



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

**INFRASAR – INTERFEROMETRIA SAR COM DIFUSORES
PERMANENTES (PSINSAR) APLICADA À DETEÇÃO
DE DESLOCAMENTOS EM GEODINÂMICA
E INFRAESTRUTURAS**

Relatório de avaliação final do projeto P2I/LNEC 2013-2020



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

INFRASAR – INTERFEROMETRIA SAR COM DIFUSORES PERMANENTES (PSINSAR) APLICADA À DETEÇÃO DE DESLOCAMENTOS EM GEODINÂMICA E INFRAESTRUTURAS

Relatório de avaliação final do projeto P2I/LNEC 2013-2020

Lisboa • dezembro 2023

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 401/2023 – DBB/NGA

Título

INFRASAR – INTERFEROMETRIA SAR COM DIFUSORES PERMANENTES (PSINSAR) APLICADA À DETEÇÃO DE DESLOCAMENTOS EM GEODINÂMICA E INFRAESTRUTURAS

Relatório de avaliação final do projeto P2I/LNEC 2013-2020

Autoria

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

Ana Fonseca

Investigadora Principal do LNEC (Aposentada)

Dora Roque

Investigadora Auxiliar, Núcleo de Geodesia Aplicada

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 401/2023

Proc. 0404/1102/19717

INFRASAR – INTERFEROMETRIA SAR COM DIFUSORES PERMANENTES (PSINSAR) APLICADA À DETEÇÃO DE DESLOCAMENTOS EM GEODINÂMICA E INFRAESTRUTURAS

Relatório de avaliação final do projeto P2I/LNEC 2013-2020

Resumo

Neste relatório apresenta-se, de forma sucinta, a descrição da atividade de investigação realizada no âmbito do projeto INFRASAR no período 2014-2023. Os resultados da atividade são analisados e avaliados, em face dos objetivos inicialmente previstos.

Palavras-chave: INFRASAR / Interferometria SAR / PSInSAR / Difusores permanentes / Detecção de deslocamentos

INFRASAR – SAR INTERFEROMETRY WITH PERMANENT SCATTERERS (PSINSAR) APPLIED TO THE DETECTION OF DISPLACEMENTS IN GEODYNAMICS AND INFRASTRUCTURES

Final evaluation report of the P2I/LNEC project 2013-2020

Abstract

A concise description is presented of the research activities undertaken in the INFRASAR project during 2014-2023. The results are analyzed and assessed, considering the initial goals of the project.

Keywords: INFRASAR / SAR Interferometry / PSInSAR / Permanent scatterers / Displacements monitoring

Índice

1	Introdução	1
2	Atividade desenvolvida.....	3
2.1	Descrição da atividade desenvolvida.....	3
2.2	Aplicações a estudos por contrato.....	7
2.3	Apreciação da atividade desenvolvida.....	7
3	Divulgação de resultados	8
3.1	Tese de doutoramento.....	8
3.2	Publicações em revistas internacionais.....	8
3.3	Comunicações a congressos.....	8
3.4	Relatórios do LNEC	10
3.5	Eventos de divulgação científica.....	10
4	Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento	12
4.1	Indicadores de desempenho.....	12
4.2	Recursos humanos mobilizados	12
4.3	Financiamento.....	13
5	Considerações finais	15
	Referências bibliográficas	17
	ANEXOS.....	19
	ANEXO I Ficha inicial do projeto INFRASAR.....	21
	ANEXO II Plano de trabalhos do projeto INFRASAR após proposta em 2018 de revisão e extensão	35

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Atividades realizadas (2018-2023).....	3
Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho	12
Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos do LNEC	13

1 | Introdução

O projeto de investigação INFRASAR (Interferometria SAR com difusores permanentes (PSInSAR) aplicada à deteção de deslocamentos em geodinâmica e infraestruturas) teve início em 29 de dezembro de 2014 com uma duração prevista de 48 meses (Anexo I). Foi objeto de um relatório de progresso intercalar (LNEC; 2018) que propôs a reformulação do plano de atividades e a sua extensão (Anexo II), tendo sido fechado no final de 2023. Foi integrado no plano de inovação e investigação (P2I) do LNEC, com enquadramento na matriz programática da estratégia de investigação e inovação 2013-2020 (E2I), inserindo-se no eixo E4 (risco e segurança) e na temática T2 (novas tecnologias).

O projeto inseriu-se na missão do LNEC e do Departamento de Barragens de Betão (DBB), na componente de acompanhamento do comportamento de obras de engenharia, e nas atribuições do Núcleo de Geodesia Aplicada (NGA), no desenvolvimento de métodos da geodesia para a determinação de deslocamentos em infraestruturas. Foi também ao encontro da política espacial europeia que promove a apropriação, pelas instituições dos países membros, para a execução das suas atividades, da informação adquirida pelos satélites de observação da Terra da Agência Espacial Europeia (*European Space Agency – ESA*), no âmbito do Programa Copernicus (<http://www.copernicus.eu/>).

O projeto propôs a utilização da interferometria RADAR, com imagens adquiridas por sensores de radar de abertura sintética (*synthetic aperture radar – SAR*), para complementar os sistemas de observação de estruturas e respetivas envolventes. A segurança estrutural é avaliada, usualmente, com a contribuição de deslocamentos obtidos por equipamentos embebidos na estrutura e por métodos geodésicos (taqueometria, nivelamento, sistemas de navegação global por satélite), num número reduzido de pontos e com uma frequência temporal baixa. Com este projeto pretendeu-se complementar estas observações com deslocamentos, também de elevada precisão, obtidos em novos pontos que são refletores do sinal do satélite. A observação tem como base a informação que fica registada em imagens adquiridas na banda das micro-ondas do espectro eletromagnético pelos sensores SAR, o que permite aumentar a densidade de pontos objeto da rede de observação e a frequência da monitorização, estabelecendo-se uma boa relação custo – benefício. O estudo pode ser estendido à envolvente das estruturas, onde raramente existem observações efetuadas pelos métodos acima referidos. Pretendeu-se ainda avaliar as contribuições que o aumento da densidade espaciotemporal de pontos da rede de observação poderá dar ao controlo de segurança de estruturas.

A equipa de investigação do LNEC foi formada inicialmente pela IP Ana Maria Fonseca (investigadora responsável) e pela BIIC Dora Roque (atualmente IA), do NGA do DBB, e duas investigadoras do IST, Ana Paula Falcão e Sandra Heleno. Em fevereiro de 2016, por solicitação do Conselho Diretivo (CD) do LNEC, foi produzido um relatório de progresso do projeto, informal e sintético, que foi submetido ao CD pela informação nº 86, de 29 de fevereiro de 2016, na qual se propunha a continuação do projeto com pequenas alterações. A informação foi despachada favoravelmente, em março de 2016, e o projeto reformulado, nomeadamente integrando na equipa o Professor Daniele Perissin, da Universidade de

Purdue, EUA, e o IA Paulo Morais do CIC, no seguimento de efetiva colaboração no projeto, entretanto iniciada. Em 2018 foi proposta a integração na equipa da IP Maria João Henriques e do IA José Nuno Lima do NGA e do BIIC João Morais do CIC. Após a aposentação da IP Ana Maria Fonseca, em março de 2022, a IA Dora Roque passou a ser a investigadora responsável pelo projeto.

O projeto utilizou recursos do LabImagem do NGA, no que diz respeito a computadores e *software* comercial (SARPROZ®, Pinnacle®, MATLAB®), *open source* (R, SNAP-ESA, QGIS, MintPy), e recursos disponíveis na rede do LNEC, como o *software* ArcGIS®.

Apresenta-se neste relatório a atividade realizada nos nove anos de duração do projeto.

2 | Atividade desenvolvida

2.1 Descrição da atividade desenvolvida

No Quadro 2.1 apresenta-se a atividade desenvolvida de 2018 a 2023, assinalando o estado de desenvolvimento temporal das tarefas.

Quadro 2.1 – Atividades realizadas (2018-2023)

			2018	2019	2020	2021	2022	2023
	Designação da Atividade	Tare	Designação da Tarefa					
Atividade 1	Processamento e modelação da incerteza dos deslocamentos obtidos na infraestrutura de refletores instalados no campus do LNEC	T1.1	<i>Processamento de imagens SAR</i>					
		T1.2	<i>Processamento dos dados da monitorização in-situ: nivelamento geométrico e GNSS</i>					
		T1.3	<i>Validação: comparação de deslocamentos obtidos pelas várias técnicas</i>					
Atividade 2	Caso de estudo 1: Barragens de betão e aterro e respetivas encostas	T2.1	<i>Processamento de pilhas de imagens SAR para geração de interferogramas</i>					
		T2.2	<i>Processamento de pilhas de interferogramas para identificação de difusores permanentes (LDP)</i>					
		T2.3	<i>Determinação de deslocamento ao longo da linha de vista do satélite e sua velocidade nos LDP.</i>					
		T2.4	<i>Combinação de passagens ascendentes e descendentes do satélite para determinação de deslocamentos 3D</i>					
		T2.5	<i>Validação - Cruzamento com dados in-situ</i>					
Atividade 3	Caso de Estudo 2 - Lisboa: Baixa de Lisboa e CREL	T3.1	<i>Processamento de pilhas de imagens SAR para geração de interferogramas</i>					
		T3.2	<i>Processamento de pilhas de interferogramas para identificação de difusores permanentes (LDP)</i>					
		T3.3	<i>Determinação de deslocamento ao longo da linha de vista do satélite e sua velocidade nos LDP.</i>					
		T3.4	<i>Validação - Cruzamento com dados in-situ</i>					
Atividade 4	Caso de Estudo 3 - Monitorização do Pavilhão Altiice Arena	T4.1	<i>Processamento de pilhas de imagens SAR para geração de interferogramas</i>					
		T4.2	<i>Processamento de pilhas de interferogramas para identificação de difusores permanentes (LDP)</i>					
		T4.3	<i>Determinação de deslocamento ao longo da linha de vista do satélite e sua velocidade nos LDP.</i>					
		T4.4	<i>Validação - Cruzamento com dados in-situ</i>					
Atividade 5	Caso de Estudo 4 - Geodinâmica do lago Urema na Gorongosa (Moçambique) e vulcão do Fogo (Cabo Verde)	T5.1	<i>Processamento de pilhas de imagens SAR para geração de interferogramas</i>					
		T5.2	<i>Processamento de pilhas de interferogramas para identificação de difusores permanentes (LDP)</i>					
		T5.3	<i>Determinação de deslocamento ao longo da linha de vista do satélite e sua velocidade nos LDP.</i>					
		T5.4	<i>Validação - Cruzamento com dados in-situ</i>					
Elaboração da tese de doutoramento								

A atividade desenvolvida teve por objetivo avaliar a tecnologia PSInSAR para monitorização de infraestruturas, em vários casos de estudo, e detetar os aspetos que necessitam de I&D, de modo a permitir a integração desta informação em sistemas de monitorização geodésica. Neste âmbito foi concluída a formação da BIIC Dora Roque do NGA, que deu origem a um plano de tese, aprovado pelo

Conselho Científico do LNEC em 2016 (LNEC; 2016), a sua passagem a BD e a conclusão dos estudos conducentes a uma tese de doutoramento no IST, sob orientação da Professora Ana Paula Falcão, que integra a equipa do projeto. A tese foi submetida ao IST e concluída com sucesso em dezembro de 2020 (Roque; 2020).

As tarefas iniciais do projeto, anteriores à sua reformulação em 2018, foram apresentadas detalhadamente em LNEC (2018). Descreve-se, de seguida, sumariamente, a atividade realizada nas tarefas propostas na reformulação.

Atividade 1 – Processamento e modelação da incerteza dos deslocamentos obtidos na infraestrutura de refletores instalados no *campus* do LNEC

Entre outubro de 2017 e fevereiro de 2020 esteve instalada, no *campus* do LNEC, uma infraestrutura de refletores artificiais para os satélites Sentinel-1A/B do programa Copernicus. Foi composta por um refletor de um modelo inovador projetado e construído no LNEC, no âmbito do projeto, e por dois refletores de modelo tradicional cedidos pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Foram realizados vários ensaios, durante os quais os refletores foram deslocados ao longo de direções predefinidas e os seus deslocamentos foram monitorizados através de PSInSAR, com recurso ao *software* SARPROZ®, disponível no LabImagem entre 2014 e 2021, e ao *software open source* MintPy (tarefa T1.1).

Os deslocamentos dos refletores foram também monitorizados a partir de métodos geodésicos *in situ* (tarefa T1.2). Os deslocamentos verticais dos refletores foram determinados quinzenalmente através de operações de nivelamento geométrico. O refletor do LNEC estava equipado com uma antena do sistema de navegação global por satélite (*global navigation satellite system* – GNSS) em permanência, o que permitiu obter os seus deslocamentos tridimensionais diariamente. Os deslocamentos GNSS foram processados com o *software* Pinnacle®.

A validação dos deslocamentos PSInSAR e a determinação da respetiva incerteza foram efetuadas através da comparação destes deslocamentos com os obtidos pelos métodos geodésicos considerados de referência (tarefa T1.3).

No âmbito desta atividade foi acolhido no NGA, entre abril e julho de 2023, o aluno de doutoramento Alex Alonso-Díaz, da Universidade de Vigo, cujo trabalho teve como objetivo a calibração de deslocamentos obtidos por diferentes algoritmos de interferometria SAR (InSAR) com recurso aos dados recolhidos no refletor do LNEC. Refere-se, ainda, uma solicitação, em outubro de 2023, da Professora Ana Paula Falcão, no âmbito de uma tese de doutoramento em curso no IST, para a realização de um ensaio para simulação no refletor do LNEC de padrões de deslocamentos típicos de deslizamentos de terras.

O estudo de validação e análise de incertezas dos deslocamentos InSAR foi apresentado no *Living Planet Symposium 2019*, em Milão, Itália (Roque *et al.*; 2019a) e como comunicação oral por convite no *Colloque G2 2019 Géodésie & Géophysique*, em Le Mans, França (Roque *et al.*; 2019b). Uma análise comparativa entre diferentes algoritmos de processamento InSAR, com base em dados recolhidos no refletor do LNEC, foi apresentada no *Workshop SARWatch – Advances in the Science*

and Applications of SAR Interferometry (Alonso-Díaz *et al.*, s.d.) em novembro de 2023, e está em preparação um artigo para revista internacional com revisão por pares relativo à calibração de deslocamentos InSAR.

Atividade 2 – Caso de estudo 1: Barragens de betão e aterro e respetivas encostas

Após a reformulação do projeto foram considerados três casos de estudo nesta atividade: duas barragens de betão (Baixo Sabor e Foz Tua) e uma barragem de aterro (Odelouca). As tarefas T2.1, T2.2 e T2.3 foram efetuadas com o *software* de processamento InSAR SARPROZ®. No caso das barragens do Baixo Sabor e de Foz Tua foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-1A, da ESA, cedidas pelo programa Copernicus. O período considerado para análise foi de junho de 2016 a maio de 2018, coincidente com os dois primeiros anos de observação com GNSS na barragem do Baixo Sabor e com o primeiro enchimento da albufeira da barragem de Foz Tua. No caso da barragem de Odelouca, foi utilizado um conjunto de imagens do satélite japonês ALOS-1, cedido gratuitamente pela agência espacial japonesa (JAXA) mediante a aprovação de um projeto submetido à entidade referida. As imagens correspondem ao intervalo de tempo entre 2006 e 2010, que abrange o período antes da construção da barragem e parte do primeiro enchimento da albufeira.

A tarefa T2.4 previa a combinação de deslocamentos InSAR adquiridos a partir de diferentes geometrias para determinação de deslocamentos 3D. A análise foi efetuada para a barragem do Baixo Sabor, considerando imagens do satélite Sentinel-1A, tendo sido obtidos deslocamentos verticais e radiais para pontos no coroamento da barragem e as respetivas incertezas. Também no âmbito desta tarefa foi desenvolvido um método para integração de deslocamentos InSAR no sistema de observação geodésica GNSS instalado na barragem do Baixo Sabor, de modo a ampliar a observação para as encostas. O método foi implementado numa aplicação computacional, desenvolvida em R. O estudo foi publicado numa revista internacional com revisão por pares (Roque *et al.*; 2021). Para as barragens de Odelouca e Foz Tua foi realizada a análise de deslocamentos nas encostas nas vizinhanças das respetivas albufeiras, através de uma estratégia de identificação de padrões em séries temporais de deslocamentos, desenvolvida no âmbito da atividade 3 do projeto. O estudo relativo às encostas da barragem de Odelouca foi apresentado como comunicação oral no *Workshop SARWatch – Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry 2018* (Roque *et al.*; 2018) e o caso das encostas da barragem de Foz Tua foi apresentado na X Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, em novembro de 2023 (Roque e Falcão; s.d.).

No caso da integração de deslocamentos InSAR e GNSS, a validação dos resultados obtidos (tarefa T2.5) foi efetuada através da comparação dos deslocamentos resultantes da integração com deslocamentos de antenas GNSS não utilizadas na análise (Roque; 2020, Roque *et al.*; 2021). Os resultados da aplicação do método para análise de padrões de séries temporais para a monitorização de encostas foram comparados com resultados da aplicação do método *PS-Time* (Berti *et al.*; 2013) aos mesmos dados (Roque; 2020).

Atividade 3 – Caso de Estudo 2 - Lisboa: Baixa de Lisboa e CREL

No âmbito desta atividade foram construídos dois mapas de deslocamentos, correspondentes a geometrias de observação distintas, para parte da área metropolitana de Lisboa, entre 2015 e 2018. Foram utilizadas imagens SAR do satélite da ESA Sentinel-1A, tendo sido processadas com a técnica *persistent scatterer interferometry* (PSI), implementada no *software* SARPROZ® (tarefas T3.1, T3.2 e T3.3).

Foi desenvolvido, em R, um método de análise de séries temporais de deslocamentos (já referido na atividade 2), com base na formação de *clusters* de difusores permanentes com comportamento semelhante. Foram selecionadas áreas de interesse para efetuar uma análise mais detalhada dos deslocamentos com a aplicação proposta: um troço da CREL no concelho de Odivelas, a Baixa da cidade de Lisboa e o cruzamento da Avenida da República com a Avenida Elias Garcia, em Lisboa.

A validação dos resultados (tarefa T3.4) foi executada de forma distinta para cada caso de estudo. No caso da CREL, os deslocamentos PSI foram validados por comparação com dados *in situ* disponibilizados pela BRISA (LNEC; 2018). Para a Baixa de Lisboa e para o cruzamento da Avenida da República com a Avenida Elias Garcia não foram obtidos difusores permanentes próximos de pontos com deslocamentos conhecidos, não tendo sido possível efetuar a comparação. Para os três casos de estudo, os resultados obtidos no processamento PSI e na análise de séries temporais foram validados através de inspeções visuais às fachadas de edifícios (Roque; 2020, Roque *et al.*; 2023). No caso da análise de séries temporais foi, também, efetuada a comparação com o método *PS-Time* (Berti *et al.*; 2013).

Os resultados obtidos na análise dos deslocamentos observados na Baixa de Lisboa foram publicados numa revista internacional com revisão por pares (Roque *et al.*; 2023).

Atividade 4 – Caso de Estudo 3 - Monitorização do Pavilhão Altice Arena

As tarefas desta atividade foram concluídas em 2017 e foram reportadas em LNEC (2018).

Atividade 5 – Caso de Estudo 4 - Geodinâmica do lago Urema na Gorongosa (Moçambique) e vulcão do Fogo (Cabo Verde)

O projeto incluiu dois casos de estudo relacionados com geodinâmica: o lago Urema na Gorongosa, em Moçambique, localizado no extremo de um *rift*, e o vulcão da ilha do Fogo, em Cabo Verde.

Na sequência do trabalho desenvolvido anteriormente para o lago Urema (LNEC; 2018), foi efetuado um estudo da dinâmica de cheias no lago através de produtos interferométricos obtidos a partir de imagens SAR cedidas pela JAXA. O estudo foi considerado como concluído.

Quanto ao estudo da erupção de novembro de 2014 do vulcão da ilha do Fogo, foi efetuado um processamento PSI de imagens recolhidas antes do evento, com o objetivo de obter deslocamentos na zona da fissura eruptiva que evidenciassem o comportamento do magma. O estudo desenvolvido foi incluído numa comunicação oral em conferência (Fernandes *et al.*; 2018) e considerado como concluído.

Elaboração da tese de doutoramento

A tese de doutoramento associada ao projeto foi submetida em setembro de 2020 e concluída com sucesso, com a sua aprovação em sessão de discussão, em dezembro do mesmo ano (Roque; 2020).

2.2 Aplicações a estudos por contrato

No final de 2020 foi feita uma solicitação ao LNEC de mentoria de uma *Startup* incubada no Instituto Pedro Nunes (IPN) em Coimbra, no domínio da InSAR. Esta mentoria realizou-se, por contrato com o IPN e a empresa THEIA – Technology, Heritage and Investigation in Archaeology, tendo dado origem a um relatório LNEC (LNEC; 2021a) e a uma comunicação em conferência (Roque *et al.*; 2022a).

No início de 2021, o LNEC foi solicitado pelo Metro do Porto, SA, para a realização de um trabalho de monitorização de deslocamentos nos túneis, obras de arte e taludes das linhas de metro, desde o início de operação das infraestruturas, em 2002, até junho de 2021. Foi elaborado um plano de monitorização da infraestrutura através de InSAR (LNEC; 2021b) e realizado o estudo solicitado (LNEC; 2021c). Os resultados foram apresentados numa conferência em março de 2022 (Roque *et al.*; 2022b).

2.3 Apreciação da atividade desenvolvida

A atividade desenvolvida decorreu, no essencial, dentro do âmbito previsto para o projeto, tendo sido concluídas todas as tarefas propostas na reformulação de 2018. Os resultados obtidos foram divulgados através de artigos em revistas internacionais com revisão pelos pares e em encontros científicos. O projeto permitiu adquirir competências na área da interferometria SAR e conduziu à criação de aplicações computacionais para explorar os dados obtidos através desta tecnologia. As ferramentas desenvolvidas no âmbito do projeto contribuíram para tornar esta tecnologia mais atrativa para aplicações na área da monitorização de estruturas e respetiva envolvente, o que se refletiu na realização de dois estudos por contrato. Recentemente, tem-se verificado algum interesse das universidades no refletor artificial do LNEC, tendo havido o acolhimento de um aluno de doutoramento da Universidade de Vigo para trabalhar os dados recolhidos no equipamento e uma solicitação do IST para a realização de um ensaio. Apesar da diminuição da atividade do projeto após a conclusão da tese de doutoramento associada, a sua extensão até 2023 permitiu o início da exploração de novos algoritmos InSAR, para além do PSI / PSInSAR, que poderão capacitar o LNEC para monitorizar um leque mais alargado de estruturas através desta tecnologia.

3 | Divulgação de resultados

3.1 Tese de doutoramento

ROQUE, D. (2020) – **Displacement measurement through InSAR geodesy for structural health monitoring**. Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Orientação: Prof. Ana Paula Falcão, IP Ana Fonseca e IC José Vieira de Lemos.

3.2 Publicações em revistas internacionais

ROQUE, D., LIMA, J.N., PERISSIN, D., FALCÃO, A.P., LEMOS, J.V., FONSECA, A. (2021) – **Integrated InSAR and GNSS monitoring sub-system for an arch dam and reservoir banks**. *Journal of Surveying Engineering*, 147(3): 05021003. doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-S428.0000361.

ROQUE, D., FALCÃO, A.P., PERISSIN, D., AMADO, C., LEMOS, J.V., FONSECA, A.M. (2023) – **SARClust – A new tool to analyze InSAR displacement time series for structure monitoring**. *Sustainability*, 15(4): 3728. doi: 10.3390/su15043728.

3.3 Comunicações a congressos

ROQUE, D., FONSECA, A., HENRIQUES, M.J., FALCÃO, A. (2014) – **A first approach for displacement analysis in Lisbon Downtown using PSInSAR**. *Procedia Technology*, 16: 288–293. doi: 10.1016/j.protcy.2014.10.094.

ROQUE, D., PERISSIN, D., FALCÃO, A.P., HENRIQUES, M.J., FONSECA, A. (2015a) – **Monitorização de estruturas com interferometria SAR**. Atas da VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Amadora, 29 – 30 de outubro.

ROQUE, D., PERISSIN, D., FALCÃO, A.P., FONSECA, A., HENRIQUES, M.J. (2015b) – **Dam regional safety warning using time-series InSAR techniques**. Atas da 2nd *International Dam World Conference*, Lisboa, LNEC, 21 – 24 de abril.

ROQUE, D., PERISSIN, D., FALCÃO, A.P., FONSECA, A., HENRIQUES, M.J. (2015c) – **Monitoring structure and regional-level displacements for Lisbon using multi-temporal InSAR techniques**. Atas do *FRINGE 2015 – Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop*. Frascati, Roma, 23 – 27 de março.

ROQUE, D., SIMONETTO, E., FALCÃO, A.P., FONSECA, A. (2015d) – **Displacement measurement for Lisbon, Portugal, using combined InSAR and GNSS data**. Resumos do *Workshop ForM@Ter MDIS (Deformation Measurement by Space Imagery)*, em Autrans, França, 7 – 9 de outubro.

ROQUE, D., SIMONETTO, E., FALCÃO, A.P., PERISSIN, D., DURAND, F., MOREL, L., FONSECA, A., POLIDORI, L. (2016a) – **An analysis of displacement measurements for Lisbon, Portugal,**

- using combined InSAR and GNSS data.** Atas do *Living Planet Symposium* 2016, Praga, República Checa, 9 – 13 de maio.
- ROQUE, D., PERISSIN, D., FALCÃO, A.P., GOMES, R., ROQUE, A.J., FONSECA, A.M. (2016b) – **Displacement measurement using SAR interferometry – An application to the Lisbon regional outer circular and its neighbourhood.** Atas da Conferência Internacional sobre Riscos Urbanos (ICUR 2016), Lisboa, 30 de junho – 2 de julho.
- ROQUE, D., HENRIQUES, M.J., PERISSIN, D., FALCÃO, A.P., FONSECA, A.M. (2016c) – **Combined InSAR and geodetic measurements for displacement analysis at the metallic roof of MEO Arena building, Portugal.** *Procedia Computer Science*, 100: 1115-1120. doi: 10.1016/j.procs.2016.09.260.
- ROQUE, D., PERISSIN, D., FALCÃO, A.P., MARUJO, N., HENRIQUES, M.J., LEMOS, J.V., FONSECA, A. (2017a) – **Evaluation of breakwater damages from multitemporal InSAR techniques.** Livro de resumos do *FRINGE 2017 Workshop – Advances in the science and applications of SAR interferometry and Sentinel-1 InSAR*, Helsínquia, Finlândia, 5 – 9 de junho.
- HENRIQUES, M.J., ROQUE, D., CRUZ, H., FONSECA, A. (2017b) – **Monitoring the behavior of MEO Arena roof.** Atas da *7th International Conference on Engineering Surveying*, LNEC, Lisboa, 18 – 20 de outubro.
- FERNANDES, R., DUMONT, S., ROQUE, D., MARTINS, B., FALCÃO, A.P., BOS, M.S., HELENO, S. (2018) – **Deciphering magma plumbing system at Fogo volcano using geodetic (InSAR, GNSS and Gravimetric) data.** Atas da *AGU Fall Meeting 2018*, Washington, D.C, Estados Unidos da América, 10 – 14 dezembro.
- ROQUE, D., PERISSIN, D., FALCÃO, A.P., AMADO, C., LEMOS, J.V., FONSECA, A.M. (2018) – **Analysis of InSAR displacements for the slopes around Odelouca reservoir.** *Procedia Computer Science*, 138: 338-345. doi: 10.1016/j.procs.2018.10.048.
- ROQUE, D., MORAIS, J., FALCÃO, A.P., LIMA, J.N., PERISSIN, D., MORAIS, P., CATALÃO, J., LEMOS, J.V., FONSECA, A.M. (2019a) – **Precision assessment of PSI displacements at a corner reflector infrastructure for Sentinel-1.** Resumos do *Living Planet Symposium* 2019, Milão, Itália, 13 – 17 de maio.
- ROQUE, D., MORAIS, J., FALCÃO, A.P., LIMA, N., PERISSIN, D., MORAIS, P., CATALÃO, J., LEMOS, J.V., FONSECA, A.M. (2019b) – **Validation of PSI displacements at a bidirectional corner reflector.** Resumos do *Colloque G2 2019 Géodésie & Géophysique*, Le Mans, França, 20 – 22 de novembro.
- ROQUE, D., CORREIA, M., CABRAL, R., DAVIES, S., CORDEIRO, T., FONSECA, A., BARRETO, P. (2022a) – **InSAR displacement time series post-processing to back-analyze a slope failure.** Atas do *5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, Valência, Espanha, 20 – 22 de junho. doi: 10.4995/JISDM2022.2022.13839.
- ROQUE, D., TEIXEIRA, N., FONSECA, A. (2022b) – **Monitorização de deslocamentos nas infraestruturas do Metro do Porto através de InSAR.** Resumos da I Conferência Nacional Copernicus, Évora, 22 – 23 de março.

ALONSO-DÍAZ, A., ROQUE, D., SOLLA, M., LIMA, J.N. (s.d.) – **Comparative analysis of MT-InSAR algorithms supported by GNSS data and corner reflectors: Assessing performance and accuracy.** *Procedia Computer Science* (aceite).

ROQUE, D., FALCÃO, A.P. (s.d.) – **Monitorização com InSAR de encostas na vizinhança de uma albufeira durante o primeiro enchimento.** X Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia (aceite).

3.4 Relatórios do LNEC

LNEC (2016) – **Determinação de deslocamentos com geodesia InSAR para o controlo de segurança de estruturas. Plano de tese de doutoramento da bolseira Dora Roque.** LNEC – Proc. 0404/1102/19717. Relatório 344/2016 – DBB/NGA.

LNEC (2018) – **INFRASAR – Interferometria SAR com difusores permanentes (PSINSAR) aplicada à deteção de deslocamentos em geodinâmica e infraestruturas. Relatório de progresso 2014-2017 do projeto do P2I/LNEC.** LNEC – Proc. 0404/1102/19717. Relatório 166/2018 – DBB/NGA.

LNEC (2021a) – **Identificação de padrões em deslocamentos obtidos com interferometria SAR. Aplicação a um talude da autoestrada A24.** LNEC – Proc. 0404/1201/22781. Relatório 362/2021 – DBB/NGA.

LNEC (2021b) – **Metro do Porto. Plano do sistema de observação com interferometria SAR.** LNEC – Proc. 0404/1201/22896. Relatório 109/2021 – DBB/NGA.

LNEC (2021c) – **Metro do Porto. Resultados da monitorização das infraestruturas com interferometria SAR.** LNEC – Proc. 0404/1201/22896. Relatório 335/2021 – DBB/NGA.

3.5 Eventos de divulgação científica

Em maio de 2023, decorreu no LNEC o evento Copernicus para o Setor das Cidades Inteligentes, com organização conjunta da Agência Espacial Portuguesa e do LNEC, enquadrado no âmbito do projeto.

Os trabalhos desenvolvidos nas atividades do projeto foram divulgados através de várias apresentações por convite:

ROQUE, D. (2023) – **Visão geral de observação da Terra e infraestruturas.** Sessão prática do evento Copernicus para o Setor das Cidades Inteligentes, LNEC, Lisboa, 26 de maio.

ROQUE, D., FONSECA, A. (2023) – **Análise de deslocamentos obtidos por dados de observação da Terra para vários casos de estudo.** *Webinar Copernicus European Ground Motion Service*, coorganizado pela Sociedade de Geografia de Lisboa, a Agência Espacial Portuguesa e a Agência Europeia do Ambiente, 3 de maio.

ROQUE, D. (2021) – **Displacement measurement through InSAR geodesy for structural health monitoring.** Apresentação da tese de doutoramento para o Conselho Científico do LNEC, 9 de abril.

FONSECA, A., ROQUE, D. (2021) – **A observação da Terra e o serviço de ground motion do programa europeu Copernicus**. Sessão virtual promovida pela Sociedade de Geografia de Lisboa, 18 de fevereiro.

ROQUE, D., MORAIS, J., FALCÃO, AP., LIMA, N., PERISSIN, D., MORAIS, P., CATALÃO, J., LEMOS, J.V., FONSECA, AM. (2019b) – **Validation of PSI displacements at a bidirectional corner reflector**. *Colloque G2 2019 Géodésie & Géophysique*, Le Mans, França, 21 de novembro.

ROQUE, D., FONSECA, A.M., FALCÃO, A.P. (2019) – **Sentinel-1 and results in Portugal**. Workshop Copernicus for Geohazards in the Framework of AGEO, Lisboa, 13 de novembro.

ROQUE, D. (2019) – **SAR data to monitor a changing world: From floods to structures**. 6th European Meeting of Young Surveyors, Porto, 12 de outubro.

ROQUE, D. (2018) – **SAR interferometry usage in a civil engineering laboratory**. Apresentação em modo virtual para a Faculdade de Geomática da Universidade de Tecnologia K.N.Toosi, Irão, 6 – 7 de março.

4 | Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento

4.1 Indicadores de desempenho

No Quadro 4.1 apresentam-se os indicadores de desempenho do projeto, os seus valores totais previstos na ficha inicial e os realizados de 2014 a 2023.

Quadro 4.1 – Indicadores de desempenho

Indicadores	Realizado de 2014 a 2023 (10 anos)	Total previsto no projeto de 2014 a 2017 (4 anos)
Teses de doutoramento	1	1
Teses de mestrado	0	1
Artigos em revista internacional	2	3
Artigos em revista nacional	0	1
Comunicações em congresso	18	4
Relatórios do LNEC	5	0

Os resultados exetáveis indicados na ficha inicial de projeto foram genericamente atingidos. A tese de doutoramento planeada foi concluída. Contudo, não foi possível captar um aluno de mestrado para realizar uma dissertação ao abrigo do projeto. Dos três artigos planeados para publicação em revista internacional com revisão por pares, dois foram publicados e o terceiro está em preparação. O número de comunicações previstas foi superado. Apesar de inicialmente não estar prevista a elaboração de relatórios LNEC no âmbito do projeto, foram efetuadas cinco publicações deste tipo, três das quais associadas a estudos por contrato beneficiados pelos métodos desenvolvidos no projeto.

4.2 Recursos humanos mobilizados

No Quadro 4.2 apresentam-se os recursos humanos do LNEC afetos ao projeto, os meses de trabalho previstos e efetivamente dedicados de 2015 a 2023 e o total previsto na ficha de projeto.

Quadro 4.2 – Afetação de recursos humanos do LNEC

Equipa do LNEC	Categoria	Meses de trabalho		Concretização percentual extrapolando o previsto no projeto
		Realizado em 2015-2023 (9 anos)*	Total previsto no projeto de 2014 a 2017 (4 anos)	
Ana Fonseca	IP	10,1	9,6	60%
Dora Roque	BIIC/BD/IA	56,2	36	69%
Maria João Henriques	IP	0	0	0%
José Nuno Lima	IA	0	0	0%
Paulo Morais	IA	0	0	0%
João Morais	BIIC/BD	0,1	0	2%

*dependente da data de aprovação do processo

Tal como previsto, a IP Ana Fonseca e a BIIC/BD/IA Dora Roque foram os elementos da equipa com maior afetação ao projeto, tendo cumprido uma percentagem elevada da dedicação prevista. A atividade no âmbito do projeto abrandou após a conclusão da tese de doutoramento, sendo essa a razão para a concretização percentual não ter atingido os 100%. Os quatro membros restantes do projeto não foram incluídos na ficha inicial, tendo sido mobilizados aquando das alterações introduzidas em 2016 e 2018. A IP Maria João Henriques e o IA José Nuno Lima tiveram colaborações pontuais em algumas atividades do projeto, nomeadamente nas componentes com dados *in situ*. O IA Paulo Morais e o BIIC/BD João Morais colaboraram na implementação da infraestrutura de refletores artificiais no LNEC. As concretizações percentuais apresentadas foram determinadas tendo em conta o tempo de permanência no projeto de cada elemento da equipa. No caso da IP Ana Fonseca foi considerado o período 2015-2022, para a BIIC/BD/IA Dora Roque foi o período 2015-2023 e para o BIIC/BD João Morais foi o período 2018-2023.

4.3 Financiamento

Foram submetidos três projetos a agências espaciais (alemã, italiana e japonesa), para acesso gratuito ao conjunto de imagens de satélite necessário para os casos de estudo previstos, tendo sido todos aprovados e as imagens obtidas sem custos (com um valor comercial de €233.000,00). Foi submetida à FCT uma proposta de financiamento da bolsa de doutoramento da BIIC/BD/IA Dora Roque, que foi aprovada.

Foi também submetida, em parceria com o IST, a financiamento da FCT, para cofinanciamento deste projeto, a proposta PTDC/ECMEST/4047/2014 «SlopeSAR – Desenvolvimento de um sistema de

monitorização de barragens de aterro, taludes e encostas com base em técnicas avançadas de interferometria radar», mas não obteve financiamento.

5 | Considerações finais

O Projeto INFRASAR teve como objetivo capacitar o LNEC para a utilização de uma tecnologia de geodesia aplicada, a interferometria SAR, e contribuir para promover a sua aplicação à monitorização de estruturas e respetiva envolvente. O projeto correspondeu a uma linha nova de I&D no âmbito da deteção remota, tendo sido obtidos resultados relevantes nas monitorizações realizadas, nomeadamente em barragens de betão, de aterro e respetivas encostas, em várias áreas da cidade de Lisboa e concelhos vizinhos e em estudos de geodinâmica no continente africano. Os resultados expetáveis do projeto foram obtidos, nomeadamente a realização de uma tese de doutoramento, de dois artigos em revistas internacionais com revisão pelos pares e de várias comunicações em encontros científicos.

Pretende-se dar continuidade a este estudo no P2I21-27 do LNEC através da inclusão desta linha de investigação num projeto dedicado à automatização da monitorização de estruturas com métodos geodésicos. Houve também manifestações de interesse para a inclusão de estudos com InSAR em propostas de projetos do DBB, do DG e do DT no âmbito do novo ciclo de I&I do LNEC, o P2I21-27.

Lisboa, LNEC, dezembro de 2023

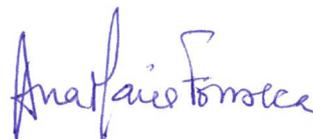
VISTOS

A Chefe do Núcleo de Geodesia Aplicada



Maria João Henriques

AUTORIA



Ana Fonseca
Investigadora Principal

O Diretor do Departamento de Barragens de Betão



António Lopes Batista



Dora Roque
Investigadora Auxiliar

Referências bibliográficas

BERTI, M.; CORSINI, A.; FRANCESCHINI, S.; IANNACONE, J.P., 2013 – **Automated classification of persistent scatterers interferometry time series**, Natural Hazards and Earth System Sciences, 13(8): 1945–1958. doi: 10.5194/nhess-13-1945-2013.

ANEXOS

ANEXO I

Ficha inicial do projeto INFRASAR

1 - Dados Gerais

1.1 Identificação do projeto

Designação	Interferometria SAR com difusores permanentes (PSInSAR) aplicada à deteção de deslocamentos em geodinâmica e infraestruturas
Acrónimo	INFRASAR
Unidade Departamental proponente	DBB
Setor	NGA
Investigador Responsável	Ana Fonseca (LNEC)
Duração (meses)	48
Data de início (ano-mês-dia)	01/01/2014

1.2 Inserção na matriz programática da E2I (indicar par(es) (Eixo programático, Temática prioritária))

Par principal (obrigatório)	E4, T2
Par secundário (opcional)	E2, T2; E2, T4; E4, T4

1.3 Entidades intervenientes

Entidade coordenadora	LNEC
Parceiros internos	
Parceiros externos	IST, EDIA, WW - Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas
Entidade externa interessada	EDIA, WW - Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas
Financiamento externo (S/N)	N

1.4 Resumo

(max. 300 palavras)	<p>O sistema de observação da Terra Copernicus (anteriormente designado GMES) da União Europeia, disponibiliza ferramentas de monitorização do planeta Terra, com o objetivo de tornar a Europa independente no que diz respeito à monitorização do seu território nas suas componentes terrestre, marítima e atmosférica. Este sistema, constituído por três sub-sistemas, espacial, terrestre e in-situ, dispõe de satélites com sensores na banda das micro-ondas (RADAR), que permitem a monitorização da subsidência (deslocamentos ao longo do tempo ao longo da linha de vista do satélite) utilizando a tecnologia da Interferometria SAR (Ferretti et al., 2001), (Heleno et al., 2011), com aplicações à Geodinâmica e à monitorização de infraestruturas (pontes, barragens, túneis, vias de comunicação, ...) (Perissin et al., 2009, 2012). Este estudo pretende aplicar esta tecnologia à monitorização de obras de engenharia e instabilidade de encostas, integrando observações in-situ, aplicando métodos já consolidados e testando novas metodologias desenvolvidas com o objetivo de minimizar a incerteza.</p>
---------------------	--

Referências Bibliográficas:

- Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca (2001). "Permanent Scatterers in SAR Interferometry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No 1, pp. 8-20.
- Heleno, S., Oliveira, L., Henriques, M.J., Falcão, A. Lima, J., Cooksley, G., Ferretti, A., Fonseca, A., Lobo-Ferreira, J.P., Fonseca, J. – Persistent Scatterers Interferometry reveals ground deformation in Lisbon. Remote Sensing of Environment, Volume 115, Issue 8, 15 August 2011, Pages 2152-2167.
- Perissin, D., C. Prati, F. Rocca, PSInSAR analysis over the Three Gorges Dam and urban areas in China. Proceedings of 2009 Urban Remote Sensing Joint Event. 978-1-4244-3461-9/09/2009 IEEE.
- Perissin, D., Z. Wang and H. Lin, "Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 73, 58–67, 2012.

2 - Fundamentação

(síntese do estado da arte, identificação de problemas por resolver, motivações internas e/ou externas)

O sistema de observação da Terra Copernicus, da União Europeia, recolhe dados de monitorização do planeta Terra, que serão disponibilizados aos utilizadores sem custos. Este sistema dispõe de satélites com sensores na banda das micro-ondas (RADAR), que permitem, através da tecnologia de interferometria SAR¹ (InSAR) a determinação de deslocamentos sobre a superfície terrestre (Ferretti et al., 2001), (Heleno et al., 2011). A utilização de séries temporais de imagens SAR (pilhas interferométricas) permite minimizar os problemas de decorrelações temporal e geométrica e a influência da atmosfera que dificultam a construção de interferogramas. Ferretti et al. (2001) propuseram o conceito de Difusores Permanentes (Permanent Scatterers), em que objetos naturais se comportam como difusores estáveis ao longo de um intervalo de tempo, em relação a uma imagem tomada como referência, permitindo a determinação de deslocamentos desses objetos na direção da linha de vista do satélite (PSInSAR).

As motivações para a realização deste projeto são:

- promover a utilização deste tipo de dados cuja aquisição é suportada pelos contribuintes europeus e que deve ser colocada pela comunidade científica ao seu serviço; contribuir para a operacionalização de uma tecnologia espacial de monitorização temporal de infraestruturas.

3 - Objetivos

(indicar para além dos objetivos científicos do projeto, os objetivos do investigador responsável e das entidades envolvidas)

- capacitar o LNEC no domínio desta tecnologia que cada vez é mais solicitada pelos donos de obra, como se pode ver pela diversidade dos casos de estudos propostos, que resultaram de solicitações de donos de obra, através da realização de um PhD neste domínio por uma BIIC do LNEC;
- enquadrar o plano e posterior tese de doutoramento de uma BIIC do DBB/NGA.

4 - Contribuições inovadoras

(indicar as contribuições para o reforço dos conhecimentos, das competências e/ou dos recursos experimentais do LNEC)

Recentemente a tecnologia PSInSAR tem sido testada para determinar deslocamentos em obras de engenharia, nomeadamente Edifícios, Túneis e Barragens (Perissin et al., 2009, 2012). Esta tecnologia permite manter sobre monitorização zonas ou infraestruturas que não estão instrumentadas, ou de difícil instrumentação, e emitir alertas no caso de deteção de situações anómalas. No caso de infraestruturas instrumentadas esta tecnologia pode aumentar a redundância da monitorização realizada, utilizando novos métodos propostos com o objetivo de melhorar a incerteza dos deslocamentos, tais como a Tomografia SAR (Lombardini et al., 2008), a Radargrametria (Goel and Adam, 2010), os Quase-Difusores Permanentes (Perissin and Wang, 2011), a utilização de técnicas de construção de interferogramas com pares de imagens com pequenas diferenças orbitais (SBAS), a integração de dados provenientes de passagens ascendentes e descendentes dos satélites, a decomposição das observações ao longo da linha de vista do satélite nas suas componentes 3D e a utilização de refletores de canto.

5 - Metodologia

(descrição da abordagem e dos métodos teóricos e/ou experimentais a utilizar)

Elaboração de catálogos de imagens de satélite SAR passíveis de integrar pilhas (temporais) interferométricas com qualidade nas várias áreas de estudo, a partir das imagens disponibilizadas pelas agências espaciais europeia (ESA), alemã (DLR), italiana (ASI), japonesa (JAXA) e canadiana (através da empresa MDA); a qualidade destes conjuntos de dados é crítica para a qualidade dos resultados obtidos, nomeadamente no que diz respeito à frequência temporal das imagens e à coerência dos difusores permanentes;

Processamento das pilhas interferométricas de modo a separar as várias componentes que contribuem para a diferença de fase dos sinais refletidos pelos difusores permanentes em épocas diferentes com métodos convencionais (Interferometria SAR com Difusores Permanentes - PSINSAR) e com novos métodos propostos, com o objetivo de melhorar a incerteza dos deslocamentos, tais como a Tomografia SAR (Lombardini et al., 2008), a Radargrametria (Goel and Adam, 2010), os Quase-Difusores Permanentes, o SBAS, a integração de dados provenientes de passagens ascendentes e descendentes dos satélites, a decomposição das observações ao longo da linha de vista do satélite nas suas componentes 3D e a utilização de refletores de canto; validação dos deslocamentos detetados com dados provenientes de monitorização in-situ, de modo a concluir qual a metodologia mais adequada para a infraestrutura e o modelo de deformação.

No âmbito do projeto INFRASAR estas metodologias serão testadas e adaptadas para determinar deslocamentos em casos de estudo selecionados, nomeadamente, barragens do Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva (EDIA), quebra-mar da Ericeira (Direcção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos), Lago Urema no Parque da Gorongosa em Moçambique (Carr Foundation - Gorongosa Restoration Project), Minas de Cobre e Ouro na Polónia (KGHM Polska Miedź S.A. Group) e encostas nas zonas de construção das novas barragens (EDP).

¹SAR - Synthetic Aperture RADAR

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Roque, Dora, Fonseca, Ana Maria, Henriques, Maria João, Falcão, Ana Paula – A first approach for displacement analysis in Lisbon Downtown using PS-InSAR. CENTERIS 2014 – Conference on ENTERprise Information Systems (accepted paper). Troia, Portugal, 15-17 October 2014.

Crosetto, M., O. Monserrat, R. Iglesias, and B. Crippa (2010). “Persistent Scatterer Interferometry: Potential, Limits and Initial C- and X-band Comparison”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 76, No 9, pp. 1061-1069.

Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca (2001). “Permanent Scatterers in SAR Interferometry”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, No 1, pp. 8-20.

Goel, K. and N. Adam (2010). “A Bayesian Method for Very High Resolution Multi Aspect Angle Radargrammetry”, *EUSAR 2010*, pp. 158-161.

Heleno, S., Oliveira, L., Henriques, M.J., Falcão, A. Lima, J., Cooksley, G., Ferretti, A., Fonseca, A., Lobo-Ferreira, J.P., Fonseca, J. – *Persistent Scatterers Interferometry reveals ground deformation in Lisbon. Remote Sensing of Environment, Volume 115, Issue 8, 15 August 2011, Pages 2152-2167.*

Lombardini, F., G. Fornaro, M. Pardini, D. Reale, F. Serafino, F. Soldovieri, and M. Costantini (2008). “SAR Tomography for Scene Elevation and Deformation Reconstruction: Algorithms and Potentialities”, *IEEE*.

Perissin, D., C. Prati, F. Rocca, PSInSAR Analysis over the Three Gorges Dam and urban areas in China. Proceedings of **2009 Urban Remote Sensing Joint Event**. 978-1-4244-3461-9/09/2009 IEEE.

Perissin, D., Z. Wang and H. Lin, “Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 73, 58–67, 2012.

Perissin, D. and T. Wang, “Repeat-pass SAR Interferometry with Partially Coherent Targets”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50 (1), 271–280, 2012.

6 - Plano de Trabalhos

Atividade	Designação da Atividade	Tarefa	Designação da Tarefa	1º S	2º S	3º S	4º S	5º S	6º S	7º S	8º S
Atividade 1	Criação de Catálogos de imagens para cada caso de estudo e adaptação ao software proprietário e open source de processamento de imagens SAR para aplicações de interferometria	T1.1	<i>Estabelecimento do Estado da Arte</i>								
		T1.2	<i>Identificação de bottlenecks que dificultam a operacionalização</i>								
		T1.3	<i>Criação de catálogos de imagens</i>								
		T1.4	<i>formação no software proprietário SARSCAPE</i>								
		T1.5	<i>formação no software open source STAMPS</i>								
		T1.6	<i>formação no software open source SARPROZ</i>								
		T1.7	<i>Desenvolvimento de software</i>								
Atividade 2	Caso de Estudo 1- Barragens de Betão e Aterro	T2.1	<i>Processamento de pilhas de imagens SAR para geração de interferogramas</i>								
		T2.2	<i>Processamento de pilhas de interferogramas para identificação de difusores permanentes (DP)</i>								
		T2.3	<i>Determinação de deslocamento ao longo da linha de vista do satélite e sua velocidade nos DP.</i>								
		T2.4	<i>Instalação de refletores de canto</i>								
		T2.5	<i>Combinação de passagens ascendentes e descendentes do satélite</i>								
		T2.6	<i>Determinação de deslocamentos 3D a partir do deslocamento na linha de vista do satélite.</i>								

		T5.3	<i>Determinação de deslocamento ao longo da linha de vista do satélite e sua velocidade nos DP.</i>																			
		T5.4	<i>Determinação de deslocamentos 3D a partir do deslocamento na linha de vista do satélite.</i>																			
		T5.5	<i>Validação - Cruzamento com dados in-situ</i>																			
Atividade 6	Caso de Estudo 5 - Encostas das Novas Barragens	T6.1	<i>Instalação de refletores de canto</i>																			
		T6.2	<i>Processamento de pilhas de imagens SAR para geração de interferogramas</i>																			
		T6.3	<i>Processamento de pilhas de interferogramas para identificação de difusores permanentes (DP)</i>																			
		T6.4	<i>Determinação de deslocamento ao longo da linha de vista do satélite e sua velocidade nos DP.</i>																			
		T6.5	<i>Determinação de deslocamentos 3D a partir do deslocamento na linha de vista do satélite.</i>																			
		T6.6	<i>Validação - Cruzamento com dados in-situ</i>																			
Atividade 7	Elaboração de Dissertação de doutoramento	T7.1																				

7 - Equipa de trabalho				
Nome	Categoria	Sector/Entidade	Tarefas	Afetação ao projeto (%)
Ana Fonseca	Investigador Principal	DBB/NGA	Co-orientação PhD	20%
Ana Paula Falcão	Escolher	IST	Orientação PhD	20%
Sandra Heleno	Escolher	IST	Orientação PSIN	10%
Dora Roque	BIIC	DBB/NGA	IDI/PhD	75%

8 - Resultados expectáveis

Resultados por atividade/tarefa	Descrição
<i>(descrever os resultados esperados por atividade e/ou tarefas)</i>	
Atividade 1	Domínio do estado da arte e do software de processamento
Atividade 2	Aplicação à monitorização de Barragens de Aterro (EDIA)
Atividade 3	Aplicação à monitorização do molhe da Ericeira
Atividade 4	Aplicação à monitorização de uma mina (Polónia)
Atividade 5	Aplicação à caracterização da Geodinâmica do lago Urema na Gorongosa Moçambique
Atividade 6	Aplicação à monitorização de encostas
Atividade 7	Tese de Doutoramento
Outros resultados	
Teses	
<i>mestrado</i>	1
<i>doutoramento</i>	1
<i>outras</i>	Plano de Tese 1
Artigos em revista	
<i>nacional</i>	1
<i>internacional</i>	3
Comunicações	1* + 3
Outros produtos	Módulos MatLab do software SARPROZ

*Comunicação aceite **Roque, Dora, Fonseca, Ana Maria, Henriques, Maria João, Falcão, Ana Paula** – A first approach for displacement analysis in Lisbon Downtown using PS-InSAR. CENTERIS 2014 – Conference on ENTERprise Information Systems (accepted paper). Troia, Portugal, 15-17 October 2014.

9 - Recursos humanos

Grupo	Esforço (h*m)	Valor €
1	0.00	0.00
2	9.60	54 720.00
3	36.00	126 000.00
4	0.00	0.00
<i>TOTAL</i>	45.60	180 720.00

10 - Despesas correntes

Designação	Quantidade	Valor unitário €	Montante €
Imagens de satélite	1	20 000.00	20 000.00
			0.00
			0.00
			0.00
			0.00
			0.00
<i>TOTAL</i>			20 000.00

11 - Equipamento

Designação	Quantidade	Valor unitário €	Montante €
			0.00
			0.00
			0.00
			0.00
			0.00
			0.00
<i>TOTAL</i>			0.00

12 - Orçamento

Designação	Estimativa de custo €	Financiamento externo €	Financiamento LNEC €
Recursos Humanos	180 720		180720
Despesas Correntes	20 000		20000
Equipamentos	0		0
Gastos gerais	184 720		184720
			0
			0
Total	385 440	0	385 440

ANEXO II

Plano de trabalhos do projeto INFRASAR após proposta em 2018 de revisão e extensão

6 - Plano de Trabalhos				2018		2019	
	Designação da Atividade	Tarefa	Designação da Tarefa				
Atividade 1	Processamento e modelação da incerteza dos deslocamentos obtidos na infraestrutura de refletores instalados no campus do LNEC	T1.1	<i>Processamento de imagens SAR</i>				
		T1.2	<i>Processamento dos dados da monitorização in-situ: nivelamento geomérico e GNSS</i>				
		T1.3	<i>Validação: comparação de deslocamentos obtidos prlas várias técnicas</i>				
Atividade 2	Caso de estudo 1: Barragens de betão e aterro e respetivas encostas	T2.1	<i>Processamento de pilhas de imagens SAR para geração de interferogramas</i>				
		T2.2	<i>Processamento de pilhas de interferogramas para identificação de difusores permanentes (DP)</i>				
		T2.3	<i>Determinação de deslocamento ao longo da linha de vista do satélite e sua velocidade nos DP.</i>				
		T2.4	<i>Combinação de passagens ascendentes e descendentes do satélite para determinação de deslocamentos 3D</i>				
		T2.5	<i>Validação - Cruzamento com dados in-situ</i>				
Atividade 3	Caso de Estudo 2 - Lisboa: Baixa de Lisboa e CREL	T3.1	<i>Processamento de pilhas de imagens SAR para geração de interferogramas</i>				
		T3.2	<i>Processamento de pilhas de interferogramas para identificação de difusores permanentes (DP)</i>				
		T3.3	<i>Determinação de deslocamento ao longo da linha de vista do satélite e sua velocidade nos DP.</i>				
		T3.4	<i>Validação - Cruzamento com dados in-situ</i>				

Atividade 4	Caso de Estudo 3 - Monitorização do Pavilhão Alfiice Arena	T4.1	<i>Processamento de pilhas de imagens SAR para geração de interferogramas</i>			
		T4.2	<i>Processamento de pilhas de interferogramas para identificação de difusores permanentes (DP)</i>			
		T4.3	<i>Determinação de deslocamento ao longo da linha de vista do satélite e sua velocidade nos DP.</i>			
		T4.4	<i>Validação - Cruzamento com dados in-situ</i>			
Atividade 5	Caso de Estudo 4 - Geodinâmica do Vulcão do Fogo	T5.1	<i>Processamento de pilhas de imagens SAR para geração de interferogramas</i>			
		T5.2	<i>Processamento de pilhas de interferogramas para identificação de difusores permanentes (DP)</i>			
		T5.3	<i>Determinação de deslocamento ao longo da linha de vista do satélite e sua velocidade nos DP.</i>			
		T5.4	<i>Validação - Cruzamento com dados in-situ</i>			
Elaboração da dissertação de doutoramento						



www.lnec.pt

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL
tel. (+351) 21 844 30 00
lnec@lnec.pt www.lnec.pt