

Avaliação do estado de Obras de Arte Especiais e suas Fundações através de Técnicas de Monitoramento e Métodos não Destrutivos

Marcos Massao Futai¹, Túlio Nogueira Bittencourt¹, Flavio Kazuo Toome^{2*}, Gabriela Vieira Menezes², Silvia Suzuki², Juliana Ferreira Fernandes³, Luciano Oliveira⁴, Matheus Abreu e Souza⁴

¹ Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica

² Pesquisador GeolnraUSP

³ Pesquisadora GMEC

⁴ VALE

e-mail: futai@usp.br, tbitten@usp.br, flavio.toome@usp.br, gabivieira@usp.br, silviasuzukiengenharia@gmail.com, julianaffernandes@gmail.com, oliveira.luciano@vale.com, matheus.souza@vale.com

Resumo

Esse trabalho apresenta o projeto de P&D que está sendo desenvolvido no LIM-GMEC-GeolnraUSP-EPUSP. O projeto visa o desenvolvimento e aplicação de técnicas de inspeção e monitoramento de obras-de-arte especiais (OAEs) ferroviárias e suas fundações, incluindo métodos não destrutivos, soluções remotas e não invasivas, para que se possa garantir a segurança e o desempenho adequados dessas estruturas com o menor nível de interferência na operação da via. Este estudo tem como foco a avaliação da capacidade de carga de pontes de diferentes tipologias que integram a infraestrutura da Estrada de Ferro Carajás (EFC), administrada pela VALE, mas pode ser estendido para outras vias de interesse da companhia. A base de todas as estratégias de manutenção é a aquisição de informações da condição real da estrutura, seja por inspeções periódicas ou por monitoramento. Dessa forma, a metodologia proposta para realização desta pesquisa está dividida em etapas: Levantamento de dados existentes das pontes e revisão bibliográfica; análises computacionais para inferir o desempenho atual e realizar um prognóstico de comportamento; realização de ensaios de campo e laboratório para definição das propriedades e parâmetros dos materiais e de modelos constitutivos para representá-los; desenvolvimento, testes e aplicação de um sistema de inspeção e monitoramento para pontes construídas; instrumentação e monitoramento com sistemas consagrados e técnicas de análise remota, como interferometria e análise de imagem, e realização de ensaios não destrutivos. Como resultado desse projeto será estabelecido um conjunto de metodologias práticas e eficientes que indiquem o real estado das OAEs e suas fundações. Sua aplicação programada ao longo do tempo poderá permitir avaliar as condições de degradação das estruturas e detecção de danos, o que resultará em uma melhor programação das operações de manutenção, reparo, ou reforço, dentro de um ambiente integrado visando o estudo do ciclo de vida das estruturas.

Palavras-Chaves: Via permanente, Obras de Arte Especiais ferroviárias, Fundações de pontes, Inspeção, Monitoramento.

1. INTRODUÇÃO

As obras-de-arte especiais (OAEs) ferroviárias estão sujeitas a danos causados por sua utilização ao longo do tempo. Além dos efeitos do carregamento (fadiga, impactos, sobrecargas, etc.), elas estão sujeitas à

degradação dos materiais e das condições de suporte, bem como à exposição a condições ambientais adversas (tempestades, enchentes, vendavais, terremotos, etc.). Esses danos afetam e degradam as condições de serviço e segurança ao longo do tempo.

Associada à degradação natural das obras, há também a necessidade de verificações devidas a mudanças das condições de carregamento em função da introdução de novos equipamentos ou da necessidade do aumento da produtividade da via. O acompanhamento contínuo ou repetido das respostas estruturais de OAEs é importante para tomada de decisões relativas à sua manutenção, ao reparo e ao reforço da estrutura analisada. Para identificar os elementos estruturais que exigem manutenção é necessário empregar um programa sistemático de inspeção [1-2].

Um dos principais objetivos das inspeções periódicas é juntar informações dos elementos estruturais que estão em uma condição precária ou crítica, e com necessidade de reparo, reforço ou reabilitação. Os resultados dessas inspeções visuais são usados para fornecer uma avaliação da condição tanto das peças individualmente quanto da estrutura como um todo. Entretanto, por conta da dificuldade ou impossibilidade de acesso para a realização de inspeções visuais, as fundações, encontros e demais obras geotécnicas geralmente são negligenciadas, acarretando a falta de informações sobre o comportamento e condição estrutural desses elementos.

No Brasil, as normas e manuais referentes à inspeção de pontes [3-5] tem como foco a superestrutura, e apresentam poucas ou nenhuma diretriz para a avaliação do estado das fundações. Além disso, muitas vezes não se dispõe de dados sobre sua real geometria, os materiais que as compõem ou as cargas reais de utilização, o que dificulta a determinação da capacidade de carga e do fator de segurança das mesmas.

Existem vários fatores que podem influenciar na condição estrutural e no desempenho das pontes e suas fundações, tais como carbonatação do concreto, corrosão das armaduras, fadiga, carregamento cíclico e exposição por erosão, tendo como possíveis consequências recalques absolutos ou diferenciais, degradação da resistência dos elementos estruturais, da resistência do solo e também da interface solo-estrutura, culminando na perda de capacidade de carga da fundação [6-9]. Como resultado, pode haver prejuízo no bom desempenho das OAEs, e, em

casos extremos a ruptura da fundação e consequente colapso da estrutura [10,11].

Nesse sentido, para a avaliação das fundações e de outros elementos estruturais inacessíveis à inspeção visual, têm-se a alternativa de utilizar ensaios que possam fornecer os parâmetros necessários para a análise de durabilidade e integridade estrutural, como é o caso dos ensaios não destrutivos e geofísicos.

No âmbito da avaliação do comportamento e capacidade portante das estruturas e fundações, assume relevância o monitoramento estrutural. Conhecido na literatura técnica internacional como *Structural Health Monitoring* (SHM), esse campo emergente da engenharia civil visa fornecer informações precisas e atualizadas sobre a integridade e segurança das estruturas, por meio de medições de grandezas como deformação, deslocamento linear ou angular, e aceleração em pontos representativos da mesma. As informações obtidas com o monitoramento geralmente são utilizadas para averiguar a necessidade de reforços estruturais, planejar atividades de manutenção, verificar hipóteses de projeto, reduzir incertezas e ampliar o conhecimento acerca da estrutura [12,13]. Baseando-se nesse conhecimento, podem ser adotadas as medidas mais apropriadas a fim de prolongar sua vida útil [14] e minimizar custos com manutenção [15,16].

Essencialmente, um sistema de monitoramento é constituído por uma rede de sensores integrada à estrutura, a qual é conectada a sistemas de aquisição, de armazenamento e processamento de informação, com ligação a uma central remota por meio de sistemas de comunicação [17], sendo que, atualmente, os equipamentos que compõem os sistemas de monitoramento apresentam elevado grau de automação, versatilidade e flexibilidade [18,19].

É possível encontrar na literatura técnica internacional diversas aplicações de SHM em pontes de diferentes concepções estruturais [20-23], entretanto, a maioria desses trabalhos são focados na análise da superestrutura, e raramente as fundações fazem parte de seu escopo, provavelmente pelas mesmas limitações comentadas anteriormente. Posto que para avaliar de forma correta o

desempenho e a integridade da estrutura como um todo é necessário conhecer o estado das suas fundações e levar em consideração as características da interação solo-estrutura [24,25], pretende-se durante esse trabalho desenvolver, testar e aplicar um sistema de SHM nas OAEs incluindo suas fundações.

Uma das técnicas que serão aplicadas para a avaliação do desempenho e condições estruturais dos elementos monitorados é a análise baseada na teoria de propagação de ondas, que correlaciona a presença de danos estruturais com mudanças nas suas frequências naturais de vibração. Essa técnica não é prática comum para verificar o desempenho das fundações, sobretudo no Brasil, mas há trabalhos que comprovam a possibilidade de identificar a diminuição das suas frequências naturais de vibração em função do avanço da erosão ao redor desses elementos [26,27].

Contudo, apesar de todo o desenvolvimento tecnológico nas áreas de ensaios não destrutivos, ensaios de campo e SHM, ainda há a necessidade de desenvolvimento e aplicação de tecnologias remotas e não invasivas de baixo custo [28,29]. A utilização de tecnologias baseadas em imagens e seu tratamento por meio de algoritmos computacionais de análise de dados são bastante promissores para a identificação de parâmetros estruturais de forma remota [30].

As informações sobre as OAEs necessárias para o seu gerenciamento podem ser armazenadas em sistemas avançados de modelagem de 'objetos' que compõem os ativos físicos. A filosofia BIM (*Building Information Model*) tem sido estendida para as OAEs dentro do que se denomina BrIM (*Bridge Information Model*) e pode constituir no futuro uma forma poderosa de compartilhamento de informações e conhecimento sobre o seu comportamento ao longo do ciclo de vida [31].

A análise dos aspectos contemplados acima e sua integração serão objeto do projeto de pesquisa aqui proposto, e poderão abrir perspectivas interessantes para o gerenciamento das OAEs que compõem a infraestrutura das vias operadas pela VALE.

2. METODOLOGIA EMPREGADA

Foram escolhidas 3 pontes de diferentes tipologias que integram a infraestrutura da Estrada de Ferro Carajás (EFC), administrada pela VALE, sendo que uma delas servirá de protótipo a ser estudado em profundidade para definir as novas metodologias de investigação com várias tecnologias de inspeção e monitoramento. As outras duas tipologias representativas também serão estudadas com técnicas convencionais e baseadas nas calibrações preliminares. Os resultados definirão os critérios para avaliação do desempenho das estruturas e essas informações poderão ser utilizadas para replicar a metodologia em outras OAEs. Abaixo estão descritas as tecnologias empregadas pelos grupos de pesquisa GeoInfraUSP e GMEC.

2.1 Inspeção

A inspeção em OAEs é de suma importância para coletar informações sobre a estrutura, e realizar um diagnóstico das patologias encontradas. Atualmente, no Brasil, essa inspeção é realizada de forma visual e manual e segue as recomendações da norma ABNT NBR 9452 – “Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento” [3]. A norma apresenta os tipos de inspeção e quando elas devem ser realizadas, assim como critérios de classificação e parâmetros de avaliação das OAEs, para então definir uma nota de classificação da estrutura e as ações que devem ser tomadas.



Fig. 1 Inspeção utilizando VANT. Fonte: Dorafshan, 2018 [32].

Atualmente, com o grande avanço da tecnologia ótica, soluções de inspeções automatizadas vêm sendo estudadas. A

utilização de VANTs (veículo aéreo não tripulado) para a aquisição de imagens como ilustra a Fig. 1, e a utilização de visão computacional para a detecção e classificação de danos se tornaram soluções para a inspeção [32].

Para a área de inspeção, a pesquisa busca analisar o estado e condições estruturais de algumas OAEs representativas das tipologias existentes na EFC e suas fundações por meio de técnicas de inspeção convencionais e as que envolvem a utilização de VANTs (*drones*) equipados com câmeras de alta definição e câmeras térmicas. Além disso, pretende-se analisar e aprimorar recomendações para inspeção de OAEs, comparando códigos internacionais e os disponíveis no Brasil.

2.2 Modelagem computacional

A modelagem computacional é utilizada para inferir o desempenho atual e realizar prognósticos de comportamento das estruturas, servindo também como base para o planejamento do sistema de monitoramento. Para a análise computacional estão sendo utilizados *softwares* específicos que permitem a criação de modelos digitais 3D das estruturas em estudo a partir das informações disponíveis em projeto ou levantadas pelas inspeções prévias. Uma ferramenta auxiliar para a captação da geometria real da estrutura, “*as-is*”, são os *scanners a laser*. Esses equipamentos são capazes de criar imagens panorâmicas 360 graus e uma geometria digital em 3D da estrutura escaneada a partir da captação de nuvens de pontos (Fig 2).



Fig. 2 Nuvem de pontos captada por *scanner*

Com auxílio do *software Rhino3D* e da programação gráfica *Grasshopper* constrói-se um modelo geométrico parametrizado da estrutura em estudo, buscando representar fielmente suas dimensões, a interação entre

seus elementos e os materiais que a compõem. Essa geometria é posteriormente integrada a modelos de elementos finitos, para garantir uma representação confiável do comportamento real da estrutura, com foco na obtenção de qualidade da malha e condições de contorno adequadas. Os modelos construídos estão sendo utilizados nas análises das OAEs, e serão futuramente atualizados e calibrados com informações adicionais advindas de inspeções e do monitoramento. Esse processo é ilustrado no esquema da Fig. 3.

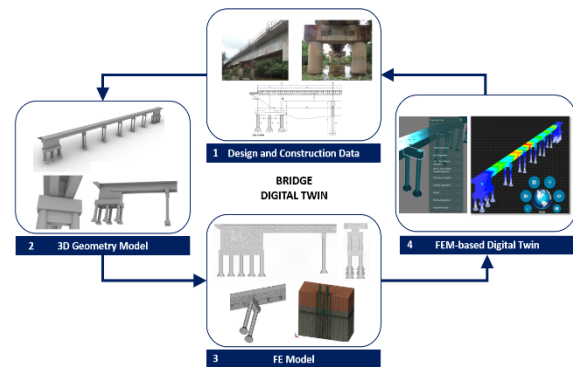


Fig. 3 Processo de desenvolvimento de modelos digitais das OAEs. Fonte: Bittencourt *et al.*, 2021[33].

2.3 Ensaios não destrutivos

2.3.1 Ensaios não destrutivos e Geofísicos para investigação do solo e fundações enterradas

Serão utilizadas técnicas não destrutivas para definir o comprimento das fundações, como o sistema eco sônico com resposta ao impulso (Sonic Echo/Impulse Response SE/IR) e o sistema sísmico com arranjo paralelo [34,35]. No Brasil a técnica mais difundida é o teste de integridade de fundações (PIT – Pile Integrity Test). O teste é realizado em fundações profundas para avaliar a integridade de estacas de modo a inferir, indiretamente, possíveis defeitos construtivos que poderiam ter ocorrido na concretagem, além de trincas, rupturas e anomalias da seção da estaca (Fig. 4).

As principais metodologias utilizadas para verificação da integridade e características das barras de aço inseridas em estruturas de fundação são normalmente baseadas em técnicas acústicas, magnéticas, reflectométricas, ultrassônicas e de

resistividade elétrica. Dentre os diversos métodos existentes no mercado, quatro se apresentam mais promissores e com potencial de utilização em estruturas já existentes. São eles: Sonic Echo, Time Domain Reflectometry, Reflectometric Impulse Measurement Technique, e o método da Resistência Elétrica [36].

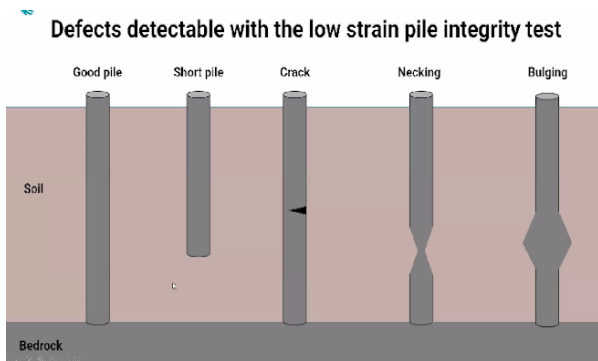


Fig. 4 Defeitos detectáveis em estacas pelo PIT

2.3.2 Ensaios não destrutivos para avaliação do concreto e armadura

Vários métodos de ensaios não destrutivos visam alcançar a mais alta qualidade de imagem visual de características internas e/ou externas das estruturas de concreto [37,38]. Contudo, assim como as inspeções visuais, nenhum método não destrutivo individual pode detectar todos os tipos de patologias nas estruturas de concreto, [39]. O ideal é que se utilize em conjunto a inspeção visual com diferentes técnicas de ensaios não destrutivos (Fig. 5), assim como está sendo aplicado neste projeto de pesquisa.



Fig. 5 Ensaios não destrutivos empregados em estruturas de concreto

2.4 Monitoramento

Ao longo destes últimos anos tem havido extraordinária evolução na área de análise experimental de estruturas [16]. Acompanhando a revolução tecnológica

moderna, as ferramentas de monitoramento atuais apresentam recursos de grande utilidade. Valendo-se disso, nesse projeto estão sendo utilizadas diferentes técnicas de monitoramento para coletar parâmetros como deslocamentos linear e angular, deformação, e aceleração em pontos representativos da superestrutura e das fundações das OAEs em estudo. Os resultados obtidos por meio das novas tecnologias serão comparados com aqueles de tecnologia consolidada, permitindo assim a calibração e validação das novas ferramentas. A partir dos dados coletados serão avaliados tanto o comportamento estático, quanto o comportamento dinâmico das estruturas.

2.4.1 Técnicas de monitoramento embarcado

Para o monitoramento embarcado será feita a instrumentação com sensores de tipologias diferentes entre si, combinando tecnologias já consolidadas, como os sensores elétricos, e tecnologias emergentes, como os sensores de fibra ótica (SFOs). A combinação dessas tecnologias possibilita a composição de sistemas de monitoramento híbridos, que podem apresentar resiliência, agilidade e durabilidade superiores a sistemas com sensores de um único tipo [40].

A proposta de incorporação de SFOs nos sistemas de monitoramento tem como objetivo proporcionar alternativas confiáveis principalmente para a aplicação em ambientes onde os sensores convencionais apresentam algum tipo de limitação, tomando partido de algumas vantagens desse tipo de tecnologia, como resistência a ambientes hostis, imunidade a interferências eletromagnéticas, medições a longas distâncias e capacidade de multiplexação. A possibilidade de alocar vários sensores em uma mesma linha de transmissão, até mesmo para a detecção de parâmetros diferentes, oferece novas oportunidades de monitoramento, com redes mais diversificadas e compactas, já que há a diminuição na quantidade de cabos de transmissão [12,41,42].

Além da diversidade de sensores, serão incorporadas aos sistemas de monitoramento tecnologias de instrumentação sem fio (*wireless*) e monitoramento remoto, com dados sendo adquiridos em campo e transmitidos por rede ou armazenados em nuvem, ideais para monitoramentos de médio e longo prazo.

2.4.2 Técnicas de monitoramento não embarcado

Embora a metodologia atual para o monitoramento de pontes produza dados confiáveis, existem limitações na resolução espacial e temporal. Especialmente para o monitoramento em pontes, existem regiões de difícil acesso, o que pode limitar a instalação e manutenção de sistemas de monitoramento embarcado, além de exigir interrupções de serviço da estrutura como o fechamento do tráfego [30]. Todavia, existem novas abordagens complementares que solucionam as atuais limitações dos sensores convencionais.

Com os grandes avanços em dispositivos óticos, o monitoramento baseado em visão computacional, processamento de imagens e técnicas interferométricas tem sido um campo de pesquisa que ganha cada vez mais atenção na área da engenharia civil, devido as vantagens de não contato e medição à longa distância com alta precisão [43].

2.4.2.1. Radar Interferométrico

Para as técnicas óticas interferométricas existe o radar interferométrico, que é uma técnica de sensoriamento remoto poderosa, capaz de detectar pequenos deslocamentos a uma grande distância. A base teórica desses radares é derivada das tecnologias espaciais InSAR (*Interferometric synthetic aperture RADAR*) onde um radar satélite é capaz de explorar informações de fase de imagens para detectar deslocamentos de alguns milímetros do solo a uma distância de centenas de quilômetros [44].

Com a finalidade de validar essa tecnologia para a aplicação em SHM, dados de deslocamentos dinâmicos adquiridos em campo por meio de radar interferométrico foram comparados com resultados obtidos através de uma solução numérica em dois estudos de caso [45]. Os dados obtidos em campo se mostraram um ótimo indicador para o monitoramento das estruturas.

O radar interferométrico IBIS-FS será utilizado nas OAEs em estudo. O equipamento pode ser utilizado tanto para monitoramentos estáticos, como em testes de carga de estrutura, quanto para monitoramento dinâmico, sendo neste

caso melhor utilizado para medidas de frequência de ressonância estrutural e análise de forma modal [28]. Neste trabalho já foram realizados alguns testes em uma passarela de pequeno porte utilizando o IBIS-FS como ilustra a Fig. 6.

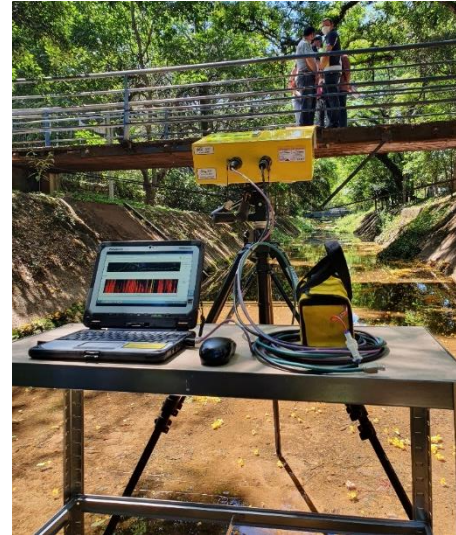


Fig. 6 Radar interferométrico IBIS-FS

2.4.2.2. Processamento de imagem

Existe um campo de métodos óticos sem contato que inclui técnicas de processamento de imagens que medem a deformação em toda superfície do objeto de estudo. Como representantes dessas técnicas, o DIC (*Digital Image Correlation*) e o MA (*Motion Amplification*) serão utilizados neste trabalho para o monitoramento das OAEs.

O DIC (*Digital Image Correlation*) é uma ferramenta poderosa e flexível utilizada para medir deformações e deslocamentos na superfície de um objeto, a partir da comparação de imagens digitais [46]. Por ser um método sem contato com a estrutura, o DIC permite realizar medidas em locais de difícil acesso. A popularização dos veículos não tripulados como *drones* aumenta a acessibilidade e diminui a interferência da estrutura na medida. Atualmente existe uma abordagem que combina o método DIC com um *drone* equipado com um sistema embarcado para controlar a aquisição das imagens. Reagan *et al.* [47] realizaram monitoramentos em duas pontes, como ilustra a Fig. 7. Eles compararam os resultados obtidos pelo DIC e por extensômetros, e verificaram a acurácia do método não embarcado.

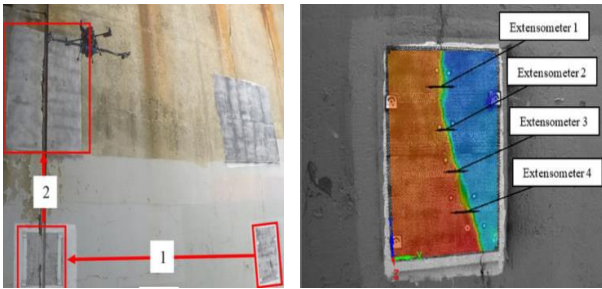


Fig. 7 Monitoramento utilizando VANT. Fonte: Reagan et al., 2018 [47]

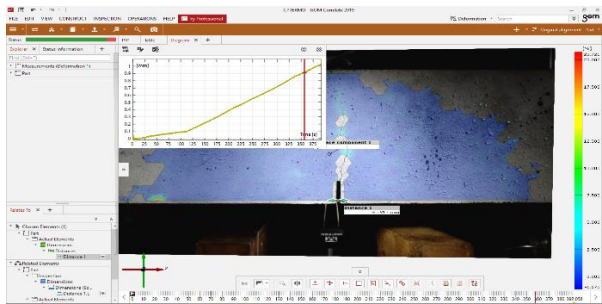


Fig. 8 Ensaio DIC realizado em laboratório

Neste projeto, Toome *et al.* [48] testaram essa técnica em laboratório, comparando o DIC com os sensores elétricos, a fim de validá-la (Fig. 8). Após a validação dessa técnica no laboratório, o DIC foi utilizado em uma OAE de concreto armado de pequeno porte, a fim de medir deslocamentos e acelerações nos pontos do tabuleiro e bloco de fundação, como ilustram as Fig. 9 e 10.

Outro representante das técnicas óticas é a amplificação de imagem (*Motion Amplification - MA*) que permite revelar movimentos em vídeos, os quais seriam impossíveis de ver a olho nu e exibi-los em uma forma indicativa. Medições de deslocamento são realizadas sem contato por meio de filmagens, proporcionando coletas mais seguras e bem mais eficientes. Esta técnica demonstra o comportamento dinâmico do ativo através de vídeos com extração de formas de onda, espectros e órbitas, além de trajetórias de atividades transientes, dando ao analista um maior entendimento sobre as possíveis causas fundamentais dos problemas decorrentes.

Existe um estudo dinâmico das vibrações em uma ponte que foi realizado utilizando o algoritmo de MA em imagens digitais [49]. O ensaio foi feito em laboratório, utilizando uma viga metálica treliçada que foi submetida a excitações artificiais em condições plena e

danificada. As respostas dinâmicas foram extraídas através de sensores acoplados na estrutura e pelo MA. O algoritmo conseguiu caracterizar precisamente os detalhes da vibração da viga, provando ser uma técnica promissora, mas que ainda necessita de melhorias.

O Iris-M é um equipamento de aquisição e processamento de vídeo, o qual consiste em um conjunto de câmera de alta velocidade conectada a um computador com *software Motion Amplification™*. Esse equipamento será utilizado no sistema de monitoramento das OAEs em estudo, alguns resultados já foram obtidos em testes realizados em uma passarela de pequeno porte (Fig. 11).



Fig. 9 Ensaio DIC realizado no tabuleiro de uma OAE

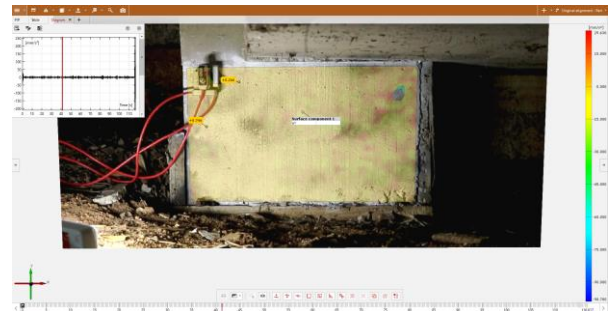


Fig. 10 Ensaio DIC realizado no bloco de fundação de uma OAE

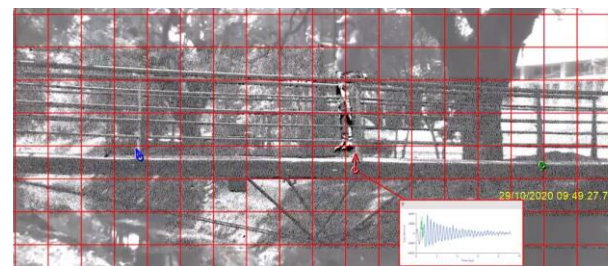


Fig. 11 Monitoramento teste realizado com o Iris-M

3. RESULTADOS ESPERADOS

A maioria das técnicas aqui citadas já vêm sendo testadas conjuntamente em estruturas de menor porte, mistas e de concreto armado, para futuramente serem utilizadas nas OAEs que são objeto de estudo deste projeto. A análise dos dados obtidos até agora pelos diferentes métodos e equipamentos em teste vem mostrando uma boa convergência de resultados, comprovando o potencial de aplicação destes.

Ao final da execução da metodologia proposta, a análise dos resultados obtidos por meio das técnicas apresentadas irá possibilitar verificar o real estado e desempenho das OAEs como um todo, incluindo a interação solo-fundação-estrutura.

As informações adquiridas podem ser futuramente integradas em sistemas de gerenciamento com modelos BrIM (Fig. 10), que vem se mostrando uma poderosa ferramenta de compartilhamento de informações sobre o comportamento ao longo do ciclo de vida das OAEs. Isso poderá trazer ganhos de eficiência, produtividade, conforto e segurança operacional, além de redução de custos [50].

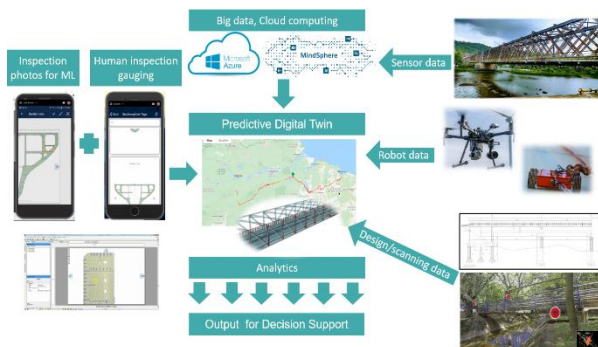


Fig. 12 Esquema de modelo BrIM de integração de informações. Fonte: Bittencourt *et al.*, 2021[33]

4. CONCLUSÕES

A combinação de técnicas de inspeção modernas, ensaios não destrutivos e monitoramento permite diagnósticos muito mais precisos e prognósticos de comportamento estrutural mais realistas. Como resultado desse projeto será estabelecido um conjunto de metodologias práticas e eficientes para a avaliação de OAEs de diferentes tipologias que integram a

infraestrutura da Estrada de Ferro Carajás (EFC), administrada pela VALE, mas que poderá ser replicado para outros casos de interesse. A aplicação desse método possibilitará uma melhor programação das operações de manutenção, reparo ou reforço, trazendo benefícios para o gerenciamento dessas estruturas ao longo de seus ciclos de vida.

5. AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem o suporte financeiro da Cátedra *Under Rail* patrocinada pela companhia VALE S.A.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Woodward, R. J. et al. Final Report – Contract nº RO – 97 – SC.2220, p. 29-100, BRIME, 2001.
- [2] Bittencourt, T.N. et al. Maintenance, monitoring, safety, risk and resilience of bridges and bridge networks. 1.Ed. London: CRC Press - Taylor and Francis, 2016. V. 1. 616p. ISBN: 978-1-138-02851-7
- [3] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9452 - Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2019.
- [4] BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa/IPR. IPR-709: Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias. Rio de Janeiro, 2004.
- [5] _____. Norma 010/2004-Pro: Inspeções em Pontes e Viadutos de Concreto Armado e Protendido-Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- [6] Mortara, G. et al. Cyclic shear stress degradation and post-cyclic behaviour from sand-steel interface direct shear tests. Canadian Geotech. J., 44, 739-752, 2007.
- [7] Sharma, S. and Fahey, M. Degradation of stiffness of cemented calcareous soils in cyclic triaxial tests. J. Geotech. Geoenviron, 129,619-629, 2003.

- [8] Jardine, R.J. and Standing, J. R. Field axial cyclic loading experiments on piles driven in sand. Soils and Foundations; 52(4):723–736, 2012.
- [9] Rimoy, S.P. Ageing and axial cyclic loading studies of displacement piles in sands. PhD thesis. Imperial College London. 2013.
- [10] Cook, W. et al. Bridge Failure Rate. J. Perform. Constr. Facil., 2015, 29(3): 04014080, 2014.
- [11] Briaud, J.L., Gardoni, P. and Yao, C. Statistical, Risk, and Reliability Analyses of Bridge Scour. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2014, 140(2): 04013011, 2013.
- [12] Glisic, B.; Inaudi, D. Fibre optic methods for structural health monitoring. John Wiley & Sons, 2007.
- [13] 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.
- [14] Gao, Y. Structural health monitoring strategies for smart sensor networks. Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana, USA, 2005.
- [15] Feng, M. Q. et al. Baseline models for bridge performance monitoring. Journal of Engineering Mechanics, pp. 562-569. ASCE, 2004.
- [16] Meneghetti, L.C. et al. Tendências modernas para acompanhamento experimental do desempenho estrutural, 54CBC - 54º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2012, Macéio-AL. SÃO PAULO: IBRACON, 2012. V. 1. P. 1-14.
- [17] Assis, W. S. et al. Controle da aquisição e tratamento de resultados da monitoração utilizando LabVIEW. Betão Estrutural 2004. FEUP-GPBE. Porto, Portugal, 2004.
- [18] Bergmeister, K.; Santa, U. Global Monitoring Concepts for Bridges. Structural Concrete. Vol. 2, n.º 1, pp.29-39. March 2001.
- [19] Colombo, A.B. et al. Development of a web interface for structural health monitoring data visualization and structural performance. IN: IABMAS 2016, FOZ DO IGUAÇU. MAINTENANCE, MONITORING, SAFETY, RISK AND RESILIENCE OF BRIDGES AND BRIDGE NETWORKS. LONDON: CRC PRESS, 2016. V.1. P.227-227.
- [20] Ye, X.W.; Su, Y.H.; Han, J.P. Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: A comprehensive review. The Scientific World Journal, 2014.
- [21] Chen, Z. et al. Deployment of a smart structural health monitoring system for long-span arch bridges: A review and a case study. Sensors, 17(9), p.2151, 2017.
- [22] Alexakis, H. et al. Structural Health Monitoring of a masonry viaduct with Fibre Bragg Grating sensors. IABSE Symposium, Guimarães, Portugal, 2019.
- [23] Barbosa, C. et al. Monitoring and control of the longest suspension bridge in Brazil during its complex rehabilitation process. SMAR - 5th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, Potsdam, Germany, 2019.
- [24] Gharad, A.M.; Sonparote, R.S. Influence of soil-structure interaction on the dynamic response of continuous and integral bridges subjected to moving loads. International Journal of Rail Transportation, 8(3), pp.285-306, 2020.
- [25] Faraonis, P. et al. Implications of subsoil-foundation modelling on the dynamic characteristics of a monitored bridge. Structure and Infrastructure Engineering, 15(2), pp.180-192, 2019.
- [26] Kong, X.; Cai, C.S.; Hou, S. Scour effect on a single pile and development of corresponding scour monitoring methods. Smart materials and structures, 22(5), p. 055011, 2013.
- [27] Bao, T. et al. Critical insights for advanced bridge scour detection using the natural

- frequency. *Journal of Sound and Vibration*, 386, pp.116-133, 2017.
- [28] IBIS-FS:
<https://idsgeoradar.com/products/interferometric-radar/ibis-fs>
- [29] Rothberg S.J. et al. An International Review of Laser Doppler Vibrometry: Making Light Work of Vibration Measurement. *Optics and Laser in Engineering* 99, 11-22 pp, 2017.
- [30] Catbas, N. et al. A Vision for Vision-based Technologies for Bridge Health Monitoring. IABMAS 2018, CRC Press - Taylor and Francis, 2018. V.1, PP. 54-62. ISBN: 978-1-138-73045-8
- [31] Chipman, T. et al. FHWA Report, FHWA-HIF-16-011, 2016. (<https://www.fhwa.dot.gov/bridge/pubs/hif16011/hif16011a.pdf>)
- [32] Dorafshan, S.; Maguire, M. Bridge inspection: human performance, unmanned aerial systems and automation. [s.l.] Springer Berlin Heidelberg, 2018. v.8
- [33] Bittencourt, T.N. et al. Utilization of Digital Twins for bridge inspection, monitoring and maintenance. Manuscript submitted for publication. 2021.
- [34] Hossai, M. S, Khan, M. S., Hossain, J., Kibria, G. and Taufiq, T. (2013). Evaluation of Unknown Foundation Depth Using Different NDT Methods. *J. Perform. Constr. Facil.*, 27(2): 209-214.
- [35] Duan, C., Yang, C., Xu, B. e Zhou, Y. (2017) Crosshole seismic CT data field experiments and interpretation for karst caves in deep foundations. *Engineering Geology*, Vol. 228, October, pp. 180-196.
- [36] Mikos, A. P.; Roedel, L.; Caetano, M. C.; Kormann, A.C.M.; Faro, V.P.; Sestrem, L. P.; Teixeira, L.P.C., 2016. Aplicabilidade de métodos não destrutivos em estruturas de contenção: cortinas atirantadas e solo grampeado. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica O Futuro Sustentável do Brasil passa por Minas COBRAMSEG. Outubro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.]
- [37] Forde, M., 2010. International practice using NDE for the inspection of concrete and masonry arch bridges. *Bridg. Struct.*, Volume 6, pp. 25-34.
- [38] Forde, M., 2013. Differences in international strategy for the NDT of concrete. *Nondestructive Testing of Materials and Structures*, p. 1217–1227.
- [39] Hiasa, S., Birgul, R., Matsumoto, M. & Necati Catbas, F., 2018. Experimental and numerical studies for suitable infrared thermography implementation on concrete bridge decks. *Measurement*, Volume 121, pp. 144-159.
- [40] Pamukcu, S.; Cheng, L.; Pervizpour, M. Introduction and Overview of Underground Sensing for Sustainable Response. *Underground Sensing: Monitoring and Hazard Detection for Environment and Infrastructure*, pp. 1-42. Academic Press, 2018
- [41] Peters, K. J.; Inaudi, D. Fiber optic sensors for assessing and monitoring civil infrastructures. *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*, pp. 121-158. Woodhead Publishing, 2014.
- [42] Xiao, W.; Yi, X.; Pan, F.; Li R.; Xia, T. Acoustic, Electromagnetic and Optical Sensing and Monitoring Methods. *Underground Sensing: Monitoring and Hazard Detection for Environment and Infrastructure*, pp. 43-139. Academic Press, 2018.
- [43] Ye, X. W.; Dong, C. Z.; Liu, T. A Review of Machine Vision-Based Structural Health Monitoring: Methodologies and Applications. *Journal of Sensors*, v. 2016.
- [44] Pepe, A.; Calò, F. A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's Surface displacements. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 7, n. 12, 2017.
- [45] Sokol, M. et al. Radar interferometry for SHM purposes. *MATEC Web of Conferences*, v. 310, p. 00037, 2020.
- [46] Gencturk, B. et al. Use of digital image correlation technique in full-scale testing of

prestressed concrete structures.
Measurement: Journal of the International
Measurement Confederation, 505–515,
2014.

[47] Reagan, D.; Sabato, A.; Niezrecki, C. Feasibility of using digital image correlation for unmanned aerial vehicle structural health monitoring of bridges. Structural Health Monitoring, v. 17, n. 5, p. 1056–1072, 2017.

[48] Toome, F. K.; Fernandes, J. F.; Bittencourt, T. N.; Futai, M. M. Ensaio Não Destrutivo Utilizando Método Sem Contato Através da Correlação de Imagem Digital em Amostra de Concreto. 62º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis/SC, 2021.

[49] Chu, X.; Xiang, X.; Zhou, Z. Experimental study of Euler motion amplification algorithm in bridge vibration analysis. J. Highw. Transp. Res. Dev. 2019, 36, 41–47.

[50] Bittencourt, T. N., Futai, M.M., Conceição Neto, A. P. Digital transformation of bridges inspection, monitoring and maintenance processes. Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations – Yokota & Frangopol (eds) © 2021 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-367-23278-8.