

II Encontro de Ferrovias, 2010 – Vitória – ES

Monitoração de Pontes de Concreto Armado e Protendido na Estrada de Ferro Carajás

Rodolfo Alvarado Montoya^{1*}, Andre Andrade de Azevedo², Remo Magalhães de Souza³, Regina Augusta Campos Sampaio⁴, Luís Augusto Conte Mendes Veloso⁵

^{1,2} Vale, Av. Dante Michelini, 5500, Vitória - Espírito Santo - CEP: 29090-900, Brasil

^{3,4,5} UFPA, Av. Augusto Correa, nº 01, Belém - Pará - CEP: 66075-900, Brasil

e-mail: rodolfo.montoya@vale.com, andre.andrade@vale.com,
remo@ufpa.br, rsampaio@ufpa.br, lveloso@ufpa.br

Resumo As estruturas da Vale são constantemente inspecionadas para observar o comportamento dos seus elementos estruturais, sendo que as mesmas inspeções são visuais e detalhadas, proporcionando assim uma visão do estado geral da estrutura. Como parte da gestão de ativos da empresa, foi necessário o desenvolvimento de monitoramento de pontes e viadutos ferroviárias em concreto armado e protendido, o qual desempenha papel relevante na avaliação da capacidade de carga e da resposta dinâmica de estruturas danificadas ou com comportamento inadequado. Este monitoramento auxilia na determinação da capacidade resistente última da ponte e da sua vida útil, e a gestão dos dados obtidos é uma ferramenta fundamental para tomada de decisões dentro da empresa. Com isso, pode-se estimar com precisão a capacidade estrutural da ponte e a sua vida útil, o que permite assegurar o tráfego de composições com maior segurança, sob o ponto de vista estrutural.

Palavras-Chaves: monitoração de estruturas; obras de arte especiais, integridade estrutural e capacidade de carga.

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, realizou-se a monitoração de onze pontes de concreto na ferrovia da Vale Estrada de ferro Carajás (EFC). Com este programa, foram obtidos resultados importantes para a manutenção e gestão dos ativos desta ferrovia.

O processo de monitoração começa com a avaliação do projeto estrutural, histórico das inspeções e dos reforços eventualmente executados. Posteriormente, são elaborados modelos numéricos em elementos finitos, e realizadas análises estruturais estáticas e dinâmicas, análises de fadiga, etc.. Após a compreensão do comportamento estrutural da ponte, elabora-se um projeto de monitoração, e após a obtenção dos dados, procede-se à calibração dos modelos numéricos. Com estes modelos calibrados, pode-se determinar a

capacidade resistente real da estrutura, permitindo verificar a possibilidade de aumento da carga por eixo, assim como aumento da velocidade de operação.

Como resultado das monitorações, foi possível um melhor entendimento sobre o comportamento real das estruturas, e o porquê de muitas fissuras registradas pelas equipes de inspeção assim como a necessidade de alguns reforços nos elementos.

Como exemplo de pontes da EFC, a Fig. 1, mostra a ponte sobre o Rio Mearim.



Fig. 1 Ponte sobre o rio Mearim [1]

Este artigo foi concebido resumindo alguns dos resultados de um convênio de cooperação entre a Vale e a UFPA – Universidade Federal do Pará, executado pelo Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicado à Engenharia (NICAE) tendo sido iniciado em 2007. O objetivo do convênio é desenvolver uma metodologia de avaliação da integridade das pontes na EFC.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é descrever a metodologia utilizada para a obtenção da capacidade de carga resistente e a vida útil à fadiga de pontes de concreto armado e protendido, e apresentação de um resumo dos resultados obtidos nas monitorações destas pontes da EFC.

3. JUSTIFICATIVA

A função da engenharia de manutenção é de manter ou colocar um item em um estado adequado para cumprir uma função requerida ou projetada.

A manutenção dos equipamentos e componentes da infra-estrutura ferroviária tem como objetivo manter a disponibilidade das ferrovias, diminuindo as interdições e restrições de velocidade e conseqüentemente, as perdas de produção devido às deficiências da infra-estrutura, bem como evitar danos materiais, pessoais e ambientais [2].

A monitoração de uma estrutura para observar o seu estado atual e a sua capacidade de carga real, justifica-se na necessidade de garantir uma qualidade de serviço de alto nível. Através da aplicação sistemática das técnicas de monitoração, e com a disponibilidade de uma equipe que seja totalmente capacitada para realizar as atividades de manutenção, monitoração de estruturas e interpretação dos

resultados, pode-se reduzir ao mínimo a manutenção corretiva.

4. METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE PONTES DE CONCRETO

A metodologia utilizada para estudar a capacidade de carga de uma ponte de concreto segue os passos descritos a seguir.

4.1 Análise preliminar

Nesta etapa, são obtidos e estudados os dados de projeto, e é realizada a revisão das inspeções anteriores, históricos de reforços ou de falhas. Verifica-se também se é necessária a obtenção de dados de campo adicionais para comprovação das dimensões reais dos elementos estruturais.

A título de ilustração, na figura 2 apresenta-se um mapa de fissuração de uma das pontes estudadas.

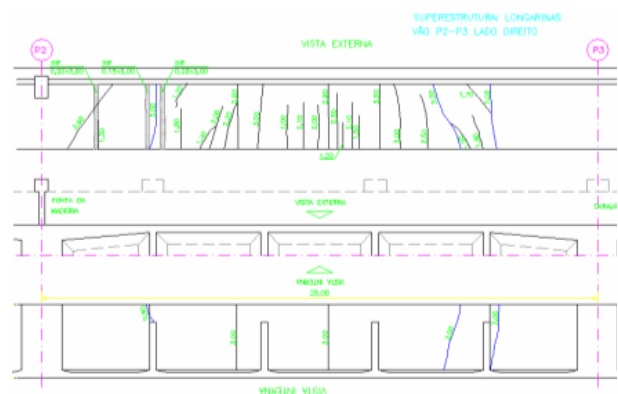


Fig. 2 Mapa de fissuração de uma ponte [1]

4.2 Inspeção Visual e Análise do material construtivo

Nesta etapa, são realizadas inspeções visuais e ensaios de campo, usando equipamentos para ensaios não destrutivos, tais como, pacômetro, esclerômetro, ultrassom, e são feitos testes de alcalinidade para determinação de profundidade de carbonatação. Além disso, é feita a extração de testemunhos de concreto, como é mostrado na figura 3, para realização de testes posteriores em laboratório.

A inspeção detalhada de toda a estrutura permite a identificação de quadros patológicos, principalmente de fissuração e corrosão das armaduras, para posterior profilaxia e reparo.



Fig. 3 Retirada de testemunhos de concreto [1]

4.3 Análise numérica

Nesta etapa são elaborados os modelos numéricos, baseados nas características do projeto da estrutura, e são realizadas análises preliminares.

Para as solicitações, no que diz respeito ao trem tipo, foi utilizado como padrão a locomotiva com maior representação no grupo, Locomotiva DASH-9, o qual representa aproximadamente 30% do total da frota. Quanto ao tipo de vagão usou-se o GDT que corresponde a 90% da frota e é utilizado no transporte de minério de ferro.



Fig. 4 Veículos ferroviários

A composição de veículos foi representado por: 2 Locomotivas + 110 vagões + 1 locomotiva + 110 vagões + 1 locomotiva + 110 vagões, onde a carga por eixo das locomotivas é de 30 ton/eixo e dos vagões de 32,5 ton/eixo. Para a análise numérica utilizou-se o método dos elementos finitos com as estruturas sendo representadas por elementos de diversos tipos, tais como barra (elemento de pórtico), casca e sólidos (Figura 5).

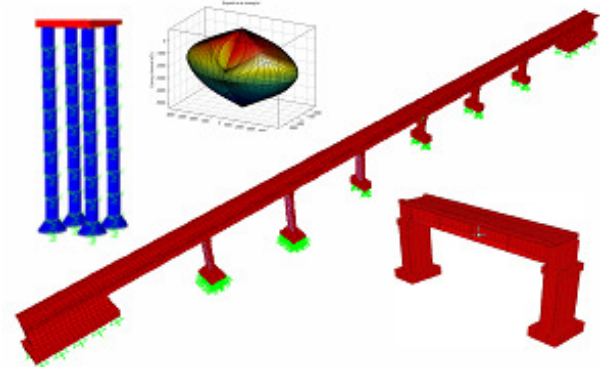


Fig. 5 Modelo numéricos utilizados para pontes de concreto armado e protendido

4.4 Monitoramento estrutural

As principais grandezas monitoradas são deformações, deslocamentos, temperaturas, e acelerações.

Os sensores são posicionados nos pontos de maiores deslocamentos e deformações (ou solicitações) encontradas nos modelos numéricos (Figs. 6 e 7), assim como em pontos importantes para a realização da análise modal experimental. Em geral, são utilizados os seguintes sensores:

- Elettrical bonded strain gage;
- Linear variable differential transformer (LVDT);
- Resistance temperature detector (RTD);
- Acelerômetros piezoelétricos.

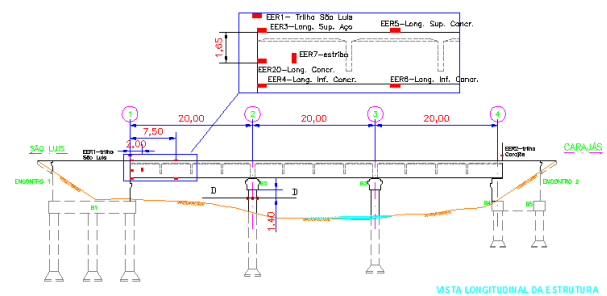


Fig. 6 Projeto de monitoração da ponte sobre o rio Praqueú [1]



Fig. 7 Extensometria no concreto [1]

4.5 Calibração do modelo numérico

Nesta etapa são realizadas a calibração dos modelos numéricos com base nos dados experimentais obtidos, a fim de se permitir uma melhor representação do comportamento real da estrutura. Assim, pode-se obter parâmetros de calibração conduzindo a um modelo numérico realista, o qual servirá como uma ferramenta de gestão do ativo.

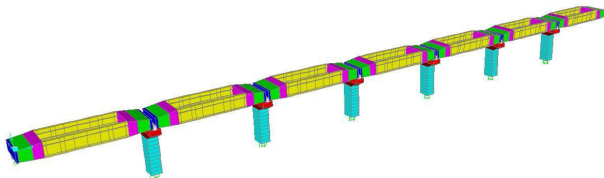


Fig. 8 Modelo calibrado da ponte sobre o rio Buriticupu [1]

4.6 Avaliação do projeto estrutural e proposta de reforço

Nesta etapa são feitas verificações da estrutura de acordo com critérios normativos, e caso haja a necessidade, são propostos reforços para re-adequação do projeto estrutural ou recomendações para a manutenção.

5. ESTUDO DAS PONTES DE CONCRETO ARMADO

Este estudo foi realizado com o objetivo de outorgar ferramentas de decisão para a manutenção das pontes de concreto armado e protendido da Vale.

Já foram analisadas oito (8) pontes em concreto armado, observando-se geralmente problemas de fissuração. Entretanto, verificou-se que as estruturas, de um modo geral, atendem satisfatoriamente aos estados limites último e de utilização/serviço, tanto para o carregamento atual quanto para o carregamento previsto para um trem-tipo futuro (com 40Tf/eixo).

A Fig. 9 mostra uma vista da estrutura real e do modelo numérico referente à ponte sobre o Rio Praqueú.

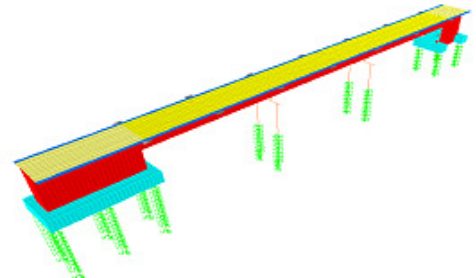


Fig. 9 Modelo da ponte sobre o rio Praqueú [1]

Deve-se ressaltar que estas estruturas foram projetadas no final da década de 70, utilizando-se a prática de projeto vigente na época, e considerando o trem tipo Cooper E80. Os modelos utilizados para a maioria das pontes foi o modelo de viga contínua, considerando rótulas ou engastamento perfeitos nos encontros.

Entretanto, com a elaboração de modelos mais precisos por elementos finitos, pôde-se constatar que a hipótese de engastamento perfeito nos encontros não era satisfatória, já que pode haver uma movimentação (translação e rotação) considerável no ponto de ligação entre a superestrutura e o encontro, conforme ilustra a (Fig. 10) para a ponte sobre o Rio Praqueú.

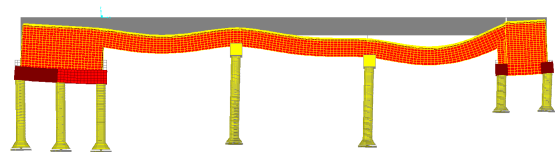


Fig. 10 Configuração deformada do modelo da ponte sobre o rio Praqueú [1]

De um modo geral, se observa que os pilares, vigas protendidas e lajes, possuem vidas úteis à fadiga, bastante elevadas.

Um ponto interessante é o fato que os testemunhos de concreto extraídos foram ensaiados no laboratório (Fig. 11) e os resultados revelaram que as resistências obtidas são maiores do que as especificadas no projeto. Esta diferença na resistência, e conseqüentemente na rigidez do concreto, contribuem significativamente para um aumento no grau de segurança da estrutura

real, em relação ao considerado na elaboração do projeto estrutural [1].

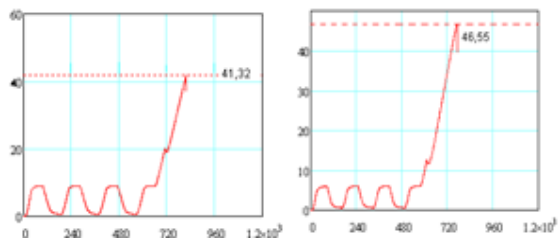


Fig. 11 Resistências dos testemunhas do concreto [1]

Particularmente, houve o caso do viaduto sobre a CFN, 1ª travessia (Fig. 12), onde se recomendou o reforço das longarinas, já que para o carregamento futuro encontrou-se uma estimativa de vida útil muito baixa.



Fig. 12 Viaduto sobre a CFN 1 travessia [1]

Um ponto que merece destaque diz respeito ao efeito do carregamento móvel sobre as lajes. É prática usual de projeto se considerar um ângulo de espraio de 45°, e todas as lajes das pontes estudadas foram projetadas considerando-se este ângulo de espraio, o que conduziu a um carregamento supostamente uniforme sobre a região central da laje. Entretanto, este carregamento uniforme não condiz com a realidade, devido ao fato de que os trilhos estão praticamente posicionados no mesmo plano vertical que passa pelas longarinas (Fig. 13), e as cargas móveis são praticamente absorvidas diretamente pelas longarinas, sem carregar efetivamente as lajes.

Na figura 14, se observa que existe uma diferença considerável entre as amplitudes de deformação teóricas e experimentais, sendo os resultados experimentais muito menores. Essa diferença pode ser atribuída ao fato das longarinas serem muito mais rígidas do que a laje absorvendo uma parcela maior do carregamento proveniente do trem. Assim, a carga distribuída ao longo da laje é menor do que a que foi determinada de forma empírica

considerando um espraio uniforme das cargas através do lastro [1].

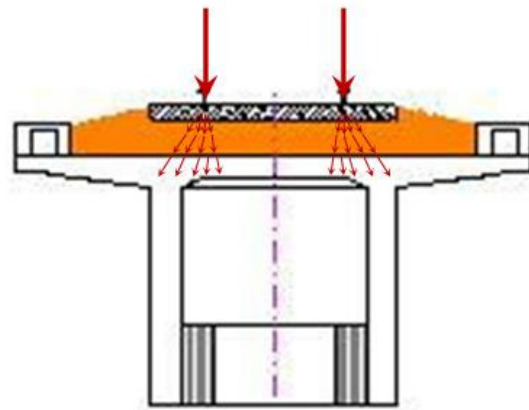


Fig. 13. Seção transversal típica das pontes, e efeito de espraio das cargas.

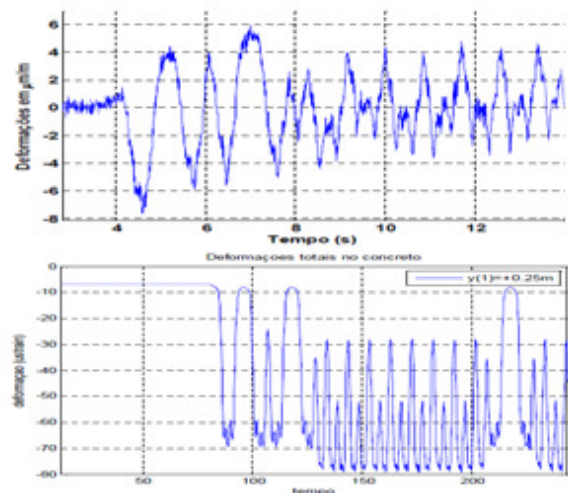


Fig. 14 Diferenças entre deformações obtidas experimentalmente (superior) e numericamente (inferior) [1]

5. ESTUDO DAS PONTES DE CONCRETO PROTENDIDO

Já foram analisadas três (3) pontes em concreto protendido. Todas as pontes atendem satisfatoriamente aos estados limites último e de utilização/serviço, tanto para o carregamento atual quanto para o estimado do trem-tipo futuro.

Em geral, se observa que os pilares, vigas protendidas e lajes, possuem vidas úteis altas a fadiga. Também se observou que o módulo de elasticidade de concreto é maior do que o projetado inicialmente.

6. CONCLUSÕES

Em relação aos resultados das análises realizadas os seguintes pontos merecem destaque:

- a) As pontes em concreto armado apresentam grau de fissuração considerável.
- b) A região de ligação entre a superestrutura e os encontros não podem ser sempre considerados como um engastamento perfeito.
- c) Ao contrário do que foi previsto no projeto original das lajes, estas estão submetidas a um carregamento muito pequeno, já que as longarinas praticamente absorvem diretamente o carregamento móvel.
- d) As análises realizadas permitem afirmar, que em geral, as estruturas atendem os estados limites últimos e de serviço.
- e) As estimativas de viga à fadiga das estruturas em geral são bem elevadas.
- f) Os resultados obtidos experimentalmente são compatíveis com os obtidos numericamente após a calibração dos modelos.
- g) A disponibilização dos modelos calibrados das estruturas é bastante útil para avaliação de eventuais projetos de reforço.

A monitoração de estruturas está totalmente alinhada com a estratégia de organização da Vale, já que esta permite auxiliar na observação do comportamento real da estrutura, cumprindo com a segurança dos ativos, empregados e preservação do meio ambiente.

O sistema de monitoramento estrutural de pontes ferroviárias segue um processo de gestão de ativos que permite visualizar preditivamente o comportamento dos ativos da empresa. Além disso, de forma muito mais importante, auxilia nas tomadas de decisão, no planejamento e na consolidação de uma base teórica e experimental do estado real do ativo da empresa.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a toda equipe da UFPA, que são os responsáveis pela execução das atividades deste projeto e às equipes de pontes da EFC. Equipe UFPA: José Perilo da Rosa Neto, Ronaldson M. Carneiro, Selma Lídia A. Lobato, Rafael Queiroz, Sandro Diord Rescinho

Amador, Lílian Danyelle A. de Oliveira, Francisco Vicente de Souza, Paulo Athayde, Edilson Moraes, Eduardo Tagliarini, Caio Laurindo, Jennefer Lavôr Bentes, Vinicius Barrichello, Rollan Soares, Adelana Guimarães, Dênis Quaresma, José Neto, Rittermayer, Alcebíades Negrão Macêdo, Vitor Branco, Regis, Sandoval Rodrigues Jr., Denio Ramam, e outros.

Equipe Vale: Anísio Almeida, Marcelo Diniz.

8. REFERÊNCIAS

- [1] SAMPAIO, R.C., MAGALHÃES DE SOUZA; Desenvolvimento de metodologia para avaliação da integridade estrutural de pontes e viadutos ferroviários ao longo da Estrada de Ferro Carajás. Convenio UFPA-Vale, 2007.
- [2] VALE; Manual de manutenção de via permanente, 2009.