



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

# **DETERMINAÇÃO DE DESLOCAMENTOS COM GEODESIA INSAR PARA O CONTROLO DE SEGURANÇA DE ESTRUTURAS**

**Plano de tese de doutoramento da bolsreira Dora Roque**

Lisboa • dezembro de 2016

**I&D BARRAGENS DE BETÃO**

**RELATÓRIO 344/2016 – DBB/NGA**

## **Título**

### **DETERMINAÇÃO DE DESLOCAMENTOS COM GEODESIA INSAR PARA O CONTROLO DE SEGURANÇA DE ESTRUTURAS**

Plano de tese de doutoramento da bolsreira Dora Roque

## **Autoria**

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

### **Dora Roque**

Bolsreira de Doutoramento, Núcleo de Geodesia Aplicada

### **Ana Maria Fonseca**

Investigadora Principal, Chefe do Núcleo de Geodesia Aplicada

### **José Vieira de Lemos**

Investigador-Coordenador, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO DA UNIVERSIDADE DE LISBOA

### **Ana Paula Falcão**

Professora Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos

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

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: [lnec@lnec.pt](mailto:lnec@lnec.pt)

[www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)

Relatório 344/2016

Proc. 0404/112/19717

## DETERMINAÇÃO DE DESLOCAMENTOS COM GEODESIA INSAR PARA O CONTROLO DE SEGURANÇA DE ESTRUTURAS

Plano de tese de doutoramento da bolsista Dora Roque

### Resumo

---

O relatório apresenta uma proposta de plano de estudos para a tese de doutoramento da bolsista Dora Roque, a realizar no Núcleo de Geodesia Aplicada do Departamento de Barragens de Betão do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. O objetivo principal do estudo é contribuir para a operacionalização da geodesia InSAR na determinação de deslocamentos para o controlo de segurança de estruturas.

Palavras-chave: Plano de tese / Geodesia InSAR / Sistemas de observação

## DISPLACEMENT MEASUREMENT THROUGH INSAR GEODESY FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING

Plan for the PhD thesis of research fellow Dora Roque

### Abstract

---

The report presents a proposal for the study plan of the PhD thesis of research fellow Dora Roque, which will be performed at the Applied Geodesy Unit of the Concrete Dams Department of the National Laboratory for Civil Engineering. The main goal of the study is to contribute to the development of the application of InSAR geodesy to obtain displacements in the scope of structural health monitoring.

Keywords: Thesis plan / InSAR geodesy / Monitoring systems



## Sumário executivo

---

O documento apresenta uma proposta de plano de estudos para a tese de doutoramento da bolsista Dora Luísa Ferreira da Luz Roque. Propõe-se que os trabalhos conducentes à obtenção do doutoramento se realizem no Núcleo de Geodesia Aplicada do Departamento de Barragens de Betão do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e que a tese seja submetida para apreciação no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.

O tema proposto para a tese é “Determinação de deslocamentos com geodesia InSAR para o controlo de segurança de estruturas” e o objetivo principal do estudo é complementar os sistemas de observação de estruturas e respetiva envolvente com dados adquiridos através da tecnologia radar de abertura sintética (*synthetic aperture radar* – SAR). A segurança estrutural é avaliada, usualmente, com a contribuição de deslocamentos obtidos por equipamentos instalados na estrutura e métodos geodésicos (taqueometria, nivelamento, sistemas de navegação global por satélite), que constitui informação pontual obtida num número reduzido de pontos. Com o estudo proposto neste plano pretende-se complementar estas observações com deslocamentos obtidos em novos pontos que são refletores do sinal do satélite, registados em imagens adquiridas na banda das micro-ondas do espectro eletromagnético, o que poderá aumentar a densidade de pontos objeto da rede de observação e a frequência da monitorização, com uma boa relação custo – benefício, e estender a análise à envolvente das estruturas, onde raramente existem observações efetuadas pelos métodos tradicionais acima referidos. Pretende-se ainda avaliar as contribuições que o aumento da densidade espaço-temporal de pontos da rede de observação poderá dar ao controlo de segurança de estruturas.

Neste plano são apresentados o estado da arte da tecnologia da interferometria SAR (InSAR), o enquadramento do tema proposto nas atividades do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, a definição das abordagens teórica e experimental a seguir e, ainda, o planeamento das atividades a realizar no âmbito da tese, nomeadamente os estudos preliminares, o cronograma das tarefas, as condições necessárias para a realização do estudo e o seu financiamento.

## Atividade curricular da candidata

---

A candidata é licenciada em engenharia geográfica pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, tendo concluído a licenciatura em 2007. Finalizou o mestrado em engenharia geográfica na mesma faculdade em 2009. No último ano do mestrado estagiou no Instituto Geográfico do Exército, atual Centro de Informação Geoespacial do Exército, para realizar os trabalhos para a sua tese na área do processamento digital de imagem e da fotogrametria, com o título “Cobertura aérea nacional RAF47 – Recuperação radiométrica e triangulação”. O trabalho realizado teve a devida divulgação internacional (Redweik *et al.*, 2010).

Após a conclusão do mestrado foi bolsista de investigação no CERENA – Centro de Recursos Naturais e Ambiente, no então Departamento de Minas e Georrecursos do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, entre fevereiro de 2010 e maio de 2011. Durante esta bolsa a candidata adquiriu conhecimentos e desenvolveu trabalho na área da deteção remota, direcionada para as imagens óticas, no âmbito do projeto *DesertWatch-Extension*, financiado pela Agência Espacial Europeia (ESA).

Entre junho de 2011 e maio de 2016 a candidata foi bolsista de iniciação à investigação científica no Núcleo de Geodesia Aplicada (NGA) do Departamento de Barragens de Betão (DBB) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), tendo desenvolvido trabalho no LabImagem – Laboratório de Processamento Digital de Imagens, sob a coordenação da Investigadora Principal Ana Fonseca. Participou no projeto RIVERSAR – Exploração de imagens SAR para aperfeiçoar modelos de inundação no rio Tejo (PTDC/CTE-GIX/099085/2008), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do qual desenvolveu um algoritmo para a classificação automática de imagens de satélite da mesma área geográfica adquiridas em épocas diferentes (Roque *et al.*, 2014a). Nas áreas da fotogrametria terrestre e do processamento digital de imagem, colaborou na construção de mapas de patologias e registos gráficos de danos de superfícies, nomeadamente paramentos de barragens de betão, fachadas azulejadas de edifícios e painéis de azulejos.

Desde junho de 2016 é bolsista de doutoramento no NGA/DBB/LNEC. Tem dado seguimento ao trabalho iniciado em 2014, na área da geodesia InSAR, tendo em vista a elaboração do presente plano de tese e o planeamento dos estudos, no âmbito do projeto do P2I do LNEC InfraSAR de suporte à investigação a realizar e ao doutoramento.

## Índice

1	Introdução .....	1
2	Objetivos .....	3
3	Estado da arte .....	5
	3.1 Interferometria SAR .....	5
	3.2 Técnicas multitemporais de InSAR .....	7
	3.3 Refletores artificiais .....	10
	3.4 Sensores .....	13
	3.5 Aplicações das técnicas MTI .....	13
	3.6 Controlo de segurança de estruturas .....	16
4	Enquadramento e justificação do tema .....	20
5	Definição da abordagem teórica e experimental .....	23
6	Planeamento das atividades .....	26
	6.1 Estudos preliminares .....	26
	6.2 Cronograma .....	27
	6.3 Condições para a realização do estudo .....	28
	6.4 Financiamento .....	30
	Referências Bibliográficas .....	32

## Índice de figuras

Figura 3.1 – Aquisição de imagens de radar por satélites (©ESA).....	5
Figura 3.2 – Geometria de aquisição de imagens radar (Fonseca e Fernandes, 2004) .....	6
Figura 3.3 – Exemplo de interferograma (retirado de López-Quiroz <i>et al.</i> , 2009) .....	7
Figura 3.4 – Exemplo de aplicação do algoritmo PSInSAR na medição de deslocamentos na cidade de Vancouver (©Tele-Rilevamento Europa), retirado de Ferretti <i>et al.</i> , 2005 .....	9
Figura 3.5 – Refletor artificial passivo (a) e ativo (b), retirado de Mahapatra (2015).....	12
Figura 3.6 – Exemplo de radar terrestre (Gigli <i>et al.</i> , 2011).....	15
Figura 3.7 – Desvio padrão das posições relativas nas suas componentes tridimensionais (dN, dE e dh) em função da duração da sessão de observação, para uma base de 325 m, adaptado de Lima <i>et al.</i> (2015).....	19
Figura 6.1 – Deslocamentos observados com PSI e com nivelamento geométrico para um ponto no coroamento da barragem dos Álamos I.....	26
Figura 6.2 – Mapa de velocidade média dos deslocamentos de dispersores persistentes na Baixa de Lisboa (Roque <i>et al.</i> , 2014b) .....	27
Figura 6.3 – Cronograma das tarefas .....	27
Figura 6.4 – Datas das imagens SAR não pertencentes à ESA.....	28

## Índice de quadros

Quadro 3.1 – Equações para determinação do RCS máximo para cada tipo de refletor artificial.....	11
Quadro 3.2 – Exemplos de satélites com sensores SAR a bordo .....	13
Quadro 5.1 – Dados de validação para cada caso de estudo .....	24

## Glossário

---

ALOS – *advanced land observing satellite*

APS – *atmospheric phase screen*

ASAR – *advanced synthetic aperture radar*

ASI – *Agenzia Spaziale Italiana*

BIIC – bolsista de iniciação à investigação científica

CAT – *compact active transponder*

CIGeoE – Centro de Informação Geoespacial do Exército

CREL – Circular Regional Exterior de Lisboa

DBB – Departamento de Barragens de Betão

DGT – Direção Geral do Território

DInSAR – *differential interferometric synthetic aperture radar*

DLR – *Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt*

EDIA – Empresa para o Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva

EDP – Energias de Portugal

ERS – *European remote sensing satellite*

ESA – *European Space Agency*

FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia

GB-InSAR – *ground-based interferometric synthetic aperture radar*

GNSS – *global navigation satellite system*

InSAR – *interferometric synthetic aperture radar*

IST-UL – Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

JAXA – *Japan Aerospace Exploration Agency*

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LOS – *line-of-sight*

MDS – modelo digital de superfície

MTI – *multi-temporal interferometric synthetic aperture radar*

NGA – Núcleo de Geodesia Aplicada

PALSAR – *phased array type L-band synthetic aperture radar*

PSI – *persistent scatterers interferometry*

PSInSAR – *permanent scatterers interferometric synthetic aperture radar*

QPS – *quasi-permanent scatterers*

RCS – *radar cross section*

SAR – *synthetic aperture radar*

SBAS – *small baseline subset*

StaMPS – *Stanford method for persistent scatterers*

VANT – *veículo aéreo não tripulado*



# 1 | Introdução

O presente documento contém o plano de estudos para a tese de doutoramento da bolsista Dora Luísa Ferreira da Luz Roque, do Núcleo de Geodesia Aplicada (NGA) do Departamento de Barragens de Betão (DBB) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

O tema da tese será “Determinação de deslocamentos com geodesia InSAR para o controlo de segurança de estruturas” e terá como objetivo complementar os sistemas de observação de estruturas com deslocamentos obtidos a partir de imagens de satélite. Para além de complementar os sistemas já existentes, pretende-se também criar novos sistemas de observação para as áreas de estudo onde estes não estejam definidos. A geodesia InSAR é uma técnica de geodesia aplicada, que permite a medição de deslocamentos com precisão milimétrica na superfície terrestre através de dados adquiridos por sensores que operam na banda das micro-ondas do espectro eletromagnético. No trabalho proposto apenas serão consideradas imagens adquiridas por sensores transportados por satélites. A inclusão de dados obtidos por satélite nos sistemas de observação tradicionais, baseados na medição de deslocamentos através de equipamentos instalados nas estruturas e métodos geodésicos com localizações pontuais, permitirá aumentar a densidade de pontos da rede de observação e a frequência de observação. Os dados obtidos por satélite permitem uma análise quase contínua da superfície terrestre, não estando limitada apenas à estrutura, mas abrangendo também a sua envolvente, que raramente é monitorizada através de outras técnicas, nomeadamente nas zonas de difícil acesso. A utilização destes dados permite, ainda, o acompanhamento remoto dos deslocamentos nas regiões de interesse, sem a necessidade de realizar deslocações ao local, e pode contribuir para os sistemas de aviso e alerta. Uma vez detetada uma zona potencialmente instável através da geodesia InSAR, podem ser despoletadas campanhas de observação *in situ*. As observações obtidas através das imagens podem também ser utilizadas como informação de apoio para o planeamento destas campanhas, dada a possibilidade de efetuar análises regionais, que permitem conhecer *a priori* a extensão do fenómeno a monitorizar e quais as zonas mais afetadas. Em relação ao aumento da frequência de observação, é possível obter deslocamentos a cada passagem do satélite, com a mesma geometria de aquisição de imagem, pela mesma área geográfica. Os satélites atualmente em órbita garantem observações quinzenais. Através deste método torna-se também possível a análise de deslocamentos ocorridos no passado graças ao acesso a imagens históricas arquivadas.

A Agência Espacial Europeia (*European Space Agency* – ESA) foi pioneira na aquisição e disponibilização, de forma gratuita, de imagens de radar de abertura sintética (*synthetic aperture radar* – SAR) a nível global, com o lançamento do satélite ERS-1 (em 1991), ao qual se seguiram o ERS-2 (em 1995) e o Envisat (em 2002), já todos desativados. Em abril de 2014 foi lançado o Sentinel-1A, o primeiro de uma série de quatro satélites cujo lançamento está planeado até 2020, que visa dar continuidade à missão iniciada pelos seus antecessores. Existem outras agências espaciais, nomeadamente as alemã, italiana, japonesa e canadense, que também possuem satélites com

sensores SAR a bordo. No entanto, estas imagens têm custos associados, mas é possível ter acesso gratuito a conjuntos de imagens mediante a aprovação de projetos científicos submetidos a estas agências (conforme relatado em 6.3).

No âmbito da tese serão considerados dois domínios de estudo com tipologias diferentes. O primeiro corresponde à cidade de Lisboa e à sua vizinhança e engloba tanto os edifícios como as vias de comunicação, com especial atenção para a Baixa da cidade e para um troço de 8 km da Circular Regional Exterior de Lisboa (CREL), na zona de Casal de Cambra (concelho de Sintra). O segundo é constituído por barragens de betão e de aterro e pelos taludes adjacentes às respetivas albufeiras, nomeadamente: i) as barragens de betão de Foz Tua e do Baixo Sabor, da EDP – Energias de Portugal; ii) as barragens de aterro do Loureiro, Álamos I, II e III, Amoreira, Serpa, Laje, Ferreira, Penedrão, Cinco Reis e Brinches, da EDIA – Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva, S.A.; e iii) a barragem de aterro de Odelouca, das Águas do Algarve. Especial atenção será dada aos taludes das albufeiras das barragens de Foz Tua e do Baixo Sabor, cujos primeiros enchimentos ocorreram recentemente.

A tese será orientada pela Professora Doutora Ana Paula Falcão, do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (IST-UL) e, no LNEC, pela Investigadora Principal Ana Maria Fonseca e pelo Investigador Coordenador José Vieira de Lemos.

## 2 | Objetivos

O objetivo principal da tese proposta neste documento é promover a operacionalização das técnicas de interferometria com radar de abertura sintética (*interferometric synthetic aperture radar* – InSAR) na obtenção de deslocamentos para o controlo de segurança de obras. As técnicas de InSAR permitem a medição de deslocamentos a uma escala regional (da ordem das dezenas de km<sup>2</sup>), incluindo em locais de difícil acesso.

Com este estudo pretende-se analisar o desempenho de técnicas de processamento multitemporal de InSAR (MTI), em que é utilizado um conjunto de imagens adquiridas em épocas diferentes, para a determinação de deslocamentos em estruturas de tipologias distintas (barragens de betão e de aterro, edifícios e vias de comunicação) e nas respetivas envolventes. Na análise serão consideradas imagens adquiridas por diferentes sensores e, conseqüentemente, com propriedades distintas, nomeadamente a banda das micro-ondas em que a imagem é adquirida, a resolução espacial, a resolução temporal e a geometria de aquisição. Serão ainda testados diferentes algoritmos para processamento MTI. Com os testes realizados, pretende-se efetuar uma análise das possíveis estratégias de processamento e selecionar a mais adequada para cada caso de estudo, tendo em conta a densidade de pontos em que é possível determinar deslocamentos e a incerteza associada a essas medições.

Com o intuito de avaliar a incerteza dos deslocamentos obtidos com InSAR, será construído no LNEC um refletor artificial passivo, isto é, um equipamento que reflète a radiação emitida pelo sensor de forma estável, de acordo com um novo modelo projetado pela candidata. Este refletor será sujeito a deslocamentos predefinidos, de modo a que estes possam ser comparados com os observados através de InSAR e, assim, quantificar a incerteza. Pretende-se avaliar a incerteza associada a diferentes situações, nomeadamente ausência de deslocamentos, deslocamentos lineares e não lineares, ao longo da linha de vista do sensor e em direções diferentes desta. O refletor será composto por dois triedros retangulares com uma aresta comum, com o objetivo de avaliar a possibilidade de combinar observações adquiridas a partir de pontos de vista diferentes e de decompor o deslocamento observado nas suas componentes vertical e horizontal. Dois refletores passivos de um modelo diferente (triedro triangular) foram emprestados pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e pretende-se instalá-los na proximidade do refletor desenvolvido no âmbito da tese, a fim de comparar o desempenho de refletores com propriedades distintas e avaliar a influência do efeito atmosférico na medição de deslocamentos com InSAR para pontos separados por distâncias pequenas (da ordem das centenas de metros).

Outro dos objetivos do trabalho proposto é contribuir para a integração de deslocamentos observados com geodesia InSAR nos sistemas de observação de obras. Pretende-se avaliar o impacto da inclusão de observações obtidas com InSAR nos sistemas já existentes, através da análise da distribuição de erros dos deslocamentos obtidos. Outra finalidade da integração de InSAR com outras técnicas, nomeadamente com o sistema global de navegação por satélite (*global navigation satellite*

*system* – GNSS), é o aumento da densidade espacial e da frequência temporal da rede de observação.

Por fim, pretende-se desenvolver métodos de análise para as séries temporais de deslocamentos obtidas com InSAR para as estruturas e respetiva envolvente, de modo a identificar atempadamente evoluções não esperadas, deslocamentos progressivos e possíveis sinais de instabilidade.

## 3 | Estado da arte

### 3.1 Interferometria SAR

As imagens de satélite permitem aceder remotamente a informação sobre a superfície terrestre e podem ser adquiridas em diferentes frequências do espectro eletromagnético. A radiação da banda das micro-ondas abrange comprimentos de onda entre 1 mm e 1 m e tem várias aplicações em deteção remota. Os radares são sensores ativos de micro-ondas, ou seja, o próprio sensor emite um feixe de radiação eletromagnética em direção à superfície terrestre (Figura 3.1), que depois é refletida pelos elementos da superfície e captada pelo sensor. Estes sensores podem ser instalados noutras plataformas, nomeadamente aéreas, tais como aviões, veículos aéreos não tripulados (VANT) ou terrestres, como estruturas móveis instaladas em carris.



Figura 3.1 – Aquisição de imagens de radar por satélites (©ESA)

O conceito de radar de abertura sintética surgiu na década de 70 do século XX e consiste na simulação de uma antena maior do que a real através da integração das observações de um ponto da superfície terrestre a partir de vários pontos de vista da trajetória da plataforma a partir da qual este é observado. Este método permite obter uma resolução espacial de alguns metros na direção da trajetória da plataforma, bastante melhor do que o obtido com radar de abertura real, em que a resolução depende da dimensão física da antena, que está limitada pelo peso que a plataforma consegue transportar.

A radiação micro-ondas é pouco afetada pela dispersão atmosférica, o que possibilita a observação da superfície terrestre mesmo na presença de nuvens. Os radares são independentes da luz solar, uma vez que é o próprio sensor que emite a radiação, pelo que a aquisição de imagens pode ser efetuada tanto durante o dia como durante a noite. As imagens radar têm duas dimensões, azimute (direção da trajetória da plataforma) e alcance oblíquo (direção da linha de vista do sensor, que é perpendicular à trajetória e oblíqua em relação à superfície terrestre), representadas na Figura 3.2. A

radiação micro-ondas emitida pelo sensor é refletida pelos elementos existentes numa pequena área da superfície terrestre (célula de resolução) e o eco é recebido pelo sensor, ficando registada, na forma de um número complexo, a informação da amplitude e da fase da radiação refletida (Ferretti *et al.*, 2007). As técnicas de InSAR são aplicadas à informação da fase. No caso de ser considerado um único alvo no interior da célula de resolução, a fase da radiação “ $\Phi$ ” pode ser relacionada com a distância “ $R$ ” entre esse alvo e o sensor através da equação (1), onde “ $\lambda$ ” é o comprimento de onda da radiação,

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} R \quad (1)$$

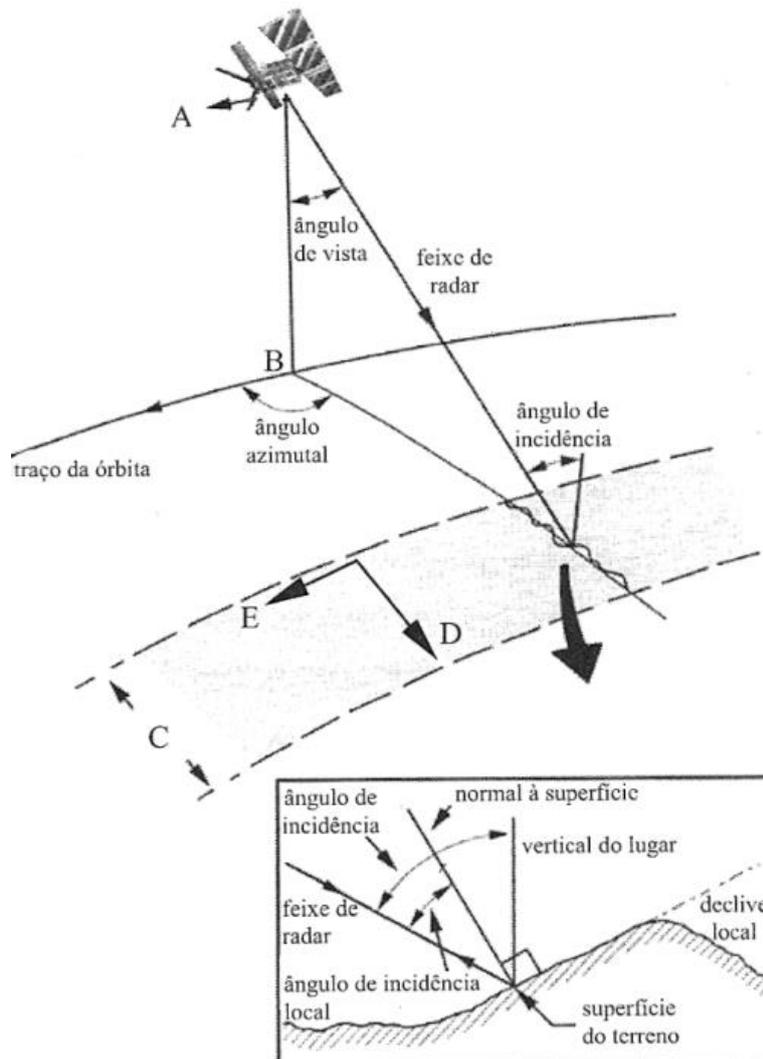


Figura 3.2 – Geometria de aquisição de imagens radar (Fonseca e Fernandes, 2004)

Se a plataforma transportar duas antenas recetoras ou se a mesma antena repetir a passagem pela mesma área geográfica e com a mesma geometria de aquisição, é possível construir uma imagem da diferença de fase entre duas épocas – interferograma (Figura 3.3). Esta técnica é denominada InSAR diferencial (*differential interferometric synthetic aperture radar – DInSAR*).

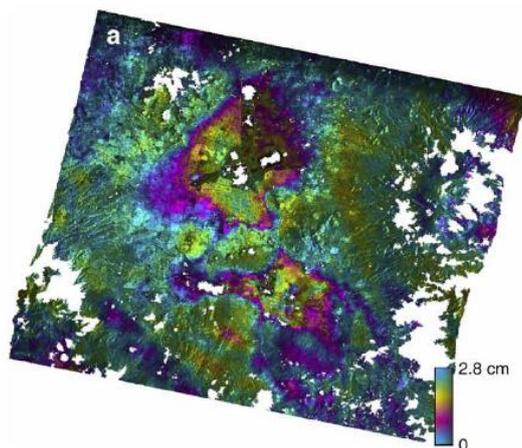


Figura 3.3 – Exemplo de interferograma (retirado de López-Quiroz *et al.*, 2009)

Os valores de diferença de fase obtidos contêm componentes provenientes de várias fontes: topografia, deslocamentos, perturbações da órbita do satélite e influência da atmosfera. As principais aplicações desta técnica são a construção de modelos digitais de superfície (MDS) ou a deteção de deslocamentos na superfície terrestre. As perturbações da órbita do satélite e a componente atmosférica limitam a aplicação desta técnica, não sendo possível diferenciá-los das grandezas pretendidas. Estas limitações implicam que os MDS obtidos através de DInSAR tenham uma precisão da ordem das dezenas de metros e os deslocamentos tenham precisão centimétrica. Outros fatores que limitam a aplicação de DInSAR são as decorrelações espacial e temporal, que se verificam se as imagens forem adquiridas a partir de localizações muito afastadas ou em épocas distantes, respetivamente.

## 3.2 Técnicas multitemporais de InSAR

Tal como no caso do GNSS, em que a diminuição da incerteza inicial foi conseguida através do desenvolvimento de estratégias de processamento dos dados, as limitações do DInSAR apresentadas na secção anterior foram ultrapassadas através das técnicas MTI, em que é considerado um conjunto de imagens com a mesma geometria de aquisição, denominado por pilha interferométrica.

Algumas das técnicas MTI utilizam uma imagem de referência, a imagem mestre, enquanto as restantes imagens são consideradas como imagens escravas. Estas técnicas são denominadas por técnicas de interferometria por dispersores persistentes (*persistent scatterers interferometry* – PSI). A primeira técnica PSI foi desenvolvida no início do século XXI e é denominada interferometria SAR com dispersores permanentes – PSInSAR (Ferretti *et al.*, 2001). A utilização de uma pilha interferométrica, de no mínimo 15 imagens, permite estimar o efeito da atmosfera (*atmospheric phase screen* – APS), uma vez que este tem uma frequência temporal elevada e uma frequência espacial baixa, possibilitando a sua separação das outras componentes da diferença de fase. Nesta técnica apenas são considerados *pixels* que mantêm um comportamento coerente – os dispersores permanentes – em que é assumido que existe um alvo pontual em cada *pixel* com comportamento

refletor que se sobrepõe ao dos restantes elementos (potencial ponto objeto de uma rede de monitorização). A seleção dos *pixels* candidatos a dispersores permanentes é realizada sobre séries temporais de amplitude (magnitude do sinal), em que são identificados aqueles que apresentam um comportamento estável para toda a série temporal considerada. Os candidatos a dispersores permanentes são utilizados para a estimativa do APS através da equação

$$\Delta\Phi = a1^T + p_\xi \cdot \xi^T + p_\eta \cdot \eta^T + B_p \cdot \Delta q^T + B_t \cdot v^T + E \quad (2)$$

onde: “ $\Delta\Phi$ ” é a fase interferométrica após a subtração da componente devida à topografia; “ $a1$ ”, “ $p_\xi$ ” e “ $p_\eta$ ” são as componentes atmosféricas; “ $B_p$ ” é a distância entre os dois pontos de aquisição de imagem medida na direção perpendicular à linha de vista da imagem mestre (base perpendicular); “ $\Delta q$ ” é o erro do MDS; “ $B_t$ ” é o intervalo de tempo entre a aquisição das duas imagens (base temporal); “ $v$ ” é a velocidade linear dos candidatos a dispersores permanentes ao longo da linha de vista do sensor; e “ $E$ ” são os resíduos.

A equação (2) não é linear, pois “ $\Delta\Phi$ ” é a fase interferométrica enrolada, que corresponde a um valor entre  $-\pi$  e  $\pi$ . A equação tem de ser resolvida de forma iterativa, para obter univocamente a fase (desenrolada), sendo a convergência do algoritmo dependente da inexistência de lacunas nos dados, da exatidão do MDS de referência, das dimensões da área de estudo (das quais depende a linearidade do APS e das perturbações orbitais) e do facto de os deslocamentos serem modelados como sendo lentos e com velocidade constante. Para a equação (2) ser linear, seria necessário substituir a fase interferométrica enrolada pela desenrolada, obtida através da equação (3), onde “ $n$ ” é o número inteiro de ciclos que a radiação completou na sua trajetória, o qual não é conhecido.

$$\Delta\Phi^{desenrolada} = \Delta\Phi^{enrolada} + 2n\pi \quad (3)$$

A partir dos resíduos da equação (2) é possível obter as perturbações atmosféricas através de um filtro, dado que existe uma elevada correlação espacial da componente atmosférica para distâncias pequenas. A exatidão do resultado depende do número de imagens, da densidade dos candidatos a dispersores permanentes e da robustez da estimativa da fase interferométrica. O APS é interpolado para todos os *pixels* da imagem e subtraído à fase interferométrica. Desta forma, o erro do MDS e a velocidade dos deslocamentos ao longo da linha de vista do sensor (*line of sight* – LOS) podem ser determinados para um elevado número de *pixels* (os dispersores permanentes) através da maximização da coerência temporal,  $|\zeta|$  (equação 4), onde se mantém a notação anterior e “ $M$ ” é o número de interferogramas, “ $\phi_m$ ” é o valor de fase do interferograma diferencial “ $m$ ” relativo a um *pixel* genérico depois da remoção do APS, “ $\lambda$ ” é o comprimento de onda da radiação, “ $R$ ” é a distância entre o sensor e o alvo e “ $\alpha$ ” é o ângulo de incidência da radiação.

$$arg \max_{\Delta q, v} \left\{ |\zeta| = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M e^{j\phi_m} \cdot e^{-j\left(\frac{4\pi}{\lambda R \sin \alpha} B_{p_m} \Delta q + \frac{4\pi}{\lambda} B_{t_m} v\right)} \right\} \quad (4)$$

A Figura 3.4 apresenta um exemplo de aplicação do algoritmo PSInSAR na medição de deslocamentos na cidade canadiana de Vancouver.

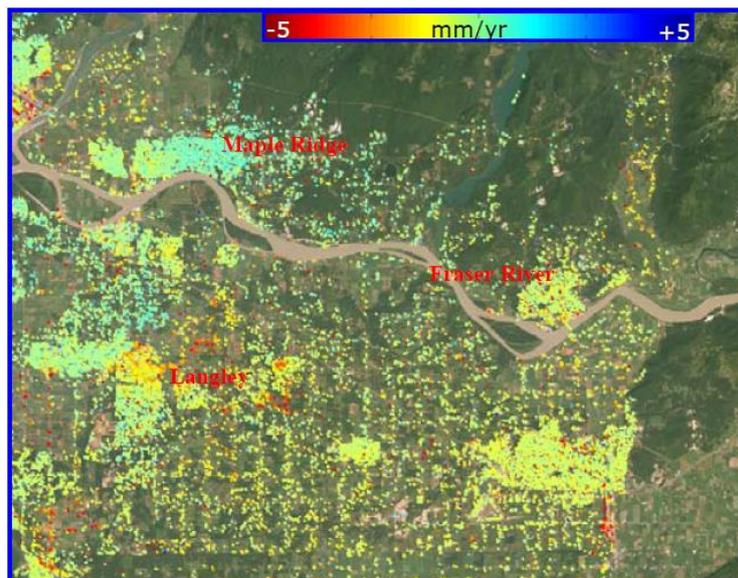


Figura 3.4 – Exemplo de aplicação do algoritmo PSInSAR na medição de deslocamentos na cidade de Vancouver (©Tele-Rilevamento Europa), retirado de Ferretti *et al.*, 2005

Outras técnicas PSI surgiram para resolver limitações do PSInSAR como, por exemplo, o método de Stanford para dispersores persistentes (StaMPS). Este algoritmo considera o facto de os deslocamentos serem correlacionados no tempo e no espaço, a atmosfera ser correlacionada no espaço mas não no tempo e do ruído não ser correlacionado nem no espaço nem no tempo, para separar as componentes da fase relativas aos deslocamentos e à atmosfera através de filtros aplicados aos candidatos a dispersores persistentes. O resíduo obtido para a fase após a remoção das componentes anteriores contém o erro do MDS, que é posteriormente modelado e retirado à fase. Os resíduos resultantes correspondem ao ruído, cuja medida é utilizada para avaliar se os pontos cumprem os requisitos para serem considerados como dispersores persistentes (Hooper *et al.*, 2012).

Têm também sido desenvolvidas técnicas MTI que não consideram apenas uma imagem mestre para a série temporal, como é o caso do *Small Baseline Subset* – SBAS. Esta técnica considera apenas interferogramas construídos a partir de pares de imagens com bases perpendiculares pequenas, com o objetivo de diminuir a decorrelação espacial. O algoritmo efetua uma seleção de *pixels*, realizando o desenrolar da fase apenas sobre pontos com coerência espacial acima de um determinado limiar, cujos resultados são utilizados para fazer uma interpolação para os restantes *pixels*. Sobre o primeiro desenrolar da fase são estimadas as componentes da fase correspondentes à frequência baixa dos deslocamentos e ao erro do MDS. Estas duas componentes são subtraídas aos interferogramas originais, que são sujeitos a uma nova operação de desenrolar da fase, mais refinada que a anterior. A soma dos interferogramas desenrolados com as componentes do deslocamento e do erro do MDS permite obter os interferogramas finais onde é aplicada uma decomposição de valor singular para obter o vetor da velocidade dos deslocamentos. No entanto, esta componente da fase ainda está afetada pelo efeito atmosférico, que é estimado através da aplicação de um filtro passa-baixo espacial e um filtro passa-alto temporal, sendo depois removido ao resultado (Berardino *et al.*, 2002).

A utilização de quasi-dispersores permanentes (*quasi-permanent scatterers* – QPS) permite efetuar estimativas de altitude e de velocidade linear para pontos à superfície terrestre parcialmente coerentes (Perissin e Wang, 2011a), ou seja, ao contrário da técnica do PSInSAR, que requer que o ponto seja coerente em todas as imagens, no QPS é suficiente que o ponto apresente coerência apenas num subconjunto de imagens. Em vez de utilizar só uma imagem mestre, a técnica do QPS considera o conjunto de interferogramas que permite ligar todas as imagens do conjunto e, simultaneamente, maximiza a coerência espacial (coeficiente de correlação cruzada normalizado) para um determinado conjunto de dispersores. Para cada dispersor é selecionado um subconjunto de interferogramas através da coerência espacial, que é calculada através da equação (5), onde “ $\gamma_p^{i,j}$ ” é a coerência espacial no *pixel* “p” para o interferograma obtido das imagens “i” e “j”, “ $viz(p)$ ” é uma vizinhança do *pixel* “p”, “ $s_i$ ” é o valor (número complexo) do *pixel* na imagem “i”, “ $s_j$ ” é o valor do *pixel* na imagem “j” e “\*” é o conjugado de um número complexo.

$$\gamma_p^{i,j} = \frac{\sum_{viz(p)} s_i s_j^*}{\sqrt{\sum_{viz(p)} |s_i|^2 \sum_{viz(p)} |s_j|^2}} \quad (5)$$

Para aumentar o quociente entre o sinal e o ruído, é aplicado um filtro que diminui a resolução das imagens e atribui o valor médio dos *pixels* originais ao *pixel* novo. Desta forma, a estimativa da altitude e da velocidade linear de cada QPS é realizada através da maximização de uma nova expressão para a coerência temporal, em que a coerência espacial é utilizada como peso, apresentada na equação (6), onde se mantém a notação anterior.

$$\arg \max_{\Delta q, v} \left\{ \zeta = \frac{\sum_{m=1}^M |\gamma_p^{i,j}| \cdot e^{-j \left( \frac{4\pi}{\lambda R \sin \alpha} B p_m \cdot \Delta q + \frac{4\pi}{\lambda} B t_m \cdot v \right)}}{\sum_{m=1}^M |\gamma_p^{i,j}|} \right\} \quad (6)$$

As técnicas MTI resumidas em cima, ao possibilitarem a mitigação do efeito atmosférico, permitem a estimativa da altitude com precisão métrica e da velocidade linear de deslocamentos com precisão de 1 mm/ano para um número elevado de dispersores na superfície terrestre.

### 3.3 Refletores artificiais

As técnicas MTI dependem da oportunidade da existência de dispersores na zona a monitorizar, ou seja, não é possível controlar a localização destes. Os dispersores persistentes correspondem a pontos que mantêm um comportamento refletor das micro-ondas total ou parcialmente coerente ao longo do intervalo de tempo considerado e, normalmente, correspondem a objetos construídos pelo Homem, tais como edifícios ou postes de iluminação. Os elementos que cumprem os requisitos para dispersores persistentes encontram-se com maior frequência em áreas urbanas, enquanto várias estruturas que representam risco para as populações, tais como barragens ou reservatórios de substâncias perigosas estão localizadas em zonas campestres, onde o número de dispersores persistentes é, geralmente, baixo. Vários autores sugerem a utilização de refletores artificiais passivos para ultrapassar esta limitação (Ye *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2012; Ge *et al.*, 2011; Qin *et al.*, 2013; Xing *et al.*, 2013). Os refletores artificiais passivos são estruturas metálicas, que podem ter a forma de diedros ou triedros (Figura 3.5a), cujo eixo deve ser alinhado com a LOS, de modo a que, a

cada passagem do satélite, o sinal emitido seja refletido na direção deste. Desta forma, o refletor artificial apresenta um comportamento coerente em todas as imagens, garantindo a existência de um dispersor persistente na localização pretendida.

Um dos aspetos mais importantes da utilização de refletores artificiais é a sua orientação, em que alguns modelos são mais tolerantes em relação ao erro deste parâmetro do que outros. De acordo com Li *et al.* (2012), o triedro quadrangular é o menos tolerante ao erro de orientação, enquanto o triedro triangular é o mais tolerante. O eixo do triedro deve ter em conta o ângulo de incidência da radiação e o azimute da LOS, “ $\beta$ ”, que é determinado pela equação (7), onde “ $\alpha$ ” é a inclinação do plano orbital do satélite e “ $\varphi$ ” é a latitude do lugar (Ye *et al.*, 2004).

$$\beta = \arcsen\left(\frac{\cos \alpha}{\cos \varphi}\right) \quad (7)$$

O rigor na orientação é indispensável para que o sinal seja refletido com a amplitude máxima possível, ou seja, para que seja obtido o máximo da secção cruzada do radar (*radar cross section – RCS*). Entre os tipos de refletores possíveis, o triedro quadrangular é o que tem maior valor de RCS e o triedro triangular é o que tem menor valor.

O Quadro 3.1 apresenta as equações (8), (9) e (10) para determinar o RCS para cada um dos casos, onde “ $a$ ” é o comprimento do lado e “ $\lambda$ ” é o comprimento de onda da radiação (Qin *et al.*, 2013). As desvantagens deste modelo de refletores são a sua dimensão elevada (um triedro triangular para a banda C deve ter uma aresta de 1 m), a sensibilidade à orientação e o seu custo.

**Quadro 3.1 – Equações para determinação do RCS máximo para cada tipo de refletor artificial**

Refletores	RCS máximo (m <sup>2</sup> )
Triedro triangular	$\frac{4\pi a^4}{3\lambda^2}$ (8)
Diedro retangular	$\frac{8\pi a^4}{\lambda^2}$ (9)
Triedro quadrangular	$\frac{12\pi a^4}{\lambda^2}$ (10)

Recentemente surgiram refletores artificiais ativos (*compact active transponders – CAT*), que são equipamentos de pequenas dimensões com antenas que recebem o sinal emitido pelo sensor, amplificam-no e transmitem-no de volta (Figura 3.5b). Estes equipamentos também são específicos para uma determinada banda das micro-ondas e para poupar energia estão programados para estar inativos e apenas serem ativados quando o sensor se aproxima (Mahapatra, 2015).



Figura 3.5 – Refletor artificial passivo (a) e ativo (b), retirado de Mahapatra (2015)

A fim de garantir que o refletor artificial (passivo ou ativo) é visível nas imagens, é necessário assegurar que existe contraste suficiente entre este e a sua envolvente e que os vários refletores não ficam alinhados na mesma linha ou coluna das imagens (Quin e Loreaux, 2013).

Independentemente de os dispersores persistentes serem naturais ou artificiais, as técnicas MTI apenas permitem monitorizar deslocamentos ao longo da LOS, o que implica que, no caso de o deslocamento ocorrer na direção perpendicular a esta, não é possível proceder à sua identificação. Os satélites que transportam sensores SAR têm órbitas quasi-polares, ou seja, a sua trajetória tem aproximadamente a direção norte-sul, e os sensores emitem a radiação na direção perpendicular à órbita. Deste modo, não é possível detetar deslocamentos na direção norte-sul através das técnicas MTI. Além disso, a partir de apenas uma pilha interferométrica, também não é possível separar as componentes vertical e este-oeste do deslocamento, uma vez que seriam precisos pelo menos duas observações de deslocamentos para o mesmo ponto e no mesmo intervalo de tempo. A relação entre o deslocamento observado ao longo da LOS e o deslocamento nas suas componentes tridimensionais é expressa pela equação (11), onde “ $d_{LOS}$ ” é o deslocamento ao longo da LOS, “ $d_v$ ” é o deslocamento na direção vertical, “ $d_P$ ” e “ $d_M$ ” são os deslocamentos no plano cartográfico na direção da distância à perpendicular e na direção da distância à meridiana, respetivamente, “ $\theta$ ” é o ângulo de incidência da radiação e “ $\delta$ ” é o rumo da órbita do satélite (Dentz *et al.*, 2006).

$$d_{LOS} = d_v \cdot \cos \theta - \text{sen } \theta \left[ d_P \cos \left( \delta - \frac{3\pi}{2} \right) + d_M \sin \left( \delta - \frac{3\pi}{2} \right) \right] \quad (11)$$

A eficácia dos algoritmos de técnicas MTI depende da capacidade em separar todas as componentes da fase interferométrica. Assim, se o modelo para a velocidade considerar apenas deslocamentos lineares para uma área de estudo onde esse comportamento não se verifique, a velocidade dos dispersores persistentes será mal determinada, uma vez que a componente não linear do deslocamento não será diferenciada do efeito atmosférico. Existem algoritmos que permitem diferenciar os deslocamentos não lineares do efeito atmosférico, no entanto estes conduzem a bons resultados apenas em pilhas interferométricas com um elevado número de imagens adquiridas com uma frequência regular, o que é difícil de conseguir, nomeadamente para os dados disponibilizados gratuitamente.

### 3.4 Sensores

A preocupação com o tempo de revisita dos sensores SAR a uma determinada área geográfica tem aumentado entre as agências espaciais responsáveis pela aquisição destes dados de observação da Terra, uma vez que as imagens de satélite (e principalmente as imagens SAR com a sua capacidade de aquisição a qualquer hora do dia e em quaisquer condições atmosféricas) são uma boa fonte de informação para auxiliar em casos de emergência. Desta forma, as agências espaciais têm desenvolvido constelações de satélites, como é o caso da agência espacial alemã (DLR), que possui os satélites TerraSAR-X e TanDEM-X, e da agência espacial italiana (ASI), que dispõe de quatro satélites COSMO-SkyMed. As imagens captadas pelos sensores da ESA são disponibilizadas gratuitamente aos cidadãos. As imagens das restantes agências espaciais são comercializadas. O Quadro 3.2 apresenta as características de alguns dos satélites com sensores SAR a bordo. Alguns destes já foram desativados, mas continua a ser possível aceder ao histórico de imagens.

**Quadro 3.2 – Exemplos de satélites com sensores SAR a bordo**

Agência	Satélite	Banda	Resolução temporal (dias)	Início da atividade	Fim da atividade
ESA	ERS-1	C	35	1991	2000
	ERS-2	C	35	1995	2011
	Envisat	C	35	2002	2012
	Sentinel-1A	C	12	2014	-
DLR (Alemanha)	TerraSAR-X	X	11	2007	-
ASI (Itália)	COSMO-SkyMed	X	16	2007	-
JAXA (Japão)	ALOS-2	L	14	2014	-

### 3.5 Aplicações das técnicas MTI

A capacidade das técnicas MTI para a monitorização de deslocamentos em áreas geográficas extensas torna-as adequadas para estudos de geodinâmica. Uma das aplicações mais frequentes das técnicas de interferometria SAR é a monitorização de falhas sísmicas, normalmente através de

DInSAR, sendo possível identificar comportamentos característicos de cada uma das fases do ciclo sísmico. A acumulação lenta de tensões na vizinhança da falha antes da ocorrência do sismo origina movimentos lentos à superfície terrestre que podem ser monitorizados através de interferogramas obtidos a partir de imagens adquiridas em datas em que se verifica uma concentração baixa de vapor de água na atmosfera (para minimizar o efeito do APS) e perturbações orbitais pequenas. Alternativamente pode ser utilizado um conjunto de interferogramas com mais descorrelação, mas associado a outras técnicas, como o GNSS, para individualizar os deslocamentos. Os deslocamentos permanentes causados pelo sismo podem ser detetados através de imagens adquiridas antes e depois do evento, permitindo a análise da geometria e da dimensão da rotura. A resposta da litosfera às tensões impostas pelo sismo pode durar vários anos e caracteriza-se por deslocamentos mais rápidos do que os que ocorrem antes do sismo, que também podem ser monitorizados através de técnicas MTI. As maiores dificuldades para esta aplicação estão relacionadas com a baixa resolução temporal das imagens, sendo rara a existência de imagens adquiridas imediatamente após o sismo (Salvi *et al.*, 2012).

Dado que a linha de vista dos sensores SAR é relativamente próxima da vertical do lugar, esta tecnologia é bastante eficaz para monitorizar deslocamentos verticais, logo a subsidência é um dos fenómenos mais estudados através das técnicas MTI. Têm sido realizados estudos sobre este tema para várias cidades, por exemplo para a cidade do México (Osmanoglu *et al.*, 2011) e de Los Angeles (Zhang *et al.*, 2012), com velocidades de subsidência máxima de 300 mm/ano e 16 mm/ano, respetivamente. As causas do fenómeno podem estar relacionadas com a extração de água subterrânea, extração de petróleo e gás natural ou movimento do terreno na proximidade de falhas geológicas. A técnica dos dispersores persistentes já foi aplicada a imagens da cidade de Lisboa (Heleno *et al.*, 2011), num estudo realizado com a colaboração do LNEC, tendo sido detetadas duas zonas de subsidência. Uma das zonas está localizada nas Laranjeiras e apresentou velocidade máxima de subsidência de 12 mm/ano entre 1992 e 2006, enquanto a outra situa-se em Vialonga, com velocidade máxima de subsidência, para o mesmo intervalo de tempo, de 14 mm/ano. O fenómeno pode estar relacionado com a extração de água subterrânea e com a proximidade a falhas geológicas que funcionam como barreiras hidráulicas.

Os deslizamentos de terras em encostas e taludes também são fenómenos cuja análise pode ser efetuada com recurso às técnicas MTI, embora neste caso seja recomendável a utilização de radares terrestres (*ground-based InSAR* – GB-InSAR) em vez dos sensores transportados em satélites. Este equipamento desloca-se sobre carris, que são colocados na vizinhança da encosta ou talude que se pretende monitorizar, sendo a aquisição de imagens repetida sempre a partir dos mesmos pontos de vista, com uma resolução temporal de alguns minutos (Figura 3.6). Deste modo é possível avaliar os deslocamentos não só com resolução temporal elevada, mas também com boa resolução espacial, uma vez que a distância entre o sensor e os objetos é relativamente pequena. À semelhança dos sensores SAR localizados em plataformas espaciais, também o GB-InSAR apenas mede deslocamentos ao longo da LOS, sendo necessário ter este aspeto em atenção aquando da seleção do local para a instalação do equipamento. A análise da velocidade e da aceleração dos

deslocamentos permite “prever” a ocorrência de deslizamentos com algum tempo de antecedência (Mazzanti *et al.*, 2014).



Figura 3.6 – Exemplo de radar terrestre (Gigli *et al.*, 2011)

Nos últimos anos têm surgido diversos trabalhos relativos à aplicação de técnicas MTI na monitorização de estruturas, tais como edifícios, vias de comunicação e barragens. Di Martire *et al.* (2014) utilizaram 51 imagens Envisat ASAR para monitorizar uma barragem de aterro localizada numa zona de sismicidade elevada, tendo obtido deslocamentos concordantes com os observados através de equipamentos instalados na obra, em que se confirmou que os deslocamentos são mais acentuados nos primeiros anos após a construção. As técnicas MTI foram aplicadas à monitorização de áreas urbanas e das obras do projeto *Three Gorges*, na China, tanto à barragem como à sua envolvente (Perissin e Wang, 2011b). Dos pontos identificados na barragem, os autores inferiram que esta apresentava um comportamento estável, à exceção de um pequeno deslocamento, possivelmente devido à pressão da água da albufeira. Além disso, foram identificadas zonas de subsidência nas margens, que podem ter sido causadas pelo desvio de águas subterrâneas aquando da construção das infraestruturas de apoio à barragem. Sausse *et al.* (2015) apresentam o resultado de um estudo realizado com InSAR para os taludes na vizinhança de uma barragem onde se verificou a existência de um deslizamento de terras confirmado através de estudos geológicos. Herrera *et al.* (2010) analisaram os edifícios de um hospital com imagens TerraSAR-X e observaram velocidades de subsidência mais elevadas em zonas onde havia fissuras, tendo conseguido relacionar esses valores com diferentes tipos de fundações dos edifícios. Fornaro *et al.* (2013) analisaram a estrutura de uma ponte através das medições dos deslocamentos causados pela dilatação térmica através de imagens TerraSAR-X.

Sausse *et al.* (2015) apontam como vantagens da utilização do InSAR para a medição de deslocamentos o facto de não ser necessário ter instrumentação no local de estudo, a baixa sensibilidade às condições meteorológicas, a capacidade de fornecer dados a nível regional, a possibilidade de analisar o comportamento passado das áreas de interesse com imagens de arquivo e a continuidade da aquisição de imagens assegurada pelo lançamento de novos satélites. As limitações indicadas pelos mesmos autores são o facto de o nível de incerteza não estar bem definido, a impossibilidade de realizar processamentos em tempo real (devido à complexidade e

necessidade de adaptação dos algoritmos a cada caso de estudo), a necessidade de utilizar um número de imagens elevado, apenas ser possível observar os deslocamentos ao longo da LOS e a influência que a presença de vegetação e a orientação da superfície têm no número de dispersores.

### 3.6 Controlo de segurança de estruturas

A segurança de uma estrutura é “a capacidade de satisfação de exigências de comportamento” durante a sua vida (Pedro e Florentino, 1989). Existem dois tipos de eventos que podem influenciar esta capacidade, sendo denominados acidentes os que podem originar a rotura da estrutura, enquanto os incidentes são anomalias que podem perturbar o funcionamento desta, mas não são suficientes para provocar a sua rotura. As “consequências não controladas” da ocorrência de acidentes ou incidentes são o risco potencial da estrutura, que apresenta três graus: baixo, significativo e elevado. O risco potencial é considerado baixo quando não há vidas humanas em perigo e os eventuais custos materiais são baixos. O grau significativo é atribuído a situações em que pode haver perda de algumas vidas humanas e os custos materiais são já consideráveis. O risco potencial é elevado se um número significativo de vidas humanas estiver em risco e os custos materiais forem elevados (Pedro e Florentino, 1989).

O controlo de segurança de estruturas é o processo de determinar e acompanhar a integridade da estrutura e identificar a existência, localização e severidade dos danos (Chang *et al.*, 2003; Vanik *et al.*, 2000). Tem como objetivos conhecer as características e o comportamento das estruturas, assim como a sua evolução, a fim de detetar atempadamente fenómenos que possam originar anomalias e agir de modo a corrigir ou minimizar as suas consequências (Pedro e Florentino, 1989). A monitorização contínua da integridade estrutural é um instrumento fundamental do controlo de segurança de obras (Vanik *et al.*, 2000), de modo a permitir a identificação de danos numa fase ainda inicial do seu desenvolvimento, o que tem vantagens económicas e de segurança (Farrar e Worden, 2007). Existem duas abordagens para realizar esta operação: a global e a local. O controlo de segurança global pode apoiar-se na análise de deslocamentos, velocidades e alterações, bem como das frequências próprias e das formas dos modos de vibração (utilizado no caso de edifícios, pontes e barragens). Contudo, este método não permite saber nem a localização nem a extensão dos danos. Outra limitação dos métodos globais é o facto de as observações poderem ser afetadas por alterações da temperatura e da humidade do ar (Chang *et al.*, 2003). Vanik *et al.* (2000) utilizam probabilidade Bayesiana para avaliar a incerteza dos métodos globais de controlo de segurança de obras. A fim de localizar o dano e avaliar a sua extensão, são utilizados métodos locais, não destrutivos, que podem ser, por exemplo, ultrassons. As desvantagens destes métodos são o facto de serem demorados, terem custos elevados e a necessidade de aceder fisicamente aos locais que se pretende avaliar (Chang *et al.*, 2003). A utilização de sensores de fibra ótica pode ser vantajosa, tanto em termos de durabilidade e versatilidade, como economicamente, dados os baixos custos de produção (Mita, 1999).

De acordo com Farrar *et al.* (2004), o controlo de segurança de estruturas pode ser dividido em quatro fases. A primeira é a avaliação operacional, que consiste na análise das razões que tornam

necessária a avaliação de uma determinada estrutura e as condições de operação desta. Pretende-se, durante esta fase, definir o tipo de danos que poderão afetar o desempenho da estrutura e identificar as condições operacionais e ambientais em que esta funciona, as limitações que essas condições representam para a aquisição de dados e as razões económicas e de segurança para realizar a sua monitorização. A segunda fase é a aquisição de dados, a sua fusão e filtragem. Para a aquisição de dados são considerados aspetos como a seleção do tipo de sensores a utilizar, onde estes devem ser instalados, o seu número, o método para transmissão de dados e com que frequência a recolha de informação deve ocorrer. Como os dados são recolhidos em diferentes condições e a partir de um número elevado de sensores, é necessário normalizá-los e integrar as observações provenientes de diferentes fontes a fim de obter dados correlacionáveis. Normalmente são aplicados filtros aos dados para aumentar a sua fiabilidade. A terceira fase é a identificação de variáveis e condensação da informação, que consiste na identificação das variáveis observadas pelos sensores que fornecem informação sobre a ocorrência de danos e permitem distinguir entre estruturas danificadas e não danificadas (Farrar *et al.*, 2004). Devem ser considerados os vários cenários de risco que se podem verificar ao longo da vida da obra e os riscos potenciais associados a cada um deles. As variáveis a monitorizar são selecionadas com base nos cenários de risco (Pedro e Florentino, 1989). A seleção de variáveis também pode ser realizada através de simulações, em que danos semelhantes aos que podem ocorrer na estrutura real são simulados através de ferramentas numéricas, tal como modelos de elementos finitos, e é verificada a influência que esses danos causam nas variáveis adquiridas com os sistemas de observação propostos (Farrar e Worden, 2007). A quarta fase é o desenvolvimento de modelos estatísticos para verificar se as alterações nas variáveis selecionadas durante a terceira fase são estatisticamente significativas. Estes modelos estão divididos em duas categorias: modelos supervisionados e modelos não supervisionados. Os modelos supervisionados são utilizados quando existem dados relativos às estruturas com e sem danos. A análise da resposta da superfície, redes neuronais e algoritmos genéticos são exemplos destes modelos. Os modelos não supervisionados são aplicados quando não existem dados relativos a estruturas danificadas e consistem na análise de *outliers* (Farrar *et al.*, 2004). Com a aplicação destes métodos pretende-se obter informação relativa à existência e localização dos danos, através dos métodos não supervisionados, e o seu tipo, extensão e o tempo de vida útil da estrutura com métodos supervisionados (Farrar e Worden, 2007).

No caso particular das barragens, o controlo de segurança deve considerar não apenas a estrutura, mas todos os elementos relacionados com a obra e a sua exploração, nomeadamente a albufeira, os taludes, tomadas de água, descarregadores, a fundação e a zona a jusante. O processo de controlo de segurança deve ser efetuado durante todas as fases da vida da estrutura: o projeto, a construção, o primeiro enchimento da albufeira, a exploração e o seu abandono. Durante a fase do projeto é importante prescrever a qualidade dos materiais e das técnicas de construção, para assegurar os resultados dos estudos realizados. O sistema de observação da barragem deve ser instalado durante a construção, devendo ser realizada a aquisição de dados iniciais que sirvam de referência para as fases posteriores. O primeiro enchimento da albufeira é a fase que apresenta habitualmente maior risco e durante a qual devem ser efetuadas observações e inspeções visuais com maior frequência,

que são comparadas com modelos de previsão construídos a partir dos dados disponíveis das fases de projeto e construção. Numa fase inicial da exploração devem ser realizadas observações a fim de caracterizar o comportamento da obra. A deteção de anomalias deve ser realizada por comparação com os modelos definidos anteriormente. Quando a barragem atinge o fim do seu tempo de vida o abandono e conseqüente demolição devem ser acompanhados com observações, a fim de garantir a segurança de todos os elementos da estrutura ao longo do processo (Pedro e Florentino, 1989).

Os sistemas de observação consistem num conjunto de equipamentos que têm como objetivo a observação de variáveis necessárias ao controlo de segurança estrutural. Para barragens de betão com altura maior que 50 m, as variáveis correntemente observadas são o nível da água da albufeira, a temperatura do ar, a temperatura do betão, as subpressões na fundação, os caudais drenados e infiltrados, os deslocamentos horizontais e verticais, os movimentos nas juntas entre blocos e fissuras, as rotações, as extensões, as tensões e as características dos materiais. A última variável pode ser determinada em laboratório, enquanto as restantes são observadas *in situ*. As mais importantes são os deslocamentos, as subpressões e os caudais drenados (Pedro e Florentino, 1989).

Os deslocamentos horizontais e verticais podem ser observados através de métodos geodésicos para um conjunto de pontos objeto localizados na barragem (Casaca *et al.*, 2009a) ou nos taludes (Casaca *et al.*, 2009b). Pretende-se determinar os deslocamentos nestes pontos com incerteza submilimétrica. É observado um subconjunto das grandezas geométricas associadas aos pontos da rede de observação geodésica, tais como desníveis, ângulos azimutais e distâncias. As diferenças entre observações obtidas em épocas diferentes possibilitam a determinação dos deslocamentos dos pontos objeto e de fatores de variância. Os deslocamentos são relativos a um conjunto de pontos considerados fixos, que formam o quadro de referência local e que são selecionados tendo em conta informação geotécnica. Os equipamentos utilizados nas observações são teodolitos, distanciómetros eletromagnéticos e níveis. Os erros que afetam as observações são erros sistemáticos ou instrumentais, dependentes da calibração do equipamento, ou erros ambientais, como a refração atmosférica (Casaca, 2001; 2009a; 2009b).

Os métodos de posicionamento por satélite também têm sido utilizados no LNEC para a medição de deslocamentos em barragens (Lima, 2015a). O GNSS permite efetuar observações em quaisquer condições atmosféricas e a qualquer hora do dia. À semelhança dos métodos geodésicos clássicos, para obter medições com a precisão requerida, também é necessária uma equipa experiente para operar o equipamento GNSS, dado o elevado rigor necessário para o estacionamento, nivelamento e medição da altura das antenas (Lima *et al.*, 2015). O equipamento utilizado tem uma grande influência na qualidade dos resultados obtidos, devendo ser utilizadas antenas do tipo *choke ring* (Lima, 2015a). Para a monitorização de deslocamentos de frequência baixa e durante intervalos de tempo longos deve ser utilizado o modo estático relativo (Lima, 2015b), em que é utilizado um recetor colocado numa estação base (que servirá de referência) e um segundo recetor é estacionado no ponto objeto que se pretende coordenar durante um determinado intervalo de tempo. A incerteza das

medições efetuadas depende da duração das sessões de observação em cada ponto, sendo possível obter precisão milimétrica com estações permanentes (Figura 3.7).

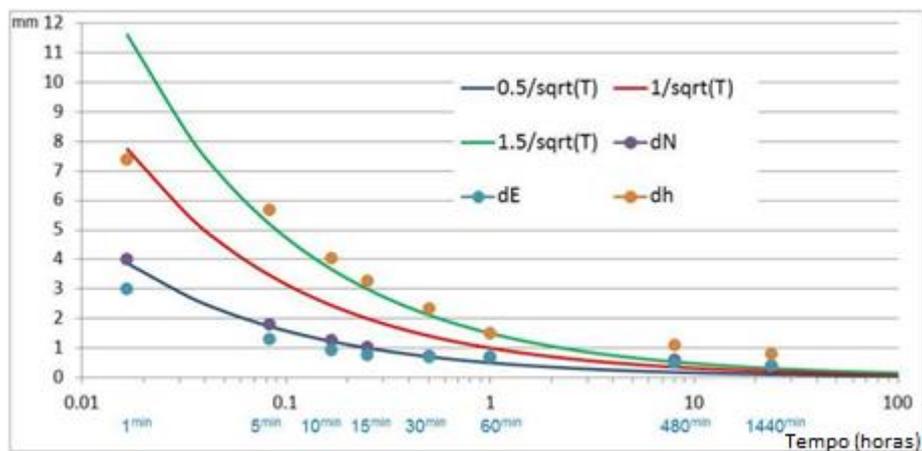


Figura 3.7 – Desvio padrão das posições relativas nas suas componentes tridimensionais (dN, dE e dh) em função da duração da sessão de observação, para uma base de 325 m, adaptado de Lima *et al.* (2015)

## 4 | Enquadramento e justificação do tema

Uma das missões do NGA é a realização de estudos de desenvolvimento e aplicação de métodos da geodesia à observação do comportamento de obras, nomeadamente taludes, barragens, pontes e monumentos. A monitorização de estruturas é uma atividade essencial para a segurança, tendo como objetivo a identificação atempada de anomalias que possam colocar em risco a integridade da estrutura. São várias as técnicas de alta precisão atualmente utilizadas para a medição de deslocamentos, nomeadamente equipamentos instalados na estrutura ou métodos de observação geodésica, tais como nivelamento, taqueometria ou GNSS. Estes métodos de medição de deslocamentos *in situ* permitem a obtenção de deslocamentos num número reduzido de pontos, maioritariamente situados na estrutura, sendo frequente que não se realize observação referente à envolvente da obra, cuja estabilidade é fundamental para a integridade da estrutura. A aquisição de dados através destes métodos implica a deslocação de equipas à área de estudo, tendo custos elevados. A utilização de uma técnica de medição de deslocamentos de forma remota e com custos baixos pode ser uma mais-valia para a otimização das campanhas de observação *in situ* ao possibilitar a identificação dos primeiros sinais de instabilidade e a extensão espacial do fenómeno. A existência no NGA de dezenas de anos de dados de monitorização *in situ* permite dispor de informação para a calibração e o controlo de qualidade da informação obtida por geodesia InSAR.

A interferometria SAR é uma técnica de geodesia aplicada que surgiu na década de 70 do século XX e que tem como principais utilizações a medição de deslocamentos e a construção de modelos digitais de superfície. Até ao lançamento do satélite ERS-1 pela ESA em 1991, o número de imagens adquiridas com a mesma geometria era pequeno e a influência das diferentes condições atmosféricas verificadas em cada época de aquisição apenas permitiam a determinação de deslocamentos com precisão centimétrica e de altitudes com precisão de dezenas de metros. Nos primeiros anos do século XXI, a existência de um arquivo de imagens adquiridas ao longo de 10 anos permitiu o desenvolvimento de novas técnicas para o processamento multitemporal de imagens SAR. A estimativa e remoção do efeito da atmosfera através da aplicação de filtros no espaço e no tempo possibilitam a medição de deslocamentos com precisão milimétrica e de altitudes com precisão métrica. As resoluções espaciais das imagens adquiridas por esta primeira geração de sensores SAR era de algumas dezenas de metros (20 m no caso dos sensores da ESA) e apenas em 2007 foi lançado o primeiro satélite com um sensor SAR de muito alta resolução, o TerraSAR-X, da agência espacial alemã, cujas imagens podem ter até 1 m de resolução espacial. Inicialmente, a geodinâmica foi uma das principais aplicações desta tecnologia, nomeadamente na análise de deformações causadas por fenómenos de grande extensão espacial e de deslocamentos de grande magnitude, tais como os provocados por sismos, deslizamentos de terras, subsidência ou atividade vulcânica (Hooper *et al.*, 2004; Notti *et al.*, 2009; Heleno *et al.*, 2011; Luo *et al.*, 2013). O recente aparecimento de sensores de muito alta resolução, que operam em frequências mais elevadas das micro-ondas (banda X), tem orientado a investigação e o desenvolvimento para aplicações onde se observam

deslocamentos de menor magnitude, necessários à monitorização de estruturas (Perissin e Wang, 2011b; Bakon *et al.*, 2014; Lazecky *et al.*, 2014; Sousa *et al.*, 2014).

Nos últimos anos os dados GNSS têm sido utilizados para a observação de barragens e taludes. A geodesia InSAR apresenta algumas vantagens face a esta tecnologia, tais como a maior densidade de pontos objeto, a possibilidade de efetuar observações em locais de difícil acesso e a nível regional. No entanto, o GNSS possibilita uma maior frequência de observação e a seleção da localização dos pontos a serem observados. A integração das duas tecnologias pode ser vantajosa, permitindo conjugar a densidade espacial de pontos do InSAR com a frequência de observação do GNSS e utilizar os resultados de uma das técnicas para ultrapassar as limitações da outra.

A aplicação de geodesia InSAR à monitorização de estruturas ainda apresenta limitações, para cujo diagnóstico e solução esta tese pretende contribuir de modo a tornar a tecnologia operacional.

A geodesia InSAR apenas permite a deteção de deslocamentos ao longo da linha de vista do sensor, que é oblíqua em relação à superfície terrestre. No caso de o deslocamento ocorrer noutra direção, o que é observado através de InSAR é a projeção desse deslocamento na linha de vista do sensor. Por outro lado, os alvos com maior probabilidade de se comportarem como dispersores persistentes são estruturas verticais construídas pelo Homem de modo a que o sinal SAR seja refletido na superfície e no chão e regresse ao sensor. Esta tecnologia permite a deteção de um elevado número de dispersores persistentes em zonas urbanas. No entanto, o número destes elementos em zonas campestres é geralmente pequeno, principalmente em zonas com coberto vegetal, uma vez que a ação do vento e o crescimento da vegetação impedem um comportamento refletor estável exigido para os dispersores persistentes. Esta limitação é particularmente pertinente para a monitorização do comportamento dos taludes na vizinhança de albufeiras, que é um dos casos de estudo propostos no trabalho. Outro problema é o facto de vários algoritmos de InSAR considerarem apenas modelos de deslocamento lineares, ou seja, detetam apenas dispersores que têm deslocamentos com movimento uniforme. No entanto, as estruturas apresentam frequentemente comportamentos não lineares, sendo comum a ocorrência de deslocamentos de maior velocidade nos primeiros anos após a construção, que tendem depois a estabilizar. Além disso, comportamentos oscilatórios podem também ser observados, devidos a alterações ambientais (causados por variações de temperatura ou da humidade do ar) e fenómenos que afetam o terreno de implantação (recarga de aquíferos, carga oceânica ou variações do nível de água numa albufeira, por exemplo). Estes fenómenos têm influência no comportamento da estrutura, são detetáveis através de InSAR, no entanto podem funcionar como máscara a possíveis sinais de instabilidade com menor magnitude.

A realização de uma tese de doutoramento no LNEC, em colaboração com o IST-UL, com o tema proposto neste plano, permite aliar as várias valências existentes nas duas instituições, nomeadamente a experiência nas áreas da geodesia, deteção remota, monitorização de estruturas e geotecnia, com o objetivo de se dar uma contribuição importante para esta área científica.

A utilização deste tipo de dados na missão das instituições da administração pública dos países europeus tem sido promovida pela Comissão Europeia, nomeadamente a utilização de dados de observação da Terra, através do programa *Copernicus*, que disponibiliza os dados sem custos

adicionais dado que a sua aquisição já foi financiada pelos impostos dos cidadãos europeus. A utilização da tecnologia InSAR tem sido facilitada através do lançamento do satélite Sentinel-1A e pela disponibilização gratuita das suas imagens. Esta promoção tem despertado o interesse de várias empresas e donos de obra para as potencialidades desta tecnologia, levando-os a contactar instituições de investigação para avaliar a sua eficácia na monitorização das estruturas pelas quais são responsáveis. Contudo, o número de grupos de investigação que realizam investigação e desenvolvimento nesta área em Portugal é ainda muito reduzido.

O tema proposto para a tese está enquadrado no projeto do Plano de Investigação e Inovação (P2I) do LNEC “InfraSAR – Interferometria SAR com difusores permanentes (PSInSAR) aplicada à deteção de deslocamentos em geodinâmica e infraestruturas” (Processo 0404/112/19717), integrado no eixo programático “E4 – Risco e segurança (reforçar a fiabilidade e a resiliência)” e nas temáticas prioritárias “T2 – Novas tecnologias” e “T4 – Políticas públicas” da Estratégia de Investigação e Inovação (E2I) do LNEC.

## 5 | Definição da abordagem teórica e experimental

Com o trabalho proposto neste plano pretende-se avaliar a capacidade da geodesia InSAR para fornecer dados que possam contribuir para o controlo de segurança de estruturas. Com este estudo pretende-se:

- Propor o método de processamento de geodesia InSAR mais adequado ao acompanhamento de cada tipo de estruturas;
- Propor métodos para a integração dos dados obtidos através de geodesia InSAR com os de outros métodos, em particular os de observação geodésica;
- Propor variáveis observadas com geodesia InSAR que possam ter utilidade para apoiar o controlo de segurança de estruturas.

A fim de cumprir os objetivos propostos, foi definido um conjunto de tarefas a efetuar durante a tese, nomeadamente:

1. Pesquisa bibliográfica e preparação dos trabalhos;
2. Determinação de deslocamentos em estruturas e na sua envolvente através de geodesia InSAR;
3. Validação dos resultados e caracterização da distribuição de erros;
4. Contribuição para o controlo de segurança de estruturas;
5. Redação da tese.

A primeira tarefa “Pesquisa bibliográfica e preparação dos trabalhos” foi iniciada ainda durante a bolsa de iniciação à investigação científica, entre 2011 e 2016. Têm sido recolhidos diversos artigos em revistas científicas, atas de conferências e livros relativos à geodesia InSAR, aos algoritmos de processamento e às suas aplicações. Torna-se, no entanto, imprescindível continuar esta pesquisa ao longo de todo o doutoramento, uma vez que esta tecnologia tem tido um grande desenvolvimento nos últimos anos e prevê-se que estes continuem a ocorrer devido ao recente lançamento de novos satélites. Foi construído um catálogo de imagens, identificadas aplicações informáticas para processamento InSAR e recolhidos dados (informação geológica e observações de estações permanentes de GNSS). Foram já obtidas gratuitamente imagens das agências espaciais europeia, alemã, italiana e japonesa. Para aprofundar os conhecimentos relativos ao tema, a candidata deverá continuar a participar em conferências e outros eventos científicos da especialidade, assim como estabelecer colaborações com outras instituições, nacionais e estrangeiras, onde seja desenvolvida investigação nesta área, como foi realizado no último ano.

A segunda tarefa “Determinação de deslocamentos em estruturas e na sua envolvente através de geodesia InSAR” consistirá na construção de mapas de deslocamentos para as várias áreas de estudo, através de aplicações informáticas (comerciais e *open-source*) que implementam técnicas de processamento InSAR. Os mapas de deslocamentos serão construídos a partir de imagens adquiridas por vários sensores, em diferentes bandas das micro-ondas e com resoluções espaciais e

temporais distintas, a fim de identificar a influência destes parâmetros nos resultados. Serão utilizados testes estatísticos de hipóteses para avaliar a compatibilidade entre as várias soluções obtidas. Deste modo, pretende-se identificar o método de processamento de geodesia InSAR mais adequado para cada área de estudo. As séries temporais de deslocamentos obtidas com geodesia InSAR serão analisadas de modo a identificar e remover as contribuições de fenómenos ambientais que possam estar a mascarar eventuais sinais de instabilidade. Serão desenvolvidos métodos para integrar observações de geodesia InSAR com as do GNSS e será avaliada a possibilidade de obter redes de observação com a densidade de pontos objeto da primeira técnica e com a frequência de observação da segunda. No caso das barragens de aterro e taludes, onde se prevê um número pequeno de dispersores naturais, pretende-se utilizar refletores artificiais passivos e ativos. Será projetado e construído um novo modelo de refletor artificial passivo, composto por dois refletores com uma aresta comum e orientações opostas, de modo a captar a radiação emitida pelo sensor a partir de pontos de vista diferentes e possibilitar a decomposição do deslocamento nas suas componentes vertical e horizontal (na direção este-oeste). Pretende-se instalar um destes equipamentos na banquetta da barragem de aterro da Laje (EDIA) e nos taludes da albufeira da barragem de Foz Tua (EDP). A barragem de aterro da Laje foi selecionada para a realização deste teste devido à sua orientação na direção norte-sul, o que implica que os deslocamentos de maior magnitude deverão ocorrer nas direções vertical e este-oeste, precisamente aquelas que o refletor artificial bidirecional permitirá identificar. A instalação de refletores artificiais passivos nos taludes da albufeira da barragem de Foz Tua permitirá acompanhar os deslocamentos verticais e horizontais (na direção este-oeste) durante o primeiro enchimento da albufeira. Pretende-se, ainda, instalar refletores artificiais ativos nos taludes para aumentar o número de dispersores da rede de observação com geodesia InSAR.

Na terceira tarefa “Validação dos resultados e caracterização da distribuição de erros” será realizada a comparação dos resultados do processamento InSAR com dados provenientes de técnicas de monitorização *in situ*, nomeadamente nivelamento, taqueometria ou observações GNSS (Quadro 5.1).

**Quadro 5.1 – Dados de validação para cada caso de estudo**

Áreas de estudo	Validação
Lisboa	Nivelamento
Barragens da EDIA	Nivelamento / Taqueometria
Barragem de Odelouca	Nivelamento / Taqueometria / GNSS
Barragens de Foz Tua e Baixo Sabor	Nivelamento / Taqueometria / GNSS / Fios de prumo

Prevê-se que estes dados sejam disponibilizados pelos donos de obra e pelo NGA. Para a cidade de Lisboa e vizinhança, pretende-se utilizar dados de nivelamento de algumas das obras monitorizadas pelo NGA, nomeadamente o edifício da ala oeste da Praça do Comércio. Para a área de estudo da CREL, serão solicitados dados ao dono de obra (BRISA) e aos municípios onde foram detetados sinais de potencial instabilidade nesta obra (Sintra, Odivelas e Loures). Para as barragens da EDIA, serão solicitados dados de nivelamento e taqueometria obtidos pela empresa, sendo que esta já manifestou o seu interesse em colaborar no projeto. Para as restantes barragens serão utilizadas observações geodésicas realizadas pelo NGA, sendo de destacar a instalação de estações permanentes de GNSS na barragem do Baixo Sabor e envolvente. Nas barragens de Foz Tua e Baixo Sabor poderão ser usados, ainda, os deslocamentos monitorizados com fios de prumo. Testes estatísticos de hipóteses serão utilizados a fim de avaliar o grau de semelhança entre as observações obtidas através das diferentes técnicas. Também nesta tarefa, será realizada a caracterização da distribuição de erros dos deslocamentos. Pretende-se efetuar esta análise para os resultados obtidos na integração da geodesia InSAR com GNSS, construindo elipses de erro a partir das incertezas associadas a cada uma das tecnologias.

Para a quarta tarefa, “Contribuição para o controlo de segurança de estruturas”, será realizada a análise dos resultados obtidos anteriormente com o fim de determinar se existe algum comportamento anómalo nos objetos de estudo, a sua localização e extensão. Serão identificadas as variáveis observadas através de geodesia InSAR (deslocamento acumulado, velocidade média, coeficiente de correlação com fenómenos ambientais) que são sensíveis à ocorrência de danos na estrutura e envolvente, de modo a inferir a sua utilidade para alimentar modelos de elementos finitos e análises de vulnerabilidade.

A quinta tarefa consiste na redação da dissertação, que será submetida para arguição e defesa em provas públicas.

## 6 | Planeamento das atividades

### 6.1 Estudos preliminares

A fim de avaliar a exequibilidade do estudo proposto e preparar a sua execução, foram elaborados catálogos das imagens SAR existentes para cada área de estudo e realizados testes de processamento para dois casos em particular. Um dos casos para o qual foram efetuados estudos preliminares foi a barragem de aterro dos Álamos I, da EDIA, e os taludes na vizinhança da sua albufeira. A técnica utilizada foi a interferometria por dispersores persistentes, considerando deslocamentos não lineares, que foi aplicada a dois conjuntos de imagens Envisat ASAR. Os resultados foram validados através da comparação com dados de nivelamento geométrico para um ponto comum entre a rede de observação geodésica e um dispersor persistente, tendo sido observada a mesma tendência com os dois métodos (Figura 6.1). O trabalho realizado está descrito em Roque *et al.* (2015a).

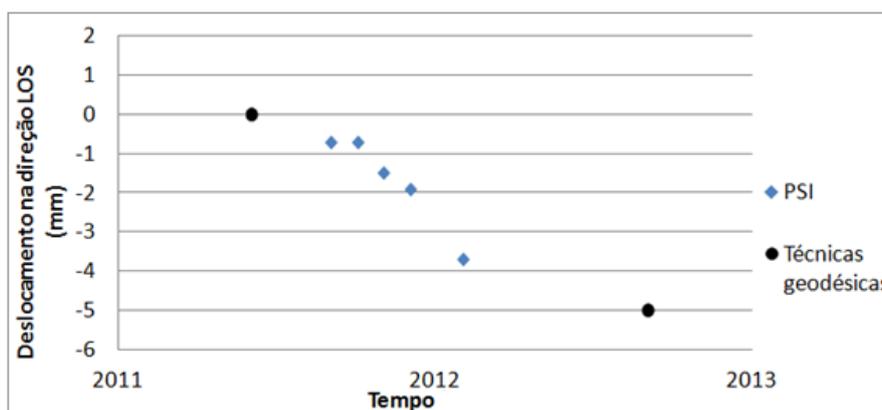


Figura 6.1 – Deslocamentos observados com PSI e com nivelamento geométrico para um ponto no coroamento da barragem dos Álamos I

O outro caso avaliado foi a cidade de Lisboa, tendo sido dado maior destaque à zona da Baixa, ao pavilhão MEO Arena e ao troço da linha de caminho-de-ferro de Cascais entre Paço de Arcos e Belém. Nestes testes foram considerados modelos não lineares de deslocamento e de dilatação térmica das estruturas para a técnica do PSI. A Figura 6.2 apresenta o mapa de velocidade média para dispersores localizados na Baixa, onde se observa o aumento da taxa de subsidência na Praça do Comércio de norte para sul, à semelhança dos valores observados através de nivelamento. O trabalho está descrito em Roque *et al.* (2014b) e Roque *et al.* (2015b).

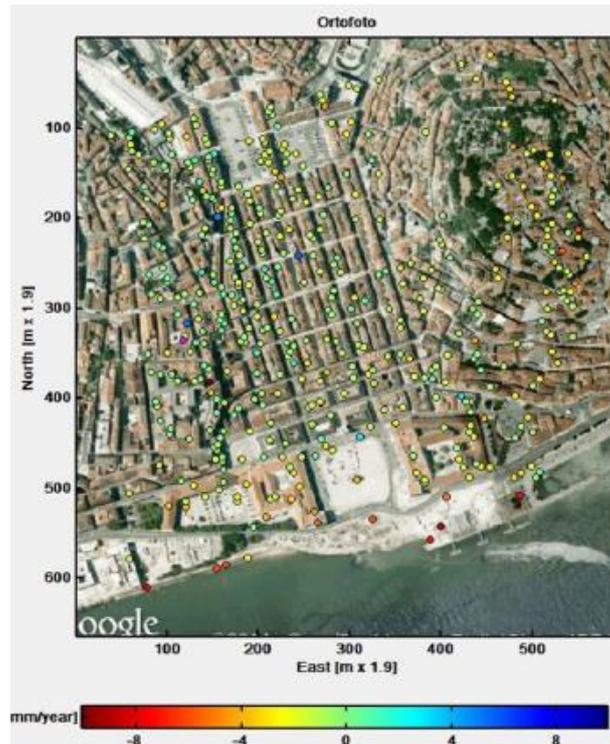


Figura 6.2 – Mapa de velocidade média dos deslocamentos de dispersores persistentes na Baixa de Lisboa (Roque *et al.*, 2014b)

## 6.2 Cronograma

As tarefas apresentadas anteriormente serão realizadas ao longo de quatro anos, de acordo com o cronograma apresentado na Figura 6.3.

Tarefas	1º Ano				2º Ano				3º Ano				4º Ano			
Tarefa 1																
Tarefa 2																
Tarefa 3																
Tarefa 4																
Tarefa 5																

Tarefa 1 – Pesquisa bibliográfica e preparação dos trabalhos;

Tarefa 2 – Determinação de deslocamentos em estruturas e na sua envolvente através de geodesia InSAR;

Tarefa 3 – Validação dos resultados e caracterização da distribuição de erros;

Tarefa 4 – Contribuição para o controlo de segurança de estruturas;

Tarefa 5 – Redação da tese.

Figura 6.3 – Cronograma das tarefas

Uma vez que as barragens estão situadas em zonas campestres, onde se prevê que o número de dispersores persistentes seja reduzido, será necessário instalar refletores artificiais com localizações chave das áreas de estudo, o que se pretende realizar com a maior brevidade possível, e aguardar que seja adquirido um número de imagens significativo em que estes refletores sejam visíveis. Desta forma, o estudo para a área urbana será realizado numa fase inicial dos trabalhos, enquanto as barragens e a sua envolvente serão analisadas quando as condições necessárias estiverem reunidas. O início desta análise está previsto para o segundo ano do doutoramento, mas depende da data de instalação dos refletores artificiais.

### 6.3 Condições para a realização do estudo

O requisito fundamental para a realização dos trabalhos propostos é o acesso a imagens SAR. Prevê-se que a maioria dos estudos propostos seja realizada com imagens adquiridas com o sensor a bordo do satélite Sentinel-1A, dado que estão a ser adquiridas imagens com o formato próprio para interferometria, para todas as áreas de estudo, desde março de 2015, com frequência quinzenal e distribuição gratuita. Contudo, as imagens do Sentinel-1A não são as mais adequadas para a análise de algumas das áreas de estudo. Para as zonas urbanas, as imagens adquiridas na banda X têm uma resolução espacial maior e possibilitam a identificação de um número superior de dispersores persistentes. Para as zonas campestres onde se situam as barragens e taludes, a banda L é a mais adequada, possibilitando a deteção de dispersores persistentes em locais com vegetação. Foram identificados dois conjuntos de imagens da banda X para a cidade de Lisboa e um conjunto de imagens da banda L para cada área de estudo de barragens e taludes (Figura 6.4).

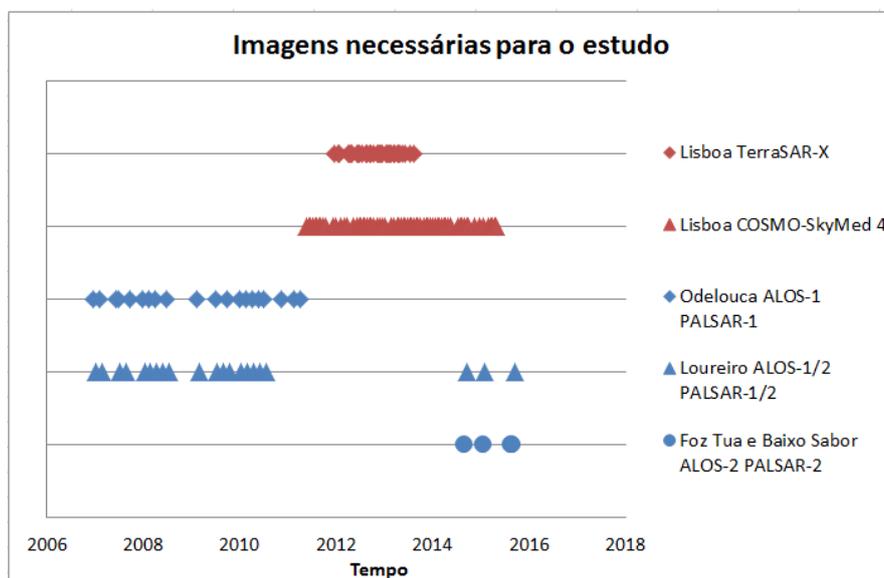


Figura 6.4 – Datas das imagens SAR não pertencentes à ESA

No caso da zona de Lisboa, foram selecionados um conjunto de 35 imagens TerraSAR-X e um conjunto de 70 imagens COSMO-SkyMed 4, ambos com resoluções espaciais de 3 m. Estas imagens foram obtidas gratuitamente através da aprovação de projetos de investigação submetidos às agências espaciais alemã e italiana.

Para as barragens de Foz Tua e do Baixo Sabor pretende-se acompanhar o comportamento das barragens e dos taludes durante o primeiro enchimento das albufeiras e os primeiros anos de exploração, sendo ideais para esse fim as imagens do sensor japonês ALOS-2 PALSAR-2, que começaram a ser adquiridas em setembro de 2014. Das nove barragens de aterro da EDIA consideradas no trabalho, foi selecionada a barragem do Loureiro para a análise com imagens ALOS-2 PALSAR-2, uma vez que, para além deste, também existem conjuntos de imagens Sentinel-1A e COSMO-SkyMed que abrangem esta estrutura. Pretende-se realizar a comparação entre os resultados obtidos para a mesma área de estudo com imagens das bandas L, C e X das micro-ondas. A análise para a barragem de Odelouca será realizada apenas para os primeiros anos de exploração, quando os métodos *in situ* identificaram valores acentuados de assentamento, com imagens do sensor ALOS-1 PALSAR-1 adquiridas entre 2010 e 2011. Durante o ano de 2015 foi submetido um projeto à JAXA tendo em vista a aquisição gratuita destas imagens, o qual foi aprovado.

Para além das imagens, será necessário adquirir outros dados, nomeadamente dados meteorológicos, que se prevê que possam ser fornecidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (com custos), quando não existirem dados gratuitos disponibilizados por outras entidades. Serão necessários dados adquiridos pelas estações permanentes de GNSS, havendo duas redes a operar em Portugal, a ReNEP, da Direção Geral do Território (DGT), e a SERVIR, do Centro de Informação Geoespacial do Exército (CIGeoE). Os dados desta última rede têm custos associados, mas um protocolo entre o LNEC e o CIGeoE permite o acesso gratuito. Dados relativos a alturas de maré foram já obtidos gratuitamente através da DGT.

A utilização de refletores artificiais será importante para a realização dos trabalhos a fim de aumentar o número de dispersores persistentes nas áreas de estudo com barragens.

Para o processamento InSAR prevê-se a utilização de vários programas cujas licenças para a realização de estudos de investigação são gratuitas: o SARPROZ<sup>®</sup> (Perissin, 2015), o ROI\_PAC (Pritchard, 2014), o Doris (Kampes *et al.*, 2003) e o StaMPS (Hooper *et al.*, 2012), todos eles já instalados em computadores do LabImagem. Está também prevista a utilização do programa comercial SARscape<sup>®</sup>, disponível no Instituto Superior Técnico. Em princípio, o SARPROZ<sup>®</sup> será o mais utilizado devido à elevada variedade de algoritmos para processamento InSAR e de ferramentas para controlo de qualidade dos resultados que disponibiliza. O ROI\_PAC e o Doris serão utilizados para o pré processamento de imagens SAR necessário para a análise no StaMPS. Tanto o StaMPS como o SARscape<sup>®</sup> serão utilizados para processamentos com algoritmos que não estejam implementados no SARPROZ<sup>®</sup>. À exceção do SARPROZ<sup>®</sup>, que tem versões para Windows e Linux, os restantes programas apenas podem ser utilizados em ambiente Linux. O SARPROZ<sup>®</sup> é um *software* desenvolvido em MATLAB<sup>®</sup> e, atualmente, existe no LabImagem uma versão compilada deste, que corre de forma independente da linguagem em que foi desenvolvido. No entanto, para que seja possível desenvolver novos algoritmos sobre este programa, será necessário o acesso a uma licença de MATLAB<sup>®</sup> complementada por cinco *toolboxes*:

- *Image processing toolbox*;
- *Signal processing toolbox*;

- *Mapping toolbox*;
- *Parallel computing toolbox*;
- *Statistics and machine learning toolbox*.

As licenças para o MATLAB® e para a *Image processing toolbox* já existem no LabImagem, pelo que será necessário adquirir apenas as restantes *toolboxes*.

O processamento de dados SAR é bastante exigente em termos computacionais, dado o grande volume de dados e a complexidade dos algoritmos. O LabImagem possui computadores de elevada capacidade de processamento, adequados à realização do trabalho.

Devido ao número reduzido de grupos de investigação a desenvolver trabalho na área do InSAR em Portugal, a colaboração com instituições estrangeiras assume uma grande importância. Foi estabelecida uma parceria com o autor do programa SARPROZ®, o Professor Daniele Perissin, da Universidade de Purdue, nos Estados Unidos da América, a fim de obter apoio na utilização do *software*. Foi também iniciada uma colaboração com a Professora Elisabeth Simonetto da *École Supérieure des Géomètres et Topographes*, em Le Mans, França, que resultou na realização de um estágio da candidata nessa instituição, com a duração de cinco semanas, em 2015, tendo em vista o estudo da utilização de dados GNSS para integração com o InSAR.

## 6.4 Financiamento

Para a realização dos trabalhos pretendem-se utilizar dados e *software* gratuito ou já existentes no LNEC ou no IST-UL, sempre que possível. O maior encargo previsto é o relativo à aquisição de imagens, uma vez que se pretende complementar o estudo realizado com as imagens fornecidas gratuitamente pela ESA com imagens de outras agências, a fim de inferir a influência de diferentes parâmetros de aquisição sobre a qualidade dos resultados. Foram já obtidos gratuitamente conjuntos de imagens dos satélites TerraSAR-X, COSMO-SkyMed 4 e ALOS-1/2 PALSAR-1/2, com um valor comercial de €63000, €126000 e €400000, respetivamente.

A fim de obter financiamento para os restantes encargos decorrentes do estudo, nomeadamente refletores artificiais passivos e ativos, *toolboxes* do MATLAB® e dados meteorológicos, será submetido um projeto à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), que terá em conta os trabalhos propostos neste plano para os estudos relacionados com barragens. Também se pretende apresentar uma candidatura relativa a este tema ao fundo de financiamento europeu H2020, em colaboração com a empresa DEIMOS.

Será também solicitada a colaboração das empresas que já demonstraram interesse no estudo, para apoio à aquisição de refletores artificiais.

Em junho de 2016 a candidata concorreu a uma bolsa individual de doutoramento da FCT para cofinanciar a sua bolsa no LNEC.

Lisboa, LNEC, dezembro de 2016

VISTO

O Diretor do Departamento de Barragens de  
Betão

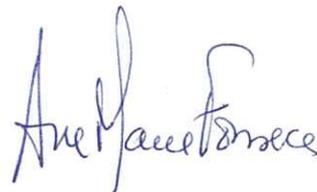


António Lopes Batista

AUTORIA



Dora Roque  
Bolsreira de Doutoramento



Ana Maria Fonseca  
Investigadora Principal  
Chefe do Núcleo de Geodesia Aplicada



José Vieira de Lemos  
Investigador-Coordenador



Ana Paula Falcão  
Professora Auxiliar

## Referências Bibliográficas

- BAKON, M.; PERISSIN, D.; LAZECKY, M.; PAPCO, J., 2014 – **Infrastructure non-linear deformation monitoring via satellite radar interferometry**. Procedia Technology, 16, pp. 294-300.
- BERARDINO, P.; FORNARO, G.; LANARI, R.; SANSOSTI, E., 2002 – **A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, No. 11, pp. 2375-2382, doi: 10.1109/TGRS.2002.803792.
- CASACA, J., 2001 – **O método da variação de coordenadas na observação geodésica de barragens**. LNEC: Série ICT, ITB21.
- CASACA, J.; HENRIQUES, M.J.; MATEUS, P., 2009a – **O ajustamento de grandezas heterogêneas pelo método das componentes de variância**. Atas do 2º Encontro Nacional de Geodesia Aplicada, LNEC, Lisboa, 12 – 13 de outubro.
- CASACA, J.; HENRIQUES, M.J.; COELHO, J.; CANDEIAS, H., 2009b – **O papel do quadro de referência na monitorização de deslocamentos: Um caso de estudo**. Atas do 2º Encontro Nacional de Geodesia Aplicada, LNEC, Lisboa, 12 – 13 de outubro.
- CHANG, P.C.; FLATAU, A.; LIU, S.C., 2003 – **Review paper: Health monitoring of civil infrastructure**. Structural Health Monitoring 2003; Vol. 2(3); pp. 257-267.
- DENTZ, F.; VAN HALDEREN, L.; POSSEL, B.; ESFAHANY, S.S.; SLOBBE, C.; WORTEL, T., 2006 – **On the potential of satellite radar interferometry for monitoring dikes of the Netherlands – A technical feasibility study**. Delft University of Technology, Geomatics, Faculty of Aerospace Engineering.
- DI MARTIRE, D.; IGLESIAS, R.; MONELLS, D.; CENTOLANZA, G.; SICA, S.; RAMONDINI, M.; PAGANO, L.; MALLORQUÍ, J.J.; CALCATERRA, D., 2014 – **Comparison between differential SAR interferometry and ground measurements data in the displacement monitoring of the earth-dam of Conza della Campania (Italy)**. Remote Sensing of Environment, 148, pp. 58 – 69. doi: 10.1016/j.rse.2014.03.014.
- FARRAR, C.R.; HEMEZ, F.M.; SHUNK, D.D.; STINEMATES, D.W.; NADLER, B.R.; CZARNECKI, J.J., 2004 – **A review of structural health monitoring literature: 1996-2001**. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory (p. 303).
- FARRAR, C.R.; WORDEN, K., 2007 – **An introduction to structural health monitoring**. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 365, pp. 303-315. doi: 10.1098/rsta.2006.1928.
- FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F., 2001 – **Permanent scatterers in SAR interferometry**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No. 1, pp. 8-20, Publisher Item Identifier: S 0196-2892(01)00991-3.
- FERRETTI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F.; CASAGLI, N.; FARINA, P.; DAN YOUNG, B., 2005 – **Permanent scatterers technology: A powerful state of the art tool for history and**

- future monitoring of landslide and other terrain instability phenomena.** Tele-Rilevamento Europa, Milão, pp. 425 – 433.
- FERRETTI, A.; MONTI-GUARNIERI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F.; MASSONNET, D., 2007 – **InSAR principles: Guidelines for SAR interferometry processing and interpretation,** Publicações da ESA, Noordwijk, Holanda.
- FONSECA, A.D.; FERNANDES, J.C., 2004 – **Detecção remota.** 2ª Edição. Lisboa: LIDEL.
- FORNARO, G.; REALE, D.; VERDE, S., 2013 – **Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multidimensional SAR imaging.** IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 10, No. 4, pp. 677 – 681.
- GE, D.; WANG, Y.; ZHANG, L.; ZHANG, X.; YAN, D.; LI, M., 2011 – **Integrating corner reflector and PSInSAR technique to monitor regional land subsidence.** Atas da conferência IGARSS 2011, pp. 1619 – 1622.
- GIGLI, G.; FANTI, R.; CANUTI, P.; CASAGLI, N., 2011 – **Integration of advanced monitoring and numerical modeling techniques for the complete risk scenario analysis of rockslides: The case of Mt. Beni (Florence, Italy).** Engineering Geology, 120, pp. 48 – 59.
- HELENO, S.I.N.; OLIVEIRA, L.G.S.; HENRIQUES, M.J.; FALCÃO, A.P.; LIMA, J.N.P.; COOKSLEY, G.; FERRETTI, A.; FONSECA, A.M.; LOBO-FERREIRA, J.P.; FONSECA, J.F.B.D., 2011 – **Persistent Scatterers Interferometry detects and measures ground subsidence in Lisbon.** Remote Sensing of Environment, 115, pp. 2152-2167, doi: 10.1016/j.rse.2011.04.021.
- HERRERA, G.; TOMÁS, R.; MONELLS, D.; CENTOLANZA, G.; MALLORQUÍ, J.J.; VICENTE, F.; NAVARRO, V.D.; LOPEZ-SANCHEZ, J.M.; SANABRIA, M.; CANO, M.; MULAS, J., 2010 – **Analysis of subsidence using TerraSAR-X data: Murcia case study.** Engineering Geology, 116, pp. 284 – 295.
- HOOPER, A.; ZEBKER, H.; SEGALL, P.; KAMPES, B., 2004 – **A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers.** Geophysical Research Letters, Vol. 31, L23611, pp. 1-5, doi: 10.1029/2004GL021737.
- HOOPER, A.; BEKAERT, D.; SPAANS, K.; ARIKAN, M., 2012 – **Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation.** Tectonophysics, 514-517, pp.1-13. doi: 10.1016/j.tecto.2011.10.013.
- KAMPES, B.M.; HANSEN, R.F.; PERSKI, Z., 2003 – **Radar interferometry with public domain tools.** Atas do Third International Workshop on ERS SAR Interferometry, 'FRINGE03', Frascati, Itália, 1-5 dezembro 2003, 6 pp.
- LAZECKY, M.; RAPANT, P.; PERISSIN, D.; BAKON, M., 2014 – **Deformations of highway over undermined Ostrava-Svinov area monitored by InSAR using limited set of SAR images.** Procedia Technology, 16, pp. 414-421.

- LI, C.; YIN, J.; ZHAO, J.; ZHANG, G.; SHAN, X., 2012 – **The selection of artificial corner reflectors based on RCS analysis**. Acta Geophysica, Vol. 60, no. 1, pp. 43-58. doi: 10.2478/s11600-011-0060-y.
- LIMA, J.N., 2015a – **Monitorização de deslocamentos em barragens de aterro com o GNSS**. Atas da VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Amadora, 29 – 30 de outubro.
- LIMA, J.N., 2015b – **A utilização de filtros digitais em séries temporais GNSS**. Atas da VIII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Amadora, 29 – 30 de outubro.
- LIMA, J.N.; CONDE, V.; CANDEIAS, H., 2015 – **Quality assessment of GNSS with short-length session in the displacement measurement of a large embankment dam**. Atas da Second International Dam World Conference, Lisboa, 21 – 24 de abril.
- LÓPEZ-QUIROZ, P.; DOIN, M.-P.; TUPIN; F.; BRIOLE; P.; NICOLAS, J.-M., 2009 – **Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry**. Journal of Applied Geophysics, 69, pp. 1-15.
- LUO, S.; FU, L.; ZHU, S.; HE, Q.; WAN, W.; YANG, B., 2013 – **Processes of the displacement field change of the 2009 April 6 Mw 6.3 L’Aquila earthquake using persistent scatterer and small baseline methods**. The Seismological Society of China, Institute of Geophysics, China Earthquake Administration and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, doi: 10.1007/s11589-013-0028-x.
- MAHAPATRA, P.S., 2015 – **Geodetic network design for InSAR – Application to ground deformation monitoring**. Tese de doutoramento, Universidade Técnica de Delft, Holanda.
- MAZZANTI, P.; BOZZANO, F.; CIPRIANI, I.; PRESTININZI, A., 2014 – **New insights into the temporal prediction of landslides by a terrestrial SAR interferometry monitoring case study**. Landslides, Springerlink.com. doi: 10.1007/s10346-014-0469-x.
- MITA, A., 1999 – **Emerging needs in Japan for health monitoring technologies in civil and building structures**. Atas do Second International Workshop on Structural Health Monitoring, setembro, pp. 56-67.
- NOTTI, D.; MEISINA, C.; ZUCCA, F., 2009 – **Analysis of PSInSAR data for landslide studies from regional to local scale**. Atas do “Fringe Workshop”, Frascati, Itália, 30 novembro – 4 dezembro (ESA SP-677, março 2010).
- OSMANOGLU, B.; DIXON, T.H.; WADOWINSKI, S.; CABRAL-CANO, E.; JIANG, Y., 2011 – **Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 13, Issue 1, pp. 1 – 122. doi: 10.1016/j.jag.2010.05.009.
- PEDRO, J.O.; FLORENTINO, C.A., 1989 – **Crítérios e métodos de observação de barragens de betão**. LNEC, Memória N.º 740.
- PERISSIN, D.; WANG, T., 2011a – **Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 50, No. 1, pp. 271-280, doi: 10.1109/TGRS.2011.2160644.

- PERISSIN, D.; WANG, T., 2011b – **Time-series InSAR applications over urban areas in China**. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 4, No 1, pp. 92-99.
- PERISSIN, D., 2015 – **SARPROZ Manual**. Disponível em <http://www.sarproz.com/software-manual/>, acessado em dezembro de 2015.
- PRITCHARD, M.E., 2014 – **Open-source software for geodetic imaging: ROI\_PAC for InSAR and pixel tracking**. Disponível em [http://www.geo.cornell.edu/eas/PeoplePlaces/Faculty/matt/pub/winsar/InSAR\\_textbook\\_for\\_web\\_2014.pdf](http://www.geo.cornell.edu/eas/PeoplePlaces/Faculty/matt/pub/winsar/InSAR_textbook_for_web_2014.pdf), acessado em dezembro de 2015.
- QIN, Y.; PERISSIN, D.; LEI, L., 2013 – **The design and experiments on corner reflectors for urban ground deformation monitoring in Hong Kong**. International Journal of Antennas and Propagation, Volume 2013. doi: 10.1155/2013/191685.
- QUIN, G.; LOREAU, P., 2013 – **Submillimeter accuracy of multipass corner reflector monitoring by PS technique**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 51, No. 3, pp. 1775 – 1783.
- REDWEIK, P.; ROQUE, D.; MARQUES, A.; MATILDES, R.; MARQUES, F., 2010 – **Triangulating the past – Recovering Portugal’s aerial images repository**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 76, No. 9, September 2010, pp. 1007-1018. doi: 10.14358/PERS.76.9.1007
- ROQUE, D.; AFONSO, N.; FONSECA, A.M.; HELENO, S., 2014a – **OBIA flood delimitation assisted by threshold determination with principal component analysis**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 80, No. 5, June 2014, pp. 551-557. doi: 10.14358/PERS.80.6.551.
- ROQUE, D.; FONSECA, A.M.; HENRIQUES, M.J.; FALCÃO, A.P., 2014b – **A first approach for displacement analysis in Lisbon Downtown using PS-InSAR**, Procedia Technology, Vol. 16. doi: 10.1016/j.protcy.2014.10.094.
- ROQUE, D.; PERISSIN, D.; FALCÃO, A.P.; FONSECA, A.M.; HENRIQUES, M.J., 2015a – **Dam regional safety warning using time-series InSAR techniques**. Atas da Second International Dam World Conference, LNEC, Lisboa, 21 – 24 de abril.
- ROQUE, D.; PERISSIN, D.; FALCÃO, A.P.; FONSECA, A.M.; HENRIQUES, M.J., 2015b – **Monitoring structure and regional-level displacements for Lisbon using multitemporal InSAR techniques**. Atas do FRINGE 2015 Workshop: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop, ESA special publication SP-731, Frascati, Itália.
- SALVI, S.; STRAMONDO, S.; FUNNING, G.J.; FERRETTI, A.; SARTI, F.; MOURATIDIS, A., 2012 – **The Sentinel-1 mission for the improvement of the scientific understanding and the operational monitoring of the seismic cycle**. Remote Sensing of Environment, 120, pp. 164-174.

- SAUSSE, J.; FABRE, J.P.; BOUDON, R.; HOONAKKER, M., 2015 – **Évolutions recentes du concept et des moyens d'auscultation des barrages**. Atas do Vingt-cinquième Congrès des Grands Barrages, Stavanger, Juin.
- SOUSA, J.J.; HLAVÁCOVÁ, I.; BAKON, M.; LAZECKY, M.; PATRÍCIO, G.; GUIMARÃES, P.; RUIZ, A.M.; BASTOS, L.; SOUSA, A.; BENTO, R., 2014 – **Potential of multi-temporal InSAR techniques for bridges and dams monitoring**. Procedia Technology, 16, pp. 834-841.
- VANIK, M.W.; BECK, J.L.; AU, S., 2000 – **Bayesian probabilistic approach to structural health monitoring**. Journal of Engineering Mechanics, 126(7), pp. 738-745.
- XING, X.; ZHU, J.; WANG, Y.; YANG, Y., 2013 – **Time series ground subsidence inversion in mining area based on CRInSAR and PSInSAR integration**. J. Cent. South Univ., (20), pp. 2498-2509. doi: 10.1007/s11771-0.13-1762-x.
- YE, X.; KAUFMANN, H.; GUO, X.F., 2004 – **Landslide monitoring in the Three Gorges area using D-InSAR and corner reflectors**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 70, No. 10, pp. 1167-1172.
- ZHANG, L.; LU, Z.; DING, X.; JUNG, H.; FENG, G.; LEE, C.-W., 2012 – **Mapping ground surface deformation using temporarily coherent point SAR interferometry: Application to Los Angeles Basin**. Remote Sensing of Environment, 117, pp. 429 – 439.