

Interferometria de radar de abertura sintética (InSAR) como ferramenta de alerta precoce no monitoramento de Obras de Arte Especiais: o caso da ponte sobre o Estreito dos Mosquitos (BR-135/MA)

FÁBIO PESSOA DA SILVA NUNES - DIR. DE INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA - (fabio.nunes@dnit.gov.br) - <https://orcid.org/0009-0003-6601-0084> ;

MARIA HELENA FERRER - ENG^a - <https://orcid.org/0000-0003-3326-2042> ;

ALEXANDRE GIL BATISTA DE MEDEIROS - COORD. DE MANUTENÇÃO DE ESTRUTURAS E CONTENÇÕES - <https://orcid.org/0009-0005-7861-9203> ;

MATEUS SANTOS LIMA - ENG. - <https://orcid.org/0009-0006-7852-5482> – DNIT

RESUMO

A SEGURANÇA DE PONTES E VIADUTOS NO BRASIL, DIANTE DE COLAPSOS, TEM MOTIVADO A ADOÇÃO DE MÉTODOS DE ALERTA PRECOCE. ESTE ARTIGO APRESENTA A INTERFEROMETRIA DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA (InSAR) COMO FERRAMENTA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS (OAEs), ABORDANDO SEUS FUNDAMENTOS, TÉCNICAS MULTITEMORAIS E A SENSIBILIDADE A DESLOCAMENTOS NA ESCALA MILIMÉTRICA. COMO ESTUDO DE CASO, ANALISA-SE A PONTE SOBRE O ESTREITO DOS MOSQUITOS (BR-135/MA), NA QUAL DEZ PONTOS MONITORADOS POR SATÉLITE INDICARAM AMPLITUDE DIFERENCIAL DE APROXIMADAMENTE 125 MM EM 25 MESES, COM APROXIMAÇÃO DE ATÉ +64 MM E AFASTAMENTO DE ATÉ -61 MM EM RELAÇÃO AO SATÉLITE. O COMPORTAMENTO CINEMÁTICO DIVERGENTE OBSERVADO NAS SÉRIES MOTIVOU INSPEÇÃO EXTRAORDINÁRIA, QUE CONFIRMOU CONDIÇÃO ESTRUTURAL CRÍTICA E PERDA EXPRESSIVA DE RIGIDEZ NA REGIÃO DOS ANTIGOS DENTES GERBER. CONCLUI-SE QUE O InSAR É EFICAZ COMO INSTRUMENTO DE TRIAGEM, ALERTA PRECOCE E APOIO À GESTÃO DE ATIVOS BASEADA EM RISCO.

PALAVRAS-CHAVE: InSAR, OBRAS DE ARTE ESPECIAIS, MONITORAMENTO ESTRUTURAL, ALERTA PRECOCE, GESTÃO DE ATIVOS.

1. INTRODUÇÃO

A malha rodoviária federal brasileira reúne milhares de Obras de Arte Especiais

(OAEs), parcela expressiva delas projetada e construída há várias décadas, sob normas e carregamentos distintos dos atuais. O envelhecimento desse acervo, somado ao aumento do volume e do peso do tráfego, eleva a demanda por inspeção, manutenção e, sobretudo, por prevenção de falhas. Colapsos ocorridos nos últimos anos evidenciaram o elevado custo humano e econômico associado à perda de uma travessia.

A inspeção visual periódica e a instrumentação permanecem indispensáveis, porém são localizadas, episódicas e intensivas em recursos. Técnicas de sensoriamento remoto orbital despontam como camada complementar de vigilância contínua. A interferometria de radar de abertura sintética (InSAR) destaca-se por apresentar sensibilidade a deslocamentos na escala milimétrica, cobrir grandes extensões sem instalação de equipamentos em campo e dispor de acervos históricos de imagens desde a década de 1990.

Este artigo apresenta os fundamentos da técnica InSAR e seu papel como ferramenta de alerta precoce em OAEs, ilustrado por um estudo de caso nacional, a Ponte sobre o Estreito dos Mosquitos (BR-135/MA), cujo monitoramento orbital antecedeu e motivou a inspeção extraordinária

e o monitoramento dinâmico descritos no artigo que acompanha o presente trabalho.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Fundamentos da técnica InSAR

O radar de abertura sintética (SAR, do inglês *Synthetic Aperture Radar*) é um sensor ativo embarcado em satélite que emite micro-ondas e registra o sinal retroespalhado pela superfície. Por dispor de fonte própria de energia, adquire imagens de dia e de noite e atravessa a cobertura de nuvens, garantindo aquisições regulares independentemente das condições meteorológicas, vantagem decisiva no clima tropical.

A interferometria explora a fase do sinal de duas ou mais imagens adquiridas sobre a mesma área em datas distintas. A diferença de fase relaciona-se à variação da distância entre o satélite e o alvo ao longo da linha de visada (LOS, do inglês *line of sight*). Removidas as contribuições da topografia e da órbita, a interferometria diferencial (DInSAR) isola a componente de deformação, com sensibilidade da ordem de milímetros. A banda C, adotada pela constelação Sentinel-1 do programa europeu Copernicus, equilibra cobertura e dados gratuitos, com revisita de 6 a 12 dias;

a banda L penetra melhor a vegetação, característica relevante nos corredores rodoviários brasileiros.

2.2 Técnicas multitemporais: PSInSAR e SBAS

Interferogramas isolados sofrem com ruídos atmosféricos e perda de coerência ao longo do tempo. Técnicas multitemporais superam essas limitações processando longas pilhas de imagens. A interferometria por refletores persistentes (PSInSAR), proposta por Ferretti, Prati e Rocca (2001), identifica pontos de resposta estável como quinas de estruturas, elementos metálicos e superfícies de concreto, e estima, para cada um, a velocidade de deslocamento e o histórico temporal. A técnica de pequenas linhas de base (SBAS), de Berardino *et al.* (2002), explora alvos distribuídos, ampliando a densidade de medições. Para as OAEs, concreto e aço comportam-se como excelentes refletores, favorecendo alta densidade de pontos sobre tabuleiros, pilares e encontros (Crosetto *et al.*, 2016).

2.3 InSAR como ferramenta de alerta precoce em OAEs

No monitoramento de OAEs, o InSAR permite acompanhar recalques de fundações e pilares, tendências de deflexão de tabuleiros e o assentamento de aterros de acesso, com a vantagem de produzir séries temporais que evidenciam acelerações do deslocamento, possíveis precursores de falha. O caso de referência internacional é o da Ponte Morandi, em Gênova, cujo colapso em 2018 resultou em 43 mortes: estudos com séries InSAR (Milillo *et al.*, 2019) demonstraram deformações mensuráveis e crescentes nos meses anteriores à ruptura. Esse potencial de detecção precoce, aliado à cobertura sistemática de redes inteiras, motiva a incorporação da técnica aos programas de gestão de OAEs.

2.4 Estudo de caso: Ponte sobre o Estreito dos Mosquitos (BR-135/MA)

A Ponte sobre o Estreito dos Mosquitos (ativo OAE5124), localizada na BR-135/MA, aproximadamente na latitude -2,761733° e longitude -44,356967°, possui 459 m de extensão, seção celular em concreto pro-



FIGURA 1

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DISPERSORES PERSISTENTES (PS) SOBRE A PONTE SOBRE O ESTREITO DOS MOSQUITOS (BR-135/MA), EM GEOMETRIA ORBITAL DESCENDENTE

FONTE: PLATAFORMA DE MONITORAMENTO IN SAR

tendido, antigos dentes Gerber e histórico de intervenções de reforço, tendo sido aberta ao tráfego em 1972.

O monitoramento interferométrico empregado neste estudo utiliza dados SAR da missão Sentinel-1, em banda C, processados de forma multitemporal para obtenção de séries de deslocamento associadas a dispersores persistentes (PS — *Persistent Scatterers*). No caso analisado, foram utilizadas exclusivamente aquisições em geometria orbital descendente, sendo os deslocamentos expressos na linha de visada do satélite (LOS — *Line of Sight*). Dessa forma, os valores apresentados correspondem à variação relativa da distância entre o sensor e o alvo projetada na direção LOS, não sendo possível, a partir de uma única geometria orbital, decompor isoladamente as componentes vertical e horizontal do movimento.

A solução operacional disponibiliza aos usuários os produtos resultantes do processamento multitemporal e as respectivas séries de deslocamento dos PS. Entretanto, a interface consultada não permite recuperar de forma rastreável o número total de cenas SAR efetivamente empregado na pilha interferométrica, tampouco identifica, para o usuário, o alvo estável de referência utilizado no processamento. Do mesmo modo, embora os produtos sejam baseados na evolução temporal de dispersores persistentes, a implementação específica

do algoritmo de processamento não é discriminada na interface operacional como PSInSAR clássico ou SBAS. Por esse motivo, neste trabalho, o método é referido de forma mais geral como processamento InSAR multitemporal baseado em dispersores persistentes.

A Figura 1 apresenta a distribuição espacial dos dispersores persistentes atualmente disponíveis sobre a Ponte sobre o Estreito dos Mosquitos, evidenciando a cobertura interferométrica ao longo da estrutura. Ressalta-se que a plataforma possui caráter dinâmico, sendo os produtos atualizados à medida que novas aquisições SAR são incorporadas ao processamento. Consequentemente, a configuração atualmente apresentada no ambiente operacional não permite estabelecer de maneira inequívoca a correspondência entre a identificação atual dos dispersores e os dez pontos selecionados quando da análise original.

Para preservar a rastreabilidade entre os dados interferométricos originalmente avaliados e as ações de gestão deles decorrentes, adotou-se, neste estudo, a janela compreendida entre janeiro de 2024 e fevereiro de 2026, correspondente ao conjunto de dados disponíveis e efetivamente utilizados na avaliação técnica original. Naquela ocasião, foram selecionadas dez séries temporais associadas a dispersores persistentes disponíveis sobre a estrutura.

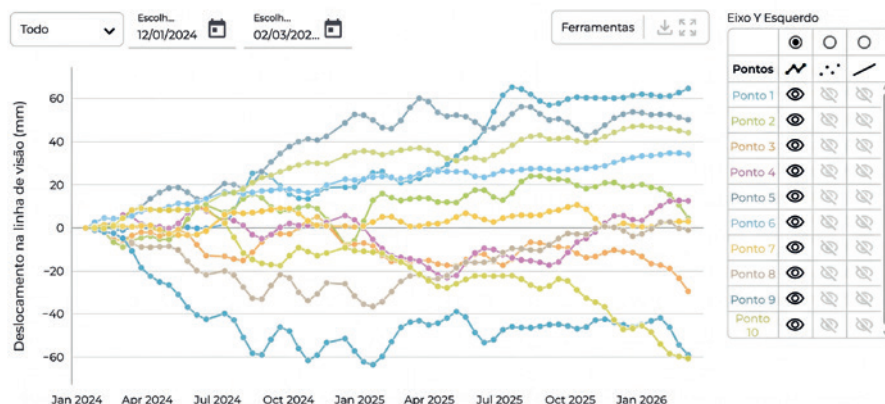


FIGURA 2

SÉRIES TEMPORAIS DE DESLOCAMENTO NA LINHA DE VISADA (LOS) DOS DEZ PONTOS MONITORADOS NA OAE5124 ENTRE JANEIRO DE 2024 E FEVEREIRO DE 2026

FONTE: PLATAFORMA DE MONITORAMENTO InSAR

Atualizações posteriores da plataforma não foram incorporadas retrospectivamente aos resultados aqui apresentados. A Figura 2 preserva, portanto, as séries temporais efetivamente consideradas na análise.

A leitura das séries evidencia comportamento cinemático diferenciado entre os pontos selecionados. Ao final do período, os valores extremos variavam de aproximadamente +64 mm, indicando aproximação em relação ao satélite, a -61 mm, indicando afastamento, correspondendo a uma amplitude diferencial de aproximadamente 125 mm entre os extremos das séries em LOS. Essa amplitude não deve ser interpretada diretamente como abertura, recalque ou deslocamento estrutural físico de 125 mm, uma vez que a medição em uma única geometria orbital representa a projeção das componentes de movimento sobre a direção LOS.

Três séries destacaram-se pela magnitude e pela evolução temporal. Uma apresentou aproximação sustentada até aproximadamente +64 mm, com velocidade média da ordem de +30 mm/ano e cerca de +36 mm/ano no trecho final analisado. Duas outras atingiram aproximadamente -58 mm e -61 mm em afastamento, sendo que esta última apresentou aceleração expressiva no trecho final, da ordem de -60 mm/ano. A síntese desses comportamentos é apresentada na Tabela 1.

Cabe destacar que não foi realizada, no presente estudo, a decomposição quantitativa da componente termoelástica das séries de deslocamento. Pontes de concreto pretendido estão sujeitas a variações sazonais decorrentes da expansão e contração térmica, que podem contribuir para a amplitude das séries interferométricas (Schlögl *et al.*, 2021; Tonelli *et al.*, 2023). Dessa forma, a amplitude diferencial de aproximadamente 125 mm corresponde à diferença observada entre os extremos das séries relativas em LOS e não deve ser interpretada integralmente como deformação estrutural permanente. Apesar dessa limitação, a persistência temporal, a divergência entre as séries e a alteração de velocidade observada em pontos distintos justificaram a priorização da estrutura para investigação complementar.

A priorização da estrutura não se baseou exclusivamente na magnitude absoluta das séries. Para fins de triagem, foram consideradas conjuntamente a persistência temporal dos deslocamentos, a divergên-

cia de comportamento entre as séries e a alteração de velocidade observada em pontos de maior magnitude. Dessa forma, o alerta interferométrico deve ser entendido como indicador de comportamento cinemático anômalo e de necessidade de investigação prioritária, e não como um limite isolado de segurança estrutural. Não se adota, portanto, um valor absoluto universal de deslocamento em LOS que, isoladamente, determine uma condição de risco para todas as tipologias de OAEs.

No que se refere à incerteza das medições, não foi realizada validação geodésica independente específica dos dez pontos analisados, e a interface operacional utilizada não disponibilizou uma estimativa quantitativa de incerteza individual associada a cada série. Por esse motivo, não se atribui neste trabalho uma precisão absoluta específica aos valores apresentados. Os resultados são interpretados prioritariamente quanto à magnitude relativa, evolução temporal e

padrão conjunto das séries. Nesse contexto, a expressão “sensibilidade a deslocamentos na escala milimétrica” é mais apropriada do que a atribuição de uma precisão milimétrica absoluta ao estudo de caso.

O carregamento proveniente do tráfego rodoviário constitui uma ação variável relevante para a resposta estrutural da ponte; entretanto, não foi incorporada ao presente estudo uma série de tráfego sincronizada com as aquisições SAR. Além disso, a periodicidade orbital da aquisição InSAR não permite individualizar a resposta transitória decorrente da passagem de veículos, fenômeno que ocorre em escala temporal muito inferior ao intervalo entre imagens sucessivas. Assim, a análise concentrou-se nas tendências de médio e longo prazo das séries interferométricas, enquanto a resposta dinâmica ao tráfego foi avaliada posteriormente por métodos específicos de campo.

A combinação entre magnitude, persistência e evolução diferenciada das séries

TABELA 1

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE REFORÇO ESTRUTURAL

Série	Deslocamento LOS ao final do período	Comportamento observado	Indicador de evolução
Série de maior aproximação	≈ +64 mm	Aproximação persistente	≈ +30 mm/ano no período e ≈ +36 mm/ano no trecho final
Série de afastamento	≈ -58 mm	Afastamento progressivo	tendência persistente
Série de maior afastamento	≈ -61 mm	Afastamento com aceleração no trecho final	≈ -60 mm/ano no trecho final

FONTE: OS AUTORES

motivou a realização de inspeção extraordinária presencial. Essa inspeção, complementada por aerolevantamento com drone, modelagem em elementos finitos e identificação modal operacional, caracterizou a estrutura em condição crítica, com Nota 1 segundo a Norma DNIT 010/2024-PRO, perda de rigidez de até 27,9% na região dos antigos dentes Gerber e acelerações longitudinais elevadas, resultando na recomendação de restrição parcial ao tráfego pesado (veja detalhes no outro artigo dos autores nesta edição). Esses resultados de campo constituem a validação independente de que o sinal interferométrico havia identificado uma região que demandava investigação prioritária. A Norma DNIT 010/2024-PRO associa a condição crítica à necessidade de medidas imediatas, podendo envolver restrição ou interdição do tráfego e instrumentação contínua.

Dessa forma, o estudo de caso evidencia o papel do InSAR como camada complementar de triagem e alerta precoce: o monitoramento orbital permitiu identificar previamente um comportamento cinemático anômalo e direcionar a investigação de campo, enquanto a caracterização da condição estrutural e as decisões de intervenção permaneceram fundamentadas na inspeção e nas avaliações específicas realizadas na OAE.

2.5 Limitações e integração à gestão de ativos

A correta aplicação do InSAR exige reconhecer suas limitações. A medição ocorre

apenas na linha de visada; a recuperação das componentes vertical e horizontal demanda a combinação de órbitas ascendente e descendente. A técnica depende de alvos coerentes, vegetação densa e lâminas d'água reduzem a coerência, e exige a separação da componente térmica cíclica das estruturas esbeltas. OAEs de pequenas dimensões podem oferecer número insuficiente de refletores. Em síntese, o InSAR fornece tendência e alerta, não dispensando inspeção nem instrumentação dedicada.

Incorporado a um fluxo de gestão de ativos baseado em risco, o InSAR gera alertas parametrizados que direcionam inspeções e, quando necessário, a instalação de instrumentação convencional nos pontos críticos, otimizando a alocação de equipes e recursos. Essa articulação entre sensoriamento remoto, inspeção convencional e modelos de priorização alinha-se à transição para uma gestão de ativos rodoviários preditiva e orientada por dados.

Sob o ponto de vista econômico, uma das principais vantagens do monitoramento orbital está associada à sua escalabilidade. Diferentemente da instrumentação permanente convencional, que exige instalação e manutenção de equipamentos em cada estrutura, o InSAR permite o acompanhamento simultâneo de um grande número de ativos a partir de uma infraestrutura integrada de processamento e gestão de dados. No âmbito do DNIT, essa característica possibilita sua aplicação como ferramenta de triagem em uma rede extensa de

OAEs, direcionando inspeções detalhadas e instrumentação específica às estruturas que apresentem comportamento anômalo. Assim, o benefício econômico da técnica está principalmente na racionalização da alocação de recursos de inspeção e monitoramento, e não na substituição dos métodos convencionais.

3. CONCLUSÕES

O InSAR é uma técnica madura e aplicável ao monitoramento de deslocamentos de OAEs em larga escala, com sensibilidade na escala milimétrica e capacidade de análise histórica. Seu maior potencial está na detecção de tendências e de sinais precursores de movimento e na triagem que direciona inspeções. No caso da Ponte sobre o Estreito dos Mosquitos, o monitoramento orbital revelou amplitude diferencial de cerca de 125 mm em 25 meses, com pontos em aceleração que dispararam o alerta e anteciparam a confirmação de condição crítica em campo, em linha com o precedente internacional da Ponte Morandi.

As limitações da técnica, geometria de linha de visada, dependência de coerência e efeitos térmicos e atmosféricos, impõem interpretação criteriosa e impedem que ela substitua a inspeção visual e a instrumentação dedicada. Recomenda-se sua adoção como camada complementar de vigilância e alerta precoce, integrada a uma gestão de ativos baseada em risco, capaz de ampliar a segurança das travessias e a eficiência na aplicação dos recursos públicos. ☺

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BERARDINO, P.; FORNARO, G.; LANARI, R.; SANSOSTI, E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 40, n. 11, p. 2375-2383, 2002.
- [2] CROSETTO, M.; MONSERRAT, O.; CUEVAS-GONZÁLEZ, M.; DEVANTHÉRY, N.; CRIPPA, B. Persistent Scatterer Interferometry: a review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 115, p. 78-89, 2016.
- [3] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Norma DNIT 010/2024-PRO: inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido - procedimento. Brasília: DNIT, 2024.
- [4] FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 39, n. 1, p. 8-20, 2001.
- [5] MILILLO, P.; GIARDINA, G.; PERISSIN, D.; MILILLO, G.; COLETTA, A.; TERRANOVA, C. Pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: the Morandi Bridge, Genoa, Italy. *Remote Sensing*, v. 11, n. 12, art. 1403, 2019.
- [6] NUNES, F. P. S. et al. Inspeção extraordinária e monitoramento dinâmico de obra de arte especial em concreto protendido com dentes Gerber: estudo de caso da Ponte sobre o Estreito dos Mosquitos (BR-135/MA). *Revista CONCRETO & Construções*, no prelo. [artigo que acompanha o presente trabalho].
- [7] SCHLÖGL, M.; WIDHALM, B.; AVIAN, M. Comprehensive time-series analysis of bridge deformation using differential satellite radar interferometry based on Sentinel-1. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 172, p. 132-146, 2021. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.12.001.
- [8] TONELLI, D. et al. Interpretation of Bridge Health Monitoring Data from Satellite InSAR Technology. *Remote Sensing*, v. 15, 5242, 2023. DOI: 10.3390/rs15215242.