixeira<sup>3</sup>, Túlio N. Bittencourt<sup>4</sup>, Eduardo Machado<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade de São Paulo / Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica / [alfredo.pcn@uol.com.br](mailto:alfredo.pcn@uol.com.br)

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo / Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica / [abcolombo@gmail.com](mailto:abcolombo@gmail.com)

<sup>3</sup> Universidade de São Paulo / Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica / [ritermayer@yahoo.com.br](mailto:ritermayer@yahoo.com.br)

<sup>4</sup> Universidade de São Paulo / Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica / [tbitten@gmail.com](mailto:tbitten@gmail.com)

<sup>5</sup> Companhia VALE / Supervisão de Obras de Arte Especiais - EFVM / [eduardo.machado@vale.com](mailto:eduardo.machado@vale.com)

### Resumo

Sabe-se que, por diferentes razões, as vias permanentes ferroviárias brasileiras apresentam de maneira geral muitas deficiências, as quais se refletem no estado atual das suas importantes obras de arte. Este trabalho descreve e apresenta resultados de um plano de ações que tem sido realizado em uma ferrovia brasileira, o qual abrange procedimentos de inspeção estrutural, instrumentação e monitoramento do comportamento de pontes e viadutos durante as solicitações cíclicas devidas às passagens de trens. Inspeção visual e cadastramento de anomalias, monitoramento de curto prazo envolvendo variáveis relativas ao comportamento estrutural (deslocamentos, rotações, deformações, acelerações), realização de ensaios não destrutivos e construção de modelos numéricos apropriados já foram realizados para dezesseis pontes ferroviárias (estruturas metálicas e de concreto armado). Os resultados encontrados servem tanto para a referência de ações da Administração Ferroviária relativas à preservação de suas obras de arte, como para subsidiar trabalhos de pesquisa de interesse acadêmico desenvolvidos na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Atividades relacionadas com os trabalhos realizados, resultados encontrados etc., são apresentados e discutidos resumidamente neste artigo.

### Palavras-chave

Estruturas; pontes e viadutos; ferrovias; instrumentação; monitoramento; inspeção estrutural.

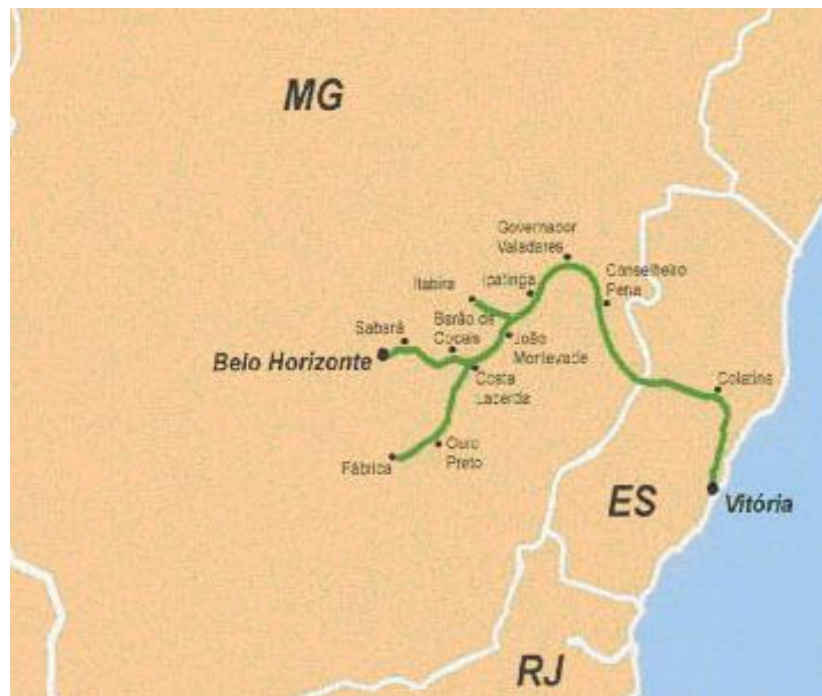
### Introdução

Este trabalho apresenta e descreve a estrutura de um plano de ações que permitiu investigar o comportamento estrutural de 16 pontes ferroviárias localizadas ao longo da Estrada de Ferro Vitória a Minas, de propriedade da Companhia Vale, através da qual o minério de ferro extraído de jazidas ao longo do seu traçado é conduzida às instalações da companhia em Vitória-ES e exportada através do Porto de Tubarão. A ferrovia, em bitola métrica, transporta outros tipos de carga, como materiais em aço produzido na Usiminas em



Ipatinga-MG e também possui e opera trens de passageiros ao longo de toda a sua extensão. Alguns resultados obtidos são apresentados e discutidos brevemente. O objetivo deste trabalho é mostrar a viabilidade e a utilidade dos trabalhos realizados ao longo da ferrovia, durante um período de aproximadamente 04 anos, visando estimular ações semelhantes em outras ferrovias e rodovias brasileiras, o que certamente irá contribuir para a manutenção de boas condições de utilização e para o aumento da vida útil das nossas pontes e viadutos. O trabalho realizado segue principalmente os fundamentos das referências bibliográficas citadas no seu final.

### **Descrição do plano de trabalho e do trabalho realizado**



**Figura 1 – Estrada de Ferro Vitória a Minas.**

O plano de trabalho foi elaborado de tal maneira que foram escolhidos pela Vale 16 pontes / viaduto em aço e concreto armado, ao longo da Ferrovia Vitória a Minas (Figura 1), para que fosse avaliado o comportamento estrutural, a partir de atividades de inspeção e monitoramento, no prazo de quatro anos. Estas obras estão relacionadas na Tabela 1, na qual constam seus nomes e época da construção, respectivos tipos, números de vãos / condições de



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



apoio, seus comprimentos típicos médios e seus municípios de localização ao longo da ferrovia.

**Tabela 1 – Características gerais das pontes e viaduto avaliados.**

Ponte / viaduto (época da construção)	Tipo	Vãos	Comprimento médio do(s) vão(s) (m)	Localização
Ponte do Rio Suaçui (1943)	Metálica - treliça Warren	01 - isostático	41	Governador Valadares - MG
Ponte do Rio Suaçui (década de 1970)	Concreto armado	03 - isostáticos	19	Governador Valadares - MG
Ponte do Rio Correntes (década de 1940)	Metálica - treliça Warren	01 - isostático	41	Governador Valadares - MG
Ponte do Córrego Itatiaia (década de 1940)	Metálica - estrado metálico	01 - isostático apoiado em pilares / encontros em concreto armado	12	Conselheiro Pena - MG
Ponte do Rio Fundão (1943)	Metálica - treliça Warren	01 - isostático	41	Fundão - ES
Ponte do Rio Santa Maria (década de 1940)	Metálica - treliça Warren	02 - isostáticos	41 e 30	Cariacica - ES
Ponte do Rio Pau Gigante (década de 1970)	Concreto armado	04 - isostáticos	16	Colatina - ES
Ponte do Rio Piracicaba II Linha 1 (década de 1970)	Concreto armado	06 - isostáticos	20	Coronel Fabriciano (região de Ipatinga- MG)
Ponte do Rio Piracicaba II Linha 2 (década de 1970)	Concreto armado	06 - isostáticos	20	Coronel Fabriciano (região de Ipatinga- MG)
Ponte do Córrego do Onça (década de 2000)	Concreto armado	02 - tabuleiro com vigas contínuas	17	Belo Horizonte - MG
Ponte do Rio Batatas (década de 1970)	Concreto armado	02 - isostáticos	21	Tumiritinga (região de Governador Valadares - MG)
Ponte do Córrego do Ouro (1987)	Metálica - viga caixão	09 - viga contínua	35	Barão de Cocais - MG
Ponte do Rio Santana (década de 1940)	Metálica - treliça Warren	01 - isostático	20	Resplendor - MG
Viaduto Funil (supõe-se década de 1990)	Concreto armado	09 - viga contínua	23	Cachoeira do Campo (região de Ouro Preto - MG)
Ponte Rio Piracicaba III (supõe-se década de 1990)	Concreto armado	07 - viga contínua	23	Antonio Dias - MG
Ponte Rio Santo Antônio (supõe-se década de 1970)	Concreto armado	12 - viga contínua	20	Naque (região de Ipatinga - MG)

Para cada ponte / viaduto avaliado foram realizadas as seguintes atividades:

- Visita e inspeção preliminares;
- Elaboração de plano de logística para as atividades em campo;



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de  
maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



- Elaboração de um projeto de instrumentação;
- Construção de modelo numérico da estrutura a ser monitorada;
- Instrumentação e monitoramento (medição, em curto prazo, de deslocamentos, deformações / curvaturas, acelerações);
- Inspeção visual detalhada da obra, durante as fases de instrumentação e monitoramento;
- Trabalho laboratorial de coleta e análise dos resultados a partir da análise dos sinais obtidos em campo;
- Emissão de Relatório Técnico.

## **Plano de monitoramento**

Para a preparação do plano de monitoramento de cada obra foram considerados os seguintes aspectos:

- a) Tipo de estrutura a ser investigada;
- b) Informações obtidas na documentação existente disponível;
- c) Informações obtidas através do histórico de inspeções já realizadas ao longo dos anos na obra e através da inspeção preliminar atual;
- d) Experiência acumulada pelo trabalho já realizado em outras obras ao longo da ferrovia;
- e) Análises estruturais preliminares, realizadas através da modelagem numérica da estrutura a monitorar.

Apresenta-se a seguir na Figura 2, a título de exemplo, o modelo de um plano de monitoramento típico para ponte em concreto armado (Ponte do Rio Suaçui).

Esse plano previu a medição de deformações, deslocamentos, acelerações e cargas de roda, conforme exposto a seguir. Demonstrou-se que a resposta estrutural era principalmente de natureza quase-estática, o que era esperado em face da velocidade máxima permitida para a via (60km/h).

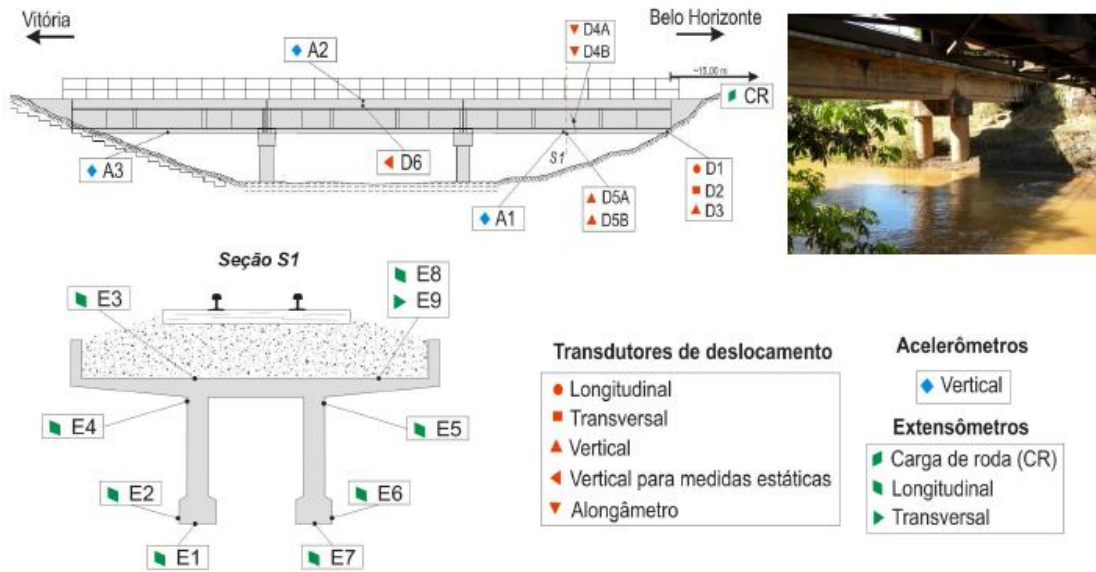


# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITERÓI

Realização:



**Figura 2 – Plano de monitoramento da Ponte do Rio Suaçuí (concreto armado)**

Entre os objetivos a atingir com o plano de monitoramento, voltado para as medições das variáveis de interesse estrutural durante as passagens de veículos (trens), destacam-se:

- Determinação dos níveis de deformação (tensão) nos elementos estruturais mais solicitados;
- Medição das rotações e deslocamentos nos apoios e deslocamentos, principalmente verticais, em outras regiões, particularmente nos meios de vão, onde ocorrem os maiores deslocamentos;
- Medição de aberturas de fissuras (estruturas de concreto);
- Cálculo de curvaturas, a partir da medição de deformações no aço tracionado e na região comprimida das estruturas de concreto;
- Determinação de níveis de aceleração e processamento dos sinais de aceleração através de análise espectral para identificação da importância da parte dinâmica da resposta estrutural, incluindo prospecções quanto às possíveis frequências naturais excitadas;
- Medição de cargas de roda e cálculo de cargas de eixo, através de metodologia apropriada, utilizando um conjunto de extensômetros elétricos ("strain gages")



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de  
maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



adequadamente instalado nos trilhos da ferrovia (o conhecimento dos valores estáticos destas cargas permite simulações realistas do comportamento estrutural).

## **Inspeção estrutural, ensaios não destrutivos e semi-destrutivos e modelo numérico**

### a) Inspeção estrutural

Visa fazer um levantamento geométrico dos elementos estruturais e comparar os dados obtidos com os que constam da documentação existente. Também visa realizar um levantamento, sob inspeção visual, das anomalias estruturais existentes na obra. A correta observação destas anomalias, documentada com registros fotográficos, resulta em informações relevantes para a análise quanto à segurança estrutural da obra. Além disso, a documentação reunida colabora para a construção do modelo numérico estrutural, a seguir mencionado.

### b) Ensaio não destrutivos e semi-destrutivos

Estes ensaios permitem determinar propriedades dos materiais (módulo de elasticidade, tensão de ruptura a compressão do concreto e tensões de escoamento e ruptura do aço, bem como outras propriedades de interesse), identificar fraturas em materiais metálicos, profundidade da frente de carbonatação na camada de cobrimento do concreto estrutural (análise da vida remanescente até que sejam atingidas as armaduras próximas da superfície externa), qualidade e uniformidade do concreto utilizado, etc. Dados obtidos nestes ensaios também são utilizados na construção do modelo numérico estrutural.

### c) Modelo numérico

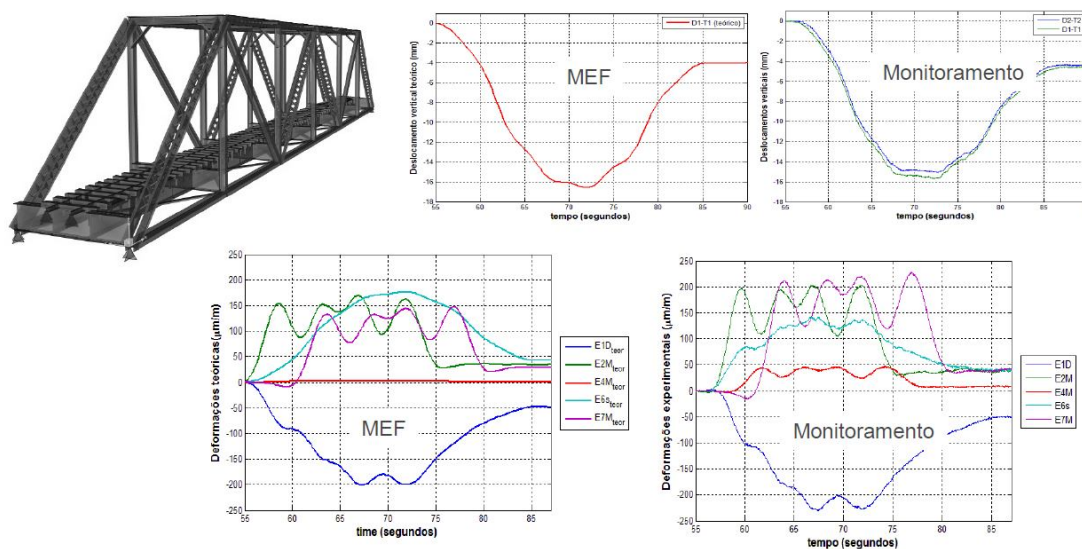
A modelagem numérica é feita de maneira que os seus parâmetros sejam tais que a resposta estrutural seja estatisticamente a mais próxima possível da obtida através do monitoramento (calibração do modelo). Normalmente, modelos lineares costumam apresentar resultados satisfatórios. Os modelos permitem determinar detalhadamente a resposta estrutural para as cargas permanentes e outros carregamentos não ocorrentes durante o monitoramento da estrutura (fase do trabalho na qual somente as respostas às cargas acidentais mais importantes é que podem ser determinadas). Além disso, quaisquer particularidades de comportamento podem ser analisadas. Como exemplo, isto foi feito na modelagem da ponte em caixão do Córrego do Ouro, para a qual havia interesse em estudar causas de ruptura a fadiga de elementos da estrutura do guarda-corpo ao longo de toda a obra.



## Análise de resultados

As análises de resultados são feitas em função de todos os parâmetros obtidos nas investigações; alguns de seus aspectos (modelo numérico e monitoramento) constam das Figuras 3 a 5, a seguir.

Na Figura 3 mostram-se o modelo numérico da Ponte do Rio Correntes e comparam-se resultados obtidos numericamente com resultados experimentais.



**Figura 3 – Ponte do Rio Correntes: simulação numérica e monitoramento**

Na Figura 4 encontram-se resultados de análise simplificada quanto à segurança a fadiga do elemento mais solicitado, utilizando-se curva SN e hipótese de Palmgreen-Miner.

Na Figura 5 tem-se análise quanto à segurança ao estado limite último para seção mais solicitada da Ponte do Rio Suaçui (concreto armado) notando-se que, já considerados os fatores de minoração de resistência e majoração das ações, há margem de segurança de aproximadamente 2,5 vezes (para efeitos do peso próprio e do trem somados). Nessa figura, o momento fletor associado ao efeito do peso próprio decorreu da análise estrutural através de modelo numérico e o momento fletor máximo, devido ao tráfego de trens, foi determinado no diagrama momento x curvatura a partir do cálculo da maior curvatura ocorrida durante as passagens de trens sobre a ponte, sendo esta função das deformações associadas, medidas em barra de aço e no concreto comprimido em uma mesma seção transversal.



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



Ponte do Rio Correntes: Curvas S-N e análise a fadiga: solicitações em montantes originais rebitados (exemplo: centrais) para trens de minério carregados e trens cargueiros com vagões HFE, FLD e FLE

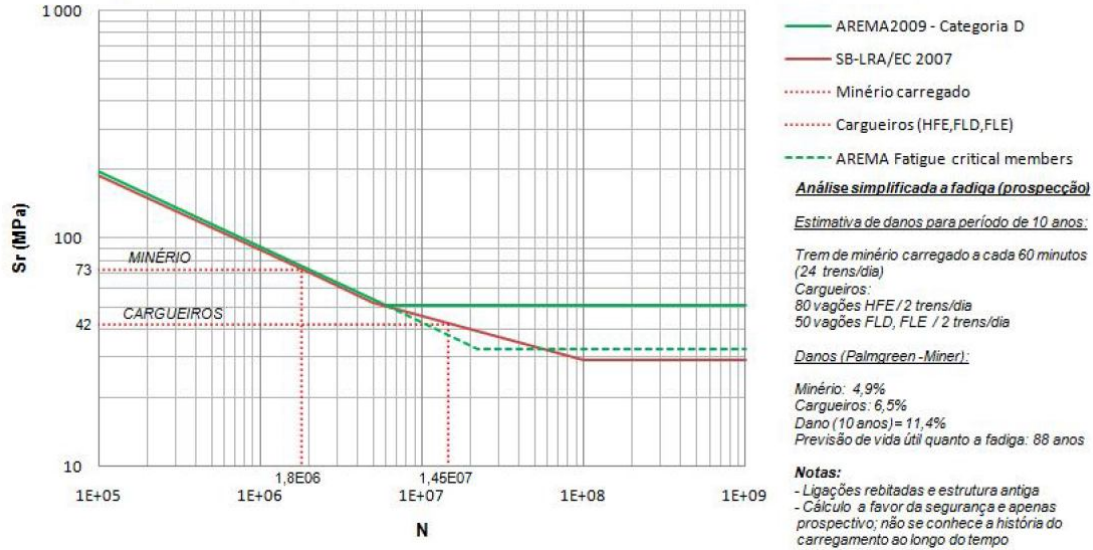
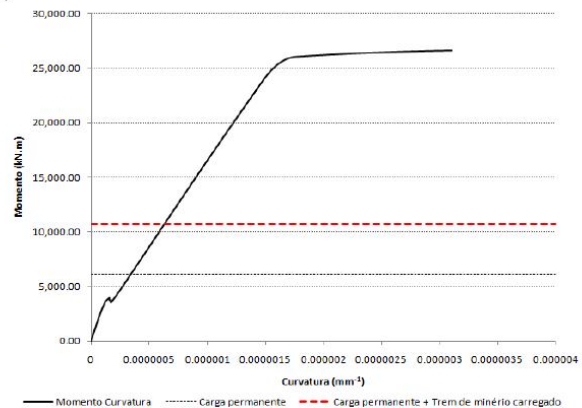
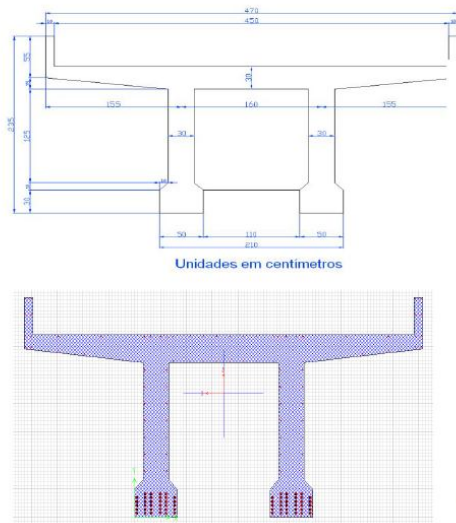


Figura 4 – Ponte do Rio Correntes: análise simplificada a fadiga



Comportamento da seção transversal do meio de vão - flexão

Figura 5 – Ponte do Rio Suaçuí (concreto armado): análise quanto ao estado limite último para seção do meio do vão / flexão (diagrama momento x curvatura)





# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



## Considerações finais

Foram inspecionadas e monitoradas, ao longo de aproximadamente 04 anos, 07 pontes em estrutura metálica e 09 pontes em concreto armado na Estrada de Ferro Vitória a Minas. De maneira geral, estas pontes encontram-se em bom estado de conservação.

Questões relevantes, como determinação dos níveis de solicitação, resistência ao estado limite último, resistência a fadiga, vida remanescente, necessidade de intervenções em casos de anomalias estruturais existentes, etc. foram apresentadas nos relatórios técnicos.

Equipamentos diversos para monitoramento, tais como sistemas de aquisição de dados de última geração utilizando diferentes tecnologias, inclusive do tipo "WiFi", foram adquiridos e têm sido utilizados. Tecnologias modernas de análise estrutural ("SHM" / monitoramento da saúde estrutural, análise de confiabilidade estrutural, análise modal operacional, análise a fadiga, etc.) têm sido investigadas e também tratadas de maneira acadêmica no âmbito do Grupo de Trabalho.

## Referências

- EUROPEAN COMMISSION. Programa "Sustainable Bridges": Guideline for Load and Resistance Assessment of Existing European Railway Bridges, Document D4.2, 2007.
- AREMA. American Railway Engineering and Mechanics of the Way Association - Manual for Railway Engineering: Volume 2, Structures, 2009.
- Assis, W. S., et al. Controlo da aquisição e tratamento de resultados da monitoração utilizando LabVIEW. Betão Estrutural 2004. FEUP-GPBE. Porto, Portugal, 2004.
- Bergmeister, K., Santa, U. Global Monitoring Concepts for Bridges. Structural Concrete. Vol. 2, n.º 1, pp. 29-39. March 2001.
- Félix, C. M. Monitoração e análise do comportamento de obras de arte. Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2005.
- Feng, M. Q. et al. Baseline models for bridge performance monitoring. Journal of Engineering Mechanics, pp. 562-569. ASCE, 2004.
- Fernando, G. F. et al. Structural integrity monitoring of concrete structures via optical fiber sensors: sensor protection systems. Structural Health Monitoring, Vol. 2, pp. 123-135. Sage Publications, 2003.
- Gao, Y. Structural health monitoring strategies for smart sensor networks. Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana, USA, 2005.
- LI, H., et al. Structural health monitoring system for the Shandong Binzhou Yellow River highway bridge. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 21, pp. 306-317. Blackwell Publishing, 2006.
- Lienhart, W.; Brunner, F. K. Monitoring of bridge deformations using embedded fiber optical sensors. Proceedings 11th International Symp. on Deformation Measurements, pp. 555-561. Santorini, Greece, 2003.
- Mufti, A. A. FRPs and FOSs lead to innovation in Canadian civil engineering structures. Construction and Building Materials, Vol. 17, pp. 379-387. Elsevier, 2003.



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de  
maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

- PARK, C. H., et al. Time-varying Reliability Model of Steel Girder Bridges, Proc. Instn. Civ. Engrs Structs & Bldgs 128, 1999, p.359-367.
- Thakkar, S. K.; Ghosh, G.; Singh, Y. Structural damage identification and health monitoring and damage identification of Bridges. Advances in Bridge Engineering, March 24-25, pp. 11-30. 2006.
- TRAUTNER, J. J.; FRANGOPOL, D. M., Computer Modeling and Reliability Evaluation of Steel Through Truss Bridges, Structural Safety 7, Elsevier, p.255-267, Colorado, 1990.
- WOODWARD, R. J. et al. Final Report – Contract n° RO – 97 – SC.2220, p. 29-100, BRIME, 2001.