



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

**RESTATE – SISTEMA DE SUORTE À DECISÃO
EM TEMPO ÚTIL PARA A AVALIAÇÃO DA
SEGURANÇA DE GRANDES BARRAGENS DE BETÃO.
O CICLO DE AÇÃO: DADOS-INFORMAÇÃO-
-CONHECIMENTO-TOMADA DE DECISÃO**

**Relatório de progresso do projeto do P2I/LNEC
até fevereiro de 2018**

Lisboa • maio de 2018

I&D BARRAGENS DE BETÃO

RELATÓRIO 171/2018 – DBB/NO

Título

RESTATE – SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO EM TEMPO ÚTIL PARA A AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE GRANDES BARRAGENS DE BETÃO. O CICLO DE AÇÃO: DADOS-INFORMAÇÃO-CONHECIMENTO-TOMADA DE DECISÃO

Relatório de progresso do projeto do P2I/LNEC até fevereiro de 2018

Autoria

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

Juan Mata

Bolseiro de Pós-Doutoramento, Núcleo de Observação

Sérgio Oliveira

Investigador Auxiliar, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

António Tavares de Castro

Investigador Principal, Chefe do Núcleo de Observação

Ivo Figueiredo Dias

Bolseiro de Pós-Doutoramento, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS

João Prudente dos Santos

Bolseiro de Pós-Doutoramento, Núcleo de Observação de Estruturas

DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

Ricardo Santos

Bolseiro de Pós-Doutoramento, Núcleo de Geotecnia de Obras Hidráulicas

CENTRO DE INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

Luís Lages Martins

Bolseiro de Pós-Doutoramento, Núcleo de Qualidade Metrológica

NÚCLEO DE TECNOLOGIAS DA INFORMAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

José Barateiro

Investigador Auxiliar, Chefe do Núcleo

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

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 171/2018

Proc. 0403/112/20970, 0109/112/2097001, 0402/112/2097002, 0304/112/2097003, 0502/112/2097004, 0904/112/2097005

RESTATE - SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO EM TEMPO ÚTIL PARA A AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE GRANDES BARRAGENS DE BETÃO. O CICLO DE AÇÃO: DADOS-INFORMAÇÃO-CONHECIMENTO-TOMADA DE DECISÃO

Relatório de progresso do projeto do P2I/LNEC até fevereiro de 2018

Resumo

Neste relatório apresenta-se, de forma sucinta, a descrição da atividade de investigação realizada no âmbito do projeto RESTATE até fevereiro de 2018. É feita a apreciação da atividade desenvolvida, nomeadamente quanto ao grau de cumprimento do plano de trabalhos, bem como dos objetivos específicos e dos indicadores de desempenho propostos na ficha de projeto. São ainda referidas as aplicações dos resultados da investigação em trabalhos contratados ao LNEC e as candidaturas a financiamento externo desenvolvidas no âmbito do projeto.

Palavras-chave: RESTATE / Barragens de betão / Controlo de qualidade das medições / Análise e interpretação do comportamento estrutural / Controlo de segurança estrutural

REAL-TIME DECISION SUPPORT SYSTEM FOR SAFETY ASSESSMENT OF LARGE CONCRETE DAMS. THE ACTION CYCLE: DATA-INFORMATION-KNOWLEDGE-DECISION MAKING

Progress report of the P2I/LNEC project by February 2018

Abstract

This report presents a brief description of the research activities performed for the RESTATE project up to February 2018. An appreciation of the developed activity is presented, namely about the degree of agreement with the work plan timeline, and as well, with the task goals and performance indicators, that are proposed in the project sheet. In the last part, the report presents the practical applications of the project results in works contracted to LNEC and in the applications to project grants.

Keywords: RESTATE / Concrete dams / Quality control of measurements / Analysis and interpretation of the structural behaviour / Structural safety control

Índice

1	Introdução	1
2	Atividade desenvolvida.....	2
3	Divulgação de conhecimentos	4
3.1	Aspetos gerais	4
3.2	Publicações.....	4
3.3	Participação em eventos técnicos-científicos	5
3.4	Teses de mestrado	5
3.5	Divulgação em plataformas digitais	6
3.6	Participação em júris.....	6
4	Financiamento externo.....	7
4.1	Aspetos gerais	7
4.2	Candidaturas a projetos financiados	7
4.3	Aplicações a trabalhos de contrato	8
5	Recursos mobilizados e indicadores de desempenho.....	9
6	Considerações finais	11
	Referências bibliográficas	13
	ANEXO Ficha do projeto	15

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Plano de trabalhos proposto	2
Quadro 5.1 – Afetação de recursos humanos.....	9
Quadro 5.2 – Indicadores de desempenho	10

1 | Introdução

O projeto de investigação RESTATE teve início em fevereiro de 2017 e tem uma duração total prevista de 46 meses.

O projeto está integrado no Plano de Inovação e Investigação (P2I) do LNEC (LNEC, 2014) e tem enquadramento na matriz programática da Estratégia de Investigação e Inovação 2013-2020 (E2I), nomeadamente no eixo estruturante E4 (Risco e segurança) e eixo transversal E5 (Instrumentos para a inovação), e nas temáticas T3 (Tecnologias de informação) e T8 (Desenvolvimento de competências e transferência de conhecimentos).

A equipa de investigação é formada pelos Bolseiros de Pós-Doutoramento Juan Mata (Investigador Responsável), do DBB/NO, João Prudente dos Santos (Investigador Co-responsável), do DE/NOE, Ivo Dias, do DBB/NMMR, Luís Lages Martins, do CIC/NQM, e Ricardo Santos, do DG/NGOH, pelo Investigador Principal António Tavares de Castro, do DBB/NO, e pelos Investigadores Auxiliares José Barateiro, do CD/NTIEC, e Sérgio Oliveira, do DBB/NMMR.

O projeto RESTATE pretende a criação de valor acrescentado nas áreas da segurança estrutural e da gestão do risco de grandes infraestruturas de engenharia civil através do desenvolvimento de modelos matemáticos que incorporem metodologias inovadoras de *Machine Learning*. O projeto tem como objetivo o desenvolvimento de metodologias de suporte à decisão em tempo útil relativamente ao controlo da segurança estrutural de grandes infraestruturas. Destacam-se as seguintes atividades do projeto:

- Controlo da qualidade dos dados da observação (manual e automática) tendo como base: i) a consideração das incertezas das medições nas observações; e ii) a implementação de cartas de controlo adequadas.
- Análise e interpretação do comportamento observado das estruturas sob ações estáticas e dinâmicas através: i) da utilização das observações obtidas em sistemas de monitorização para ações estáticas e dinâmicas; e ii) do desenvolvimento de séries de previsão do comportamento (para previsão a curto e longo prazo).
- Deteção atempada (em tempo real) do possível desenvolvimento de cenários de dano através: i) da definição de limites de aviso e alerta; e ii) da potenciação da informação armazenada em diversos estudos do LNEC sobre o comportamento estrutural em cenários de evolução até à rotura. O objetivo principal é incorporar, através de modelos de *Machine Learning*, a informação dos modelos utilizados na simulação de cenários de rotura em sistemas de gestão da informação.

2 | Atividade desenvolvida

No Quadro 2.1 apresenta-se o plano de trabalhos proposto na ficha do projeto RESTATE.

Quadro 2.1 – Plano de trabalhos proposto

Atividade	Designação da Atividade	Tarefa	1º Sem.	2º Sem.	3º Sem.	4º Sem.	5º Sem.	6º Sem.	7º Sem.	8º Sem.
Atividade 1	Controlo de qualidade das medições	T 1.1								
		T 1.2								
Atividade 2	Análise, interpretação e previsão do comportamento observado sob ações estáticas e dinâmicas	T 2.1								
		T 2.2								
		T 2.3								
Atividade 3	Deteção atempada de potenciais cenários de dano	T 3.1								
Atividade 4	Desenvolvimento de aplicação para o suporte à decisão	T 4.1								

A atividade desenvolvida insere-se em quatro tarefas que integram o plano de trabalhos do projeto:

- **T1.1- Controlo de qualidade das medições** – Nesta tarefa foram desenvolvidos trabalhos no âmbito do controlo de qualidade dos dados da observação (manual e automática) tendo como base a deteção de *outliers* e a consideração das incertezas de medição nas observações.
- **T2.1- Aplicação informática para a análise de medições sob ações estáticas e dinâmicas e a sua comparação com os resultados de modelos numéricos** – Esta tarefa encontra-se numa fase inicial de desenvolvimento, tendo sido utilizados modelos de *Machine Learning* para a análise e interpretação de grandezas observadas em barragens de aterro.
- **T2.3- Aplicação informática para a análise das medições obtidas de sistemas de monitorização de ações dinâmicas** – Parte dos trabalhos desta tarefa foram antecipados e têm sido levados a cabo em colaboração com o meio académico. A atividade neste campo tem consistido na monitorização em contínuo e na análise do comportamento dinâmico de uma barragem de betão, sob excitação ambiente/operacional e sob ações sísmicas, recorrendo-se a programas que têm vindo a ser desenvolvidos no LNEC.
- **T3.1- Definição de regras de decisão para a identificação atempada de potenciais cenários de acidente e de incidente** – Parte da atividade prevista nesta tarefa foi antecipada de forma a satisfazer necessidades no âmbito do trabalho de contrato realizado para a EDP, referente ao estudo: “Apoio do LNEC na receção e operação dos sistemas de recolha automática de dados (RAD), dos sistemas GNSS e do sistema de observação sísmica (SOS)” nas barragens do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor, na parte relativa ao sistema RAD. Neste âmbito, foi desenvolvida uma metodologia expedita para a

definição de limites de aviso e alerta que permitam a identificação de potenciais comportamentos anómalos.

A atividade está a ser desenvolvida, genericamente, de acordo com o inicialmente previsto, tendo sido alcançados parte dos objetivos específicos das tarefas T1.1, T2.1, T2.3 e T3.1, que estão descritos na ficha de projeto (Anexo).

Existe atraso em parte das tarefas, principalmente na tarefa T1.2, uma vez que a afetação da mão de obra ao projeto tem sido inferior ao previsto na proposta, situação que está a ser acompanhada com especial atenção e será compensada no futuro próximo através de níveis de afetação de mão de obra superiores aos inicialmente previstos na ficha de projeto.

3 | Divulgação de conhecimentos

3.1 Aspetos gerais

A divulgação de resultados foi realizada através de publicações, da participação em eventos técnico-científicos, de teses de mestrado e através de plataformas digitais. Refere-se, ainda, a participação em júris de teses.

3.2 Publicações

Apresenta-se a listagem de artigos publicados em revistas com arbitragem científica, comunicações e posters apresentados em congressos:

a) Artigos publicados em revistas nacionais com arbitragem científica

1. Lages Martins, L.; Silva Ribeiro, A.; Mata, J.; Tavares de Castro, A. "Medição do movimento de abertura-fecho e deslizamento de juntas em barragens de betão". Revista Medições e Ensaios. ISSN: 2182-5424. Número 14. Junho de 2017.

b) Comunicações em congressos internacionais

1. Cunha, J.; Mata, J.; Gonzalo Losada Ortiz, G. "Structural safety control of the Feiticeiro dam based on an automated data acquisition system". 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams. Praga, Republica Checa, 2017.
2. Mata, J. "RESTATE Project: Real-time decision support system for safety assessment of large concrete dams. The action cycle: Data-Information-Knowledge-Decision Making". International Summer School on Deep Learning, Bilbao, 2017.

c) Posters em congressos internacionais

1. Cunha, J.; Mata, J.; Gonzalo Losada Ortiz, G. "Structural safety control of the Feiticeiro dam based on an automated data acquisition system". 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams. Praga, Republica Checa, 2017.

Apresenta-se, ainda, a listagem dos resumos e das comunicações já submetidas a congressos internacionais que decorrerão em 2018:

- Antunes, A., Barateiro, J., Cardoso, E. "Adding value to sensor data of civil engineering structures: Automatic outlier detection". SIAM SDM - International Conference on Data Mining, COST Workshop, 2018. Submetido em 2017.
- Cunha, J.; Mata, J.; Ortiz, G. "Structural safety control of the Baixo Sabor dam based on an automated data acquisition system". ATCOLD Symposium Hydro Engineering at ICOLD 2018, Austria, 2018. Resumo e artigo submetidos em janeiro de 2018.

- Santos, R.; Mata, J. "Assessment of water flow measurement in a zoned dam using artificial neural networks". ATCOLD Symposium Hydro Engineering at ICOLD 2018, Austria, 2018. Resumo e artigo submetidos em janeiro de 2018.

3.3 Participação em eventos técnicos-científicos

Listam-se de seguida os eventos técnico-científicos frequentados no âmbito do RESTATE:

- International Summer School on Deep Learning, em Bilbao, organizado pela University of Deusto, de Bilbao, e pela Rovira i Virgili University, de Tarragona. O bolsheiro Juan Mata participou neste evento onde foram abordadas metodologias de Deep Learning (um tópico da área da *Machine Learning* que se baseia em redes neuronais artificiais) que têm como objetivo a identificação e representação de padrões, com base na observação de dados, e que possibilitam o reconhecimento de características (tipo assinatura) próprias do sistema que se está a analisar.
- VERBUND Innovation Challenge 2017 no tema "Innovation challenge - Neural networks in power plants". O bolsheiro Juan Mata participou neste evento promovido pela VERBUND (empresa austríaca de produção de energia hidroelétrica). Os objetivos principais do desafio foram: i) a promoção de metodologias inovadoras para a avaliação do desempenho das obras; e ii) o desenvolvimento de modelos e a sua utilização na previsão do comportamento observado de duas barragens da VERBUND (uma de betão e outra de aterro), com os menores erros possíveis, de modo a ser possível reconhecer desvios de forma atempada. O bolsheiro foi um dos três finalistas deste evento e foi integrado na lista de potenciais prestadores de serviços para a Verbund.

3.4 Teses de mestrado

Apresenta-se a listagem das teses de mestrado desenvolvidas no âmbito do projeto RESTATE:

1. Matilde Freitas (2017) – "Monitorização de vibrações em estruturas. Métodos de identificação modal no domínio do tempo". Dissertação de Mestrado do ISEL, elaborada no LNEC sob a orientação do Investigador Sérgio Oliveira.
2. Filipe Caçador (2017) – "Big Data Analytics Applied to Sensor Data of Engineering Structures: Predictive Methods". Dissertação de mestrado em Engenharia Informática – ISCTE-IUL, sob a orientação do Investigador José Barateiro.
3. António Antunes (2017) – "Big Data Analytics Applied to Sensor Data of Engineering Structures: Automatic Detection of Outliers". Dissertação de mestrado em Engenharia Informática – ISCTE-IUL, sob a orientação do Investigador José Barateiro.

3.5 Divulgação em plataformas digitais

No âmbito do projeto RESTATE, foi desenvolvida uma página web para a divulgação das principais atividades desenvolvidas e conquistas alcançadas. A página pode ser consultada através do seguinte endereço eletrónico: <https://sites.google.com/view/restate-project/the-project>

3.6 Participação em júris

O bolsheiro Juan Mata participou, como membro do júri, juntamente com os Eng^{os} José Pollimón e Escuder Bueno, nas provas de doutoramento de Fernando Salazar (Diretor do CIMNE Madrid), realizadas na Universitat Politècnica de Catalunya, em Barcelona. A tese intitulada “A machine learning based methodology for anomaly detection in dam behaviour”, desenvolvida sob a orientação do Prof. Oñate Ibáñez de Navarra e do Prof. Miguel Ángel Toledo Municio, apresentou uma metodologia inovadora, com base em “Boosted regression trees”, para a identificação de padrões do comportamento observado e para a deteção de comportamentos anómalos (através de simulação numérica) em barragens de betão.

4 | Financiamento externo

4.1 Aspetos gerais

A atividade de investigação realizada pela equipa do projeto no âmbito do projeto RESTATE é atualmente financiada, na sua totalidade, por fundos próprios do LNEC. No sentido de captar financiamento externo para o projeto foram promovidas candidaturas a projetos financiados. O conhecimento alcançado no projeto RESTATE foi também incorporado em trabalhos referentes a estudos por contrato.

4.2 Candidaturas a projetos financiados

Apresenta-se a listagem das candidaturas promovidas a concursos financiados:

- Candidatura do projeto “Sistema de suporte à decisão em tempo útil para a avaliação da segurança de grandes infraestruturas na Indústria 4.0”, com o acrónimo RESTATEFORINDUSTRY4.0. Foi submetida em 2017 ao concurso referente a Projetos de Desenvolvimento e Implementação de Infraestruturas de Investigação inseridas no RNIE do Programa Operacional Regional de Lisboa. Este projeto pretende financiar parte da mão de obra solicitada no projeto RESTATE, bem como despesas com a aquisição de equipamentos e missões. Foi solicitado um orçamento total para o LNEC de €239.887,99. Neste momento os resultados desta candidatura ainda não são conhecidos.
- Candidatura do projeto COVERAGE – “Combined Operational forecasting of Earthquakes, Risk reduction, EARly warninG and rapid assEssment”. A proposta está inserida no tópico SC5-17-2018 denominado “Towards operational forecasting of earthquakes and early warning capacity for more resilient societies” no âmbito da “Call” a projetos H2020-SC5-2018-2019-2020, intitulada “Greening the economy in line with the Sustainable Development Goals (SDGs)”. A candidatura solicitou um orçamento de 8M€, aborda as temáticas da previsão de sismos (antes das ocorrências), do alerta em tempo real (durante as ocorrências e antes destas atingirem as comunidades) e da avaliação rápida (imediatamente após as ocorrências). O concurso é composto por duas fases, tendo sido submetida a proposta da primeira fase em 27 de fevereiro de 2018. O interesse neste tópico por parte do DE/NOE, do DE/NESDE, do DBB/NO e do DBB/NMMR está em linha com a investigação que se faz nestes núcleos do LNEC, sendo que uma parcela das tarefas do COVERAGE tem a mesma linha de ação que o projeto RESTATE. A equipa do LNEC no consórcio do projeto COVERAGE contou com a coordenação do Eng. João Santos do DE/NOE e a participação do Eng. Juan Mata do DBB/NO, dos Engs. Ivo Dias e Jorge Gomes do DBB/NMMR e dos Engs. António Correia, Alexandra Carvalho e Paulo Candeias do DE/NESDE.

4.3 Aplicações a trabalhos de contrato

Parte das tarefas desenvolvidas no RESTATE têm sido aplicadas no âmbito dos trabalhos de contrato realizados para a EDP, intitulados: “Barragem do Alto Lindoso. Observação e controlo da segurança” e “Apoio do LNEC na receção e operação dos sistemas de recolha automática de dados (RAD), dos sistemas GNSS e do sistema de observação sísmica (SOS)”, que tem aplicação nas barragens do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor, na parte relativa ao sistema RAD, nomeadamente:

- No desenvolvimento de aplicações para a análise integrada das medições provenientes dos sistemas de RAD e manual.
- Na definição de limiares de alerta para a deteção de possíveis comportamentos anómalos.

Apresenta-se a listagem dos relatórios publicados, no âmbito dos trabalhos de contrato, com incorporação de conhecimento relacionado com o projeto RESTATE:

1. Mata, J.; Tavares de Castro, A. “Barragem do Alto Lindoso - Análise da qualidade das medições do sistema de recolha automática de dados entre 2006 e 2016”. Relatório 215/2017 – DBB/NO.
2. Mata, J.; Santos, C.; Gil de Moraes, P. “Barragens do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor - Apoio do LNEC na receção e operação dos sistemas de recolha automática de dados verificação inicial da operacionalidade dos sistemas”. Relatório 157/2017 – DBB/NO.

5 | Recursos mobilizados e indicadores de desempenho

No Quadro 5.1 apresentam-se os recursos humanos do LNEC afetados ao projeto, a afetação de recursos humanos efetivamente dedicada, até fevereiro de 2018, e a afetação total prevista na ficha do projeto. De referir que o bolseiro de Pós-doutoramento Ivo Dias ainda não iniciou a sua atividade no projeto, uma vez que a tarefa na qual vai colaborar tem início apenas em 2018.

Quadro 5.1 – Afetação de recursos humanos

Equipa do LNEC	Categoria	Meses de trabalho	
		Dedicado	Total previsto no projeto
Juan Mata (DBB/NO)	Bolseiro de Pós-doutoramento	0,9	22,4
João Prudente dos Santos (DE/NOE)	Bolseiro de Pós-doutoramento	0,1	2,8
Ivo Dias (DBB/NMMR)	Bolseiro de Pós-doutoramento	0,0	2,8
Luís Lages Martins (CIC/NQM)	Bolseiro de Pós-doutoramento	0,2	2,8
Ricardo Santos (DG/NGOH)	Bolseiro de Pós-doutoramento	0,1	2,8
António Tavares de Castro (DBB/NO)	Investigador Principal	0,1	2,8
José Barateiro (CD/NTIEC)	Investigador Auxiliar	0,2	2,8
Sérgio Oliveira (DBB/NMMR)	Investigador Auxiliar	0,3	8,4
Vera Serrazina (CD/NTIEC)	Especialista de informática	0,0	8,4
Por definir	Bolseiro de Doutoramento	0,0	16,8

No Quadro 5.2 apresentam-se os indicadores de desempenho do projeto, nomeadamente a relação entre o realizado até fevereiro de 2018 e o total previsto na ficha de projeto.

Quadro 5.2 – Indicadores de desempenho

Indicadores	Realizado	Total previsto no projeto
Artigos em revista internacional	0	4
Artigos em revista nacional	1	1
Comunicações em congresso	2*	10
Posters em congresso	1	-
Teses de mestrado	3	2
Livro	0	1
Relatórios	2	-

* Não foram consideradas as comunicações que ainda não foram apresentadas nos respetivos congressos (duas comunicações já submetidas).

6 | Considerações finais

Neste relatório descrevem-se, de forma sucinta, os trabalhos desenvolvidos durante o primeiro ano do projeto RESTATE. A afetação de mão de obra alocada ao projeto tem sido inferior ao previsto na ficha do projeto. No entanto, considera-se que os trabalhos têm decorrido genericamente de acordo com o proposto na ficha de projeto, tanto ao nível da execução das várias tarefas do plano de trabalhos como no grau de cumprimento dos objetivos e realização dos indicadores.

Lisboa, LNEC, maio de 2018

VISTO

O Conselho Diretivo



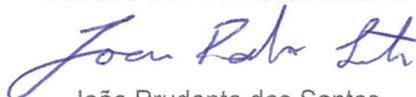
Maria de Lurdes Antunes
Vogal do Conselho Diretivo

AUTORIA



Juan Mata

Bolseiro de Pós-Doutoramento



João Prudente dos Santos

Bolseiro de Pós-Doutoramento



Sérgio Oliveira

Investigador Auxiliar



António Tavares de Castro

Investigador Principal



Iva Figueiredo Dias

Bolseiro de Pós-Doutoramento



Ricardo Santos

Bolseiro de Pós-Doutoramento



Luís Lages Martins

Bolseiro de Pós-Doutoramento



José Barateiro

Investigador Auxiliar

Referências bibliográficas

LNEC, 2014 – **E2I - Estratégia de Investigação e Inovação 2013-2020**. LNEC.
Relatório 397/2014 - CD.

ANEXO

Ficha do projeto

**FICHA DE PROJETO DE I&D&I (versão2)
2013-2020**

1 - Dados Gerais

1.1 Identificação do projeto

Designação	Real-time decision support system for safety assessment of large concrete dams. The action cycle: Data-Information-Knowledge-Decision Making. Sistema de suporte à decisão em tempo útil para a avaliação da segurança de grandes barragens de betão. O ciclo de ação: Dados-Informação-Conhecimento-Tomada de decisão.
Acrónimo	RESTATE
Unidade Departamental proponente	DBB
Setor	NO
Investigador Responsável	Juan Mata
Duração (meses)	46
Data de início (ano-mês-dia)	01-03-2017

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

Par principal (obrigatório)	E4, T3
Par secundário (opcional)	E5, T8

1.3 Entidades intervenientes

Entidade coordenadora	LNEC
Parcelos internos	DBB/NMMR; DE/NOE; ORG/NTIEC; DG/NBOH, CIC/NQM
Parcelos externos	
Entidade externa interessada	EDP
Financiamento externo (S/N)	N

1.4 Resumo

<small>(max. 300 palavras)</small>	<p>Several methodologies and procedures to support decision-making in the context of real-time safety control of large infrastructures are proposed, being concrete dams the main focus of this project. These methodologies will contribute to enhance: i) the quality control of the different measurements (Activity 1); ii) the analysis and interpretation of the structural behaviour, namely through short-term analysis and prediction (Activity 2), and iii) the safety assessment of the infrastructures (Activity 3). In practice, all the proposed methodologies and procedures will be implemented and tested with decision support tools developed in the gestBarragens system (Activity 4), that will be able to provide data and generate decision support information for the multiple decision makers involved in the structural safety control. The results of the proposed work will be disseminated through several reports and one book with a synthesis of all the developed methodologies and scientific papers to publish in national and international journals.</p> <p>Currently, there is a significant activity contracted by EDP - Energias de Portugal directly related to the subject and working program of this project. The working program presented will be developed in the time period of 5 years.</p>
------------------------------------	---

Activity 2 - Analysis, interpretation and prediction of structural response under static and dynamic loads.

The main objective of this activity is the development of new methodologies and computational applications for the **analysis** of data from static and dynamic monitoring systems using statistical approaches and modal identification techniques, **in order to make** comparison with results obtained from numerical models (3D finite element models of the dam-reservoir-foundation system).

This task is about the study and development of data-based models, based on time series forecasting techniques, for the prediction of the structural response, considering the previously observed structural behaviour and the measured data in real time. The study of time series prediction methods is proposed with the objective of finding the best strategy for time series decomposition in four elements: trend, seasonal effects, cycles and residuals. A time series is a set of statistics, usually collected at regular intervals. The aims of time series analysis are to describe and summarize time series data, fit low-dimensional models and make forecasts. As case studies, the measurement of the direct and indirect effects usually observed (concrete temperatures, discharges, uplift pressures, displacements of points of the structure and its foundation, relative movements between blocks, stresses and strains) in concrete dams will be considered. This activity is splitted in the three main tasks:

Task 2.1 - Software application for the analysis of data from MDAS and ADAS, and its comparison with structural models. The aim is set at proceeding and consolidating ongoing research at LNEC in order to create a robust, efficient and innovative software application for automatic online processing of data collected using MDAS and ADAS measurements, allowing the tracking with data based models from structural models.

Task 2.2 - Software application for the analysis of data from dynamic monitoring systems. The aim is the improvement and conclusion of the software application for the archive, analysis and presentation of data from dynamic monitoring systems, namely for modal identification and automatic comparison with numerical results from 3D finite element models of the dam-reservoir-foundation system.

Task 2.3 - Development of time series prediction methods are proposed in this task with the objective of finding the best strategy for time series decomposition in four elements: trend, seasonal effects, cycles and residuals. A time series is a set of statistics, usually collected at regular intervals. The aims of time series analysis are to describe and summarise time series data, fit low-dimensional models, and make forecasts. Moving averages (MA), autoregressive (AR), autoregressive-moving average (ARMA), and autoregressive integrated moving average (ARIMA) models are some models that will be studied for the purpose of short time prediction, proposed in this task.

As case studies, the measurement of the direct and indirect effects usually observed (concrete temperatures, seepage, uplift pressures, displacements of points of the structure and its foundation, relative movements between blocks, stresses and strains) in concrete dams will be considered.

2 - Fundamentação

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

The safety control of important civil engineering structures, involving monitoring data and numerical modelling, is an important challenge being faced by structural engineers [1-4]. The main concern, for detecting possible malfunctions as early as possible, is the real-time assessment of the structural behaviour under operating conditions. For an effective real-time decision, confidence in the measured data is crucial. Additionally, it must be possible to interpret these data (through adequate data based methods) in order to properly assess the structural's behaviour and condition (with the support of reliable numerical models).

In Portugal, LNEC is involved on the safety control of the Portuguese main dams from the design to the construction stage. The research team of this project include main responsible for the development of the support system used by LNEC, EDP-Energias de Portugal and other entities, for monitoring, diagnosis and safety control of large infrastructures in Portugal and abroad.

Nowadays, for controlling the structural safety of large concrete dams under operating conditions, the collected data is usually analysed using statistical models for effects separation (environment loads and time effects) [7-11]. The results of these statistical models are compared against the results from deterministic models, like finite element models, and synthesis graphics are automatically generated and periodically sent to the technicians in charge [5].

In the recent context, the main threat for real-time decision is the inability to timely detect scenarios of abnormal structural behaviour that may originate an accident. Therefore, the current main challenge of real time structural safety control, through the use of (automated) monitoring systems, is related to the continuous improvement of the management, validation, archiving and exploration of the information, and to the implementation of a quality control process for the measured data [12,13].

As a consequence, the main research tasks proposed in this project address the different activities of structural safety control, and can be summarized in three questions (Q1, Q2 and Q3): Q1 (Monitoring): Can it be ensured that the measurement frequency is suitable and the measured data is reliable? Two situations will be studied within this subject: i) the cases where there is redundancy of measurements of the same physical quantity (e.g. manual and automated measurements), and ii) the situations where there are only automated measurements. Q2 (Analysis and interpretation): Can the analysis and interpretation of the monitoring data be improved? In this case, data-based models based on time series forecasting techniques for the short-term prediction of structural response will be approached. Q3 (Safety assessment and decision-making): Is an early warning of abnormal behaviour possible and reliable? The early detection of a abnormal scenario will be addressed by combining information provided by monitoring systems, along with results obtained from numerical simulations.

The new advanced developed algorithms will be implemented in an ongoing management information system developed by LNEC [14,15], that will allow warning the entities responsible for the structural safety control, with clear benefits related to a timely intervention [16-20]. The main case studies used to validate the proposed methodologies will be related to large concrete dams, being expected to adapt and test the proposed methodologies through other large structures, such as bridges.

The working program presented will be developed in the time period of 5 years and there is a significant activity contracted by EDP - Energias de Portugal directly related to the subject and working program of this project, namely the safety control of the Baixo Sabor dam including the exploitation of its automated data acquisition system.

3 - Objetivos

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

The safety and serviceability assessment of large infrastructures (such as dams and bridges), under static and dynamic loads, is actually one of the greatest challenges faced by modern structural engineering.

The main aim of structural safety and serviceability assessment consists of characterizing the expected structural behaviour, by resorting to models previously calibrated by comparing their results with measurements and parameters obtained from the continuous monitoring.

Based on this comparison, decisions regarding not only maintenance, but also civil protection, can be undertaken, preferably in real-time.

The success of safety assessment approaches, whether these are based on numerical modelling or data-driven strategies, relies on the quality of the data gathered and the effectiveness of its analysis and interpretation. Errors can appear into data analytics processes at any stage of the structure's life and serious issues can result when they do. Hence, one goal of this research work is to develop methodologies capable of ensuring that reliable monitoring data is acquired in real-time (Activity 1).

Following Activity 1, the system to be developed aims at being capable of analysing, interpreting, predicting and classifying the structural behaviour in the short term (Activity 2), after which the main objectives consist of assessing the structural condition and early-warning detection of abnormal scenarios (Activity 3). Based on the results and achievements of all these three tasks, decision support tools, as a part of the gestBarragens system, capable of outputting the results of the structural assessment will be developed (Activity 4).

The main ideas and the relation between the tasks are illustrated in attached Figure 1. The implementation of the proposed methodologies in a decision support system is a solid step for the improvement of structural safety control in real time, as supported through the business model presented in Figure 2.

4 - Contribuições inovadoras

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

This project will provide LNEC with several tools that improve the safety control of large infrastructures and can support the decisions to be taken by the infrastructures owners and by the authorities. The main contributions can be grouped in four modules:

i) Data quality verification. This component is essential for implementing outlier and anomaly detection procedures and mechanisms, which prove to be suitable for manual and automatic data acquisition systems, for monitoring civil engineering structures.

ii) Analysis and interpretation. This component is responsible to implement the analysis and interpretation mechanisms that entail the "expert" component of the overall decision support system. This module relies on verified data controlled by the data quality verification module.

iii) Safety assessment. Based on the results produced by the analysis and interpretation module, this module will explore the concept of overall safety assessment through advanced interpretation of the data and alarm techniques. Additionally it will be fully integrated with the overall information system, which makes possible, for the decision makers, to interpret aggregated warnings and drilling-down to the granular data that is supporting any decision.

iv) Data visualization and exploitation. The work to be developed in this project will make possible to generate new and valuable information coming from the data analysis. In fact, the aim is set at exploring new indicators that can be further analysed for better decision making.

5 - Metodologia

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

Decision support systems are critical tools for short-term and long-term (informed) decisions in multiple areas. This program will be developed throughout several tasks contemplating four main activities of the structural safety control: i) quality control of monitoring data, ii) analysis and interpretation of the structural behaviour under static and dynamic loads, iii) safety assessment, and iv) decision-making. The four activities proposed are described as following (see Fig. 1):

Activity 1 - Quality control of monitoring data. The quality of data obtained from monitoring systems are directly related to the quality and reability of all the elements of the monitoring chain (measuring devices, record systems), that are not part of the study of this project. In this task, the aim is set at continuing and consolidating ongoing research developed at LNEC, in order to create a robust, efficient and innovative software application for controlling the quality of the monitoring data. The outlier detection is the primary step in most of data analysis applications. For this reason, several methods for outlier detection will be approached. The advantages of univariate vs. multivariate techniques and parametric vs. nonparametric procedures will be addressed in this task. Aspects related to the robustness of the used estimators will also be addressed. Two situations will be studied: i) the cases where there is redundancy of measurements of the same physical quantity (e.g. manual and automated measurements), and ii) the situations where there are only automated measurements. This activity is subdivided in the two main tasks:

Task 1.1 - Quality control of monitoring data based on measurement uncertainties. The measurand is always unknown and there is no simple rule to validate the measurement result performed by the measurement system. However, there are procedures that allow for its characterization, and which limit the magnitude of their associated errors and uncertainties. The more knowledge there is about the errors and uncertainties associated with the measurement results, the more effective will any structural assessment strategy or system relying upon the data at hand.

In order to take advantage of the redundancy of measurement systems (automated data acquisition systems, ADAS, or manual data acquisition systems, MDAS) and the confidence in the manual measurements, the aim is set at developing a quality control procedure for the assessment of ADAS measurements, that takes into account the measurement uncertainties. The objective of the proposed quality control method for paired (ADAS, MDAS) measurements is to conduct a statistical location test to compare two sets of measurements (ADAS and MDAS measurements) to assess whether their averages differ. Near zero differences between ADAS and MDAS data are expected (if measured at the same time). A case study with an application of the quality control method for paired (ADAS, MDAS) measurements of a structural behaviour under operation conditions will be presented.

Task 1.2 - Quality control of monitoring data based on multivariate statistical process control charts. Immediately after a measurement is obtained, and/or before it is stored it must be validated through the predefined thresholds in order to eliminate potential outliers. Most of outlier detection techniques for data analysis are based on distance measures, clustering and spatial methods. For situations where there are only automated measurements, the development of multivariate statistical process control charts will be performed in order to take advantage of the availability of on-line process computers which routinely collect measurements on large numbers of process variables. Application of methodologies to validate data obtained manually and through automated monitoring systems, based on statistical quality control of new measurements, using Multivariate Statistical Process Control Charts, such as multivariate Shewhart type control charts, multivariate CUSUM control charts and multivariate EWMA control charts will be tested using measurement data obtained from concrete dams under operation.

Activity 3 – Early detection of developing damage scenarios (Task 3.1). The main objective of this activity is to assess whether the measurements obtained through automated data acquisition systems (ADAS) indicate the development of scenarios related to abnormal dam behaviour. The expected magnitude of the physical quantities to be measured within these scenarios will be estimated using mathematical models. These studies will also allow the selection of redundant measurement subsystems which can confirm the occurrence of an abnormal structural behaviour related to damage scenarios. To improve the effectiveness of the structural safety control in real time, methods based on the construction of decision rules for the early detection of developing abnormal dam behaviour scenarios will be proposed. These decision rules will be based on the use of supervised machine learning models developed with data obtained through mathematical models of the structural behaviour, for scenarios related to abnormal dam behaviour, and real observed data (physical quantities measured through the use of automated monitoring system) that represent the normal structural behaviour. The aim is to combine the physical measured quantities, appropriately weighted, into a new single index allowing the classification of the observations into one of two classes: normal or abnormal behaviour (with potential to develop an incident or accident scenario). Case studies will be based in real dams under operation conditions.

Activity 4 – Development of a decision support system (Task 4.1), designed for the structural safety control and serviceability assessment of concrete dams, will be proposed, supported in the research results produced in **activities 1 to 3**. It will take advantage of the existing support system for monitoring and safety control of concrete dams, GestBarragens, that is under development, by LNEC, since early 2000. The main aim is to integrate new computer-based information tools composed by four major components: i) data quality verification; ii) analysis and interpretation; iii) safety assessment; and iv) data visualization and exploitation. In fact, decision support systems can be seen as computer-based information systems that provide interactive information support to the decision making process of managers and business users. They must be designed to give a quick and interactive response to the ad hoc queries and information needs of business users. To advertise and inform the scientific community and the general audience of the main project activities and results, three different means will be used. First, the software will be available to other organizations for demonstration. Second, scientific publications will be presented and published in international conferences and journals, respectively. Finally, it will also intend to explain the developed research work through two seminars (to be done in the beginning of the third and fifth years) and two short courses (to be done in the third and sixth years).

Referencias Bibliográficas:

- [1] Fib - Task Group 5.1. (2003). Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures. State-of-the-Art Report. Lausanne, Switzerland.
- [2] Farrar, C. R; Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, 365(1851), pp.303–315.
- [3] ICOLD (2013). Dam surveillance guide. Bulletin number 158. International Commission on Large Dams.
- [4] ICOLD (2013). Guidelines for use of numerical models in dam engineering. Bulletin number 155. International Commission on Large Dams.
- [5] Tavares de Castro, A.; Mata, J.; Barateiro, J.; Miranda, P. (2012). Information management systems for dam safety control. The Portuguese experience. In First Dam World Conference. IBRACON, Maceió, Brazil.
- [6] Barateiro, J.; Santos, J.; Mata, J.; Borbinha, J.; Antunes, G. (2009). Long-term data management and the safety of large civil engineering structures. In Proceedings of the 5th IEEE International Conference on e-Science, Oxford, United Kingdom.

- [7] Mata, J. (2011) Interpretation of concrete dam behaviour with artificial neural network and multiple linear regression models. *Engineering Structures*. Elsevier. 48(3):903–910. doi:10.1016/j.engstruct.2010.12.011.
- [8] Léger, P.; Leclerc, M. (2007). Hydrostatic, temperature, time-displacement model for concrete dams. *Journal of Engineering Mechanics*. ASCE. pp.267-277.
- [9] Mata, J.; Tavares de Castro, A.; Sá da Costa, J. (2013). Time-frequency analysis for concrete dam safety control: Correlation between the daily variation of structural response and air temperature. *Engineering Structures*. Elsevier. 48(3):658–665. doi:10.1016/j.engstruct.2012.12.013.
- [10] Mata, J.; Tavares de Castro, A.; Sá da Costa, J. (2013). Constructing input for statistical models for arch dam deformation prediction. *Structural Control and Health Monitoring*. doi:10.1002/stc.1575.
- [11] Lemos, J.; Gomes, J. (2007). Modeling seismic failure scenarios of concrete dam foundations, chapter 30. Taylor & Francis.
- [12] Mata, J. (2013). Safety control of control of concrete dams aided by automated monitoring systems. PhD Thesis, Technical University of Lisbon, Portugal.
- [13] Mata, J.; Tavares de Castro, A.; Sá da Costa, J. (2010). Quality control of dam monitoring measurements. 8th ICOLD European Club Symposium, Austria.
- [14] Turban, E., Sharda, R., Delen, D. (2010). Decision support and business intelligence systems (9th eds). Pearson Education, Inc.. New Jersey, USA.
- [15] Yin, Z.; Li, Y. (2010). Intelligent decision support system for bridge monitoring. *International Conference on Machine Vision and Human-Machine Interface*, 491-494, 2010. doi: 10.1109/MVHI.2010.203
- [16] Mata, J.; Tavares de Castro, A.; Sá da Costa, J. (2012). Threshold definition for internal early warning systems for structural safety control of dams. Application to a large concrete dam. *First Dam World Conference 2012*, Brazil.
- [17] Mata, J.; Schclar Leitão, N.; Tavares de Castro, A.; Sá da Costa, J. (2014). Construction of decision rules for early detection of a developing concrete arch dam failure scenario - A discriminant approach. *Computers and Structures*. Elsevier. 142 (2014) 45–53. doi: 10.1016/j.compstruc.2014.07.002
- [18] Santos, J. P. (2014). Smart structural health monitoring techniques for novelty identification in civil engineering structures. PhD Thesis, Technical University of Lisbon, Portugal.
- [19] Santos, J.; Crémona, C.; Orcesi A. D.; Silveira, P. (2013). Multivariate statistical analysis for early damage detection. *Engineering Structures*; 56: 273-285; 2013. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.05.022 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029613002459>
- [20] Santos, J., Orcesi, A. D., Crémona, C., Silveira, P. (2014). Baseline-free real-time assessment of structural changes. *Structure and Infrastructure Engineering, Maintenance, Management, Life-Cycle Design & Performance*. 11(2): 145-161. DOI:10.1080/15732479.2013.858169. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15732479.2013.858169#.VMaRqf6sV4g>

6 - Plano de Trabalhos

Atividade	Designação da Atividade	Tarefa	Designação da Tarefa	1º Semestre	2º Semestre	3º Semestre	4º Semestre	5º Semestre	6º Semestre	7º Semestre	8º Semestre
Activity 1	Quality control of monitoring data	T1.1	Quality control of monitoring data based on measurement uncertainties								
		T1.2	Quality control of monitoring data based on multi-variate statistical process control charts								
Activity 2	Analysis, interpretation and prediction of structural response under static and dynamic loads	T2.1	Software application for the analysis of data from MDAS and ADAS monitoring systems, and its comparison with data based models from structural mechanical models								
		T2.2	Software application for the analysis of data from dynamic monitoring systems								
		T2.3	Development of time series prediction models								
Activity 3	Early detection of developing damage scenarios	TA.1	Construction of decision rules for the early detection of developing incidents and accident scenarios								
Activity 4	Development of a decision support system	TA.1	Development of a decision support system for the structural safety control and serviceability assessment of concrete dams								

8 - Resultados expectáveis

Resultados por atividade/tarefa	Descrição
<i>(descrever os resultados esperados por actividade e/ou tarefas)</i>	
Activity 1	<ul style="list-style-type: none"> - Procedures for outlier detection and raw data validation. - To improve the existing experience and knowledge related to the use of Multivariate Statistical Process Control Charts for automated data validation. - Expected publications: one paper in an international peer reviewed journal related to the comparison between ADAS and MDAS measurements for quality control based on measurement uncertainties, and two conference papers related to the use of multivariate statistical process control charts for the quality control of measurements.
Activity 2	<ul style="list-style-type: none"> - A computational application for the comparison of the observed data, the results from quantitative interpretation models and the results from structural mechanical models (3D Finite Element Models). - New methodologies based on time series methods for the short term prediction of the structural behaviour of large dams. - Expected publications: two papers in international peer reviewed journals, three conference papers and one master thesis related to the use of time series and wavelet transform methods for short time interpretation and prediction of the dam behaviour. The publications will be focusses in several case studies in order to approach a range of real situations.
Activity 3	<ul style="list-style-type: none"> - New procedures for the construction of decision rules for the early detection of anomalous structural behaviour associated, or not, to the development of an incident or accident scenario. - Expected publications: one paper in an international peer reviewed journal, two conference papers and one master thesis related to the early detection of anomalous structural behaviour associated to several occurrences, nemely due to: the deterioration of the drainage curtain in a concrete dam and earthquakes.
Activity 4	<ul style="list-style-type: none"> - Computational applications, to be implemented in the gestBarragens system, to support the activities related to the safety control of large infrastructures. - Expected publications: one paper in a national journal and three conference papers with case studies to explain, to experts and potential users, the aim of the computational solutions developed.

Outros resultados	Quantidade
Teses	
<i>mestrado</i>	2
<i>doutoramento</i>	
<i>outras</i>	
Artigos em revista	
<i>nacional</i>	1
<i>internacional</i>	4
Comunicações	10
Outros produtos	
<i>Livro</i>	1

9 - Recursos humanos

Grupo	Esforço (h*m)	Valor €
1	0,00	0,00
2	14,00	79.800,00
3	8,40	29.400,00
4	0,00	0,00
11	33,60	134.400,00
12	16,80	33.600,00
13	0,00	0,00
21	0,00	0,00
22	0,00	0,00
23	0,00	0,00
TOTAL	72,80	277.200,00

10 - Despesas correntes

Designação	Quantidade	Valor unitário €	Montante €
Participação em congressos	8	2.000,00	16.000,00
			0,00
			0,00
			0,00
			0,00
			0,00
TOTAL			16.000,00

11 - Equipamento

Designação	Quantidade	Valor unitário €	Montante €
Computador	1	800,00	800,00
			0,00
			0,00
			0,00
			0,00
			0,00
TOTAL			800,00

12 - Orçamento

Designação	Estimativa de custo €	Financiamento externo €	Financiamento LNEC €
Recursos Humanos	277.200		277200
Despesas Correntes	16.000		16000
Equipamentos	800		800
Gastos gerais	280.560		280560
			0
			0
Total	574.560	0	574.560

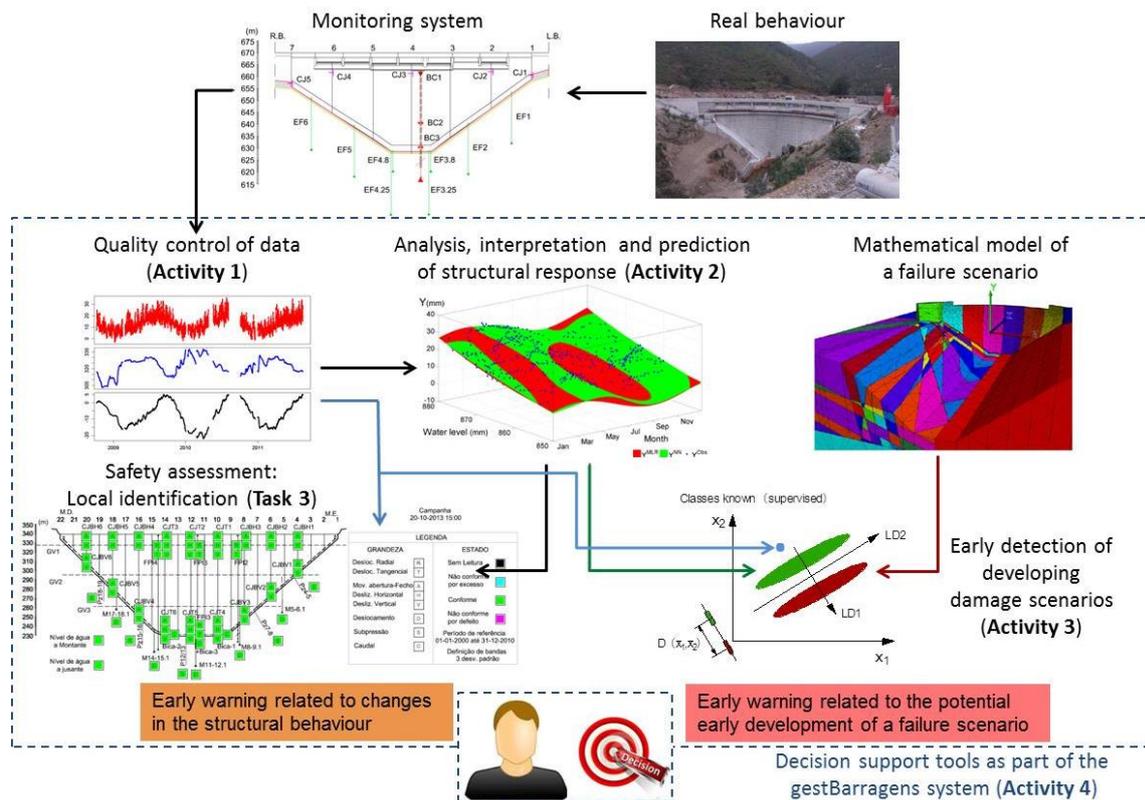


Figura I.1 – Relação entre as atividades principais do projeto RESTATE

Canvas Business Model of the proposed plan	Key Partners <ul style="list-style-type: none"> - LNEC (host institution) - Owners of civil infrastructures: EDP- Energias de Portugal and Agência Portuguesa para o Ambiente (APA). 	Key Activities <ul style="list-style-type: none"> - Research - Development of case studies - Software development - Demonstration - Dissemination - Stakeholders awareness 	Value Proposition <ul style="list-style-type: none"> - Identification and mitigation of several problems related to the quality of monitoring data of large structures - Promotion of a real-time structural safety culture - Risk mitigation of incidents and accidents related to infrastructures - Scientific and technical improvement 	Customer relationships <ul style="list-style-type: none"> - Based on knowledge improvement - Legal issues 	Customers <ul style="list-style-type: none"> - EDP-Energias de Portugal, APA, Autoridade Nacional de Proteção Civil, PRODEL, IBERDROLA and International organizations such as ICOLD.
	Key Resources <ul style="list-style-type: none"> - Data from monitoring system of large civil infrastructures, such as dams and bridges 	Channels <ul style="list-style-type: none"> - In situ activities (inspection to the infrastructures) - Meetings - Web (based on the decision support system) 	Costs <ul style="list-style-type: none"> - Scholarship - Transportation to the civil infrastructures and accommodation - Conferences and dissemination (scientific, key partners and other stakeholders) 	Benefits <ul style="list-style-type: none"> - Turn available a decision support system for real time safety assessment of large infrastructures - Promotion of the communication between different entities responsible for safety (of people and infrastructures) - Knowledge transference to the main stakeholders 	

Figura I.2 – Canvas Business Model do projeto RESTATE

