



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

GEODAM – GEODETIC METHODS OF AUTOMATIC MONITORING / MÉTODOS GEODÉSICOS DE MONITORIZAÇÃO AUTOMÁTICA

Relatório de progresso do projeto do P2I/LNEC 2021/2027



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

GEODAM – GEODETIC METHODS OF AUTOMATIC MONITORING / MÉTODOS GEODÉSICOS DE MONITORIZAÇÃO AUTOMÁTICA

Relatório de progresso do projeto do P2I/LNEC 2021/2027

Lisboa • maio 2026

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 186/2026 – DBB/NGA

Título

GEODAM – GEODETIC METHODS OF AUTOMATIC MONITORING / MÉTODOS GEODÉSICOS DE MONITORIZAÇÃO AUTOMÁTICA

Relatório de progresso do projeto do P2I/LNEC 2021/2027

Autoria

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

José Nuno Lima

Investigador Principal, Núcleo de Geodesia Aplicada

Dora Roque

Investigadora Auxiliar, Núcleo de Geodesia Aplicada

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

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 186/2026

Proc. 0404/1102/24148

GEODAM – GEODETIC METHODS OF AUTOMATIC MONITORING / MÉTODOS GEODÉSICOS DE MONITORIZAÇÃO AUTOMÁTICA

Relatório de progresso do projeto do P2I/LNEC 2021/2027

Resumo

O projeto *Geodetic Methods of Automatic Monitoring* (GeodAM) aborda, em Geodesia Aplicada, os problemas de planeamento, controlo da qualidade, estimação de parâmetros e predição na observação geodésica de barragens de betão e outras obras, pelos métodos convencionais (nivelamento geométrico e triangulação) e também por métodos espaciais (GNSS e InSAR), privilegiando o desenvolvimento de ferramentas que permitam a monitorização automática com recurso às estações em permanência *in situ*. A monitorização automática possibilita um acompanhamento das obras quase em tempo real, representando uma mais-valia para os donos de obra.

Este relatório apresenta a descrição da atividade desenvolvida entre 2024 e 2025. Analisam-se e avaliam-se os resultados obtidos face aos objetivos inicialmente traçados e, por último, propõe-se a sua revisão, devido aos constrangimentos, e as perspetivas futuras.

Palavras-chave: Projeto GEODAM / Métodos Geodésicos / Monitorização Automática / GNSS / InSAR / Barragens

GEODAM – GEODETIC METHODS OF AUTOMATIC MONITORING / MÉTODOS GEODÉSICOS DE MONITORIZAÇÃO AUTOMÁTICA

Project progress report of P2I/LNEC 2021/2027

Abstract

The Geodetic Methods of Automatic Monitoring (GeodAM) project is an Applied Geodesy study focusing on the challenges of planning, quality control, parameter estimation and prediction in the geodetic observation of concrete dams and other structures. The project uses both conventional (spirit levelling and triangulation) and spatial (GNSS and InSAR) methods, with a particular focus on developing tools that enable automatic monitoring using permanent *in situ* stations. This allows works to be monitored almost in real time, providing added value for owner of the structures.

This report presents a description of the activities carried out between 2024 and 2025. It analyses and evaluates the results obtained in relation to the initial objectives and proposes revising in light of constraints and future prospects.

Keywords: GEODAM Project / Geodetic Methods / Automatic Monitoring / GNSS / InSAR / Dams

Índice

1	Introdução	1
2	Fundamentação	2
2.1	Estado da arte	2
2.2	Problemas por resolver	3
2.3	Contribuições inovadoras	3
2.3.1	Contributos para o progresso dos conhecimentos (científicos, tecnológicos, de processos ou de metodologias)	3
2.3.2	Contributo para o reforço das competências e recursos do LNEC, nomeadamente os experimentais	4
2.4	Motivação	4
3	Temas e objetivos	6
3.1	Temas e desafios	6
3.2	Objetivo geral do projeto	6
3.3	Objetivos específicos do projeto	7
4	Metodologia	8
4.1	Descrição da abordagem geral	8
4.2	Descrição dos métodos a utilizar	8
5	Equipa	10
6	Plano de trabalhos	11
6.1	Atividade 1: Monitorização automática com GNSS	11
6.1.1	Aspetos gerais	11
6.1.2	Tarefa 1 - Recuperação dos recetores GNSS Topcon GB-1000	11
6.1.3	Tarefa 2 - Testes com recetores GNSS de baixo custo	11
6.1.4	Tarefa 3 - Monitorização de barragens e pontes com recetores GNSS de baixo custo	12
6.1.5	Tarefa 4 - Implementação de filtros e mensagens automáticas	12
6.2	Atividade 2: Análise de deslocamentos InSAR	12
6.2.1	Aspetos gerais	12
6.2.2	Tarefa 1 - Processamento InSAR	12
6.2.3	Tarefa 2 - Validação dos deslocamentos e avaliação da incerteza	12
6.2.4	Tarefa 3 - Análise de séries temporais de deslocamentos	13
7	Atividade desenvolvida	14
7.1	Aspetos gerais	14
7.2	Descrição da atividade desenvolvida	14
7.2.1	Atividade 1 – Monitorização automática com GNSS	14
7.2.2	Atividade 2 – Análise de deslocamentos InSAR	16
7.2.3	Apreciação da atividade desenvolvida e proposta de alteração do plano para 2026-2027	18
8	Divulgação de resultados	20
8.1	Teses e dissertações	20
8.2	Comunicações em encontros internacionais	20
8.3	Revistas internacionais	20
8.4	Comunicações em encontros nacionais	20
9	Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento	22

9.1	Indicadores de desempenho.....	22
9.2	Recursos humanos mobilizados	23
10	Considerações finais	24
	Referências bibliográficas	26
	ANEXOS.....	29
	ANEXO I Ficha de projeto	31
	ANEXO II Ficha de autoavaliação	57
	ANEXO III Ficha de projeto reformulada	69

Índice de figuras

Figura 7.1 – Ensaio com os recetores GNSS Topcon GB-1000: 1 – antena GNSS Topcon choque ring; 2 – antena GNSS Topcon choque ring; 3 – sala onde estavam os recetores GNSS; 4 – recetor GNSS Topcon GB-1000; 5 – recetor GNSS Topcon GB-1000; 6 – modem/router Opal GI iNet; 7 – modem/router Opal GI iNet; 8 – Raspeberry Pi; 9 – Raspeberry Pi	15
Figura 7.2 – Testes com os recetores de baixo custo Septentrio Mosaic-X5	16

Índice de quadros

Quadro 5.1 – Membros da equipa do projeto GeodAM	10
Quadro 6.1 – Membros da equipa da Atividade 1	11
Quadro 6.2 – Membros da equipa da Atividade 2	12
Quadro 9.1 – Indicadores de desempenho	20
Quadro 9.2 – Afetação de recursos humanos do LNEC	21

1 | Introdução

O projeto *Geodetic Methods of Automatic Monitoring* (GeodAM) teve início em 01/01/2024 e tem uma duração prevista de 48 meses. Está integrado no Plano de Inovação e Investigação (P2I) do LNEC, com enquadramento na matriz programática da Estratégia de Investigação e Inovação 2021-2027 (E2I), inserindo-se nos temas *Indústria 4.0* e *Construção*.

O GeodAM procura dar resposta em três componentes que caracterizam a investigação e os trabalhos de contrato do LNEC:

- 1 – Envelhecimento das grandes obras de engenharia civil e os desafios colocados pelas novas grandes obras;
- 2 – Custos elevados com a monitorização convencional e o envelhecimento e redução das equipas de campo;
- 3 – Aproveitamento das novas tecnologias para desenvolver ferramentas que permitam uma monitorização mais eficiente, por isso, mais sustentável.

A introdução recente de nova instrumentação de observação na monitorização de deslocamentos de barragens por métodos geodésicos, nomeadamente, taqueómetros motorizados e estações permanentes GNSS, veio tornar necessário o aperfeiçoamento dos métodos tradicionais de planeamento dos sistemas de observação, de controlo de qualidade das observações e de processamento dos dados. O projeto GeodAM pretende cobrir uma gama de atividades que vão da comparação de instrumentos à criação de modelos para a interpretação das observações com estações permanentes GNSS, taqueómetros robotizados e InSAR.

O projeto GeodAM, que se encontra inserido na área genérica da exploração de dados (*data mining*), destina-se a enquadrar o estudo e aplicação das metodologias de análise estatística convencional frequencista e a sua generalização Bayesiana aos dados resultantes dos sistemas de observação geodésica de grandes barragens de betão e outras obras portuguesas. Resulta da monitorização automática com estações permanentes em obra, a observar em contínuo, a disponibilização de séries temporais que devem ser tratadas para que os resultados sejam otimizados em precisão e em tempo útil. Para isso, neste projeto vão se aplicar filtros digitais (passa banda, de Kalman, etc.), fusão de observações de diferentes instrumentos e algoritmos que permitam a deteção de *outliers*.

Este relatório apresenta a atividade desenvolvida nos primeiros dois anos do projeto e propõe algumas alterações ao plano inicial, tendo em conta alguns constrangimentos que afetaram o desenvolvimento de algumas atividades e a inclusão de novos membros na equipa do projeto.

2 | Fundamentação

2.1 Estado da arte

Desde a década de 50 do século passado que se empregam no LNEC técnicas geodésicas para monitorizar deslocamentos em barragens e noutras importantes obras de engenharia civil. Embora inicialmente se utilizassem teodolitos ótico-mecânicos, níveis ótico-mecânicos e fitas de invar, eram empregues todos os cuidados nas observações e estas já eram tratadas pelo método das variações de coordenadas (Rocha *et al.*; 1956). Nas décadas de 70 e 80 do século passado, aproveitando o desenvolvimento de modelos matemáticos e meios de cálculo automático, foi desenvolvido no LNEC *software* para o planeamento e análise das redes de triangulação e nivelamento utilizadas na observação de barragens (Casaca; 2001). Simultaneamente, os desenvolvimentos da microeletrónica e dos sistemas de informação permitiram o aparecimento de novos instrumentos de observação como os taqueómetros eletrónicos motorizados e os níveis óticos digitais (Casaca; 2001), melhorando as comodidades da observação e aumentando a sua precisão.

As primeiras observações dos deslocamentos em barragens portuguesas com o GNSS foram realizadas em 2004, na barragem de Alqueva (Lima *et al.*; 2006), mas ainda não passavam de campanhas periódicas com sessões de observação de curta duração, apesar de os resultados serem prometedores. No entanto, já em 1995 se monitorizava a barragem de Pacoima (Califórnia, EUA) com GPS, com duas estações em permanência, uma localizada num dos encontros e a outra na consola central do coroamento (Behr *et al.*; 1999).

Só em 2016 se instalaram as primeiras estações GNSS em permanência para monitorizar quatro barragens portuguesas em contínuo (Lima e Casaca; 2018). A aplicação de filtros nas séries temporais GNSS permitiu que se atingisse uma precisão submilimétrica neste tipo de monitorização (Lima e Casaca; 2018). Também neste mesmo ano se instalou pela primeira vez um taqueómetro robotizado em permanência numa barragem portuguesa (Almeida *et al.*; 2017). O projeto MEGA (Métodos Estocásticos em Geodesia Aplicada (LNEC; 2018)) permitiu desenvolver uma série de ferramentas para ser aplicado às séries temporais GNSS, como, por exemplo, a deteção de *outliers* recorrendo a um procedimento bayesiano que se baseia nas elipses preditivas posteriores que assumem haver uma estabilidade temporal num ponto num determinado intervalo de tempo (Lima; 2022).

A utilização de InSAR para fins científicos teve início na década de 1990, com o lançamento de satélites com sensores SAR a bordo, por parte das agências espaciais europeia, japonesa e canadiana. A técnica InSAR diferencial, utilizada nessa década, permitia determinar deslocamentos para grandes áreas, em alvos naturalmente existentes no terreno, com incerteza centimétrica, e era aplicada na monitorização de fenómenos geodinâmicos (deformações causadas por sismos ou atividade vulcânica). No início do século XXI, surgiram as técnicas multitemporais de InSAR, que passaram a possibilitar a monitorização de deslocamentos com incerteza milimétrica. O desenvolvimento de algoritmos de processamento mais avançados, aliado ao desenvolvimento de sensores com

capacidade para adquirir imagens de alta resolução e à crescente preocupação das agências espaciais em garantir a aquisição de imagens com uma frequência regular, contribuiu para o interesse na aplicação desta tecnologia à monitorização de estruturas e da sua envolvente. No LNEC, há experiência na utilização de InSAR na monitorização de barragens e respetiva envolvente (Roque *et al.*; 2021) e de vias de comunicação (LNEC; 2021).

O presente projeto pretende implementar várias ferramentas para automatizar a monitorização de barragens e de outras obras, desde a recolha e gestão da observação, passando pelo processamento das observações com análise dos resultados e deteção de erros, e com a emissão de relatórios periódicos.

2.2 Problemas por resolver

Ao contrário da monitorização convencional, as tendências atuais da monitorização são caracterizadas pela observação contínua e automatizada. A informação disponibilizada por este tipo de monitorização permite conhecer o comportamento de pontos notáveis (e, portanto, da integridade estrutural da obra) continuamente e quase em tempo real. Por outro lado, os instrumentos de medição deverão permanecer continuamente em obra o que se poderá traduzir num avultado investimento caso se opte pelos instrumentos de topo de gama. Uma das possibilidades, para contornar o elevado preço dos equipamentos de topo de gama, será optar por instrumentos de baixo custo e por *software* aberto. Mas esta opção requer bons conhecimentos de *hardware* e a criação de *software* para ligar os instrumentos de baixo custo a *routers* e a computadores de baixo custo para que os dados sejam processados, armazenados e difundidos em tempo real.

O InSAR pode ter uma importante contribuição para a monitorização da envolvente das obras, dada a sua capacidade de monitorização de grandes áreas. A vegetação que tipicamente cobre estas zonas torna necessária a utilização de algoritmos de processamento que consideram difusores distribuídos (baseados em áreas) em vez de difusores persistentes (baseados em alvos pontuais). Os métodos InSAR que utilizam difusores distribuídos ainda não foram utilizados no LNEC e a incerteza dos deslocamentos obtidos por estes deverá ser avaliada. O *software* disponível no LNEC para processamento InSAR requer uma fase morosa de preparação dos dados, que deverá ser automatizada. A análise automática das séries temporais de deslocamento resultantes de InSAR também é um aspeto importante, tanto para a remoção de *outliers*, como para a deteção de eventuais anomalias no comportamento dos elementos estudados.

2.3 Contribuições inovadoras

2.3.1 Contributos para o progresso dos conhecimentos (científicos, tecnológicos, de processos ou de metodologias)

O potencial de inovação do projeto reside, em primeiro lugar, na aplicação de conceitos estatísticos e probabilísticos como, por exemplo, os filtros digitais, a inferência bayesiana e fusão de observações

provenientes de diferentes instrumentos, já estabelecidos, a outras áreas científicas e tecnológicas, nomeadamente à formulação e resolução de problemas práticos da Geodesia Aplicada à monitorização de barragens de betão. Alguns dos resultados do projeto GeodAM poderão ser utilizados por outros sectores do LNEC, nomeadamente o DBB/NO, no tratamento dos dados da observação de barragens, e o DE/NOE, no tratamento dos dados da observação de pontes. Desta forma, o projeto pretende contribuir para ultrapassar as dificuldades identificadas na aplicação de tecnologias que já são operacionais, mas cujo desempenho em contexto de inspeção de estruturas ainda não permite alcançar a qualidade obtida em outras situações de menor complexidade. Pretende-se atingir TRL 8 (o nível 8 de maturidade tecnológica, tradução de *Technology Readiness Level*).

No caso da monitorização automática de barragens com GNSS e taqueómetros robotizados, esta será uma nova linha de investigação a introduzir no LNEC. O contributo deste projeto será a avaliação da informação relevante de forma automática e em tempo quase real, sendo uma importante mais-valia para os donos de obra e autoridades nacionais. No projeto será testada a monitorização automática de barragens em confronto com outro tipo instrumentação. Considera-se que o TRL atual, neste caso, é de 5 e pretende-se atingir o TRL 8.

Os estudos em InSAR tiveram início na E2I 2014-2020 e o projeto pretende dar continuidade a esta linha de investigação com a avaliação de diferentes algoritmos e a utilização de métodos estatísticos para melhoria dos resultados. O LNEC tem condições ótimas para avaliar a incerteza de deslocamentos InSAR, através dos dados recolhidos nos refletores orientados para os satélites do programa Copernicus, instalados no campus entre 2017 e 2020. Considera-se que o TRL atual, neste caso, é de 6, pretende-se atingir o TRL 8.

2.3.2 Contributo para o reforço das competências e recursos do LNEC, nomeadamente os experimentais

O projeto irá reforçar as competências do LNEC através do desenvolvimento de novos meios para a monitorização automática de barragens (e outras obras importantes), permitindo desde logo um melhor acompanhamento das obras, e de, também, desenvolver novas técnicas e de novos processos que possam a vir dar origem a novas linhas de estudo por contrato.

2.4 Motivação

Os motivos para o desenvolvimento do projeto no âmbito dos termos de referência do E2I, são:

Solicitações – Pedido de estudos de entidades externas

Oportunidades – Iniciativas e desafios para desenvolver projetos de investigação

Apresentam-se, de seguida, as justificações sucintas da motivação para a realização do projeto:

1 – Envelhecimento das grandes obras de engenharia civil e novos desafios colocados pelas novas grandes obras;

2 – Custos elevados com a monitorização convencional e envelhecimento/redução das equipas de campo;

3 – Aproveitamento das novas tecnologias para desenvolver ferramentas que permitam uma monitorização mais eficiente, por isso, mais sustentável.

3 | Temas e objetivos

3.1 Temas e desafios

O tema principal, no âmbito do E2I, é o seguinte: *Indústria 4.0* (produção, exploração e gestão da informação e desenvolvimento de sistemas de informação de apoio à decisão).

Tendo como desafios principais no âmbito do E2I:

- 1 – Desenvolvimento de sistemas de medição e de controlo, qualidade e avaliação da conformidade;
- 2 – Exploração de *big data* e *data analytics*.

O tema secundário, no âmbito do E2I, é: *Construção* (desenvolvimento de produtos e processos inovadores para responder às necessidades da sociedade na qualidade e sustentabilidade do ambiente).

Os desafios secundários, no âmbito do E2I, são:

- 1 – Preservação e reabilitação do património construído, natural e cultural;
- 2 – Mitigação do risco e promoção da segurança e da resiliência do ambiente construído.

Este projeto está enquadrado nos temas e objetivos de I&I do Departamento de Barragens de Betão (DBB), dada a ênfase do projeto na monitorização e segurança de estruturas. A utilização da monitorização por métodos geodésicos para apoio à administração do território ou segurança de estruturas tem sido um tema de I&I do DBB considerado em vários ciclos anteriores da E2I do LNEC. A atividade do Núcleo de Geodesia Aplicada (NGA) é transversal a vários departamentos do LNEC, pelo que o projeto contempla outros tipos de estruturas para além de barragens e pretende utilizar tecnologias da área da Geodesia para monitorizar e estudar as estruturas, bem como a sua envolvente.

3.2 Objetivo geral do projeto

O objetivo geral do projeto é desenvolver métodos que potenciem a monitorização de estruturas de engenharia civil. Ao contrário da monitorização convencional, as tendências atuais da monitorização são caracterizadas pela observação contínua e automatizada. Assim, o projeto foca-se no desenvolvimento dos seguintes aspetos:

- 1 – Implementação de sistemas de monitorização contínua e automatizada (GNSS, taqueómetros robotizados, interferometria de SAR, inclinómetros, câmaras fotográficas em diferentes plataformas, outros) em barragens e outras obras importantes;
- 2 – Análises das séries temporais, desenvolvimentos de filtros digitais (Kalman, passa-alto, passa-baixo, passa banda, adaptativos), deteção de *outliers* com inferência bayesiana, implementação de mensagens periódicas do comportamento da obra e mensagens de alerta;
- 3 – Utilização de recetores GNSS de baixo custo e fusão de acelerómetros com recetores GNSS.

3.3 Objetivos específicos do projeto

Ao contrário da monitorização convencional, as tendências atuais da monitorização são caracterizadas pela observação contínua e automatizada. A informação disponibilizada por este tipo monitorização permite conhecer o comportamento de pontos notáveis (e, portanto, da integridade estrutural da obra) continuamente e quase em tempo real. Por outro lado, os instrumentos de medição deverão permanecer continuamente em obra o que se poderá traduzir num avultado investimento caso se opte pelos instrumentos de topo de gama. Uma das possibilidades, para contornar o elevado preço dos equipamentos de topo de gama, será optar por instrumentos de baixo custo e por *software* aberto. Mas esta opção requer bons conhecimentos de *hardware* e a criação de *software* para ligar os instrumentos de baixo custo a *routers* e a computadores de baixo custo para que os dados sejam processados, armazenados e difundidos em tempo real.

A monitorização em contínuo com GNSS nas barragens do Baixo Sabor, do Cabril e do Feiticeiro mostram que existem sistemas no mercado que asseguram de forma fiável a observação de estruturas de engenharia civil. No entanto, é possível ir mais além e com menos. Ou seja, é possível implementar a emissão de mensagens periódicas do comportamento da obra e mensagens de alerta de forma automática, através das análises automáticas das séries temporais que recorram a aplicações de filtros e deteção de *outliers* implementados, também, de forma automática. Toda esta análise automatizada ainda não foi implementada, embora já tenham sido testados os algoritmos que a permitem realizar. Por outro lado, é possível recorrer a equipamento GNSS que já existe no LNEC, ou adquirir equipamento de baixo custo, e montar um sistema de monitorização com GNSS automático não recorrendo ao equipamento de topo de gama, conforme já foi referido.

Procura-se, também, tirar partido da fusão das observações dos acelerómetros com as dos recetores GNSS, técnica já testada no LNEC, para melhorar a precisão do GNSS em tempo real (Lima *et al.*; 2014).

Paralelamente, também se pretende desenvolver esforços para dotar a monitorização com InSAR e com taqueómetros robotizados com análises automáticas das séries temporais e a implementação automática das mensagens de alerta.

4 | Metodologia

4.1 Descrição da abordagem geral

Na monitorização em contínuo com o GNSS pretende-se, numa primeira fase, preparar um par de recetores GNSS adquiridos pelo NGA há quase 20 anos para poderem operar remotamente, isto é, a observação, o processamento e a gestão de dados serão controlados a partir do LNEC, através da internet. Numa segunda fase, pretende-se adquirir recetores e antenas GNSS de baixo custo, realizar testes comparativos com recetores GNSS de topo gama. Na terceira fase, implementar a aplicação automática de filtros passa-baixo e a deteção de *outliers*. Pretende-se, também, aplicar a fusão de acelerómetros com os recetores GNSS. Finalmente, implementar a geração automática de mensagens de alerta.

Na área do InSAR, será explorado um algoritmo de processamento, baseado em difusores distribuídos, adequado para a monitorização de zonas com alguma vegetação, por exemplo encostas, e de vias de comunicação caracterizadas por superfícies tendencialmente lisas (rodovias). Os deslocamentos obtidos serão validados e a sua incerteza avaliada. Será efetuada a análise das séries temporais de deslocamentos.

4.2 Descrição dos métodos a utilizar

Os recetores GNSS Topcon GB-1000, adquiridos pelo LNEC em 2005, não estão preparados para operarem remotamente. Pretende-se integrar em cada um destes recetores um pequeno *modem/router* e um pequeno computador SBC (*single-board computer*, como, por exemplo, um *Raspberry Pi*) de modo que estes possam ser operados remotamente (observar, processar os dados e gerir os dados e as séries temporais), através da internet. Este trabalho vai contar com a colaboração de um aluno de doutoramento da FCUP.

Pretende-se adquirir dois recetores GNSS de baixo custo, como, por exemplo, os recetores Septentrio Mosaic-go. Far-se-ão testes comparativos com os Topcon GB-1000.

Pretende-se, também, implementar de forma automática filtros do tipo passa-baixo nas séries temporais das observações (como, por exemplo, as médias móveis simétricas) e a deteção de *outliers* recorrendo à inferência Bayesiana. Vai tentar-se implementar uma técnica já ensaiada no LNEC, a fusão de acelerómetros com recetores GNSS, usando os filtros de Kalman, para melhorar a precisão do GNSS em tempo real.

No final, pretende-se implementar a geração de mensagens automáticas de alerta, bem como a geração periódica de gráficos das séries temporais de deslocamentos.

Para o processamento InSAR, pretende-se utilizar o algoritmo *small baseline subsets* (SBAS), que utiliza difusores distribuídos, implementado no software de acesso livre MintPy. A utilização deste *software* requer o processamento prévio das imagens SAR num outro *software* livre (SNAP), que pode

ser automatizado. Pretende-se utilizar as ferramentas de programação do SNAP para esse fim. Para a validação de deslocamentos InSAR e para a determinação da sua incerteza serão utilizados os dados recolhidos na infraestrutura experimental de refletores artificiais para os satélites Sentinel-1 do programa Copernicus, instalada no campus do LNEC entre 2017 e 2020, e que foi monitorizada através de nivelamento geométrico e GNSS. As observações obtidas através dos métodos mais precisos serão utilizadas como referência para os deslocamentos InSAR obtidos a partir de imagens contemporâneas dos dados *in-situ*. A análise de séries temporais de deslocamento InSAR para tratamento de *outliers* e para deteção de anomalias será efetuada com recurso a análise Bayesiana e a métodos de *machine learning*.

5 | Equipa

A equipa do projeto é apresentada no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Membros da equipa do projeto GeodAM

Nome	Categoria	Setor/Entidade	Esforço (nº de meses)
José Nuno Lima	Investigador Principal (IP)	Departamento de Barragens de Betão Núcleo de Geodesia Aplicada	7.0
Maria João Henriques	Investigadora Principal (IP)	Departamento de Barragens de Betão Núcleo de Geodesia Aplicada	3.2
Dora Roque	Investigadora Auxiliar (IA)	Departamento de Barragens de Betão Núcleo de Geodesia Aplicada	2.4
Sérgio Oliveira	Investigador Principal (IP)	Departamento de Barragens de Betão Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas	2.4
Henrique Candeias	Técnico Superior (TS)	Departamento de Barragens de Betão Núcleo de Geodesia Aplicada	2.4
Nádia Braz	Técnico Superior (TS)	Departamento de Barragens de Betão Núcleo de Geodesia Aplicada	2.4
Total de investigadores			15.0
Total da equipa			19.8

6 | Plano de trabalhos

6.1 Atividade 1: Monitorização automática com GNSS

6.1.1 Aspetos gerais

Propõe-se monitorizar em contínuo e de forma automática barragens e pontes com o GNSS, para o acompanhamento automático do comportamento da obra em tempo real.

Esta atividade divide-se em quatro tarefas e tem a duração de 48 meses. A constituição da equipa e a dedicação de cada membro está detalhada no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Membros da equipa da Atividade 1

Nome	Categoria	Setor/Entidade	Percentagem
José Nuno Lima	Investigador Principal (IP)	Departamento de Barragens de Betão Núcleo de Geodesia Aplicada	15%
Maria João Henriques	Investigadora Principal (IP)	Departamento de Barragens de Betão Núcleo de Geodesia Aplicada	7%
Sérgio Oliveira	Investigador Principal (IP)	Departamento de Barragens de Betão Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas	5%
Nádia Braz	Técnico Superior (TS)	Departamento de Barragens de Betão Núcleo de Geodesia Aplicada	5%

6.1.2 Tarefa 1 - Recuperação dos recetores GNSS Topcon GB-1000

Nesta tarefa propõe-se recuperar dois recetores GNSS Topcon GB-1000, integrando em cada um deles um *modem/router* e um pequeno computador, de modo a poder operar em contínuo e de forma automática em posicionamento relativo e em tempo real.

6.1.3 Tarefa 2 - Testes com recetores GNSS de baixo custo

Nesta tarefa propõe-se realizar testes comparativos entre recetores GNSS de baixo custo com recetores GNSS de topo de gama.

6.1.4 Tarefa 3 - Monitorização de barragens e pontes com recetores GNSS de baixo custo

Nesta tarefa propõe-se instalar e observar barragens e pontes em contínuo com recetores GNSS de baixo custo, com processamento automático.

6.1.5 Tarefa 4 - Implementação de filtros e mensagens automáticas

Nesta tarefa propõe-se implementar de forma automática filtros do tipo passa baixo, a deteção de *outliers* com inferência Bayesiana e mensagens de alerta e relatórios periódicos. Igualmente, pretende-se implementar a fusão de observações de acelerómetros com as dos recetores GNSS.

6.2 Atividade 2: Análise de deslocamentos InSAR

6.2.1 Aspetos gerais

Propõe-se aperfeiçoar a capacidade de processamento e análise de deslocamentos InSAR de modo a obter mapas e séries temporais de deslocamentos InSAR.

Esta atividade divide-se em três tarefas e tem a duração de 24 meses. A constituição da equipa e a dedicação de cada membro está detalhada no Quadro 6.2.

Quadro 6.2 – Membros da equipa da Atividade 2

Nome	Categoria	Setor/Entidade	Percentagem
Dora Roque	Investigadora Auxiliar (IA)	Departamento de Barragens de Betão Núcleo de Geodesia Aplicada	5%
Henrique Candeias	Técnico Superior (TS)	Departamento de Barragens de Betão Núcleo de Geodesia Aplicada	5%

6.2.2 Tarefa 1 - Processamento InSAR

Nesta tarefa propõe-se realizar processamentos InSAR com SARPROZ, SNAP e MintPy de imagens do campus do LNEC contemporâneas da monitorização dos refletos artificiais e de um caso de estudo das encostas na vizinhança de uma albufeira.

6.2.3 Tarefa 2 - Validação dos deslocamentos e avaliação da incerteza

Nesta tarefa propõe-se comparar deslocamentos InSAR com dados *in-situ* de referência registados nos refletos do LNEC.

6.2.4 Tarefa 3 - Análise de séries temporais de deslocamentos

Nesta tarefa propõe-se aplicar métodos de análise Bayesiana e de *machine learning* para remoção de *outliers* e deteção de anomalias.

7 | Atividade desenvolvida

7.1 Aspetos gerais

O projeto GeodAM é constituído por duas atividades, que correspondem a duas linhas de investigação, a saber: Monitorização automática com GNSS (Atividade 1) e Análise de deslocamentos InSAR (Atividade 2).

A atividade 1 divide-se em quatro tarefas designadas por: 1) Recuperação dos recetores GNSS Topcon GB-1000; 2) Testes com recetores GNSS de baixo custo; 3) Monitorização de barragens com recetores GNSS de baixo custo; e 4) Implementação de filtros e mensagens automáticas.

A atividade 2 divide-se, por sua vez, em três tarefas designadas por: 1) Processamento InSAR; 2) Validação dos deslocamentos e avaliação da incerteza; e 3) Análise de séries temporais de deslocamentos.

7.2 Descrição da atividade desenvolvida

7.2.1 Atividade 1 – Monitorização automática com GNSS

De seguida, descreve-se, de forma resumida, a atividade realizada em cada tarefa.

A primeira tarefa propunha recuperar dois recetores GNSS Topcon GB-1000 que foram adquiridos pelo LNEC em 2005. Embora sejam recetores de precisão geodésica têm, contudo, algumas limitações no acesso aos seus dados via internet. Cada um deles foi ligado a um pequeno *modem/router* e a um pequeno computador de baixo custo SBC (*single-board computer* da marca *Raspeberry Pi*). Desta forma, tornou-se possível armazenar e disponibilizar as observações GNSS num servidor *web* alojado em cada um dos *Raspeberry Pi*, com baixo consumo de energia. Este servidor pode ser acedido diretamente por via de um domínio através dum servidor *proxy* que reencaminha o tráfego e, por isso, não necessita de IP público exclusivo.

Conforme se pode ver na Figura 7.1, instalaram-se duas antenas GNSS no topo do edifício Gulbenkian (sinalizadas por “1” e “2” na Figura 7.1), no *campus* do LNEC, e dentro de uma das salas do mesmo edifício (sinalizada por “3”) instalaram-se dois recetores GNSS (“4” e “5”), cada um deles ligado a um *modem/router* (“6” e “7”), estando estes últimos ligados a dois *Raspeberry Pi* (“8” e “9”). A ligação dos recetores GNSS aos *modems/routers* e aos *single-board computers* teve a colaboração do aluno de doutoramento em engenharia geoespacial da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, o mestre André Pinhal, e do seu orientador Prof. José Alberto Gonçalves, parceiros externos do projeto GeodAM. Refere-se que foi utilizado o *software* RTKLIB¹, de livre acesso, em versão CUI (Character

¹ Este *software* pode consultar-se na seguinte página <https://www.rtklib.com/> e aceder aos programas de instalação.

User Interface) em vez da versão GUI (Graphical User Interface), porque requer menos memória RAM, consome menos energia e é mais rápido a processar as observações, sendo, por isso, mais adequado para o processamento automático.

Pretende-se com esta tarefa preparar recetores GNSS que possam operar remotamente, ou seja, a observação, o acesso à observação e a gestão do armazenamento da observação possa ser feita à distância. Numa segunda fase, pretende-se que as observações possam ser processadas em tempo real, que se possam analisar os resultados, identificar *outliers* e produzir relatórios periódicos, tudo de forma automática (correspondendo às tarefas 3 e 4). Esta tarefa foi apresentada em comunicação na X Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia (Pinhal *et al.*; 2024).



Figura 7.1 – Ensaio com os recetores GNSS Topcon GB-1000: 1 – antena GNSS Topcon choke ring; 2 – antena GNSS Topcon choke ring; 3 – sala onde estavam os recetores GNSS; 4 – recetor GNSS Topcon GB-1000; 5 – recetor GNSS Topcon GB-1000; 6 – modem/router Opal Gi iNet; 7 – modem/router Opal Gi iNet; 8 – Raspberry Pi; e 9 – Raspberry Pi

Na segunda tarefa propõe-se realizar testes com recetores GNSS de baixo custo. Não dispondo o LNEC, ainda, destes tipos de equipamento, optou-se por testar o recetor GNSS Septentrio Mosaic-X5, que tem sido utilizado com bastante sucesso em projetos da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL) e da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP). Além disso, estes recetores haviam sido disponibilizados quer pela FCUL quer pela FCUP para a realização de testes para esta tarefa. Trata-se de um recetor de dimensões muito reduzidas, de baixo consumo de energia e, sobretudo, de baixo custo, sem, contudo, comprometer as capacidades de observação GNSS. De facto, está equipado com 440 canais para observar todos os satélites GNSS que estejam acima do horizonte. De integração fácil com outros equipamentos. A Figura 7.2 mostra o recetor GNSS de baixo custo, Septentrio Mosaic-X5, em teste no *campus* do LNEC. Foram utilizados dois tipos de antena, um de baixo custo e de dimensão reduzida (sinalizada com “2” na Figura 7.2) e um outro de qualidade

geodésica, Topcon CR3-GGD (“1” na Figura 7.2) e dois recetores GNSS Septentrio Mosaic-X5 (“3” e “4” na Figura 7.2). Os testes, que ainda decorrem, têm em vista a instalação destes recetores em barragens de betão e na ponte 25 de Abril, estando integrados na terceira tarefa.

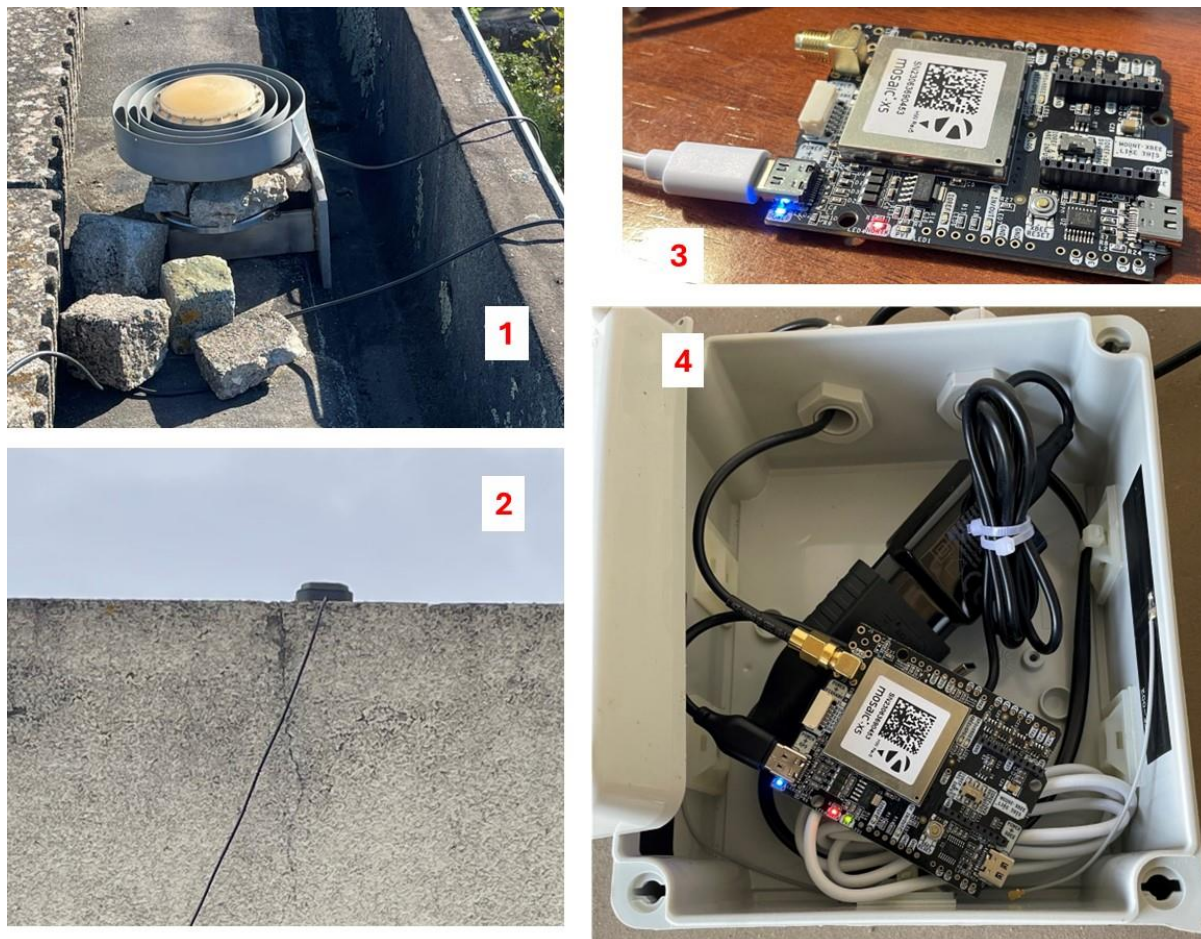


Figura 7.2 – Testes realizados com os recetores de baixo custo Septentrio Mosaic-X5

A terceira tarefa prevê a instalação de recetores GNSS de baixo custo em barragens de betão. Ainda não há uma barragem escolhida, mas conta-se instalar um sistema GNSS de monitorização nas torres da ponte 25 de Abril. Este sistema prevê a instalação de quatro recetores da Leica GS10 com antenas da Leica AS11 e dois recetores GNSS Septentrio Mosaic-X5 com duas antenas Topcon *Choke Ring* CG3-GGD. Será uma boa oportunidade para fazer um teste comparativo entre os recetores GNSS de baixo custo com recetores de qualidade geodésica, mas desta vez utilizando um posicionamento relativo cinemático.

A quarta e última tarefa estão previstas começar em 2027.

7.2.2 Atividade 2 – Análise de deslocamentos InSAR

A primeira tarefa da Atividade 2 previa a exploração de software de acesso livre para a realização de processamentos InSAR. Foram efetuados testes com os *softwares* MintPy e StaMPS, com algoritmos que consideram tanto dispersores persistentes como distribuídos, para processamento de imagens

SAR do *campus* do LNEC contemporâneas dos ensaios realizados na infraestrutura de refletores artificiais entre 2017 e 2020.

A segunda tarefa visava a validação e avaliação da incerteza dos deslocamentos determinados através dos *softwares* de acesso livre. Os resultados obtidos foram comparados com dados *in-situ* registados durante os ensaios de 2017 – 2020 e com deslocamentos calculados com o *software* comercial SARPROZ®, tendo sido verificado que os resultados obtidos pelos *softwares* de acesso livre apresentaram mais ruído (Alonso-Díaz *et al.*; 2024) e uma maior incerteza que os do *software* comercial. A infraestrutura de refletores artificiais foi também utilizada para efetuar a calibração de deslocamentos InSAR destinados à monitorização de infraestruturas de transporte (Alonso-Díaz; 2025, Alonso-Díaz *et al.*; 2025). Foram efetuados ensaios no refletor do LNEC, no âmbito da tese de doutoramento da aluna Mariana Ormeche do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (IST-UL), com o objetivo de simular padrões de deslocamento encontrados frequentemente em deslizamentos de terra. Está em preparação um artigo sobre a validação e avaliação de incerteza de deslocamentos InSAR para submissão à revista *Remote Sensing Applications: Society and Environment*.

A terceira tarefa pretende utilizar métodos de análise Bayesiana e *machine learning* para analisar séries temporais de deslocamento InSAR, a fim de remover outliers e detetar anomalias de forma automática. Esta tarefa será iniciada no biénio 2026 – 2027.

O estudo efetuado nas tarefas 1 e 2 sugere que, na monitorização de infraestruturas – que requer a determinação de deslocamentos com uma incerteza próxima do limite da tecnologia InSAR – uma solução de *software* comercial apresenta potencial para melhorar significativamente o desempenho e a eficiência face às alternativas de acesso livre atualmente testadas. Neste momento, está em processo de aquisição uma licença de um ano do *software* SARPROZ®, que estava prevista no orçamento do projeto GeodAM e que será cofinanciada pelo projeto CAMBER – *Connected and adaptive maintenance for safer urban and secondary roads*, do programa Horizonte Europa. Enquanto o *software* não está disponível, têm sido utilizados dados do serviço europeu de movimentos do solo (*european ground motion service*) do programa Copernicus da União Europeia, que consistem em séries temporais de deslocamento InSAR observadas entre 2019 e 2023, para vários países europeus. Foi desenvolvida uma aplicação computacional em R para converter os dados deste serviço para o formato lido pelas aplicações para análise de dados InSAR desenvolvidas no âmbito do projeto INFRASAR do P2I 2014-2020. Esta estratégia foi aplicada a estudos por contrato, nomeadamente na definição do programa de reconhecimento e das especificações técnicas para a carta de suscetibilidade a movimentos de terreno no Bairro do Carvalheiro e Casal da Azenha (0404/1201/2437201) e no sistema de monitorização geotécnica da encosta de A-dos-Melros (0404/1201/2435501).

7.2.3 Apreciação da atividade desenvolvida e proposta de alteração do plano para 2026-2027

De acordo com a calendarização do projeto GeodAM, na Atividade 1 os dois primeiros anos incidiram essencialmente nas duas primeiras tarefas. Para a primeira tarefa, na falta de equipamentos GNSS disponíveis seria importante dotar dois recetores Topcon Gb-1000, já adquiridos em 2005, de uma autonomia de modo que pudessem observar remotamente sem visitas periódicas ao local onde estivessem instalados. Ou seja, que remotamente se conseguisse ter acesso às observações, aos deslocamentos medidos (em tempo real ou quase real) e à gestão do armazenamento dos dados. Com a ajuda do aluno de doutoramento da FCUP essa autonomia foi conseguida e foram realizados vários testes no *campus* do LNEC. Infelizmente, a antiguidade destes recetores não permite observar satélites que não sejam das constelações GPS e GLONASS (esta última, pelo facto de ser russa, tem algumas limitações devido à guerra entre a Ucrânia e a Rússia). Os satélites da constelação europeia, o Galileo, e da constelação chinesa, o Beidou, não podem ser observados, sendo, por isso, uma limitação considerável, sobretudo para a monitorização de deslocamentos de frequências mais elevadas. Para além disso, o aluno de doutoramento da FCUP deixou de estar disponível para colaborar no GeodAM em virtude de ter conseguido uma bolsa em projeto em Astronomia, no Observatório Astronómico Prof. Manuel de Barros, da FCUP. Parte dos desenvolvimentos nesta tarefa vão ser importantes nas tarefas seguintes do projeto.

A segunda tarefa beneficiou da colaboração do professor auxiliar da FCUL, o doutorado Pedro Belé Mateus, que disponibilizou vários recetores GNSS de baixo custo, Septentrio Mosaic-X5, e de antenas GNSS também de baixo custo. Foram instalados dois destes recetores GNSS no campus do LNEC, com antenas GNSS de qualidade geodésica (Topcon *choke ring* CG3-GGD) e com antenas GNSS de baixo custo, para a realização de vários testes. Entretanto surgiu a possibilidade de se monitorizar as duas torres da ponte 25 de Abril. Já se realizou uma visita para a escolha dos locais e desenharam-se peças de fixação das antenas GNSS. A monitorização das duas torres da ponte 25 de Abril não estava prevista para este projeto.

Os desenvolvimentos realizados no âmbito da Atividade 2 têm beneficiado da colaboração com alunos de doutoramento, nomeadamente da Universidade de Vigo e do IST-UL, que têm promovido a comparação entre diferentes algoritmos de processamento InSAR e novas utilizações do refletor artificial do LNEC. Têm sido desenvolvidas ferramentas para apoiar estudos por contrato em que têm sido utilizados deslocamentos InSAR do serviço europeu de movimentos do solo do programa Copernicus. As tarefas programadas continuarão a ser executadas no biénio 2026 – 2027, tendo em vista o desenvolvimento de um sistema de alerta baseado em InSAR.

Em 2025, parte do projeto GeodAM foi incluída numa candidatura a projeto exploratório da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) intitulada “SafeInfraSat – Avaliação de segurança e risco das infraestruturas ferroviárias utilizando imagens de satélite de acesso aberto”, que não foi selecionada para financiamento. Foi também considerada em duas candidaturas ao programa Horizonte Europa que estão em avaliação: AERIS – *Advanced engineering and nature-based solutions for non-interfering*,

resilient infrastructure systems e TRANSGREEN – *Transport green infrastructure for climate resilience and biodiversity*.

As restantes tarefas, que se desenvolverão em 2026 e 2027, poderão beneficiar da colaboração de dois elementos que irão integrar a equipa da NGA, através de dois concursos, um para recrutamento de um investigador auxiliar, no âmbito do programa FCT-Tenure, e outro para uma bolsa de investigação para mestre inscrito em curso não conferente de grau académico, no âmbito de outro projeto P2I do NGA, o DICE.

8 | Divulgação de resultados

8.1 Teses e dissertações

ALONSO-DÍAZ, A.; 2025. **Radar data integration methodologies for the evaluation of transport infrastructure and digitalization of risk**. Tese de doutoramento, Department de Enxeñaría dos Recursos Naturais e Medio Ambiente, Universidade de Vigo, junho de 2025.

8.2 Comunicações em encontros internacionais

ALONSO-DÍAZ, A.; ROQUE, D.; SOLLA, M; LIMA, J.N., 2024. **Comparative analysis of MT-InSAR algorithms supported by GNSS data and corner reflectors: Assessing performance and accuracy**. ScienceDirect, Procedia Computer Science, 239 (2024), pp. 1460-1466 <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.06.319>.

LIMA, J.N.; 2025. **How effective is monitoring concrete dams with GNSS in 3D mode?** Proceedings of Fifth International Dam World Conference, LNEC, Lisbon, Portugal, April 13-17, 2025, pp. 357-375.

8.3 Revistas internacionais

ALONSO-DÍAZ, A.; ROQUE, D.; LIMA, J.N.; RODRIGUEZ, J.L.; SOLLA, M, 2025. **Improvement of InSAR displacements based on GNSS station calibration over corner reflector**. Measurement, Elsevier, Volume 257, Part D, 118946 <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118946>.

8.4 Comunicações em encontros nacionais

ROQUE, D; LIMA, J.N.; 2024. **Qual a precisão conseguida no posicionamento GNSS com processamento online?** Atas da X Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Instituto Politécnico da Guarda, 2 e 3 de dezembro de 2023, Guarda. https://www.ordemdosengenheiros.pt/fotos/editor2/2024/x_cncg_s4a_6.pdf.

PINHAL, A.; GONÇALVES, J.A.; MAGALHÃES, A.; LIMA, J.N.; 2024. **Desenvolvimento de uma solução GNSS miniaturizada para Monitorização de Estruturas de Engenharia Civil**. Atas da X Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Instituto Politécnico da Guarda, 2 e 3 de dezembro de 2023, Guarda.

ROQUE, D.; FALCÃO, A.P., 2024. **Monitorização com InSAR de encostas na vizinhança de uma albufeira durante o primeiro enchimento**. Atas da X Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Instituto Politécnico da Guarda, 2 e 3 de dezembro de 2023, Guarda. https://www.ordemdosengenheiros.pt/fotos/editor2/2024/x_cncg_s1b_2.pdf

LIMA, J.N.; 2024. **Limites da precisão e da resolução temporal na observação de barragens com o GNSS: o caso da barragem do Baixo Sabor**. Atas do Encontro Nacional Betão Estrutural, BE24, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 13 a 15 de novembro, pp. 581- 590.
https://www.fe.up.pt/be2024/wp-content/uploads/2024/11/BE2024_Livro_Atas.pdf.

9 | Indicadores de desempenho, recursos mobilizados e financiamento

9.1 Indicadores de desempenho

No quadro 9.1 apresentam-se os indicadores de desempenho do projeto, os seus valores totais previstos na ficha inicial e os já realizados em 2024-2025.

Quadro 9.1 – Indicadores de desempenho

	Indicadores	Total previsto no projeto (4 anos)	Realizado até 2025 (2 anos)
Publicações	Relatórios científicos	3	1
	Livros		
	Capítulos de livros		
	Artigos em revistas internacionais	2	1
	Artigos em revista nacionais	1	
Comunicações	Comunicações em congressos internacionais	4	2
	Comunicações em congressos nacionais	3	4
Organização de seminários e conferências	Eventos científicos e técnicos internacionais organizados ou coorganizados		
	Eventos científicos e técnicos nacionais organizados ou coorganizados		
Formação avançada	Teses de doutoramento	1	1
	Dissertações de mestrado	1	
	Outros documentos de formação avançada		
Documentos de divulgação e orientação técnica e de apoio à decisão	Especificações LNEC		
	Informações Técnicas LNEC		
	Guias		
	Normas de aplicação		
	Outros documentos		
Outros	Modelos		
	Aplicações computacionais	2	1
	Instalações piloto		
	Protótipos laboratoriais		

9.2 Recursos humanos mobilizados

No Quadro 9.2 apresentam-se os recursos humanos do LNEC afetos ao projeto GeodAM, os meses de trabalho previstos na totalidade do projeto e os meses efetivamente dedicados ao projeto em 2024-2025.

Quadro 9.2 – Afetação de recursos humanos do LNEC

Equipa do LNEC	Meses de trabalho	
	Total previsto no projeto (4 anos)	Realizado em 2024 e 2025 (2 anos)
José Nuno Lima	7,0	3,0
Maria João Henriques	3,2	1,4
Dora Roque	2,4	1,3
Sérgio Oliveira	2,4	-
Henrique Candeias	1,0	-
Nádia Braz	1,0	-

10 | Considerações finais

Os dois primeiros anos do projeto GeodAM decorreram próximo do que se tinha previsto. Na Atividade 1 procurou-se realizar as duas primeiras tarefas até ao fim. Nos próximos dois anos prevê-se realizar a terceira e a quarta tarefas, que vão dar seguimento ao trabalho desenvolvido nas duas primeiras tarefas. Na atividade 2, a primeira e a segunda tarefas estão em estado avançado de desenvolvimento. A terceira tarefa será realizada no biénio 2026 – 2027.

Propõe-se, ainda, a inclusão dos dois novos membros do NGA na equipa do projeto.

Lisboa, LNEC, maio de 2026

VISTOS

A Chefe do Núcleo de Geodesia Aplicada

Assinado por: **Maria João Oliveira De Barros
Henriques**
Num. de Identificação: 05320720
Data: 2026.05.06 18:06:16+01'00'

Maria João Henriques

O Diretor do Departamento de
Barragens de Betão

Assinado por: **António Lopes Batista**
Num. de Identificação: 03847091
Data: 2026.05.08 09:00:10+01'00'

António Lopes Batista

AUTORIA

Assinado por: **José Nuno dos Reis Pedroso de
Lima**
Num. de Identificação: 04449115
Data: 2026.05.06 17:38:49+01'00'

José Nuno Lima

Investigador Principal

Assinado por: **Dora Luísa Ferreira Da Luz Roque**
Num. de Identificação: 12959324
Data: 2026.05.06 17:49:24+01'00'

Dora Roque

Investigadora Auxiliar

Referências bibliográficas

- ALMEIDA, E.; PIMENTEL, D.; FERNANDES, D.; PESTANA, C.; ARAÚJO, R., 2017 – **Automated geodetic monitoring systems in new hydropower plants**. Atas da INGEO 2017 – 7th International Conference on Engineering Surveying, Lisboa, LNEC, pp. 77-82.
- ALONSO-DÍAZ, A.; ROQUE, D.; SOLLA, M.; LIMA, J.N., 2024 – **Comparative analysis of MT-InSAR algorithms supported by GNSS data and corner reflectors: assessing performance and accuracy**. ScienceDirect, Procedia Computer Science, 239 (2024), pp. 1460-1466
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.06.319>.
- ALONSO-DÍAZ, A.; ROQUE, D.; LIMA, J.N.; RODRIGUEZ, J.L.; SOLLA, M., 2025 – **Improvement of InSAR displacements based on GNSS station calibration over corner reflector**. Measurement, Elsevier, Volume 257, Part D, 118946
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118946>.
- ALONSO-DÍAZ, A., 2025 – **Radar data integration methodologies for the evaluation of transport infrastructure and digitalization of risk**. Tese de doutoramento, Department: Enxeñaría dos recursos naturais e medio ambiente, Universidade de Vigo, junho de 2025.
- BEHR, J.; HUDNUT, K.W.; KING, N.E., 1999 – **Monitoring structural deformation at Pacoima Dam, California, using continuous GPS**. USGS Southern California, Earthquake Center, Los Angeles, USA SCIGN-USGS, 1999.
- CASACA, J., 2001 – **O método da variação de coordenadas na observação geodésica de barragens**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ICT, Informação Técnica Barragens, ITB 21.
- LIMA, N.; CASACA, J.; HENRIQUES, M. J., 2006 – **Accuracy of displacements monitoring at large dams with GPS**. International Association of Geodesy Symposia, Vol. 131, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 239 -243.
- LIMA, J.N.; OLIVEIRA, S.; HENRIQUES, M.J.; SILVESTRE, A., 2014 – **A integração do GNSS no controlo de segurança de grandes estruturas**. Atas das 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, JPEE 2014, Lisboa, 2014.
- LIMA, J.N.; CASACA, J., 2018 – **Monitoring dam displacements with GNSS: strategy, accuracy and benefits**. Atas do 3rd International Dam World Conference (Dam World 2018). Brasil, Foz do Iguaçu, 17 a 21 de setembro 2018.
- LIMA, J.N., 2022 – **GNSS na monitorização em tempo real do comportamento estrutural de grandes obras**. Atas da JPEE 2022, 6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Encontro Nacional de betão estrutural 2022, 12º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Lisboa, LNEC, 9 a 11 de novembro de 2022.

- LIMA, J.N., 2024 – **Limites da precisão e da resolução temporal na observação de barragens com o GNSS: o caso da barragem do Baixo Sabor**. Atas do Encontro Nacional Betão Estrutural, BE24, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 13 a 15 de novembro, pp. 581- 590.
https://www.fe.up.pt/be2024/wp-content/uploads/2024/11/BE2024_Livro_Atas.pdf.
- LIMA, J.N., 2025 – **How effective is monitoring concrete dams with GNSS in 3D mode?** Proceedings of Fifth International Dam World Conference, LNEC, Lisbon, Portugal, April 13-17, 2025, pp. 357-375.
- LNEC, 2018 – **MEGA – Métodos estocásticos em geodesia aplicada. Relatório de progresso 2015 – 2017 do projeto P2I/LNEC**. LNEC - Proc. 0404/112/19619. Relatório 62/2018 – DBB/NGA.
- LNEC, 2021 – **Metro do Porto - Resultados da monitorização das infraestruturas com interferometria SAR**. LNEC - Proc. 0404/1201/22896. Relatório 335/2021 – DBB/NGA.
- LNEC, 2026 – **DICE – Imagens digitais para apoio a estudos de Engenharia Civil. Relatório de progresso do projeto P2I/LNEC/ 2021/2027**. LNEC - Proc. 0404/1102/24149. Relatório 162/2026 – DBB/NGA.
- PINHAL, A.; GONÇALVES, J.A.; MAGALHÃES, A.; LIMA, J.N., 2024 – **Desenvolvimento de uma solução GNSS miniaturizada para monitorização de estruturas de Engenharia Civil**. Atas da X Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Instituto Politécnico da Guarda, 2 e 3 de dezembro de 2023, Guarda.
- ROCHA, M.; SERAFIM, L.; FERREIRA DA SILVEIRA, J.; RODRIGUES, O. V., 1956 – **The observation of the behaviour of the portuguese concrete dams**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Publication nº 80, Lisboa.
- ROQUE, D.; LIMA, J.N.; PERISSIN, D.; FALCÃO, A.P.; LEMOS, J.V.; FONSECA, A., 2021 – **Integrated InSAR and GNSS monitoring sub-system for an arch dam and reservoir banks**. Journal of Surveying Engineering, Vol. 147, No. 3, 05021003.
- ROQUE, D; LIMA, J.N., 2024 – **Qual a precisão conseguida no posicionamento GNSS com processamento online?** Atas da X Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Instituto Politécnico da Guarda, 2 e 3 de dezembro de 2023, Guarda.
https://www.ordemosengenheiros.pt/fotos/editor2/2024/x_cncg_s4a_6.pdf.
- ROQUE, D.; FALCÃO, A.P., 2024 – **Monitorização com InSAR de encostas na vizinhança de uma albufeira durante o primeiro enchimento**. Atas da X Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, Instituto Politécnico da Guarda, 2 e 3 de dezembro de 2023, Guarda.
https://www.ordemosengenheiros.pt/fotos/editor2/2024/x_cncg_s1b_2.pdf.

ANEXOS

ANEXO I

Ficha de projeto



FICHA DE PROJETO

GEODETIC METHODS OF AUTOMATIC MONITORING / MÉTODOS GEODÉSICOS PARA MONITORIZAÇÃO AUTOMÁTICA

(GEODAM)

Versão da ficha 2 | 1900/01/00



ENQUADRAMENTO

A Estratégia de Investigação e Inovação 2021-2027 (E2I 21-27) estabelece a orientação estratégica para a atividade de investigação e inovação do LNEC para o período de 2021 a 2027. A E2I 21-27 está estruturada com base num ciclo de inovação e investigação com as seguintes etapas: motivação, temas, desafios, tipo de resultados, valor acrescentado e conectividade.

A E2I 21-27 é concretizada através do Plano de Investigação e Inovação que comporta: (i) Projetos de investigação, que têm um objeto de investigação específico e os aspetos de inovação claramente definidos, e (ii) Programas de investigação, que estabelecem linhas de investigação mais amplas nos quais se inserem vários projetos de investigação.

Os projetos e programas de investigação são descritos em fichas de projeto de investigação e em fichas de programa de investigação. A apreciação destas fichas de programa e projeto é apresentada numa ficha de apreciação. A monitorização e avaliação dos projetos e programas tem com base uma ficha de autoavaliação preenchida pelo investigador responsável a meio e no fim do projeto.

FICHA DE PROJETO

Geodetic Methods of Automatic Monitoring / Métodos Geodésicos para Monitorização Automática

Investigador responsável

José Nuno Lima

Departamento de Barragens de Betão

Copyright © Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.

Av. do Brasil 101 • 1700-066 Lisboa

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

(Versão de julho de 2022)

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO

- 1.1 DADOS GERAIS
- 1.2 ENTIDADES INTERVENIENTES
- 1.3 RESUMO

2. FUNDAMENTAÇÃO

- 2.1 ESTADO DA ARTE
- 2.2 PROBLEMAS POR RESOLVER
- 2.3 CONTRIBUIÇÕES INOVADORAS
- 2.4 MOTIVAÇÃO

3. TEMAS E OBJETIVOS

- 3.1 TEMAS E DESAFIOS
- 3.2 OBJETIVO GERAL DO PROJETO
- 3.3 OBJETIVO ESPECÍFICOS DO PROJETO

4. METODOLOGIA

- 4.1 DESCRIÇÃO DA ABORDAGEM GERAL
- 4.2 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS A UTILIZAR

5. EQUIPA

6. PLANO DE TRABALHOS

7. CRONOGRAMA

8. RESULTADOS, PRODUTOS E DISSEMINAÇÃO

- 8.1 TIPO DE RESULTADOS DO PROJETO
- 8.2 VALOR ACRESCENTADO DO PROJETO
- 8.3 ESTRATÉGIA DE DEVOLUÇÃO DOS RESULTADOS À SOCIEDADE
- 8.4 PRODUTOS PREVISTOS

9. INDEXAÇÃO AO CONTEXTO

10. ORÇAMENTO E FINANCIAMENTO

- 10.1 RECURSOS HUMANOS
- 10.2 DESPESAS CORRENTES
- 10.3. EQUIPAMENTO
- 10.4 ORÇAMENTO

A.1 CONTRIBUIÇÃO PARA OS INDICADORES DA E2I

A.2 CICLO DE INVESTIGAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1 DADOS GERAIS

Título do projeto

Geodetic Methods of Automatic Monitoring / Métodos Geodésicos para Monitorização Automática

Acrónimo do projeto

GeodAM

Unidade Departamental

Departamento de Barragens de Betão

Setor

Núcleo de Geodesia Aplicada

Investigador responsável

José Nuno Lima

Data de início

01/03/2024

Duração (meses)

48

Versão da ficha

2

Data da ficha

1.2 ENTIDADES INTERVENIENTES

Unidade operativa coordenadora

Departamento de Barragens de Betão

Parceiros internos

Departamento de Barragens de Betão / Núcleo de Geodesia Aplicada

Parceiros externos

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Entidades financiadoras

Entidades externas interessadas

EDP

Iberdrola

ENGIE

Breve descrição do interesse das entidades externas

O projeto Geodetic Methods of Automatic Monitoring (GeodAM) é um estudo em Geodesia Aplicada sobre os problemas de planeamento, controlo da qualidade, estimação de parâmetros e predição na observação geodésica de barragens de betão e outras obras, pelos métodos convencionais (nivelamento geométrico e triangulação) e também por métodos espaciais (GNSS e InSAR), privilegiando o desenvolvimento de ferramentas que permitam a monitorização automática com recurso às estações em permanência in situ. A monitorização automática possibilita um acompanhamento das obras quase em tempo real, representando uma mais-valia para os donos de obra.

1.3 RESUMO

O projeto Geodetic Methods of Automatic Monitoring (GeodAM) procura dar resposta em três componentes que caracterizam a investigação e os trabalhos de contrato do LNEC:

- 1) Envelhecimento das grandes obras de engenharia civil e os desafios colocados pelas novas grandes obras;
- 2) Custos elevados com a monitorização convencional e o envelhecimento e redução das equipas de campo;
- 3) Aproveitamento das novas tecnologias para desenvolver ferramentas que permitam uma monitorização mais eficiente, por isso, mais sustentável.

A introdução recente de nova instrumentação de observação na monitorização de deslocamentos de barragens por métodos geodésicos, nomeadamente, taqueómetros motorizados e estações permanentes GNSS, veio tornar necessário o aperfeiçoamento dos métodos tradicionais de planeamento dos sistemas de observação, de controlo de qualidade das observações e de processamento dos dados. O projeto GeodAM pretende cobrir uma gama de atividades que vão da comparação de instrumentos à criação de modelos para a interpretação das observações com estações permanentes GNSS, taqueómetros robotizados e InSAR.

O projeto GeodAM, que se encontra inserido na área genérica da exploração de dados (*data mining*), destina-se a enquadrar o estudo e aplicação das metodologias de análise estatística convencional frequentista e a sua generalização Bayesiana aos dados resultantes dos sistemas de observação geodésica de grandes barragens de betão e outras obras portuguesas. Resulta da monitorização automática com estações permanentes em obra, a observar em contínuo, a disponibilização de séries temporais que devem ser tratadas para que os resultados sejam otimizados em precisão e em tempo útil. Para isso, neste projeto vão se aplicar filtros digitais (passa banda, de Kalman, etc.), fusão de observações de diferentes instrumentos e algoritmos que permitam a deteção de outliers.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1 ESTADO DA ARTE

Desde a década de 50 do século passado que se empregam no LNEC técnicas geodésicas para monitorizar deslocamentos em barragens e noutras importantes obras de engenharia civil. Embora inicialmente se utilizassem teodolitos ótico-mecânicos, níveis ótico-mecânicos e fitas de invar, eram empregues todos os cuidados nas observações e estas já eram tratadas pelo método das variações de coordenadas (Rocha et al., 1956). Nas décadas de 70 e 80 do século passado, aproveitando o desenvolvimento de modelos matemáticos e meios de cálculo automático, foi desenvolvido no LNEC software para o planeamento e análise das redes de triangulação e nivelamento utilizadas na observação de barragens (Casaca, 2001). Simultaneamente, os desenvolvimentos da microeletrónica e dos sistemas de informação permitiram o aparecimento de novos instrumentos de observação como os taqueómetros eletrónicos motorizados e os níveis óticos digitais (Casaca, 2001), melhorando as comodidades da observação e aumentando a sua precisão.

As primeiras observações dos deslocamentos em barragens portuguesas com o GNSS foram realizadas em 2004, na barragem de Alqueva (Lima, et. al., 2006), mas ainda não passavam de campanhas periódicas com sessões de observação de curta duração, apesar de os resultados serem prometedores. No entanto, já em 1995 se monitorizava a barragem de Pacoima (Califórnia, EUA) com GPS, com duas estações em permanência, uma localizada num dos encontros e a outra na consola central do coroamento (Behr et al., 1999).

Só em 2016 se instalaram as primeiras estações GNSS em permanência para monitorizar quatro barragens portuguesas em contínuo (Lima e Casaca, 2018). A aplicação de filtros nas séries temporais GNSS permitiu que se atingisse uma precisão submilimétrica neste tipo de monitorização (Lima e Casaca, 2018). Também neste mesmo ano se instalou pela primeira vez um taqueómetro robotizado em permanência numa barragem portuguesa (Almeida et. al., 2017). O projeto MEGA (Métodos Estocásticos em Geodesia Aplicada (LNEC, 2018)) permitiu desenvolver uma série de ferramentas para ser aplicado às séries temporais GNSS, como, por exemplo, a deteção de outliers recorrendo a um procedimento bayesiano que se baseia nas elipses preditivas posteriores que assumem haver uma estabilidade temporal num ponto num determinado período de tempo (Lima, 2022).

A utilização de InSAR para fins científicos teve início na década de 1990, com o lançamento de satélites com sensores SAR a bordo, por parte das agências espaciais europeia, japonesa e canadiana. A técnica InSAR diferencial, utilizada nessa década, permitia determinar deslocamentos para grandes áreas, em alvos naturalmente existentes no terreno, com incerteza centimétrica, e era aplicada na monitorização de fenómenos geodinâmicos (deformações causadas por sismos ou atividade vulcânica). No início do século XXI, surgiram as técnicas multitemporais de InSAR, que passaram a possibilitar a monitorização de deslocamentos com incerteza milimétrica. O desenvolvimento de algoritmos de processamento mais avançados, aliado ao desenvolvimento de sensores com capacidade para adquirir imagens de alta resolução e à crescente preocupação das agências espaciais em garantir a aquisição de imagens com uma frequência regular, contribuiu para o interesse na aplicação desta tecnologia à monitorização de estruturas e da sua envolvente. No LNEC, há experiência na utilização de InSAR na monitorização de barragens e respetiva envolvente (Roque et al., 2021) e de vias de comunicação (LNEC, 2021).

O presente projeto pretende implementar várias ferramentas para automatizar a monitorização de barragens e de outras obras, desde a recolha e gestão da observação, passando pelo processamento das observações com análise dos resultados e deteção de erros, e com a emissão de relatórios periódicos.

Almeida, E., Pimentel, D., Fernandes, D., Pestana, C., Araújo, R., 2017. "Automated geodetic monitoring systems in new hydropower plants", Atas da INGEO 2017 – 7th International Conference on Engineering Surveying, Lisboa, pp. 77-82.

Behr, J., Hudnut, K.W. e King, N.E., 1999. "Monitoring Structural Deformation at Pacoima Dam, California, using continuous GPS". USGS Southern California, Earthquake Center, Los Angeles, USA SCIGN-USGS, 1999.

Casaca, J., 2001. "O método da variação de coordenadas na observação geodésica de barragens", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ICT, Informação Técnica Barragens, ITB 21.

Lima, N., Casaca, J. e Henriques, M. J., 2006. "Accuracy of displacements monitoring at large dams with GPS". International Association of Geodesy Symposia, Vol. 131, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 239-243.

Lima, J.N. e Casaca, J., 2018. "Monitoring dam displacements with GNSS: strategy, accuracy and benefits.", Atas do 3rd International Dam World Conference (Dam World 2018). Brasil, Foz do Iguaçu, 17 a 21 de setembro 2018.

Lima, J.N., 2022. "GNSS na monitorização em tempo real do comportamento estrutural de grandes obras", Atas da JPEE 2022, 6ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Encontro Nacional de betão estrutural 2022, 12º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Lisboa, LNEC, 9 a 11 de novembro de 2022.

LNEC, 2018. "MEGA – Métodos Estocásticos em Geodesia Aplicada. Relatório de progresso 2015 – 2017 do projeto P21/LNEC". LNEC, Relatório 62/2018 – DBB/NGA, fevereiro de 2018.

Rocha, M., Laginha Serafim, J., Ferreira da Silveira, A. e Rodrigues, O. V., 1956. "The observation of the behaviour of the portuguese concrete dams", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Publication nº 80, Lisboa.

Roque, D., Lima, J.N., Perissin, D., Falcão, A.P., Lemos, J.V., Fonseca, A. (2021). "Integrated InSAR and GNSS monitoring sub-system for an arch dam and reservoir banks". Journal of Surveying Engineering, Vol. 147, No. 3, 05021003.

LNEC (2021). "Metro do Porto - Resultados da monitorização das infraestruturas com Interferometria SAR". LNEC, Relatório 335/2021 - DBB/NGA, outubro de 2021.

2.2 PROBLEMAS POR RESOLVER

Ao contrário da monitorização convencional, as tendências atuais da monitorização são caracterizadas pela observação contínua e automatizada. A informação disponibilizada por este tipo de monitorização permite conhecer o comportamento de pontos notáveis (e, portanto, da integridade estrutural da obra) continuamente e quase em tempo real. Por outro lado, os instrumentos de medição deverão permanecer continuamente em obra o que se poderá traduzir num avultado investimento caso se opte pelos instrumentos de topo de gama. Uma das possibilidades, para contornar o elevado preço dos equipamentos de topo de gama, será optar por instrumentos de baixo custo e por software aberto. Mas esta opção requer bons conhecimentos de hardware e a criação de software para ligar os instrumentos de baixo custo a routers e a computadores de baixo custo para que os dados sejam processados, armazenados e difundidos em tempo real.

2.3 CONTRIBUIÇÕES INOVADORAS

2.3.1 Contributo para o progresso dos conhecimentos (científicos, tecnológicos, de processos ou de metodologias)

O potencial de inovação do projecto reside, em primeiro lugar, na aplicação de conceitos estatísticos e probabilísticos como, por exemplo, os filtros digitais, a inferência bayesiana e fusão de observações provenientes de diferentes instrumentos, já estabelecidos, a outras áreas científicas e tecnológicas, nomeadamente à formulação e resolução de problemas práticos da Geodesia Aplicada à monitorização de barragens de betão. Alguns dos resultados do projecto GeodAM poderão ser utilizados por outros sectores do LNEC, nomeadamente o DBB/NO, no tratamento dos dados da observação de barragens, e o DE/NOE, no tratamento dos dados da observação de pontes. Desta forma, o projecto pretende contribuir para ultrapassar as dificuldades identificadas na aplicação de tecnologias que já são operacionais, mas cujo desempenho em contexto de inspeção de estruturas ainda não permite alcançar a qualidade obtida em outras situações de menor complexidade. Pretende-se atingir TRL8.

No caso da monitorização automática de barragens com GNSS e taqueómetros robotizados, esta será uma nova linha de investigação a introduzir no LNEC. O contributo deste projecto será a avaliação da informação relevante de forma automática e em tempo quase real, sendo uma importante mais-valia para os donos de obra e autoridades nacionais. No projecto será testada a monitorização automática de barragens em confronto com outro tipo instrumentação. Considera-se que o TRL actual, neste caso, é de 5 e pretende-se atingir o TRL 8.

Os estudos em InSAR tiveram início na E2I 2014-2020 e o projecto pretende dar continuidade a esta linha de investigação com a avaliação de diferentes algoritmos e a utilização de métodos estatísticos para melhoria dos resultados. O LNEC tem condições ótimas para avaliar a incerteza de deslocamentos InSAR, através dos dados recolhidos nos reflectores orientados para os satélites do programa Copernicus, instalados no campus entre 2017 e 2020. Considera-se que o TRL actual, neste caso, é de 6, pretende-se atingir o TRL 8.

2.3.2 Contributo para o reforço das competências e dos recursos do LNEC, nomeadamente os experimentais

O projecto irá reforçar as competências do LNEC através do desenvolvimento de novos meios para a monitorização automática de barragens (e outras obras importantes), permitindo desde logo um melhor acompanhamento das obras, e de, também, desenvolver novas técnicas e de novos processos que possam a vir dar origem a novas linhas de estudo por contrato.

Atualmente, o LNEC não tem acesso a uma licença de SARPROZ, software proprietário para processamento InSAR que foi testado no projecto INFRASAR do P2I 2014-2020 e utilizado para a realização de um estudo por contrato para o Metro do Porto. Este projecto visa analisar a qualidade dos resultados obtidos através de software de acesso livre e promover a sua melhoria, de forma a capacitar o LNEC para continuar a desenvolver estudos com esta tecnologia.

2.4 MOTIVAÇÃO

Motivos para o desenvolvimento do projeto (ver E2I)

Solicitações - Pedidos de estudo de entidades externas

Oportunidades - Iniciativas e desafios para desenvolver projetos de investigação

Justificação sucinta da motivação para a realização do projeto (opcional)

Envelhecimento das grandes obras de engenharia civil e novos desafios colocados pelas novas grandes obras;

Custos elevados com a monitorização convencional e envelhecimento/redução das equipas de campo;

Aproveitamento das novas tecnologias para desenvolver ferramentas que permitam uma mo

3. TEMAS E OBJETIVOS

3.1 TEMAS E DESAFIOS

Tema principal (ver E2I)

Indústria 4.0

Produção, exploração e gestão da informação e desenvolvimento de sistemas de informação de apoio à decisão

Desafios principais (ver E2I)

Desenvolvimento de sistemas de medição e de controlo, qualidade e avaliação da conformidade
Exploração de big data e data analytics

Tema secundário (ver E2I)

Construção

Desenvolvimento de produtos e processos inovadores para responder às necessidades sociais de qualidade e sustentabilidade do ambiente construído

Desafios secundários (ver E2I)

Preservação e reabilitação do património construído, natural e cultural
Mitigação do risco e promoção da segurança e da resiliência do ambiente construído

Enquadramento nos temas e objetivos de I&I da Unidade Departamental

O projeto proposto está enquadrado nos temas e objetivos de I&I do Departamento de Barragens de Betão (DBB), dada a ênfase do projeto na monitorização e segurança de estruturas. A utilização da monitorização por métodos geodésicos para apoio à administração do território ou segurança de estruturas tem sido um tema de I&I do DBB considerado em vários ciclos anteriores da E2I do LNEC. A atividade do Núcleo de Geodesia Aplicada (NGA) é transversal a vários departamentos do LNEC, pelo que o projeto contempla outros tipos de estruturas para além de barragens e pretende utilizar tecnologias da área da Geodesia para monitorizar e estudar as estruturas, bem como a sua envolvente.

3.2 OBJETIVO GERAL DO PROJETO

O objetivo geral do projeto é desenvolver métodos que potenciem a monitorização de estruturas de engenharia civil. Ao contrário da monitorização convencional, as tendências atuais da monitorização são caracterizadas pela observação contínua e automatizada. Assim, o projeto foca-se no desenvolvimento dos seguintes pontos:

- 1) Implementação de sistemas de monitorização contínua e automatizada (GNSS, taqueómetros robotizados, interferometria de radar, inclinómetros, câmaras fotográficas em diferentes plataformas, outros) em barragens e outras obras importantes;
- 2) Análises das séries temporais, desenvolvimentos de filtros digitais (Kalman, passa-alto, passa-baixo, passa banda, adaptativos), deteção de outliers com inferência bayesiana, implementação de mensagens periódicas do comportamento da obra e mensagens de alerta;
- 3) Utilização de receptores GNSS de baixo custo, fusão de acelerómetros com receptores GNSS.

3.3 OBJETIVO ESPECÍFICOS DO PROJETO

Ao contrário da monitorização convencional, as tendências atuais da monitorização são caracterizadas pela observação contínua e automatizada. A informação disponibilizada por este tipo de monitorização permite conhecer o comportamento de pontos notáveis (e, portanto, da integridade estrutural da obra) continuamente e quase em tempo real. Por outro lado, os instrumentos de medição deverão permanecer continuamente em obra o que se poderá traduzir num avultado investimento caso se opte pelos instrumentos de topo de gama. Uma das possibilidades, para contornar o elevado preço dos equipamentos de topo de gama, será optar por instrumentos de baixo custo e por *software* aberto. Mas esta opção requer bons conhecimentos de *hardware* e a criação de *software* para ligar os instrumentos de baixo custo a *routers* e a computadores de baixo custo para que os dados sejam processados, armazenados e difundidos em tempo real.

A monitorização em contínuo com GNSS nas barragens do Baixo Sabor, do Cabril e do Feiticeiro mostram que existem sistemas no mercado que asseguram de forma fiável a observação de estruturas de engenharia civil. No entanto, é possível ir mais além e com menos. Ou seja, é possível implementar mensagens periódicas do comportamento da obra e mensagens de alerta de forma automática, através das análises automáticas das séries temporais que recorram a aplicações de filtros e deteção de *outliers* implementados de forma automática. Todo esta análise automatizada ainda não foi implementada, embora já tenham sido testados os algoritmos que a permitem realizar. Por outro lado, é possível recorrer a equipamento GNSS que já existe no LNEC, ou adquirir equipamento de baixo custo, e montar um sistema de monitorização com GNSS automático não recorrendo ao equipamento de topo de gama, conforme já foi referido.

Procura-se, também, tirar partido da fusão de acelerómetros com recetores GNSS, técnica já testada no LNEC, para melhorar a precisão do GNSS em tempo real.

Paralelamente, também se pretende desenvolver esforços para dotar a monitorização com InSAR e com taqueómetros robotizados com análise automáticas das séries temporais e a implementação automática das mensagens de alerta.

4. METODOLOGIA

4.1 DESCRIÇÃO DA ABORDAGEM GERAL

Na monitorização em contínuo com o GNSS pretende-se, numa primeira fase, preparar um par de recetores GNSS adquiridos pelo LNEC há quase 20 anos para poderem operar remotamente, isto é, a observação, o processamento e a gestão de dados será tudo controlado a partir do LNEC, através da internet. Numa segunda fase, adquirir recetores e antenas GNSS de baixo custo, realizar testes comparativos com recetores GNSS de topo gama. Na terceira fase, implementar aplicação automática de filtros passa-baixo e a deteção de outliers. Pretende-se, também, aplicar a fusão de acelerómetros com os recetores GNSS. Finalmente, implementar a geração automática de mensagens de alerta.

Na área do InSAR, será explorado um algoritmo de processamento, baseado em difusores distribuídos, adequado para a monitorização de zonas com alguma vegetação, por exemplo encostas, e de vias de comunicação caracterizadas por superfícies tendencialmente lisas (rodovias). Os deslocamentos obtidos serão validados e a sua incerteza avaliada. Será efetuada a análise das séries temporais de deslocamentos.

4.2 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS A UTILIZAR

Os recetores GNSS Topcon GB-1000, adquiridos pelo LNEC em 2005, não estão preparados para operarem remotamente. Pretende-se integrar em cada um destes recetores um pequeno modem/router e um pequeno computador SBC (single-board computer, como, por exemplo, um Raspberry Pi) de modo que estes possam ser operados remotamente (observar, processar os dados e gerir os dados e as séries temporais), através da internet. Este trabalho vai contar com a colaboração de um aluno de doutoramento da FCUP. Pretende-se adquirir dois recetores GNSS de baixo custo, como, por exemplo, os recetores Septentrio Mosaic-go. Far-se-ão testes comparativos com os Topcon GB-1000. Pretende-se, também, implementar de forma automática filtros do tipo passa-baixo nas séries temporais das observações (como, por exemplo, as médias móveis simétricas) e a deteção de outliers recorrendo à inferência Bayesiana. Vai tentar-se implementar uma técnica já ensaiada no LNEC, a fusão de acelerómetros com recetores GNSS, usando os filtros de Kalman, para melhorar a precisão do GNSS em tempo real. No final, pretende-se implementar a geração de mensagens automáticas de alerta, bem como, a geração periódica de gráficos das séries temporais de deslocamentos.

Para o processamento InSAR, pretende-se utilizar o algoritmo small baseline subsets (SBAS), que utiliza difusores distribuídos, implementado no software de acesso livre MintPy. A utilização deste software requer o processamento prévio das imagens SAR num outro software livre (SNAP), que pode ser automatizado. Pretende-se utilizar as ferramentas de programação do SNAP para esse fim. Para a validação de deslocamentos InSAR e para a determinação da sua incerteza serão utilizados os dados recolhidos na infraestrutura experimental de refletores artificiais para os satélites Sentinel-1 do programa Copernicus, instalada no campus do LNEC entre 2017 e 2020, e que foi monitorizada através de nivelamento geométrico e GNSS. As observações obtidas através dos métodos mais precisos serão utilizadas como referência para os deslocamentos InSAR obtidos a partir de imagens contemporâneas dos dados in-situ. A análise de séries temporais de deslocamento InSAR para tratamento de outliers e para deteção de anomalias será efetuada com recurso a análise Bayesiana e a métodos de machine learning.

5. EQUIPA

[illegible]

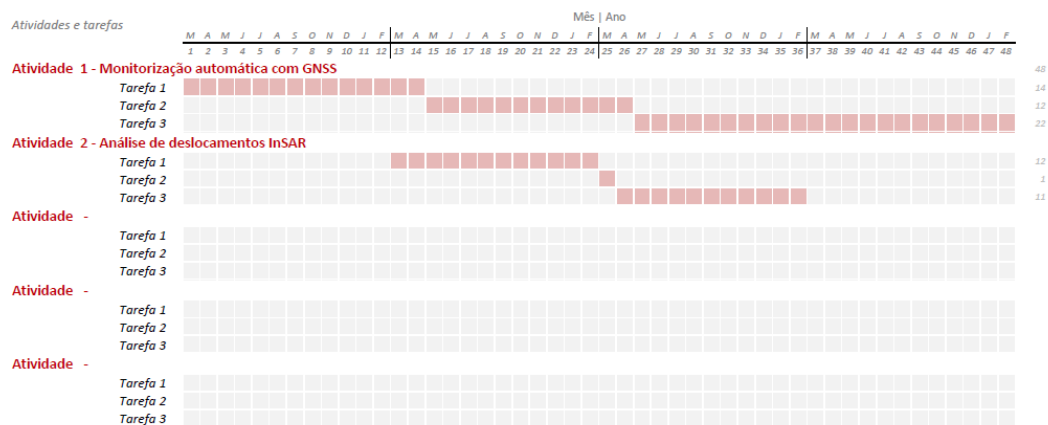
6. PLANO DE TRABALHOS

Atividade	1
<i>Designação</i>	Monitorização automática com GNSS
<i>Descrição</i>	Monitorização em contínuo e de forma automática de barragens e pontes com o GNSS
<i>Resultados</i>	Acompanhamento do comportamento da obra em tempo real e automática
<i>Duração (meses)</i>	48
<i>Equipa</i>	José Nuno Lima 15% Maria João Henriques 7% Sérgio Oliveira 5% Nádia Braz 5%
<i>Tarefa 1</i>	Recuperação dos recetores GNSS Topcon GB-1000
<i>Descrição</i>	Integração em cada um dos recetores de um modem/router e de pequeno computador de modo a operarem em contínuo e de forma automática
<i>Tarefa 2</i>	Testes com recetores GNSS de baixo custo
<i>Descrição</i>	Testes comparativos entre recetores GNSS de baixo custo com recetores GNSS de topo de gama.
<i>Tarefa 3</i>	Monitorização de barragens com recetores GNSS de baixo custo
<i>Descrição</i>	Instalação e observação de barragens em contínuo com recetores GNSS de baixo custo, com processamento automático.
<i>Tarefa 4</i>	Implementação de filtros e mensagens automáticas
<i>Descrição</i>	Implementação automática de filtros do tipo passa baixo, de deteção de outliers com inferência Bayesiana e de mensagens de alerta e relatórios periódicos. Fusão de acelerómetros com GNSS.
Atividade	2
<i>Designação</i>	Análise de deslocamentos InSAR
<i>Descrição</i>	Aperfeiçoamento da capacidade de processamento e análise de deslocamentos InSAR
<i>Resultados</i>	Mapas e séries temporais de deslocamentos InSAR
<i>Duração (meses)</i>	24
<i>Equipa</i>	Dora Roque 5% Henrique Candeias 5%
<i>Tarefa 1</i>	Processamento InSAR

Descrição	Processamento InSAR com SARPROZ, SNAP e MintPy de imagens do campus do LNEC contemporâneas da monitorização dos refletores artificiais e de um caso de estudo das encostas na vizinhança de uma albufeira.
Tarefa 2	Validação dos deslocamentos e avaliação da incerteza
Descrição	Comparação dos deslocamentos InSAR com dados in-situ de referência registados nos refletores do LNEC.
Tarefa 3	Análise de séries temporais de deslocamentos
Descrição	Aplicação de métodos de análise Bayesiana e de <i>machine learning</i> para remoção de outliers e deteção de anomalias.
Tarefa 4	
Descrição	
Atividade	
Designação	
Descrição	
Resultados	
Duração (meses)	
Equipa	
	100%
	100%
	100%
Tarefa 1	
Descrição	
Tarefa 2	
Descrição	
Tarefa 3	
Descrição	
Tarefa 4	
Descrição	
Atividade	
Designação	
Descrição	
Resultados	
Duração (meses)	
Equipa	
	100%
	100%
	100%
Tarefa 1	
Descrição	

Tarefa 2	
Descrição	
Tarefa 3	
Descrição	
Tarefa 4	
Descrição	
Atividade	
Designação	
Descrição	
Resultados	
Duração (meses)	
Equipa	
	100%
	100%
	100%
Tarefa 1	
Descrição	
Tarefa 2	
Descrição	
Tarefa 3	
Descrição	
Tarefa 4	
Descrição	

7. CRONOGRAMA



8. RESULTADOS, PRODUTOS E DISSEMINAÇÃO

8.1 TIPO DE RESULTADOS DO PROJETO

Descritores do tipo de resultados (ver E21)

Informação e conhecimento
<i>Informação e conhecimento, a reter para o desenvolvimento temático em que se referenciam</i>
Produtos e soluções
<i>Produtos e soluções, para responder a problemas ou desafios concretos</i>
Processos e sistemas
<i>Processos e sistemas, para a gestão de ativos e o tratamento, organização e gestão de informação</i>

Descrição dos resultados e sua integração nos diferentes tipos

Durante o projeto espera-se obter informação e conhecimento resultante da atividade desenvolvida, também baseada em projetos de I&I anteriores (e.g., MEGA), o que permitirá melhorar a monitorização de obras em relação à atualidade.

Os resultados obtidos no projeto visam o desenvolvimento de produtos e soluções para a monitorização, identificados durante os trabalhos de investigação e, principalmente, pelos donos de obra. Espera-se aplicar filtros automáticos que permitam melhorar as séries temporais e eliminar outliers, e gerar relatórios automáticos periódicos e de alerta da monitorização da obra.

Também serão desenvolvidos novos processos e sistemas com a monitorização automática, desenvolvendo-se estratégias de processamento dos dados e do seu armazenamento, assim como, com a implementação automática de filtros e deteção de outliers, a visualização dos resultados nos relatórios periódicos e de alerta gerados automaticamente.

8.2 VALOR ACRESCENTADO DO PROJETO

Descritores do valor acrescentado do projeto (ver E21)

Promoção da segurança
Melhoria da eficiência e do desempenho
Promoção da sustentabilidade

Descrição do valor acrescentado do projeto

O projeto irá contribuir para a promoção da segurança da obra porque permite uma monitorização contínua e em tempo real. Por outro lado, permite conhecer melhor a obra quer através dos modelos de comportamento (que serão enriquecidos com a informação proveniente da monitorização contínua), quer através das séries temporais da observação.

A observação automática e em contínuo permite conhecer melhor o comportamento da obra, permitirá, também, o acompanhamento da mesma em tempo real, resultando uma melhoria da eficiência e do desempenho da monitorização.

A observação contínua e automática vai reduzir a frequência de deslocações à obra quando comparada com os métodos tradicionais de observação.

8.3 ESTRATÉGIA DE DEVOLUÇÃO DOS RESULTADOS À SOCIEDADE

Descritores das estratégias de devolução dos resultados à sociedade (ver E21)

Interação com interlocutores

Intensificação da relação do LNEC com os interlocutores a privilegiar com vista a promover a

Comunicação de ciência e disseminação do conhecimento

Sensibilização para a importância do conhecimento científico produzido na melhoria da

Aplicação e replicabilidade dos resultados e produtos

Apropriação e utilização dos resultados pelas interlocutores a privilegiar

Descrição das estratégias de devolução de resultados à sociedade

Os resultados obtidos têm em vista a intensificação da interação com os interlocutores uma vez que a monitorização contínua e em tempo real permite um conhecimento mais aprofundado do comportamento da obra e da sua segurança, beneficiando os donos de obra e o LNEC como consultor técnico das obras monitorizadas.

A monitorização contínua e em tempo real vai obrigar a implementação automática de filtros e a deteção de outliers que terão de ser aplicados em tempo real. O carácter inovador desta implementação deverá ser divulgado em revistas e encontros científicos, tendo em vista a sua aplicação em outras obras.

8.4 PRODUTOS PREVISTOS

Publicações

Relatórios científicos	3
Livros	
Capítulos de livros	
Artigos em revista internacionais	2
Artigos em revista nacionais	

Comunicações

Comunicações em encontros científicos internacionais	4
Comunicações em encontros científicos nacionais	3

Organização de seminários e conferências

Eventos científicos e técnicos internacionais organizados ou coorganizados	
Eventos científicos e técnicos nacionais organizados ou coorganizados	

Formação avançada

Teses de doutoramento	1
Dissertações de mestrado	1
Outros documentos de formação avançada	

Documentos de divulgação e orientação técnica e de apoio à decisão

Especificações LNEC	
Informações Técnicas LNEC	
Guias	
Normas de aplicação	
Outros documentos	

Outros

Modelos	
Aplicações computacionais	2
Instalações piloto	
Protótipos laboratoriais	

9. INDEXAÇÃO AO CONTEXTO

Objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU

Indústria, inovação e infraestruturas

Horizonte Europa

Segurança civil para a sociedade

Estratégia Portugal 2030

Promoção da sociedade do conhecimento

Digitalização e inovação empresarial

10. ORÇAMENTO E FINANCIAMENTO

10.1 RECURSOS HUMANOS

<i>Grupo</i>		<i>Esforço (p*m)</i>	<i>Valor</i>
IC	Grupo 91	0.00	- €
IP (CH)	Grupo 92	0.00	- €
IP	Grupo 93	10.20	67 320 €
IA	Grupo 94	4.80	29 760 €
AI, TS	Grupo 95	4.80	19 200 €
EI, TI	Grupo 96	0.00	- €
CT, AT	Grupo 97	0.00	- €
AO	Grupo 98	0.00	- €
BPD (LNEC)	Grupo 11	0.00	- €
BD, BI (LNEC)	Grupo 12	0.00	- €
BII (LNEC)	Grupo 13	0.00	- €
BIPD (Projeto), BI (Projeto)	Grupo 21	0.00	- €
BI (Projeto)	Grupo 22	0.00	- €
BII (Projeto)	Grupo 23	0.00	- €
Total		19.80	116 280 €

10.2 DESPESAS CORRENTES

<i>Designação</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Valor unitário</i>	<i>Montante</i>
Missões internacionais	5	1 500.00 €	7 500 €
Missões nacionais	4	800.00 €	3 200 €
Article processing charges	3	2 500.00 €	7 500 €
			- €
			- €
			- €
			- €
			- €
			- €
Total			18 200 €

10.3. EQUIPAMENTO

<i>Designação</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Valor unitário</i>	<i>Montante</i>
Computador de alto desempenho	2	4 000.00 €	8 000 €
Recetores GNSS de baixo custo e acessórios	2	1 000.00 €	2 000 €
Software SARPROZ	1	12 000.00 €	12 000 €
Renovação da licença SARPROZ	3	9 000.00 €	27 000 €
			- €
			- €
			- €
			- €
			- €
Total			49 000 €

10.4 ORÇAMENTO

<i>Designação</i>	<i>Estimativa de custo</i>	<i>Financiamento externo</i>	<i>Financiamento LNEC</i>
Recursos humanos	116 280.00 €		116 280 €
Despesas correntes	18 200.00 €		18 200 €
Equipamentos	49 000.00 €		49 000 €
Gastos gerais	129 720.00 €		129 720 €
Total	313 200 €	- €	313 200 €

Valor do financiamento externo proveniente de empresas públicas ou privadas (incluída em estudos de I&I ou por contrato)	
Valor do financiamento destinado a processos internos inseridos em projetos de investigação	
	Se não existe financiamento externo nem vai ser
	Se não existe financiamento externo, mas vai ser

Legenda

Grupo 91 - Investigador Coordenador (IC)
 Grupo 92 - Investigador Principal, habilitação (P Ch)
 Grupo 93 - Investigador Principal (IP)
 Grupo 94 - Investigador Auxiliar (IA)
 Grupo 95 - Assistente de investigação (A); Técnico Superior (TS)
 Grupo 96 - Especialista de informática (E); Técnico de informática (TI)
 Grupo 97 - Coordenador técnico (CT); Assistente técnico (AT)
 Grupo 98 - Assistente operacional (AO)
 Grupo 11 - Bolsista LNEC - investigação pós-doutoral (BPD)
 Grupo 12 - Bolsista LNEC - investigação doutoramento (Antigo Regulamento LNEC de 2001/04/26); Bolsista LNEC - investigação doutoramento (BI); Bolsista LNEC - investigação mestrado (BI); Bolsista LNEC - investigação licenciatura (BI)
 Grupo 13 - Bolsista LNEC - iniciação à investigação (BI)
 Grupo 21 - Bolsista de Projeto - investigação pós-doutoral FCT/majoração LNEC (BIPD); Bolsista de Projeto - investigação doutoramento FCT/majoração LNEC (BI); Bolsista de Projeto - investigação doutoramento ou licenciados/mestres inscritos em cursos n/confere grau académico FCT (BI)
 Grupo 22 - Bolsista de Projeto - investigação mestrado/mestrado integrado ou licenciados/mestres inscritos em cursos n/confere grau académico FCT (BI)
 Grupo 23 - Bolsista de Projeto - iniciação à investigação FCT (BI)

ANEXO II

Ficha de autoavaliação



FICHA DE AUTOAVALIAÇÃO DE PROJETO

**GEODETIC METHODS OF AUTOMATIC
MONITORING / MÉTODOS GEODÉSICOS DE
MONITORIZAÇÃO AUTOMÁTICA**

GEODAM

Versão da ficha 1 | 2026/02/15



ENQUADRAMENTO

A Estratégia de Investigação e Inovação 2021-2027 (E2I 21-27) estabelece a orientação estratégica para a atividade de investigação e inovação do LNEC para o período de 2021 a 2027. A E2I 21-27 está estruturada com base num ciclo de inovação e investigação com as seguintes etapas: motivação, temas, desafios, tipo de resultados, valor acrescentado e conectividade.

A E2I 21-27 é concretizada através do Plano de Investigação e Inovação que comporta: (i) Projetos de investigação, que têm um objeto de investigação específico e os aspetos de inovação claramente definidos, e (ii) Programas de investigação, que estabelecem linhas de investigação mais amplas nos quais se inserem vários projetos de investigação.

Os projetos e programas de investigação são descritos em fichas de projeto de investigação e em fichas de programa de investigação. A apreciação destas fichas de programa e projeto é apresentada numa ficha de apreciação. A monitorização e avaliação dos projetos e programas tem com base uma ficha de autoavaliação preenchida pelo investigador responsável a meio e no fim do projeto.

FICHA DE AUTOAVALIAÇÃO DE PROJETO

GEODETIC METHODS OF AUTOMATIC MONITORING / MÉTODOS GEODÉSICOS DE MONITORIZAÇÃO AUTOMÁTICA

Investigador responsável

José Nuno Lima

Departamento de Barragens de Betão

Copyright © Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.

Av. do Brasil 101 • 1700-066 Lisboa

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

(Versão de julho de 2022)

1. INTRODUÇÃO

1.1 DADOS GERAIS

<i>Título do projeto</i>	Geodetic Methods of Automatic Monitoring / Métodos Geodésicos para Monitorização Automática
<i>Acronímio do projeto</i>	GeodAM
<i>Unidade Departamental</i>	Departamento de Barragens de Betão
<i>Setor</i>	Núcleo de Geodesia Aplicada
<i>Investigador responsável</i>	José Nuno Lima
<i>Data de início</i>	01/01/2024
<i>Duração (meses)</i>	48
<i>Versão da ficha</i>	1
<i>Data da ficha</i>	15/02/2026

1.2 ENTIDADES INTERVENIENTES

<i>Unidade operativa coordenadora</i>	Departamento de Barragens de Betão
<i>Parceiros internos</i>	Departamento de Barragens de Betão / Núcleo de Geodesia Aplicada
<i>Parceiros externos</i>	Faculdade de Ciências da Universidade do Porto Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa Universidade de Vigo (UVigo) Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa (IST-UL)
<i>Entidades financiadoras</i>	
<i>Entidades externas interessadas</i>	EDP Iberdrola Engie
<i>Breve descrição do interesse das entidades externas</i>	

O projeto Geodetic Methods of Automatic Monitoring (GeodAM) é um estudo em Geodesia Aplicada sobre os problemas de planeamento, controlo da qualidade, estimação de parâmetros e predição na observação geodésica de barragens de betão e outras obras, pelos métodos convencionais (nivelamento geométrico e triangulação) e também por métodos espaciais (GNSS e InSAR), privilegiando o desenvolvimento de ferramentas que permitam a monitorização automática com recurso às estações em permanência in situ. A monitorização automática possibilita um acompanhamento das obras quase em tempo real, representando uma mais-valia para os donos de obra.

1.3 RESUMO

O projeto Geodetic Methods of Automatic Monitoring (GeodAM) procura dar resposta em três componentes que caracterizam a investigação e os trabalhos de contrato do LNEC:

- 1) Envelhecimento das grandes obras de engenharia civil e os desafios colocados pelas novas grandes obras;
- 2) Custos elevados com a monitorização convencional e o envelhecimento e redução das equipas de campo;
- 3) Aproveitamento das novas tecnologias para desenvolver ferramentas que permitam uma monitorização mais eficiente, por isso, mais sustentável.

A introdução recente de nova instrumentação de observação na monitorização de deslocamentos de barragens por métodos geodésicos, nomeadamente, taqueómetros motorizados e estações permanentes GNSS, veio tornar necessário o aperfeiçoamento dos métodos tradicionais de planeamento dos sistemas de observação, de controlo de qualidade das observações e de processamento dos dados. O projeto GeodAM pretende cobrir uma gama de atividades que vão da comparação de instrumentos à criação de modelos para a interpretação das observações com estações permanentes GNSS, taqueómetros robotizados e InSAR.

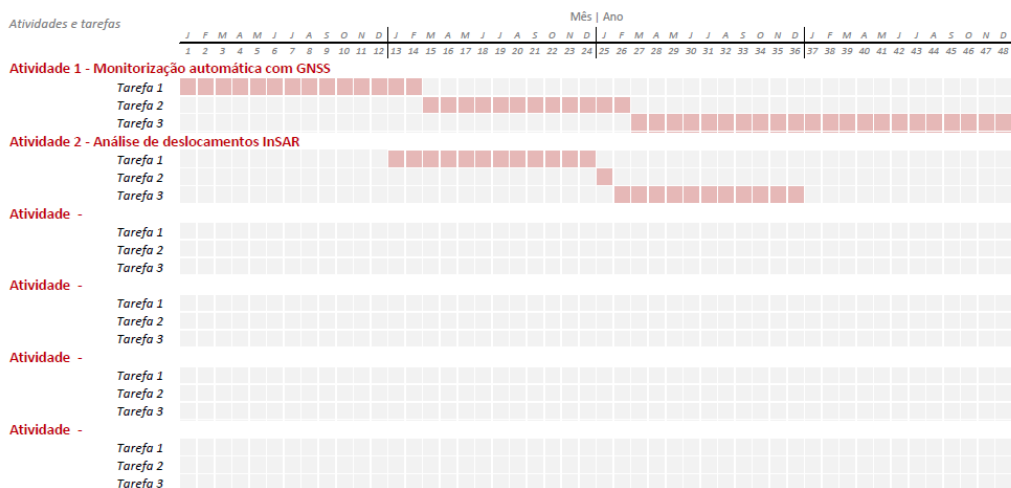
O projeto GeodAM, que se encontra inserido na área genérica da exploração de dados (data mining), destina-se a enquadrar o estudo e aplicação das metodologias de análise estatística convencional frequencista e a sua generalização Bayesiana aos dados resultantes dos sistemas de observação geodésica de grandes barragens de betão e outras obras portuguesas. Resulta da monitorização automática com estações permanentes em obra, a observar em contínuo, a disponibilização de séries temporais que devem ser tratadas para que os resultados sejam otimizados em precisão e em tempo útil. Para isso, neste projeto vão-se aplicar filtros digitais (passa banda, de Kalman, etc.), fusão de observações de diferentes instrumentos e algoritmos que permitam a deteção de outliers.

2. REALIZAÇÃO DO PLANO DE TRABALHOS

Atividade	1
<i>Designação</i>	Monitorização automática com GNSS
<i>Descrição</i>	Monitorização em contínuo e de forma automática de barragens e pontes com o GNSS
<i>Resultados previstos</i>	Acompanhamento do comportamento da obra em tempo real e automática
<i>Resultados obtidos</i>	Tarefa 1: Recuperação dos recetores GNSS Topcon GB-1000 - Integração em cada um dos recetores de um modem/router e de pequeno computador de modo a operarem em contínuo e de forma automática. Tarefa 2: Testes com recetores GNSS de baixo custo - Testes comparativos entre recetores GNSS de baixo custo com recetores GNSS de topo de gama.
Atividade	2
<i>Designação</i>	Análise de deslocamentos InSAR
<i>Descrição</i>	Aperfeiçoamento da capacidade de processamento e análise de deslocamentos InSAR
<i>Resultados previstos</i>	Mapas e séries temporais de deslocamentos InSAR
<i>Resultados obtidos</i>	Séries temporais de deslocamento InSAR obtidas a partir de diferentes algoritmos e de softwares distintos. Deslocamentos simulados no refletor artificial do LNEC no âmbito de uma tese de doutoramento do IST-UL. Método para calibração de deslocamentos InSAR para monitorização de estruturas no âmbito de uma tese de doutoramento da Universidade de Vigo. Aplicação computacional para adaptar dados do serviço europeu de movimentos do solo aos programas de análise do LNEC.
Atividade	
<i>Designação</i>	
<i>Descrição</i>	
<i>Resultados previstos</i>	
<i>Resultados obtidos</i>	
Atividade	
<i>Designação</i>	
<i>Descrição</i>	
<i>Resultados previstos</i>	
<i>Resultados obtidos</i>	
Atividade	
<i>Designação</i>	
<i>Descrição</i>	
<i>Resultados previstos</i>	
<i>Resultados obtidos</i>	
Atividade	
<i>Designação</i>	
<i>Descrição</i>	
<i>Resultados previstos</i>	

3. CRONOGRAMA

3.1 CRONOGRAMA INICIAL



4. RESULTADOS E SUA DISSEMINAÇÃO

4.1 APRECIÇÃO CRÍTICA DOS RESULTADOS DO PROJETO

Descritores do tipo de resultados (ver E21)

Aplicação e replicabilidade dos resultados e produtos

Apropriação e utilização dos resultados pelos interlocutores a privilegiar

Comunicação de ciência e disseminação do conhecimento

Sensibilização para a importância do conhecimento científico produzido na melhoria da

Apreciação

Nos dois primeiros anos de atividade, o trabalho desenvolvido para o projeto possibilitou a recuperação de equipamentos GNSS antigos e testar equipamentos GNSS de baixo custo tendo em vista a monitorização de barragens de betão e de pontes. Prevê-se que estes equipamentos possam ser aplicados em estudos por contrato.

O estudo efetuado na área do InSAR promove a utilização desta tecnologia para a monitorização de estruturas através da validação e da avaliação da incerteza dos deslocamentos, com recurso a equipamento desenvolvido no LNEC e a dados in-situ, e do desenvolvimento de métodos para calibração de deslocamentos.

A atividade desenvolvida deu origem a um artigo em revista internacional, 4 comunicações em

4.2 APRECIÇÃO CRÍTICA DA DEVOLUÇÃO DOS RESULTADOS À SOCIEDADE

Descritores das estratégias de devolução dos resultados à sociedade (ver E21)

Comunicação de ciência e conhecimento

Transmissão dos resultados à sociedade em geral com vista a promover a sua compreensão

Aplicação dos resultados pela sociedade

Apropriação e utilização dos resultados pelos interlocutores a privilegiar

Apreciação

Os desenvolvimentos têm sido divulgados através de comunicações em conferência e relatórios LNEC.

Prevê-se utilizar os equipamentos GNSS recuperados e os equipamentos GNSS de baixo custo em estudos por contrato, para permitir uma monitorização contínua das barragens de betão e das pontes.

A tecnologia InSAR tem estado a ser utilizada em estudos por contrato recorrendo a dados do serviço europeu de movimentos do solo aos quais têm sido aplicadas ferramentas desenvolvidas no âmbito do projeto.

4.3 PRODUTOS

	Previstos	Realizados
Publicações		
Relatórios científicos	3	1
Livros		
Capítulos de livros		
Artigos em revista internacionais	2	1
Artigos em revista nacionais	1	
Comunicações		
Comunicações em encontros científicos internacionais	4	2
Comunicações em encontros científicos nacionais	3	3
Organização de seminários e conferências		
Eventos científicos e técnicos internacionais organizados ou coorganizados		
Eventos científicos e técnicos nacionais organizados ou coorganizados		
Formação avançada		
Teses de doutoramento	1	1
Dissertações de mestrado	1	
Outros documentos de formação avançada		
Documentos de divulgação e orientação técnica e de apoio à decisão		
Especificações LNEC		
Informações Técnicas LNEC		
Guias		
Normas de aplicação		
Outros documentos		
Outros		
Modelos		
Aplicações computacionais	2	1
Instalações piloto		
Protótipos laboratoriais		

5. REFORMULAÇÃO DO PROJETO

5.1 NECESSIDADE DE REFORMULAÇÃO

É necessário reformular o projeto
Foi elaborada uma nova ficha de projeto

5.2 JUSTIFICAÇÃO DA REFORMULAÇÃO

É necessário reformular o projeto para incluir os dois novos membros do NGA na equipa - uma bolsista LNEC mestre inscrita em curso não conferente de grau académico e um investigador auxiliar ao abrigo do programa FCT-Tenure.

Propõe-se o prolongamento da Atividade 2 até ao final do projeto.

6. CONCLUSÕES E LINHAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURA

6.1 CONCLUSÕES

Os dois primeiros anos do projeto GeodAM decorreram próximo do que se tinha previsto. Na Atividade 1 procurou-se realizar as duas primeiras tarefas até ao fim. Nos próximos dois anos prevê-se realizar a terceira e quarta tarefas, que vão dar seguimento ao trabalho desenvolvido nas duas primeiras tarefas. Na atividade 2, a primeira tarefa já está concluída e a segunda está num estado avançado de desenvolvimento. A terceira tarefa será realizada no biénio 2026 – 2027.

6.2 LINHAS DE INVESTIGAÇÃO FUTURA

Pretende-se implementar de forma automática filtros do tipo passa-baixo nas séries temporais das observações (como, por exemplo, as médias móveis simétricas) e a deteção de outliers recorrendo à inferência Bayesiana. Vai tentar-se implementar uma técnica já ensaiada no LNEC, a fusão de acelerómetros com recetores GNSS, usando os filtros de Kalman, para melhorar a precisão do GNSS em tempo real.

No final, pretende-se implementar a geração de mensagens automáticas de alerta, bem como, a geração periódica de gráficos das séries temporais de deslocamentos.

Na área do InSAR, a investigação no biénio 2026-2027 estará focada na análise automática de séries temporais de deslocamento.

ANEXO III

Ficha de projeto reformulada



FICHA DE PROJETO

GEODETIC METHODS OF AUTOMATIC MONITORING / MÉTODOS GEODÉSICOS PARA MONITORIZAÇÃO AUTOMÁTICA

(GEODAM)

Versão da ficha 2 | 2026/03/15



ENQUADRAMENTO

A Estratégia de Investigação e Inovação 2021-2027 (E2I 21-27) estabelece a orientação estratégica para a atividade de investigação e inovação do LNEC para o período de 2021 a 2027. A E2I 21-27 está estruturada com base num ciclo de inovação e investigação com as seguintes etapas: motivação, temas, desafios, tipo de resultados, valor acrescentado e conectividade.

A E2I 21-27 é concretizada através do Plano de Investigação e Inovação que comporta: (i) Projetos de investigação, que têm um objeto de investigação específico e os aspetos de inovação claramente definidos, e (ii) Programas de investigação, que estabelecem linhas de investigação mais amplas nos quais se inserem vários projetos de investigação.

Os projetos e programas de investigação são descritos em fichas de projeto de investigação e em fichas de programa de investigação. A apreciação destas fichas de programa e projeto é apresentada numa ficha de apreciação. A monitorização e avaliação dos projetos e programas tem com base uma ficha de autoavaliação preenchida pelo investigador responsável a meio e no fim do projeto.

FICHA DE PROJETO

Geodetic Methods of Automatic Monitoring / Métodos Geodésicos para Monitorização Automática

Investigador responsável

José Nuno Lima

Departamento de Barragens de Betão

Copyright © Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.

Av. do Brasil 101 • 1700-066 Lisboa

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

(Versão de julho de 2022)

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO

- 1.1 DADOS GERAIS
- 1.2 ENTIDADES INTERVENIENTES
- 1.3 RESUMO

2. FUNDAMENTAÇÃO

- 2.1 ESTADO DA ARTE
- 2.2 PROBLEMAS POR RESOLVER
- 2.3 CONTRIBUIÇÕES INOVADORAS
- 2.4 MOTIVAÇÃO

3. TEMAS E OBJETIVOS

- 3.1 TEMAS E DESAFIOS
- 3.2 OBJETIVO GERAL DO PROJETO
- 3.3 OBJETIVO ESPECÍFICOS DO PROJETO

4. METODOLOGIA

- 4.1 DESCRIÇÃO DA ABORDAGEM GERAL
- 4.2 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS A UTILIZAR

5. EQUIPA

6. PLANO DE TRABALHOS

7. CRONOGRAMA

8. RESULTADOS, PRODUTOS E DISSEMINAÇÃO

- 8.1 TIPO DE RESULTADOS DO PROJETO
- 8.2 VALOR ACRESCENTADO DO PROJETO
- 8.3 ESTRATÉGIA DE DEVOLUÇÃO DOS RESULTADOS À SOCIEDADE
- 8.4 PRODUTOS PREVISTOS

9. INDEXAÇÃO AO CONTEXTO

10. ORÇAMENTO E FINANCIAMENTO

- 10.1 RECURSOS HUMANOS
- 10.2 DESPESAS CORRENTES
- 10.3. EQUIPAMENTO
- 10.4 ORÇAMENTO

A.1 CONTRIBUIÇÃO PARA OS INDICADORES DA E2I

A.2 CICLO DE INVESTIGAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1 DADOS GERAIS

Título do projeto

Geodetic Methods of Automatic Monitoring / Métodos Geodésicos para Monitorização Automática

Acrónimo do projeto

GeodAM

Unidade Departamental

Departamento de Barragens de Betão

Setor

Núcleo de Geodesia Aplicada

Investigador responsável

José Nuno Lima

Data de início

01/03/2024

Duração (meses)

48

Versão da ficha

2

Data da ficha

15/03/2026

1.2 ENTIDADES INTERVENIENTES

Unidade operativa coordenadora

Departamento de Barragens de Betão

Parceiros internos

Departamento de Barragens de Betão / Núcleo de Geodesia Aplicada

Parceiros externos

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Entidades financiadoras

Entidades externas interessadas

EDP

Iberdrola

ENGIE

Breve descrição do interesse das entidades externas

O projeto Geodetic Methods of Automatic Monitoring (GeodAM) é um estudo em Geodesia Aplicada sobre os problemas de planeamento, controlo da qualidade, estimação de parâmetros e predição na observação geodésica de barragens de betão e outras obras, pelos métodos convencionais (nivelamento geométrico e triangulação) e também por métodos espaciais (GNSS e InSAR), privilegiando o desenvolvimento de ferramentas que permitam a monitorização automática com recurso às estações em permanência in situ. A monitorização automática possibilita um acompanhamento das obras quase em tempo real, representando uma mais-valia para os donos de obra.

1.3 RESUMO

O projeto Geodetic Methods of Automatic Monitoring (GeodAM) procura dar resposta em três componentes que caracterizam a investigação e os trabalhos de contrato do LNEC:

- 1) Envelhecimento das grandes obras de engenharia civil e os desafios colocados pelas novas grandes obras;
- 2) Custos elevados com a monitorização convencional e o envelhecimento e redução das equipas de campo;
- 3) Aproveitamento das novas tecnologias para desenvolver ferramentas que permitam uma monitorização mais eficiente, por isso, mais sustentável.

A introdução recente de nova instrumentação de observação na monitorização de deslocamentos de barragens por métodos geodésicos, nomeadamente, taqueómetros motorizados e estações permanentes GNSS, veio tomar necessário o aperfeiçoamento dos métodos tradicionais de planeamento dos sistemas de observação, de controlo de qualidade das observações e de processamento dos dados. O projeto GeodAM pretende cobrir uma gama de atividades que vão da comparação de instrumentos à criação de modelos para a interpretação das observações com estações permanentes GNSS, taqueómetros robotizados e InSAR.

O projeto GeodAM, que se encontra inserido na área genérica da exploração de dados (*data mining*), destina-se a enquadrar o estudo e aplicação das metodologias de análise estatística convencional frequencista e a sua generalização Bayesiana aos dados resultantes dos sistemas de observação geodésica de grandes barragens de betão e outras obras portuguesas. Resulta da monitorização automática com estações permanentes em obra, a observar em contínuo, a disponibilização de séries temporais que devem ser tratadas para que os resultados sejam otimizados em precisão e em tempo útil. Para isso, neste projeto vão-se aplicar filtros digitais (passa banda, de Kalman, etc.), fusão de observações de diferentes instrumentos e algoritmos que permitam a deteção de outliers.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1 ESTADO DA ARTE

Desde a década de 50 do século passado que se empregam no LNEC técnicas geodésicas para monitorizar deslocamentos em barragens e noutras importantes obras de engenharia civil. Embora inicialmente se utilizassem teodolitos ótico-mecânicos, níveis ótico-mecânicos e fitas de invar, eram empregues todos os cuidados nas observações e estas já eram tratadas pelo método das variações de coordenadas (Rocha et al., 1956). Nas décadas de 70 e 80 do século passado, aproveitando o desenvolvimento de modelos matemáticos e meios de cálculo automático, foi desenvolvido no LNEC software para o planeamento e análise das redes de triangulação e nivelamento utilizadas na observação de barragens (Casaca, 2001). Simultaneamente, os desenvolvimentos da microeletrónica e dos sistemas de informação permitiram o aparecimento de novos instrumentos de observação como os taqueómetros eletrónicos motorizados e os níveis óticos digitais (Casaca, 2001), melhorando as comodidades da observação e aumentando a sua precisão.

As primeiras observações dos deslocamentos em barragens portuguesas com o GNSS foram realizadas em 2004, na barragem de Alqueva (Lima, et. al., 2006), mas ainda não passavam de campanhas periódicas com sessões de observação de curta duração, apesar de os resultados serem prometedores. No entanto, já em 1995 se monitorizava a barragem de Pacoima (Califórnia, EUA) com GPS, com duas estações em permanência, uma localizada num dos encontros e a outra na consola central do coroamento (Behr et al., 1999).

Só em 2016 se instalaram as primeiras estações GNSS em permanência para monitorizar quatro barragens portuguesas em contínuo (Lima e Casaca, 2018). A aplicação de filtros nas séries temporais GNSS permitiu que se atingisse uma precisão submilimétrica neste tipo de monitorização (Lima e Casaca, 2018). Também neste mesmo ano se instalou pela primeira vez um taqueómetro robotizado em permanência numa barragem portuguesa (Almeida et. al, 2017). O projeto MEGA (Métodos Estocásticos em Geodesia Aplicada (LNEC, 2018)) permitiu desenvolver uma série de ferramentas para ser aplicado às séries temporais GNSS, como, por exemplo, a deteção de outliers recorrendo a um procedimento bayesiano que se baseia nas elipses preditivas posteriores que assumem haver uma estabilidade temporal num ponto num determinado período de tempo (Lima, 2022).

A utilização de InSAR para fins científicos teve início na década de 1990, com o lançamento de satélites com sensores SAR a bordo, por parte das agências espaciais europeia, japonesa e canadiana. A técnica InSAR diferencial, utilizada nessa década, permitia determinar deslocamentos para grandes áreas, em alvos naturalmente existentes no terreno, com incerteza centimétrica, e era aplicada na monitorização de fenómenos geodinâmicos (deformações causadas por sismos ou atividade vulcânica). No início do século XXI, surgiram as técnicas multitemporais de InSAR, que passaram a possibilitar a monitorização de deslocamentos com incerteza milimétrica. O desenvolvimento de algoritmos de processamento mais avançados, aliado ao desenvolvimento de sensores com capacidade para adquirir imagens de alta resolução e à crescente preocupação das agências espaciais em garantir a aquisição de imagens com uma frequência regular, contribuiu para o interesse na aplicação desta tecnologia à monitorização de estruturas e da sua envolvente. No LNEC, há experiência na utilização de InSAR na monitorização de barragens e respetiva envolvente (Roque et al., 2021) e de vias de comunicação (LNEC, 2021).

O presente projeto pretende implementar várias ferramentas para automatizar a monitorização de barragens e de outras obras, desde a recolha e gestão da observação, passando pelo processamento das observações com análise dos resultados e deteção de erros, e com a emissão de relatórios periódicos.

Almeida, E., Pimentel, D., Fernandes, D., Pestana, C., Araújo, R., 2017. "Automated geodetic monitoring systems in new hydropower plants", Atas da INGEO 2017 – 7th International Conference on Engineering Surveying, Lisboa, pp. 77-82.

Behr, J., Hudnut, K.W. e King, N.E., 1999. "Monitoring Structural Deformation at Pacoima Dam, California, using continuous GPS". USGS Southern California, Earthquake Center, Los Angeles, USA SCIGN-USGS, 1999.

Casaca, J., 2001. "O método da variação de coordenadas na observação geodésica de barragens", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ICT, Informação Técnica Barragens, ITB 21.

Lima, N., Casaca, J. e Henriques, M. J., 2006. "Accuracy of displacements monitoring at large dams with GPS". International Association of Geodesy Symposia, Vol. 131, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 239 -243.

Lima, J.N. e Casaca, J., 2018. "Monitoring dam displacements with GNSS: strategy, accuracy and benefits.", Atas do 3rd International Dam World Conference (Dam World 2018). Brasil, Foz do Iguaçu, 17 a 21 de setembro 2018.

Lima, J.N., 2022. "GNSS na monitorização em tempo real do comportamento estrutural de grandes obras", Atas da JPÉE 2022, 6ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Encontro Nacional de betão estrutural 2022, 12º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Lisboa, LNEC, 9 a 11 de novembro de 2022.

LNEC, 2018. "MEGA – Métodos Estocásticos em Geodesia Aplicada. Relatório de progresso 2015 – 2017 do projeto P2I/LNEC". LNEC, Relatório 62/2018 – DBB/NGA, fevereiro de 2018.

Rocha, M., Laginha Serafim, J., Ferreira da Silveira, A. e Rodrigues, O. V., 1956. "The observation of the behaviour of the portuguese concrete dams", Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Publication nº 80, Lisboa.

Roque, D., Lima, J.N., Perissin, D., Falcão, A.P., Lemos, J.V., Fonseca, A. (2021). "Integrated InSAR and GNSS monitoring sub-system for an arch dam and reservoir banks". Journal of Surveying Engineering, Vol. 147, No. 3, 05021003.

LNEC (2021). "Metro do Porto - Resultados da monitorização das infraestruturas com interferometria SAR". LNEC, Relatório 335/2021 - DBB/NGA, outubro de 2021.

2.2 PROBLEMAS POR RESOLVER

Ao contrário da monitorização convencional, as tendências atuais da monitorização são caracterizadas pela observação contínua e automatizada. A informação disponibilizada por este tipo de monitorização permite conhecer o comportamento de pontos notáveis (e, portanto, da integridade estrutural da obra) continuamente e quase em tempo real. Por outro lado, os instrumentos de medição deverão permanecer continuamente em obra o que se poderá traduzir num avultado investimento caso se opte pelos instrumentos de topo de gama. Uma das possibilidades, para contornar o elevado preço dos equipamentos de topo de gama, será optar por instrumentos de baixo custo e por software aberto. Mas esta opção requer bons conhecimentos de hardware e a criação de software para ligar os instrumentos de baixo custo a routers e a computadores de baixo custo para que os dados sejam processados, armazenados e difundidos em tempo real.

O InSAR pode ter uma importante contribuição para a monitorização da envolvente das obras, dada a sua capacidade de monitorização de grandes áreas. A vegetação que tipicamente cobre estas zonas torna necessária a utilização de algoritmos de processamento que consideram difusores distribuídos (baseados em áreas) em vez de difusores persistentes (baseados em alvos pontuais). Os métodos InSAR que utilizam difusores distribuídos ainda não foram utilizados no LNEC e a incerteza dos deslocamentos obtidos por estes deverá ser avaliada. O software disponível no LNEC para processamento InSAR requer uma fase morosa de preparação dos dados, que deverá ser automatizada. A análise automática das séries temporais de deslocamento resultantes de InSAR também é um aspeto importante, tanto para a remoção de outliers, como para a deteção de eventuais anomalias no comportamento dos elementos estudados.

2.3 CONTRIBUIÇÕES INOVADORAS

2.3.1 Contributo para o progresso dos conhecimentos

(científicos, tecnológicos, de processos ou de metodologias)

O potencial de inovação do projecto reside, em primeiro lugar, na aplicação de conceitos estatísticos e probabilísticos como, por exemplo, os filtros digitais, a inferência bayesiana e fusão de observações provenientes de diferentes instrumentos, já estabelecidos, a outras áreas científicas e tecnológicas, nomeadamente à formulação e resolução de problemas práticos da Geodesia Aplicada à monitorização de barragens de betão. Alguns dos resultados do projecto GeodAM poderão ser utilizados por outros sectores do LNEC, nomeadamente o DBB/NO, no tratamento dos dados da observação de barragens, e o DE/NOE, no tratamento dos dados da observação de pontes. Desta forma, o projeto pretende contribuir para ultrapassar as dificuldades identificadas na aplicação de tecnologias que já são operacionais, mas cujo desempenho em contexto de inspeção de estruturas ainda não permite alcançar a qualidade obtida em outras situações de menor complexidade. Pretende-se atingir TRL8.

No caso da monitorização automática de barragens com GNSS e taqueómetros robotizados, esta será uma nova linha de investigação a introduzir no LNEC. O contributo deste projeto será a avaliação da informação relevante de forma automática e em tempo quase real, sendo uma importante mais-valia para os donos de obra e autoridades nacionais. No projeto será testada a monitorização automática de barragens em confronto com outro tipo instrumentação. Considera-se que o TRL atual, neste caso, é de 5 e pretende-se atingir o TRL 8.

Os estudos em InSAR tiveram início na E2I 2014-2020 e o projeto pretende dar continuidade a esta linha de investigação com a avaliação de diferentes algoritmos e a utilização de métodos estatísticos para melhoria dos resultados. O LNEC tem condições ótimas para avaliar a incerteza de deslocamentos InSAR, através dos dados recolhidos nos refletores orientados para os satélites do programa Copernicus, instalados no campus entre 2017 e 2020. Considera-se que o TRL atual, neste caso, é de 6, pretende-se atingir o TRL 8.

2.3.2 Contributo para o reforço das competências e dos recursos do LNEC, nomeadamente os experimentais

O projeto irá reforçar as competências do LNEC através do desenvolvimento de novos meios para a monitorização automática de barragens (e outras obras importantes), permitindo desde logo um melhor acompanhamento das obras, e de, também, desenvolver novas técnicas e de novos processos que possam a vir dar origem a novas linhas de estudo por contrato.

Atualmente, o LNEC não tem acesso a uma licença de SARPROZ, software proprietário para processamento InSAR que foi testado no projeto INFRASAR do P2I 2014-2020 e utilizado para a realização de um estudo por contrato para o Metro do Porto. Este projeto visa analisar a qualidade dos resultados obtidos através de software de acesso livre e promover a sua melhoria, de forma a capacitar o LNEC para continuar a desenvolver estudos com esta tecnologia.

2.4 MOTIVAÇÃO

Motivos para o desenvolvimento do projeto (ver E2I)

Solicitações - Pedidos de estudo de entidades externas

Oportunidades - Iniciativas e desafios para desenvolver projetos de investigação

Justificação sucinta da motivação para a realização do projeto (opcional)

Envelhecimento das grandes obras de engenharia civil e novos desafios colocados pelas novas grandes obras;

Custos elevados com a monitorização convencional e envelhecimento/redução das equipas de campo;

Aproveitamento das novas tecnologias para desenvolver ferramentas que permitam uma mo

3. TEMAS E OBJETIVOS

3.1 TEMAS E DESAFIOS

Tema principal (ver E2I)

Indústria 4.0

Produção, exploração e gestão da informação e desenvolvimento de sistemas de informação de apoio à decisão

Desafios principais (ver E2I)

Desenvolvimento de sistemas de medição e de controlo, qualidade e avaliação da conformidade
Exploração de big data e data analytics

Tema secundário (ver E2I)

Construção

Desenvolvimento de produtos e processos inovadores para responder às necessidades sociais de qualidade e sustentabilidade do ambiente construído

Desafios secundários (ver E2I)

Preservação e reabilitação do património construído, natural e cultural
Mitigação do risco e promoção da segurança e da resiliência do ambiente construído

Enquadramento nos temas e objetivos de I&I da Unidade Departamental

O projeto proposto está enquadrado nos temas e objetivos de I&I do Departamento de Barragens de Betão (DBB), dada a ênfase do projeto na monitorização e segurança de estruturas. A utilização da monitorização por métodos geodésicos para apoio à administração do território ou segurança de estruturas tem sido um tema de I&I do DBB considerado em vários ciclos anteriores da E2I do LNEC. A atividade do Núcleo de Geodesia Aplicada (NGA) é transversal a vários departamentos do LNEC, pelo que o projeto contempla outros tipos de estruturas para além de barragens e pretende utilizar tecnologias da área da Geodesia para monitorizar e estudar as estruturas, bem como a sua envolvente.

3.2 OBJETIVO GERAL DO PROJETO

O objetivo geral do projeto é desenvolver métodos que potenciem a monitorização de estruturas de engenharia civil. Ao contrário da monitorização convencional, as tendências atuais da monitorização são caracterizadas pela observação contínua e automatizada. Assim, o projeto foca-se no desenvolvimento dos seguintes pontos:

- 1) Implementação de sistemas de monitorização contínua e automatizada (GNSS, taqueómetros robotizados, interferometria de radar, inclinómetros, câmaras fotográficas em diferentes plataformas, outros) em barragens e outras obras importantes;
- 2) Análises das séries temporais, desenvolvimentos de filtros digitais (Kalman, passa-alto, passa-baixo, passa banda, adaptativos), deteção de *outliers* com inferência bayesiana, implementação de mensagens periódicas do comportamento da obra e mensagens de alerta;
- 3) Utilização de receptores GNSS de baixo custo, fusão de acelerómetros com receptores GNSS.

3.3 OBJETIVO ESPECÍFICOS DO PROJETO

Ao contrário da monitorização convencional, as tendências atuais da monitorização são caracterizadas pela observação contínua e automatizada. A informação disponibilizada por este tipo de monitorização permite conhecer o comportamento de pontos notáveis (e, portanto, da integridade estrutural da obra) continuamente e quase em tempo real. Por outro lado, os instrumentos de medição deverão permanecer continuamente em obra o que se poderá traduzir num avultado investimento caso se opte pelos instrumentos de topo de gama. Uma das possibilidades, para contornar o elevado preço dos equipamentos de topo de gama, será optar por instrumentos de baixo custo e por *software* aberto. Mas esta opção requer bons conhecimentos de *hardware* e a criação de *software* para ligar os instrumentos de baixo custo a *routers* e a computadores de baixo custo para que os dados sejam processados, armazenados e difundidos em tempo real.

A monitorização em contínuo com GNSS nas barragens do Baixo Sabor, do Cabril e do Feiticeiro mostram que existem sistemas no mercado que asseguram de forma fiável a observação de estruturas de engenharia civil. No entanto, é possível ir mais além e com menos. Ou seja, é possível implementar mensagens periódicas do comportamento da obra e mensagens de alerta de forma automática, através das análises automáticas das séries temporais que recorram a aplicações de filtros e deteção de *outliers* implementados de forma automática. Toda esta análise automatizada ainda não foi implementada, embora já tenham sido testados os algoritmos que a permitem realizar. Por outro lado, é possível recorrer a equipamento GNSS que já existe no LNEC, ou adquirir equipamento de baixo custo, e montar um sistema de monitorização com GNSS automático não recorrendo ao equipamento de topo de gama, conforme já foi referido.

Procura-se, também, tirar partido da fusão de acelerómetros com recetores GNSS, técnica já testada no LNEC, para melhorar a precisão do GNSS em tempo real.

Paralelamente, também se pretende desenvolver esforços para dotar a monitorização com InSAR e com taqueómetros robotizados com análise automáticas das séries temporais e a implementação automática das mensagens de alerta.

4. METODOLOGIA

4.1 DESCRIÇÃO DA ABORDAGEM GERAL

Na monitorização em contínuo com o GNSS pretende-se, numa primeira fase, preparar um par de recetores GNSS adquiridos pelo NGA há quase 20 anos para poderem operar remotamente, isto é, a observação, o processamento e a gestão de dados será tudo controlado a partir do LNEC, através da internet. Numa segunda fase, adquirir recetores e antenas GNSS de baixo custo, realizar testes comparativos com recetores GNSS de topo gama. Na terceira fase, implementar aplicação automática de filtros passa-baixo e a deteção de outliers. Pretende-se, também, aplicar a fusão de acelerómetros com os recetores GNSS. Finalmente, implementar a geração automática de mensagens de alerta.

Na área do InSAR, será explorado um algoritmo de processamento, baseado em difusores distribuídos, adequado para a monitorização de zonas com alguma vegetação, por exemplo encostas, e de vias de comunicação caracterizadas por superfícies tendencialmente lisas (rodovias). Os deslocamentos obtidos serão validados e a sua incerteza avaliada. Será efetuada a análise das séries temporais de deslocamentos.

4.2 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS A UTILIZAR

Os recetores GNSS Topcon GB-1000, adquiridos pelo LNEC em 2005, não estão preparados para operarem remotamente. Pretende-se integrar em cada um destes recetores um pequeno modem/router e um pequeno computador SBC (single-board computer, como, por exemplo, um Raspberry Pi) de modo que estes possam ser operados remotamente (observar, processar os dados e gerir os dados e as séries temporais), através da internet. Este trabalho vai contar com a colaboração de um aluno de doutoramento da FCUP. Pretende-se adquirir dois recetores GNSS de baixo custo, como, por exemplo, os recetores Septentrio Mosaic-go. Far-se-ão testes comparativos com os Topcon GB-1000. Pretende-se, também, implementar de forma automática filtros do tipo passa-baixo nas séries temporais das observações (como, por exemplo, as médias móveis simétricas) e a deteção de outliers recorrendo à inferência Bayesiana. Vai tentar-se implementar uma técnica já ensaiada no LNEC, a fusão de acelerómetros com recetores GNSS, usando os filtros de Kalman, para melhorar a precisão do GNSS em tempo real. No final, pretende-se implementar a geração de mensagens automáticas de alerta, bem como, a geração periódica de gráficos das séries temporais de deslocamentos.

Para o processamento InSAR, pretende-se utilizar o algoritmo small baseline subsets (SBAS), que utiliza difusores distribuídos, implementado no software de acesso livre MintPy. A utilização deste software requer o processamento prévio das imagens SAR num outro software livre (SNAP), que pode ser automatizado. Pretende-se utilizar as ferramentas de programação do SNAP para esse fim. Para a validação de deslocamentos InSAR e para a determinação da sua incerteza serão utilizados os dados recolhidos na infraestrutura experimental de refletores artificiais para os satélites Sentinel-1 do programa Copernicus, instalada no campus do LNEC entre 2017 e 2020, e que foi monitorizada através de nivelamento geométrico e GNSS. As observações obtidas através dos métodos mais precisos serão utilizadas como referência para os deslocamentos InSAR obtidos a partir de imagens contemporâneas dos dados in-situ. A análise de séries temporais de deslocamento InSAR para tratamento de outliers e para deteção de anomalias será efetuada com recurso a análise Bayesiana e a métodos de machine learning.

5. EQUIPA

[illegible]

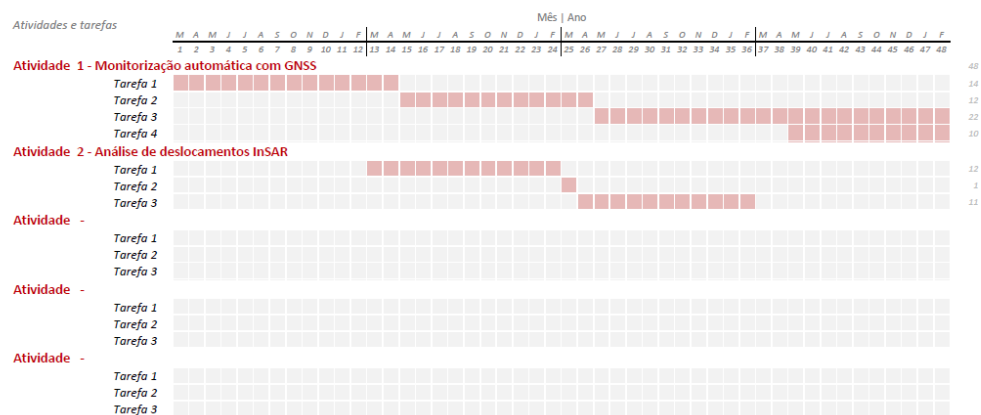
6. PLANO DE TRABALHOS

Atividade	1
<i>Designação</i>	Monitorização automática com GNSS
<i>Descrição</i>	Monitorização em contínuo e de forma automática de barragens e pontes com o GNSS
<i>Resultados</i>	Acompanhamento do comportamento da obra em tempo real e automática
<i>Duração (meses)</i>	48
<i>Equipa</i>	José Nuno Lima 15% Maria João Henriques 7% Sérgio Oliveira 5% Nádia Braz 5% Investigador FCT-Tenure 3% Bolsheiro mestre LNEC 7%
<i>Tarefa 1</i>	Recuperação dos recetores GNSS Topcon GB-1000
<i>Descrição</i>	Integração em cada um dos recetores de um modem/router e de pequeno computador de modo a operarem em contínuo e de forma automática
<i>Tarefa 2</i>	Testes com recetores GNSS de baixo custo
<i>Descrição</i>	Testes comparativos entre recetores GNSS de baixo custo com recetores GNSS de topo de gama.
<i>Tarefa 3</i>	Monitorização de barragens com recetores GNSS de baixo custo
<i>Descrição</i>	Instalação e observação de barragens em contínuo com recetores GNSS de baixo custo, com processamento automático.
<i>Tarefa 4</i>	Implementação de filtros e mensagens automáticas
<i>Descrição</i>	Implementação automática de filtros do tipo passa baixo, de deteção de outliers com inferência Bayesiana e de mensagens de alerta e relatórios periódicos. Fusão de acelerómetros com GNSS.
Atividade	2
<i>Designação</i>	Análise de deslocamentos InSAR
<i>Descrição</i>	Aperfeiçoamento da capacidade de processamento e análise de deslocamentos InSAR
<i>Resultados</i>	Mapas e séries temporais de deslocamentos InSAR
<i>Duração (meses)</i>	24
<i>Equipa</i>	Dora Roque 5% Henrique Candeias 5% Investigador FCT-Tenure 6% Bolsheiro mestre LNEC

	11%
<i>Tarefa 1</i>	Processamento InSAR
<i>Descrição</i>	Processamento InSAR com SARPROZ, SNAP e MintPy de imagens do campus do LNEC contemporâneas da monitorização dos refletores artificiais e de um caso de estudo das encostas na vizinhança de uma albufeira.
<i>Tarefa 2</i>	Validação dos deslocamentos e avaliação da incerteza
<i>Descrição</i>	Comparação dos deslocamentos InSAR com dados in-situ de referência registados nos refletores do LNEC.
<i>Tarefa 3</i>	Análise de séries temporais de deslocamentos
<i>Descrição</i>	Aplicação de métodos de análise Bayesiana e de <i>machine learning</i> para remoção de outliers e deteção de anomalias.
<i>Tarefa 4</i>	
<i>Descrição</i>	
Atividade	
<i>Designação</i>	
<i>Descrição</i>	
<i>Resultados</i>	
<i>Duração (meses)</i>	
<i>Equipa</i>	
	100%
	100%
	100%
<i>Tarefa 1</i>	
<i>Descrição</i>	
<i>Tarefa 2</i>	
<i>Descrição</i>	
<i>Tarefa 3</i>	
<i>Descrição</i>	
<i>Tarefa 4</i>	
<i>Descrição</i>	
Atividade	
<i>Designação</i>	
<i>Descrição</i>	
<i>Resultados</i>	
<i>Duração (meses)</i>	
<i>Equipa</i>	
	100%
	100%
	100%

Tarefa 1	
Descrição	
Tarefa 2	
Descrição	
Tarefa 3	
Descrição	
Tarefa 4	
Descrição	
Atividade	
Designação	
Descrição	
Resultados	
Duração (meses)	
Equipa	
	100%
	100%
	100%
Tarefa 1	
Descrição	
Tarefa 2	
Descrição	
Tarefa 3	
Descrição	
Tarefa 4	
Descrição	

7. CRONOGRAMA



8. RESULTADOS, PRODUTOS E DISSEMINAÇÃO

8.1 TIPO DE RESULTADOS DO PROJETO

Descritores do tipo de resultados (ver E21)

Informação e conhecimento
<i>Informação e conhecimento, a reter para o desenvolvimento temático em que se referenciam</i>
Produtos e soluções
<i>Produtos e soluções, para responder a problemas ou desafios concretos</i>
Processos e sistemas
<i>Processos e sistemas, para a gestão de ativos e o tratamento, organização e gestão de informação</i>

Descrição dos resultados e sua integração nos diferentes tipos

Durante o projeto espera-se obter informação e conhecimento resultante da atividade desenvolvida, também baseada em projetos de I&I anteriores (e.g., MEGA), o que permitirá melhorar a monitorização de obras em relação à atualidade.

Os resultados obtidos no projeto visam o desenvolvimento de produtos e soluções para a monitorização, identificados durante os trabalhos de investigação e, principalmente, pelos donos de obra. Espera-se aplicar filtros automáticos que permitam melhorar as séries temporais e eliminar outliers, e gerar relatórios automáticos periódicos e de alerta da monitorização da obra.

Também serão desenvolvidos novos processos e sistemas com a monitorização automática, desenvolvendo-se estratégias de processamento dos dados e do seu armazenamento, assim como, com a implementação automática de filtros e deteção de outliers, a visualização dos resultados nos relatórios periódicos e de alerta gerados automaticamente.

8.2 VALOR ACRESCENTADO DO PROJETO

Descritores do valor acrescentado do projeto (ver E21)

Promoção da segurança
Melhoria da eficiência e do desempenho
Promoção da sustentabilidade

Descrição do valor acrescentado do projeto

O projeto irá contribuir para a promoção da segurança da obra porque permite uma monitorização contínua e em tempo real. Por outro lado, permite conhecer melhor a obra quer através dos modelos de comportamento (que serão enriquecidos com a informação proveniente da monitorização contínua), quer através das séries temporais da observação.

A observação automática e em contínuo permite conhecer melhor o comportamento da obra, permitirá, também, o acompanhamento da mesma em tempo real, resultando uma melhoria da eficiência e do desempenho da monitorização.

A observação contínua e automática vai reduzir a frequência de deslocações à obra quando comparada com os métodos tradicionais de observação.

8.3 ESTRATÉGIA DE DEVOLUÇÃO DOS RESULTADOS À SOCIEDADE

Descritores das estratégias de devolução dos resultados à sociedade (ver E21)

Interação com interlocutores

Intensificação da relação do LNEC com os interlocutores a privilegiar com vista a promover a

Comunicação de ciência e disseminação do conhecimento

Sensibilização para a importância do conhecimento científico produzido na melhoria da

Aplicação e replicabilidade dos resultados e produtos

Apropriação e utilização dos resultados pelos interlocutores a privilegiar

Descrição das estratégias de devolução de resultados à sociedade

Os resultados obtidos têm em vista a intensificação da interação com os interlocutores uma vez que a monitorização contínua e em tempo real permite um conhecimento mais aprofundado do comportamento da obra e da sua segurança, beneficiando os donos de obra e o LNEC como consultor técnico das obras monitorizadas.

A monitorização contínua e em tempo real vai obrigar a implementação automática de filtros e a deteção de outliers que terão de ser aplicados em tempo real. O carácter inovador desta implementação deverá ser divulgado em revistas e encontros científicos, tendo em vista a sua aplicação em outras obras.

8.4 PRODUTOS PREVISTOS

Publicações

Relatórios científicos	3
Livros	
Capítulos de livros	
Artigos em revista internacionais	2
Artigos em revista nacionais	

Comunicações

Comunicações em encontros científicos internacionais	4
Comunicações em encontros científicos nacionais	3

Organização de seminários e conferências

Eventos científicos e técnicos internacionais organizados ou coorganizados	
Eventos científicos e técnicos nacionais organizados ou coorganizados	

Formação avançada

Teses de doutoramento	1
Dissertações de mestrado	1
Outros documentos de formação avançada	

Documentos de divulgação e orientação técnica e de apoio à decisão

Especificações LNEC	
Informações Técnicas LNEC	
Guias	
Normas de aplicação	
Outros documentos	

Outros

Modelos	
Aplicações computacionais	2
Instalações piloto	
Protótipos laboratoriais	

9. INDEXAÇÃO AO CONTEXTO

Objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU

Indústria, inovação e infraestruturas

Horizonte Europa

Segurança civil para a sociedade

Estratégia Portugal 2030

Promoção da sociedade do conhecimento
Digitalização e inovação empresarial

10. ORÇAMENTO E FINANCIAMENTO

10.1 RECURSOS HUMANOS

<i>Grupo</i>		<i>Esforço (p*m)</i>	<i>Valor</i>
IC	Grupo 91	0.00	- €
IP (cH)	Grupo 92	0.00	- €
IP	Grupo 93	10.20	67 320 €
IA	Grupo 94	7.80	48 360 €
AI, TS	Grupo 95	4.80	19 200 €
EI, TI	Grupo 96	0.00	- €
CT, AT	Grupo 97	0.00	- €
AO	Grupo 98	0.00	- €
BPD (LNEC)	Grupo 11	0.00	- €
BD, BI (LNEC)	Grupo 12	6.00	12 000 €
BII (LNEC)	Grupo 13	0.00	- €
BIPD (Projeto), BI (Projeto)	Grupo 21	0.00	- €
BI (Projeto)	Grupo 22	0.00	- €
BII (Projeto)	Grupo 23	0.00	- €
Total		28.80	146 880 €

10.2 DESPESAS CORRENTES

<i>Designação</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Valor unitário</i>	<i>Montante</i>
Missões internacionais	5	1 500.00 €	7 500 €
Missões nacionais	4	800.00 €	3 200 €
Article processing charges	3	2 500.00 €	7 500 €
			- €
			- €
			- €
			- €
			- €
			- €
Total			18 200 €

10.3. EQUIPAMENTO

<i>Designação</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Valor unitário</i>	<i>Montante</i>
Computador de alto desempenho	2	4 000.00 €	8 000 €
Recetores GNSS de baixo custo e acessórios	2	1 000.00 €	2 000 €
Software SARPROZ	1	12 000.00 €	12 000 €
Renovação da licença SARPROZ	3	9 000.00 €	27 000 €
			- €
			- €
			- €
			- €
			- €
Total			49 000 €

10.4 ORÇAMENTO

<i>Designação</i>	<i>Estimativa de custo</i>	<i>Financiamento externo</i>	<i>Financiamento LNEC</i>
Recursos humanos	146 880.00 €		146 880 €
Despesas correntes	18 200.00 €		18 200 €
Equipamentos	49 000.00 €		49 000 €
Gastos gerais	160 320.00 €		160 320 €
Total	374 400 €	- €	374 400 €

Valor do financiamento externo proveniente de empresas públicas ou privadas
(incluída em estudos de I&I ou por contrato)

Valor do financiamento destinado a processos internos inseridos em projetos
de investigação

Se não existe financiamento externo nem vai ser

Se não existe financiamento externo, mas vai ser

Legenda

Grupo 91 - Investigador Coordenador (IC)

Grupo 92 - Investigador Principal c/habilitação (IP Ch)

Grupo 93 - Investigador Principal (IP)

Grupo 94 - Investigador Auxiliar (IA)

Grupo 95 - Assistente de Investigação (AI); Técnico Superior (TS)

Grupo 96 - Especialista de Informática (EI); Técnico de Informática (TI)

Grupo 97 - Coordenador Técnico (CT); Assistente técnica (AT)

Grupo 98 - Assistente operacional (AO)

Grupo 11 - Bolseiro LNEC - investigação pós-doutoral (BPD)

Grupo 12 - Bolseiro LNEC - investigação doutoramento (Antigo Regulamento LNEC de 2001/04/26); Bolseiro LNEC - investigação doutoramento (BI);

Bolseiro LNEC - investigação mestrado (BI); Bolseiro LNEC - investigação licenciatura (BI)

Grupo 13 - Bolseiro LNEC - iniciação à investigação (BI)

Grupo 21 - Bolseiro de Projeto - investigação pós-doutoral FCT/majoração LNEC (BPD); Bolseiro de Projeto - investigação doutoramento FCT/majoração LNEC (BI); Bolseiro de Projeto - investigação doutoramento ou licenciatura/mestres inscritos em cursos n/c confere grau académico FCT (BI)

Grupo 22 - Bolseiro de Projeto - investigação mestrado/mestrado integrado ou licenciatura/mestres inscritos em cursos n/c confere grau académico FCT (BI)

Grupo 23 - Bolseiro de Projeto - iniciação à investigação FCT (BI)



www.lnec.pt

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