

A APLICABILIDADE DA MONITORIZAÇÃO POR SATÉLITE NO CONTEXTO DA GESTÃO DE ATIVOS RODOFERROVIÁRIOS

João Amado¹, João Morgado¹, Eduardo Godinho², Pedro Resende²

¹Infraestruturas de Portugal, Direção de *Asset Management*, Campus do Pragal, Praça da Portagem, 2809-013 Almada, Portugal

email: joao.amado@infraestruturasdeportugal.pt www.infraestruturasdeportugal.pt

²OUR WATCHLEADS - OWL, LDA. Rua Pedro Nunes Incubadora IPN Edifício C 3030-199, Coimbra, Portugal

Email: info@ourwatchleads.com www.ourwatchleads.com

Sumário

A Agência Espacial Europeia, no âmbito do programa Copernicus, tem em órbita duas constelações de satélites (Sentinel 1 e 2) que diariamente recolhem imagens da superfície terrestre. Várias técnicas têm vindo a ser estudadas para a utilização destes dados, existindo já alguma maturidade na sua utilização para a monitorização de subsidências e de deslocamentos, por aplicação de interferometria por radar de abertura sintética (InSAR). A presente comunicação explora o contributo desta técnica na gestão de ativos rodoferroviários. Para o efeito são apresentados resultados preliminares da sua aplicação em dois grupos distintos de ativos sob gestão da Infraestruturas de Portugal, identificando oportunidades e limitações.

Palavras-chave: InSAR, interferometria, radar, monitorização remota, pontes, obras de contenção

1 INTRODUÇÃO

A Agência Espacial Europeia, no âmbito do programa Copernicus, tem em órbita duas constelações de satélites (Sentinel 1 e Sentinel 2) que diariamente recolhem imagens da superfície terrestre, disponibilizando novas camadas de dados com uma frequência que tem vindo a aumentar ao longo dos anos. A disponibilização dos dados recolhidos é de livre acesso e sem custos de aquisição para o utilizador. Várias técnicas têm vindo a ser estudadas para a utilização destes dados, existindo já uma ampla validação no cálculo e monitorização de deslocamentos, por aplicação de técnicas multitemporais de interferometria SAR (*Synthetic Aperture Radar*). Dada a possibilidade de utilização de dados históricos torna-se possível analisar a evolução de determinadas áreas, ou pontos, ao longo de vários anos, o que permite correlacionar esta informação com o comportamento de ativos físicos, nomeadamente das infraestruturas de transporte.

A deteção de comportamentos anómalos, nomeadamente tendências de evolução estabelecidas, poderá ser de inestimável valor na deteção precoce de eventos extremos, auxiliando à adaptação dos planos de acompanhamento e diagnóstico dos ativos, no sentido de averiguar e mitigar riscos que venham a ser identificados.

Várias empresas, em Portugal e no estrangeiro, têm vindo, de forma crescente, a disponibilizar serviços de monitorização de estruturas com base em dados recolhidos por satélites, suportados em estudos e demonstrações anteriormente publicados no meio académico. A existência deste tipo de soluções, fundamentadas por sólidos conhecimentos científicos, evidenciam uma maturidade que justifica uma análise detalhada das suas potencialidades.

Especificamente, enquadram-se seguidamente os desenvolvimentos naquilo que pode ser o seu contributo para a gestão de ativos rodoferroviários, nomeadamente a utilização proativa de análises quantitativas de deslocamentos. São também apresentados os resultados preliminares da sua aplicação em dois grupos de ativos sob gestão da Infraestruturas de Portugal, nomeadamente obras geotécnicas e obras de arte, identificando oportunidades e limitações. Estes resultados poderão constituir um importante contributo ao desenvolvimento de capacidades

preditivas, permitindo a otimização da programação de ações inspetivas e de diagnóstico, com mais-valias imediatas e de longo-prazo no que respeita a recursos e tempo de resposta a situações extremas.

2 UTILIZAÇÃO DE SATÉLITES NO CONTEXTO DA GESTÃO DE ATIVOS

A utilização de sensores SAR instalados em satélites para monitorização remota de movimentos na crosta terrestre tem vindo a ser alvo de estudo e de divulgação científica há mais de duas décadas, conforme revisão bibliográfica citada em [1] e [2]. A análise de dados em retrospectiva de zonas acidentadas tem demonstrado a aplicabilidade da técnica de interferometria SAR (adiante InSAR) na deteção precoce de movimentos, tendo especial interesse no acompanhamento de tendências de evolução ao longo de séries temporais de vários anos, que possam ser dissociadas de efeitos cíclicos, relacionados com aspetos de sazonalidade e respetivos efeitos no comportamento das estruturas e dos materiais [3].

2.1 Interferometria SAR (InSAR)

A interferometria SAR é uma técnica geodética que calcula franjas de interferência criadas pela diferença na fase do sinal de duas ou mais imagens de satélite diferentes, inicialmente usada para extrair a topografia da superfície terrestre. Com a diminuição do tempo de revisita dos satélites que captam imagens radar, foi possível desenvolver técnicas aprimoradas para monitorizar os movimentos da crosta terrestre, nomeadamente o StaMPS [4] (Stanford Method for Persistent Scatterers), e que é usado nos casos de estudo do presente artigo para extrair dados de deslocamentos. O StaMPS consiste numa combinação de algoritmos que permite analisar dezenas de imagens radar para uma determinada localização e extrair pontos estáveis no que respeita ao seu comportamento refletor (Persistent Scatterers). Nestes, são avaliadas as diferenças de fase da reflexão das ondas eletromagnéticas, permitindo o cálculo de deslocamentos, assim como a própria velocidade à qual ocorrem, e que está diretamente relacionada com a tendência de movimento em cada ponto registado. Assim, esta técnica permite dispensar a utilização de alvos fixos ou pré-estabelecidos, ainda que a sua utilização complementar possa incrementar a precisão. Para que se obtenham resultados satisfatórios é necessário que a órbita, o mosaico de imagem satélite capturado (que tem cerca de 20.000,00km² de área total), e o satélite que executou a captura, se mantenham constantes de modo a ser possível correlacionar todas as imagens introduzindo o menor erro possível.

O par de satélites Sentinel-1, uma das constelações que suporta este tipo de técnicas, permite a aquisição de imagens radar a cada 5 dias, independentemente das condições climáticas, proporcionando cerca de 30 imagens por ano por cada satélite (Sentinel-1A e Sentinel-1B), com uma resolução de 5 metros.

2.2 Utilização de InSAR em obras de arte e em obras geotécnicas

O acompanhamento da condição e desempenho das obras de arte e de obras geotécnicas tem por base observações periódicas, maioritariamente visuais, complementadas, sempre que necessário, por monitorização *in situ* e instrumentação.

O uso de InSAR para complementar este tipo de acompanhamento tem vindo a ganhar relevância pelo facto de conseguir cobrir áreas muito vastas com apenas um mosaico de imagem satélite, permitindo capturar várias localizações de uma só vez. A outra grande vantagem desta tecnologia prende-se com o facto de as imagens capturadas no passado estarem disponíveis, constituindo um grande arquivo que pode ser utilizado para compreender o comportamento passado das estruturas, materiais e das deformações do solo. Com esta possibilidade de análise a dados de vários anos, é possível implementar sistemas com avisos precoces de comportamentos de risco, para os casos em que o grau e a velocidade das deformações sejam assinaláveis e não naturais das estruturas e materiais em análise. Com a análise de dados históricos é também possível implementar algoritmos preditivos que permitem estimar o seu comportamento futuro, cuja exatidão e precisão dependerá da dimensão da amostragem no que respeita a datas de observação e imagens analisadas.

3 CASOS DE ESTUDO DA INFRAESTRUTURAS DE PORTUGAL

No estudo que suportou a presente comunicação foram selecionadas duas localizações, correspondendo à área de implantação de uma obra de arte e de uma obra de contenção, para as quais foram combinadas 30 imagens radar de Sentinel-1A para o ano de 2021, numa órbita descendente, de modo a obter os valores de deslocamento em cada data de aquisição, bem como a velocidade anual de deslocamento de cada ponto observado. Os valores obtidos são

medidos na direção de vista do satélite (em inglês *Line of Sight - LOS*) mas podem ainda ser decompostos em movimentos verticais e horizontais quando combinados com outra análise de órbita oposta [5]. Como a localização da obra de arte e da obra geotécnica em estudo se encontram próximas do centro do mosaico de imagem satélite usado para a presente análise, os movimentos horizontais terão uma contribuição muito inferior, sendo que para a presente análise consideram-se os movimentos na direção de LOS como tendo uma componente vertical predominante.

3.1 OBRAS GEOTÉCNICAS

Para o caso de estudo relativo a obras geotécnicas foi selecionada uma encosta adjacente ao IP3, entre os quilómetros km 61+700 e 62+000. Trata-se de uma encosta originalmente intervencionada com muros de gabiões, que por via de comportamentos indesejáveis, foram posteriormente substituídos, em alguns troços, por paredes ancoradas.

O estudo efetuado centra-se na análise dos movimentos, ao longo de um ano de observação, de um conjunto de pontos situados quer na zona originalmente construída em gabiões, quer nas intervenções posteriores de construção de paredes ancoradas, conforme ilustrados na Figura 1.



Fig.1. Deslocamentos na encosta adjacente ao IP3

A velocidade de deformação estimada por InSAR em 2021 situa-se no intervalo entre -10mm e -3mm por ano, o que para o período temporal da análise (um ano) não representa, por si só, um comportamento anómalo. As medições registadas em cada data não são consideradas, para a área em causa, representativas de níveis de alerta ou de alarme, podendo ser enquadráveis em variações devidas a uma conjugação de fatores tais como diferenças de temperatura, níveis freáticos, pequenos ravinamentos, existência de materiais freáveis, ou mesmo atribuíveis ao erro inerente à técnica de medição. Como exemplo, apresenta-se na Figura 2 o conjunto de medições efetuado no ponto de coordenadas [-8.27487; 40.277], com uma velocidade linear de deformação estimada de -8,29 mm/ano. Ainda que com velocidades de deslocamento anuais distintos, importa assinalar que os pontos na zona

envolvente apresentam comportamento semelhante ao longo do horizonte temporal analisado, o que revela sensibilidade da análise face a fenómenos locais.

Ainda que dentro da gama de valores expectáveis poderá assinalar-se que os pontos onde foi registada a maior velocidade anual de deslocamento se localizam no tardoz das estruturas construídas, maioritariamente em áreas que correspondem ao talude natural.

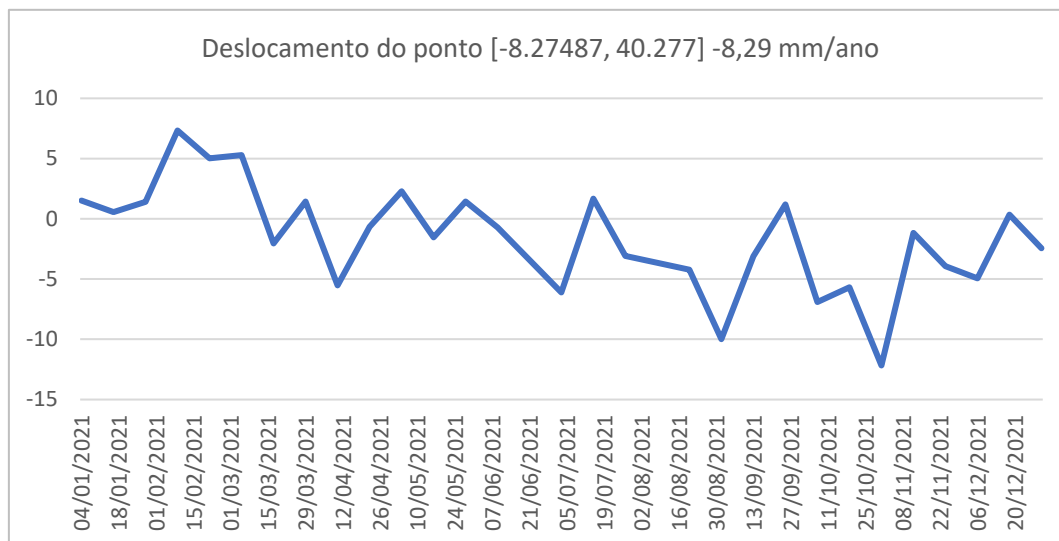


Fig.2. Gráfico de deslocamentos do ponto com velocidade anual de -8,29mm por ano em 2021

Assinala-se ainda o conjunto de pontos mais a Sul, representados na Figura 1, onde se observa uma maior proximidade entre pontos e simultaneamente uma maior proximidade à via. Esta área correspondente a uma das zonas onde se mantém a solução original de contenção em muro de gabiões, combinada com solução de proteção com rede pregada. A necessidade da rede de proteção prende-se com a forte inclinação do talude, sem revestimento natural, constituído por materiais cuja coesão potencia fenómenos de erosão superficial e de pequenos ravinamentos, que por si só poderão estar na origem das variações altimétricas registadas. Em geral, os resultados obtidos revelam um comportamento em linha com o expectável, quer para as estruturas mais recentemente contruídas, com soluções de paredes ancoradas, quer para as estruturas originais em paredes de gabiões. A comparação da informação recolhida com dados de monitorização *in-situ* constitui uma oportunidade de aprofundamento do estudo e de validação da técnica em apreço. A procura de uma complementaridade entre técnicas, com vista à otimização de recursos, beneficiará da possibilidade de maior frequência de medições por via remota, bem como da relativa facilidade de abrangência de uma área extensa e heterogênea como a apresentada neste caso de estudo.

3.2 OBRAS DE ARTE

No que respeita a obras de arte foi seleccionada a Ponte do Tejo, ao quilómetro 2+930 da linha da Beira Baixa, esquematizada na Figura 3. Trata-se de uma obra de arte ferroviária, constituída por treliça metálica assente em pilares-parede de alvenaria, com sete tramos centrais em estrutura de pórtico de rótula múltipla com tabuleiro inferior, e dois tramos de margem em vão simplesmente apoiado em cruz de Santo André, igualmente com tabuleiro inferior. Todos os aparelhos de apoio do tabuleiro da ponte são móveis, à exceção dos localizados sobre o pilar P3, onde o apoio é materializado em aparelhos de apoio fixos rotulados [6].

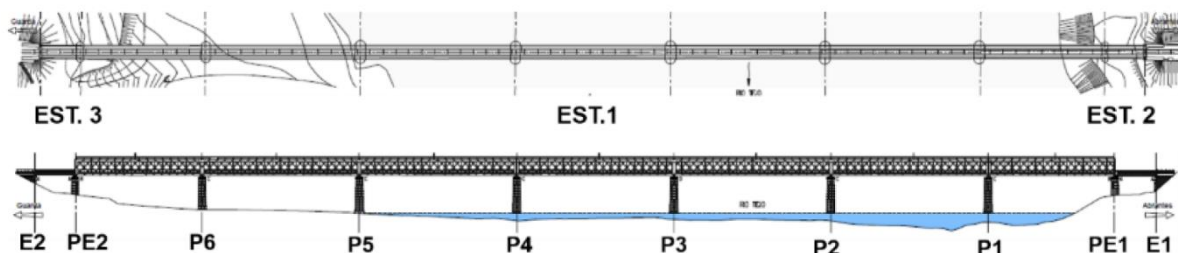


Fig. 3 - Esquema estrutural da Ponte do Tejo na Linha da Beira Baixa

A análise às imagens de satélite recolhidas durante o ano de 2021 revela uma velocidade de deformação estimada por InSAR que varia entre os -10 mm e os -5 mm por ano, e os 5 e 10 mm positivos por ano, conforme ilustrado na Figura 4. Esta imagem revela ainda uma variação coerente ao longo do alinhamento do tabuleiro da ponte, com a maioria dos pontos de valor positivo localizados na metade Sul do tabuleiro, e os pontos de valor negativo localizados maioritariamente na metade Norte, sendo que, em ambos os conjuntos, a amplitude dos valores cresce com a proximidade aos encontros. O ponto de inflexão entre os valores positivos e negativos registados na imagem situa-se nas imediações do único aparelho de apoio fixo do tabuleiro da ponte, no pilar P3.



Fig.4. Deslocamentos na ponte ferroviária do Tejo da linha da Beira Baixa

Sartorelli et. al. [3], em estudo relativo à aplicação de InSAR na monitorização remota de pontes em meio urbano, salienta a existência de fortes correlações entre as séries de deslocamentos medidos e as temperaturas observadas nas várias pontes monitorizadas, revelando que os deslocamentos medidos em pontes poderão ser maioritariamente devidos a variações de temperatura. A gama de valores registados no caso estudo em análise, bem como a sua distribuição ao longo do tabuleiro da ponte, é correlacionável com as características estruturais dos apoios, permitindo o seu enquadramento na hipótese avançada. Com efeito, as variações observadas em cada ponto são passíveis de ter como origem as variações térmicas e consequentes efeitos nos materiais estruturais. Como exemplo, ilustra-se na Figura 5 o conjunto de medições efetuadas no ponto de coordenadas [-8.185863, 39.45228],

com uma velocidade de variação altimétrica estimada por InSAR de +4,42 mm/ano, e cuja correlação com a temperatura constitui uma oportunidade de desenvolvimento futuro do presente estudo.



Fig.5. Gráfico de deslocamentos do ponto com velocidade anual de +4,42mm por ano em 2021

Tal como no exemplo descrito na secção anterior, também neste caso de estudo se observa uma coerência entre pontos próximos, apresentando comportamentos semelhantes ao longo do horizonte temporal analisado. Esta mesma constatação é evidenciada no gráfico da Figura 6, onde se analisam os deslocamentos observados em quatro pontos distintos. Neste gráfico, o deslocamento do ponto anteriormente analisado, com coordenadas [-8.185863, 39.45228], segue um padrão idêntico a dois outros pontos situados na sua proximidade, com coordenadas [-8.186018, 39.45217] e [-8.185947, 39.45203], respetivamente. Por oposição, e à medida que a distância entre pontos aumenta, observa-se que o padrão de deslocamento perde coerência, conforme é explícito no mesmo gráfico, na série relativa ao ponto com coordenadas [-8.187347, 39.45412]. Para referência geográfica dos pontos referidos nesta análise comparativa, estes encontram-se assinalados na Figura 4.

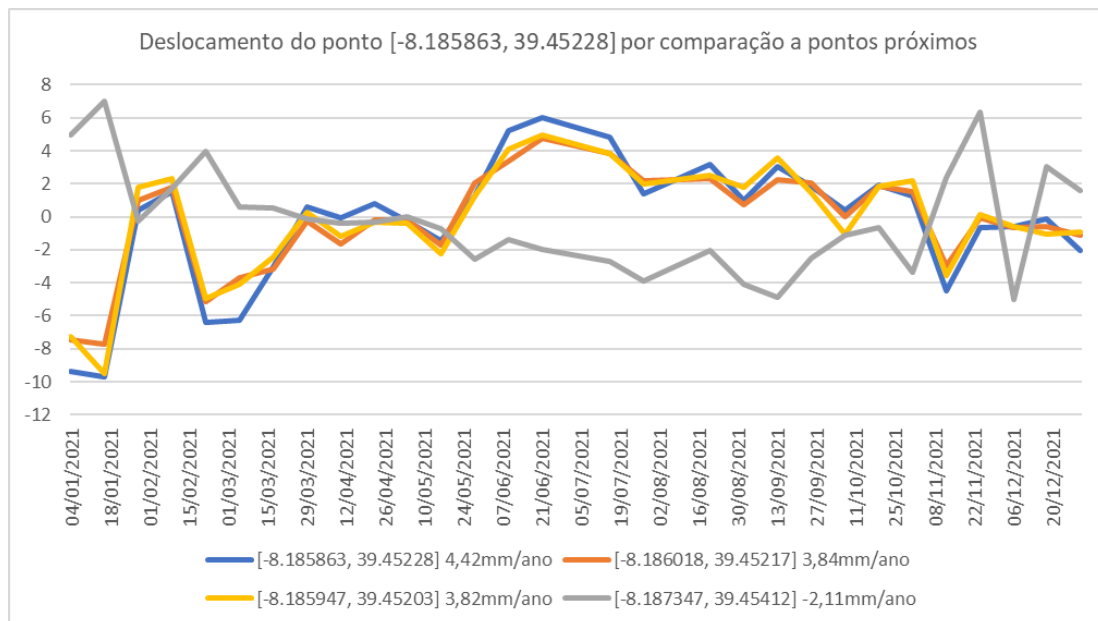


Fig.6. Gráfico comparativo de deslocamentos de quatro pontos distintos

A ponte do Tejo na linha da Beira Baixa tem vindo a ser acompanhada ao longo da sua vida de serviço através de inspeções visuais periódicas, quer à parte emersa da estrutura, quer à parte submersa através de mergulho, bem como com métodos clássicos de monitorização, nomeadamente nivelamentos geométricos e batimetrias. São conhecidas anomalias associadas à durabilidade dos materiais constituintes dos pilares e encontros, sem influência significativa no comportamento estrutural da ponte. Os dados agora obtidos, baseados em monitorização remota por satélite, estão em linha com o diagnóstico que tem vindo a ser feito à estrutura, não evidenciando situações que justifiquem alterações ao planeamento das ações de acompanhamento e manutenção previstas.

A existência de dados de batimetrias e de nivelamentos geométricos do tabuleiro constitui uma oportunidade de desenvolvimento deste estudo, com vista à validação não apenas da técnica em apreço, mas também do tipo de dados de que se fez uso. Especificamente para obras de arte, a resolução das imagens utilizadas tem influência na atribuição do ponto à estrutura da ponte ou ao terreno envolvente, o que apesar de não ter influência na precisão da medição é determinante na interpretação dos resultados. Com efeito, para uma inequívoca localização dos pontos observados no tabuleiro da ponte seria necessário incrementar o detalhe da análise através da correlação com imagens satélite de espectro visível, ou através da diminuição do tamanho do pixel por via da utilização de constelações de satélite com maior resolução.

4 DISCUSSÃO

A aplicação de técnicas multitemporais de interferometria SAR permitiu a medição de deslocamentos, e respetiva velocidade de evolução ao longo de um ano, em pontos localizados em encosta adjacente à IP3 entre os quilómetros km 61+700 e 62+000, e na área de implantação de ponte ferroviária sobre o rio Tejo ao quilómetro 2+930 da linha da Beira Baixa.

Os valores registados podem ser enquadráveis em condições normais de funcionamento das estruturas, não revelando igualmente sinais de alerta nas suas imediações que justifiquem alterações dos processos em curso de acompanhamento e manutenção. Em termos de tendências instaladas registaram-se valores de -7 a -10 mm por ano no caso da encosta; já no caso da ponte a gama de valores é superior, variando de -5 a -10 mm por ano e de 5 a 10 mm positivos, por ano.

A discussão acerca da interpretação de resultados é extensa na bibliografia consultada, devendo desde logo considerar a precisão de cada medição individual, de cerca de 5 mm [1]. A procura de tendências instaladas, reveladoras de comportamentos estruturais anómalos, carecerá da utilização de séries temporais mais longas, com dados de vários anos, conforme evidenciado em [3], de forma a dissipar o efeito de oscilações sazonais ou outros fenómenos de carácter periódico que possam ocorrer nas estruturas e mesmo no terreno natural. Para a gama de valores obtidos em ambos os casos de estudo, e pelo facto de se considerarem enquadráveis no funcionamento espectável, só a análise de séries temporais mais longas poderia revelar situações de carácter anómalo, o que constitui não só uma clara oportunidade de aprofundamento deste estudo, mas também um conceito passível de nortear uma futura integração destes métodos nos atuais processos de gestão de ativos.

De igual forma, a validação da técnica beneficiaria da correlação com outras séries de dados, nomeadamente a temperatura, mas também com medições provenientes de métodos geodésicos [2]. Como já anteriormente referido a correlação entre os deslocamentos medidos pela técnica InSAR em pontes e a temperatura observada está evidenciada na bibliografia, sendo igualmente referido, para as pontes ferroviárias, a existência de tendências instaladas de valores negativos atribuíveis ao assentamento e migração lateral do balastro [1]. Dado que a resolução das imagens utilizadas no presente estudo não permite uma localização inequívoca dos pontos observados, constitui igualmente uma oportunidade de melhoria a utilização imagens com maior resolução, ou o cruzamento com imagens satélite de espectro visível, o que permitiria, no caso da ponte ferroviária, dissipar a hipótese de eventual localização de pontos no próprio leito da linha de água. Com efeito, as imagens utilizadas no presente estudo têm uma resolução de 10 metros por pixel, sendo possível incrementar a resolução da análise para uma resolução espacial na ordem de um metro (1 m/pixel) recorrendo a dados SAR de constelações de satélites como a TerraSAR-X da empresa DLR, entre outras, com o intuito de localizar com maior precisão as deformações detetadas. Contudo, considera-se a técnica e a resolução dos dados utilizados como soluções passíveis de enquadramento nos processos de gestão de ativos, com objetivos específicos alinhados com as precisões alcançáveis, e atendendo à existência em regime *open-source* de arquivos históricos de dados recolhidos pela constelação Sentinel-1 da Agência Espacial Europeia, podendo ser complementados com a aquisição de dados de

muito alta resolução, com custos mais elevados, apenas para os ativos cujo comportamento ou criticidade assim o justifique.

Finalmente, importa salientar que a utilização de dados recolhidos por satélites de observação terrestre tem uma aplicabilidade que vai para além da monitorização e gestão dos grupos de ativos rodoferroviários aqui analisados, nomeadamente ao nível dos pavimentos e via-férrea, entre outros. Estes dados podem também ser utilizados para a criação de cartografia SIG, com identificação de áreas aluvionares, de aterros pouco consolidados, de antigos acidentes geológicos, entre outras especificidades. Permitem ainda o zonamento de áreas de risco, relativo a cheias ou incêndios, auxiliando à localização de construções estratégicas, desde a sua génese e em fase de levantamento e conceção dos projetos, dotando projetistas e decisores de ferramentas relevantes no processo de tomada de decisão. Em suma, a tecnologia de recolha de dados via satélite veio permitir a observação remota de áreas extensas, de vários quilómetros quadrados, em simultâneo e com uma velocidade de obtenção de dados que pode ser vantajosa comparativamente com as alternativas clássicas baseadas em recolhas no terreno.

5 AGRADECIMENTOS

A Infraestruturas de Portugal agradece à Our Watch Leads - OWL, Lda. a disponibilização dos seus conhecimentos e recursos para aplicação da técnica de interferometria SAR multitemporal às imagens fornecidas pela Agência Espacial Europeia.

6 REFERÊNCIAS

1. Sartorelli, L., Previtali, M., Giordano, P., Limongelli, M., & Ballio, F. (2021). Use of Sar Satellite Data in Bridge Monitoring with Application to Urban Areas. *Civil Structural Health Monitoring, Lecture Notes in Civil Engineering*, 156. doi:10.1007/978-3-030-74258-4_60
2. Roque, D., Peressin, D., Falcão, A., Henriques, M., & Fonseca, A. (2015). Monitorização de estruturas com interferometria SAR. Atas da VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia. Amadora: Ordem dos Engenheiros.
3. Sousa, J., & Bastos, L. (2013). Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(3), 659-667. doi:10.5194/nhess-13-659-2013
4. Hooper, A. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16). doi:10.1029/2008GL034654
5. Jung, J., Kim, D.-j., Vadivel, S., & Yun, S.-H. (2019). Long-Term Deflection Monitoring for Bridges Using X and C-Band Time-Series SAR Interferometry. *Remote Sensing*, 11(1258). doi:10.3390/rs11111258
6. Infraestruturas de Portugal S.A. (2018). Relatório de Inspeção Principal Global, Linha da Beira Baixa, Ponte do Tejo, Pk 2.930. Almada: Infraestruturas de Portugal S.A. (Não Publicado).