



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

## **BARRAGEM DO CABRIL**

### **Sistema para monitorização de vibrações em contínuo**

**Medição e análise automática da resposta dinâmica  
sob excitação ambiente/operacional e sob ações sísmicas**

Estudo de investigação sobre a monitorização e análise  
do comportamento dinâmico da barragem do Cabril,  
realizado no âmbito do projeto DAMFA do P2I

Lisboa • junho de 2017

**I&D BARRAGENS DE BETÃO**

**RELATÓRIO 205/2017 – DBB/NMMR**

## **Título**

### **BARRAGEM DO CABRIL**

Sistema para monitorização de vibrações em contínuo

Medição e análise automática da resposta dinâmica sob excitação ambiente/operacional e sob ações sísmicas

## **Autoria**

DEPARTAMENTO DE BARRAGENS DE BETÃO

### **Sérgio Oliveira**

Investigador Auxiliar, Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas

### **André Silvestre**

Mestre em Engenharia Civil, ISEL

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

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

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

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

Relatório 205/2017

Proc. 0402/112/2075501

## BARRAGEM DO CABRIL. SISTEMA PARA MONITORIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM CONTÍNUO

Medição e análise automática da resposta dinâmica sob excitação ambiente/operacional e sob ações sísmicas

### Resumo

---

Neste trabalho apresenta-se o sistema para monitorização em contínuo do comportamento dinâmico da barragem do Cabril que foi instalado em 2008, pelo LNEC e pela EDP, referindo alguns dos principais resultados que têm sido obtidos a partir da análise dos dados recolhidos, quer sob excitação ambiente/operacional, quer sob ações sísmicas. Salienta-se a importância do desenvolvimento do *software* para tratamento, análise e gestão automática dos dados e apresentam-se os programas que têm vindo a ser desenvolvidos no LNEC, em MATLAB, para apoio a este tipo de sistemas, nomeadamente programas de identificação modal (**Modal\_ID2.0** e **Modal\_ID\_Auto2.0**) e programas de elementos finitos tridimensionais para análise do comportamento dinâmico de sistemas barragem-fundação-albufeira (**DamDySSA2.0**).

Palavras-chave: Comportamento dinâmico de barragens / Monitorização de vibrações em contínuo / Análise espectral / Interação dinâmica barragem-albufeira / Frequências naturais / Modos de vibração / Amortecimentos modais / Densidade espectral de potência

## CABRIL DAM. SYSTEM FOR CONTINUOUS VIBRATION MONITORING

Measurement and automatic analysis of the dynamic response under ambient/operational excitation and seismic loads

### Abstract

---

This work presents the system for continuous monitoring of the dynamic behavior of the Cabril dam, which was installed in 2008 by LNEC and EDP, mentioning some of the main results that have been obtained from the analysis of the collected data, either under ambient/operational excitation or under seismic loads. The importance of the software development for automatic data processing, analysis and data management is highlighted, and the computational codes to support this type of monitoring systems that have been developed in LNEC, using MATLAB, are presented, namely programs for modal identification (**Modal\_ID2 .0** and **Modal\_ID\_Auto2.0**) and 3D finite element programs to analyze the dynamic behavior of dam-foundation-reservoir systems (**DamDySSA2.0**).

Keywords: Dynamic behavior of dams / Continuous monitoring of vibrations / Spectral analysis / Dam-reservoir dynamic interaction / Natural frequencies / Vibration modes / Modal damping / Power spectral density



## Índice

1	Introdução .....	1
2	Enquadramento .....	3
2.1	Objetivos da monitorização de vibrações em contínuo .....	3
2.2	Componentes de um sistema de monitorização de vibrações: <i>hardware</i> e <i>software</i> .....	3
3	Sistema de monitorização de vibrações instalado na barragem do Cabril.....	8
3.1	Arquitetura do sistema .....	8
3.2	Componentes do sistema .....	9
3.3	Trabalhos de preparação e instalação do sistema .....	15
3.4	Controlo remoto do sistema.....	18
3.5	Software de análise de dados.....	19
3.5.1	Aspetos gerais .....	19
3.5.2	Recolha automática de dados. Programa Cabril_Aquis.....	20
3.5.3	Programa <b>Modal_ID_auto 2.0</b> .....	23
3.5.4	Programa <b>Modal_ID2.0</b> .....	26
4	Resultados do sistema de monitorização em contínuo .....	30
4.1	Utilização do programa Modal_ID2.0 .....	30
4.2	Utilização do programa Modal_ID_Auto2.0 .....	36
4.3	Amplitude das vibrações medidas na barragem do Cabril sob diferentes tipos de excitação, incluindo sob ações sísmicas .....	40
5	Conclusões e perspetivas futuras .....	42
	Referências Bibliográficas .....	46

## Índice de figuras

Figura 1.1 – Barragem do Cabril (rio Zêzere). Vista de jusante.....	1
Figura 1.2 – Barragem do Cabril: abóbada de dupla curvatura com 132 m de altura máxima acima da fundação. Alçado desenvolvido (vista de jusante), planta e consolas.....	2
Figura 2.1 – Componentes de um sistema de monitorização de vibrações: <i>hardware</i> e <i>software</i> .....	5
Figura 2.2 – Programa DamDySSA2.0: formulação em pressões e deslocamentos. Discretização em elementos finitos tridimensionais (tipo cubo isoparamétricos de 20 pontos nodais) e resolução numérica recorrendo a uma abordagem de estados e a coordenadas modais complexas (Oliveira et al.; 2015; 2016).....	7
Figura 3.1 – Barragem do Cabril: a) fotografia com representação esquemática do 1º modo de vibração; b) modelo de EF3D (DamDySSa2.0) com representação simplificada da zona fendilhada (elemento de junta) .....	8
Figura 3.2 – Acelerómetros instalados na barragem do Cabril. a) Posicionamento dos acelerómetros. b) acelerómetro triaxial; c) acelerómetro uniaxial.....	9
Figura 3.3 – Componentes do sistema modular adotado (marca Ganter): a) Unidade de digitalização e aquisição: ebloxx A1; b) Concentrador de dados: e.pac. ....	11
Figura 3.4 – Sistema de monitorização do comportamento dinâmico instalado na barragem do Cabril. a) Acelerómetros, digitalizadores, concentradores de dados, rede de fibra ótica e servidor instalado no posto de observação e controlo (POC); b) Resultados obtidos com o <i>software</i> de tratamento e análise instalado no servidor no POC: identificação modal e comparação com resultados da modelação numérica.....	12
Figura 3.5 – Esquema com as várias componentes do sistema de observação do comportamento dinâmico em contínuo, instalado na barragem do Cabril .....	14
Figura 3.6 – Caixas instaladas junto dos transdutores: a) tipo 1; b) tipo 2; c) tipo 3 .....	15
Figura 3.7 – Equipamento em fase de testes no laboratório de eletrónica no LNEC/CIC.....	16
Figura 3.8 – Trabalhos de instalação da rede de fibra ótica: a) preparação das fibras; b) soldagem das fibras; c) ligações dos vários filamentos dentro de uma caixa.....	16
Figura 3.9 – Trabalhos de abertura de nichos para colocação dos acelerómetros .....	17
Figura 3.10 – Aspeto geral dos acelerómetros e respetivas caixas. Instalação em obra.....	17
Figura 3.11 – Servidor no Gabinete de observação da barragem do Cabril, onde é efectuado o controlo do sistema e o armazenamento dos dados, nos escritórios da central da barragem.....	18
Figura 3.12 – Controlo remoto do sistema via internet, recorrendo ao <i>software</i> TeamViewer.....	19
Figura 3.13 – Interface do programa de aquisição (Cabril_Aquis) desenvolvido no LNEC/CIC .....	20
Figura 3.14 – Fluxograma do programa de aquisição de dados Cabril_Aquis (LNEC/CIC).....	22
Figura 3.15 – Interface do programa <i>Param_Id_Modal_Auto1.0</i> desenvolvido para facilitar o preenchimento do ficheiro <i>Parametros_idModal.dad</i> com os valores dos parâmetros a utilizar no programa <i>Modal_ID_auto2.0</i> que efetua, para cada hora, a identificação modal automática .....	24
Figura 3.16 – Exemplo de um ficheiro de “output” (formato .dxf) do programa <i>Modal_ID_auto2.0</i> .....	25
Figura 3.17 – Página inicial do programa <i>Modal_ID2.0</i> .....	27
Figura 3.18 – Programa <i>Modal_ID2.0</i> , separador referente aos acelerogramas e espetros de amplitudes.....	27
Figura 3.19 – Programa <i>Modal_ID2.0</i> , separador referente à identificação modal através do método FDD.....	28
Figura 3.20 – Programa <i>Modal_ID2.0</i> , separador referente à identificação modal através do método FDD-SVD .....	29

Figura 3.21 – Programa <i>Modal_ID2.0</i> , separador referente à identificação modal através do método FDD(RD)-SVD .....	29
Figura 4.1 – Programa <i>Modal_ID2.0</i> . Análise dos dados referentes a 1 de abril de 2014, entre as 10:00 e as 11:00 horas, com a água à cota 291,45 m. a) Painel inicial para escolha do ficheiro de dados a analisar (escolha do dia e da hora em que se pretende efetuar a identificação modal); b) Painel para visualização dos acelerogramas registados e dos respetivos espectros de amplitudes e para escolha dos parâmetros de análise .....	32
Figura 4.2 – Programa <i>Modal_ID2.0</i> . Análise dos dados referentes a 1 de abril de 2014, entre as 10:00 e as 11:00 horas, com a água à cota 291,45 m. a) Painel para escolha dos parâmetros a utilizar para deteção automática dos principais picos espectrais (técnica baseada na deteção de intersecções entre linhas correspondentes diferentes níveis de suavização espectral a que se aplicam fatores de shift adequados); b) Painel para visualização dos espectros dos valores singulares, com indicação dos principais picos; neste painel é possível efetuar a escolha interativa de um dado pico mostrando-se a correspondente configuração modal em termos das ondas harmónicas nos diversos pontos de medição assim como o espectro do correspondente índice MAC .....	33
Figura 4.3 – a) Representação das frequências naturais identificadas (1 de abril de 2014, entre as 10:00 e as 11:00 horas) num gráfico com as linhas de influência das frequências naturais calculadas numericamente com o programa <i>DamDySSA2.0</i> . b) Painel inicial do programa <i>DamDySSA2.0</i> com indicação dos principais parâmetros utilizados no cálculo numérico das frequências naturais para várias cotas de água.....	34
Figura 4.4 – Programa <i>Modal_ID2.0</i> . Painel para comparação entre as configurações modais identificadas (1 de abril de 2014, entre as 10:00 e as 11:00 horas) e as calculadas numericamente com o programa <i>DamDySSA2.0</i> . a) 1º modo de vibração; b) 2º modo de vibração .....	35
Figura 4.5 – Monitorização do comportamento dinâmico da barragem do Cabril: identificação modal automática. Resultados obtidos com o programa <i>Modal_ID_Auto2.0</i> entre fevereiro e outubro de 2014.....	37
Figura 4.6 – Evolução das frequências identificadas em função da cota de água na albufeira .....	38
Figura 4.7 – Monitorização do comportamento dinâmico da barragem do Cabril. Variação das frequências naturais identificadas com o programa <i>Modal_Id_Auto2.0</i> em função da cota de água na albufeira e comparação com resultados numéricos obtidos com o <i>DamDySSA2.0</i> . Comparação entre as configurações modais identificadas e calculadas para a água à cota máxima .....	39
Figura 4.8 – Acelerogramas registados na barragem do Cabril em 27 de março de 2010, entre as 13:00 e as 14:00 horas (água à cota 293,24 m). Neste período ocorreu um sismo de magnitude 4.1 com epicentro em Sousel, a cerca de 130 km da barragem, que foi registado na barragem do Cabril (nesta data os dois acelerómetros triaxiais colocados na inserção e os uniaxiais da 2ª galeria não estavam em funcionamento). O sismo provocou uma aceleração de pico de 4 mg no ponto a meio da galeria do coroamento (direção radial) .....	41





## 1 | Introdução

Neste trabalho apresenta-se o sistema para monitorização em contínuo do comportamento dinâmico da barragem do Cabril (ver Figuras 1.1 e 1.2) e referem-se alguns dos principais resultados que têm sido obtidos a partir da análise dos dados recolhidos desde que o sistema foi instalado na obra, em 2008. Trata-se de um sistema concebido para analisar automaticamente o comportamento dinâmico do conjunto barragem-fundação-albufera com base na medição em contínuo de acelerações no corpo da obra (na zona superior) e no maciço rochoso de fundação, junto à inserção, nos encontros, em ambas as margens. O sistema está preparado para medição de acelerações devidas a excitação ambiente/operacional e devidas a ações sísmicas. Foi projetado e desenvolvido no LNEC, com financiamento da Fundação para a Ciência e Tecnologia (REEQ/815/ECM/2005), obtido na sequência de uma candidatura ao Programa Nacional de Reequipamento Científico (Oliveira; 2002), e foi instalado em obra por uma equipa multidisciplinar envolvendo técnicos e engenheiros da EDP e do LNEC, do Departamento de Barragens de Betão, DBB, e do Centro de Instrumentação Científica, CIC (Reis; Costa; 2009). Durante o ano de 2016 o sistema foi melhorado com a inclusão de novos equipamentos de proteção contra sobretensões, nomeadamente ao nível da linha de dados através da qual se efetua a ligação à internet do servidor que é utilizado para gestão, análise e armazenamento dos dados da monitorização de acelerações (as acelerações são recolhidas com uma frequência de amostragem de 1000 Hz e são armazenadas, geralmente, após decimação para 50 Hz). Atualmente, este servidor é também utilizado para gestão dos dados provenientes de um sistema GNSS, instalado pelo LNEC e pela EDP em 2016, também financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (PTDC/ECM-EST/2131/2012), com vista à medição automática, em contínuo, das três componentes de deslocamento no ponto superior da consola central com uma frequência de amostragem de 20 Hz (Oliveira; Lima; 2012).



Figura 1.1 – Barragem do Cabril (rio Zêzere). Vista de jusante

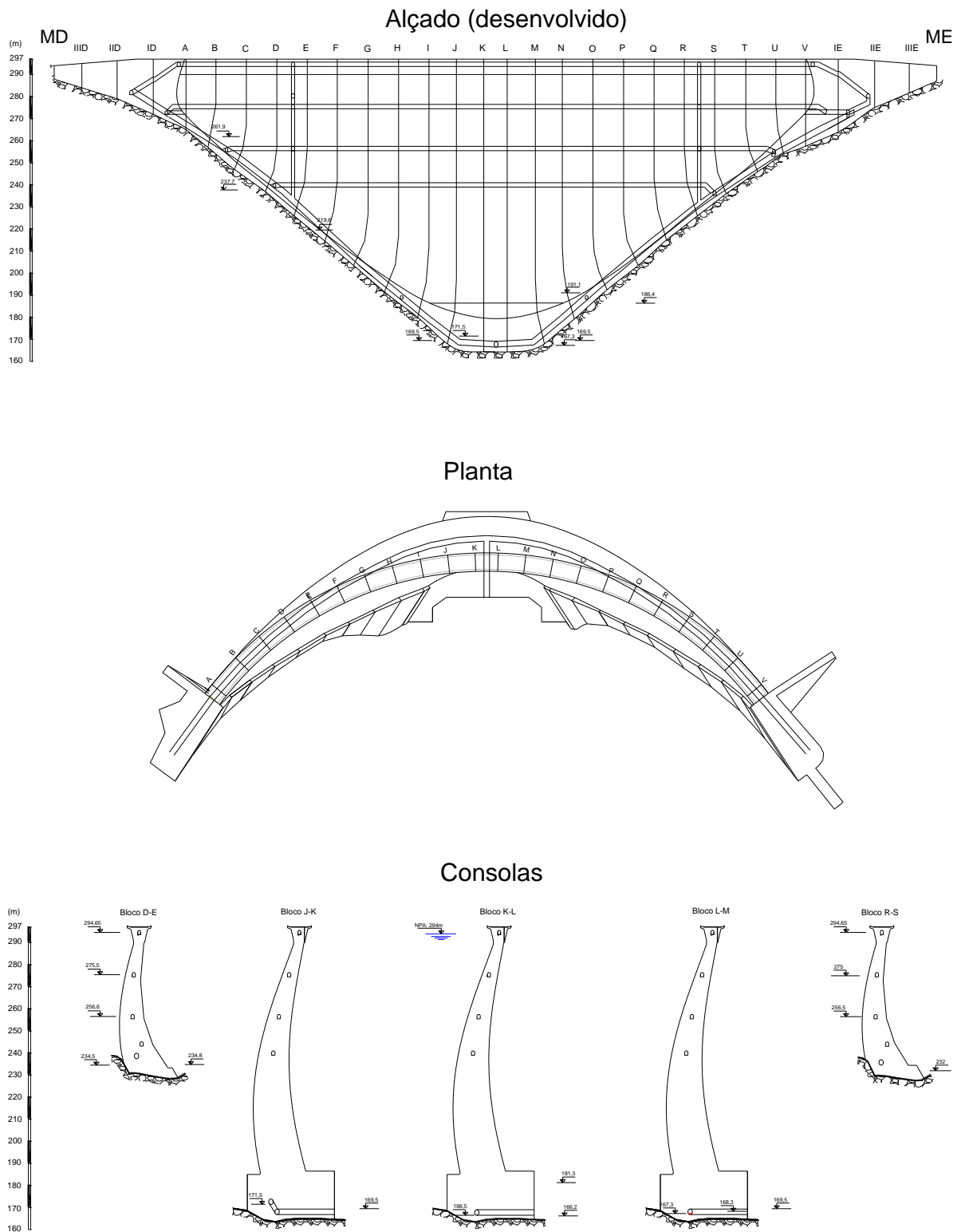


Figura 1.2 – Barragem do Cabril: abóbada de dupla curvatura com 132 m de altura máxima acima da fundação.  
Alçado desenvolvido (vista de jusante), planta e consolas

## 2 | Enquadramento

### 2.1 Objetivos da monitorização de vibrações em contínuo

Em grandes barragens de betão, como é o caso da barragem do Cabril, o objetivo da instalação de sistemas para monitorização em contínuo do seu comportamento dinâmico é a medição e análise de vibrações em vários pontos no corpo da barragem e na fundação (e, por vezes, em estruturas auxiliares), para diferentes tipos de excitação (ambiente, operacional e devida a ações sísmicas), com vista a:

- i. Identificar automaticamente os principais parâmetros modais da obra, ou seja, as frequências naturais dos principais modos de vibração e correspondentes configurações e coeficientes de amortecimento; a identificação destes parâmetros modais é efetuada na perspetiva de estudar a sua evolução ao longo do tempo, separando os efeitos da variação do nível da albufeira e da onda térmica anual, de eventuais efeitos do tempo decorrentes de fenómenos de deterioração evolutiva (Oliveira *et al.*; 2010) ou deterioração induzida por ocorrências excecionais como é o caso de sismos ou cheias;
- ii. Obter dados que permitam caracterizar experimentalmente a resposta da obra sob ações sísmicas, medindo as acelerações sísmicas na fundação (preferencialmente em profundidade, em vários pontos, para caracterização do “*free-field*”, e também em vários pontos ao longo da inserção, para caracterização das acelerações na superfície de contacto betão-rocha) e a amplitude das vibrações medidas no corpo da obra, para sismos de diferente intensidade e para diferentes níveis de água na albufeira; um objetivo importante é a comparação entre a amplitude das acelerações de pico na inserção e das acelerações de pico no corpo da barragem.

É de salientar ainda que os resultados que se obtêm com base na monitorização de vibrações em contínuo são de grande interesse para a validação dos modelos numéricos (Lemos *et al.*; 2010), (Oliveira *et al.*; 2012) a utilizar em estudos de verificação da segurança sísmica das obras existentes e, naturalmente, contribuem para aprofundar o conhecimento sobre a resposta dinâmica de sistemas barragem-fundação-albufeira, o que permite aperfeiçoar os modelos numéricos a utilizar em projeto e na verificação da segurança sísmica de novas obras.

### 2.2 Componentes de um sistema de monitorização de vibrações: *hardware e software*

Atualmente, uma das principais dificuldades na instalação e exploração dos sistemas de monitorização de vibrações em contínuo está associada ao facto dos fornecedores dos equipamentos

(*hardware*<sup>1</sup>) não disponibilizarem *software* devidamente ajustado para cada obra, que permita fazer uma análise automática e/ou interativa, em contínuo, dos dados recolhidos. Em geral, os referidos fornecedores apenas disponibilizam *software* adequado para a aquisição de dados. Contudo, o *software* para análise e gestão dos dados recolhidos (registos de acelerações) é uma componente fundamental para a eficácia dos sistemas de monitorização de vibrações em contínuo. Na Figura 2.1 apresenta-se resumidamente o *hardware* instalado na barragem do Cabril para monitorização de vibrações em contínuo e o *software* que tem vindo a ser desenvolvido no LNEC para facilitar a exploração dos dados recolhidos.

Este *software* de análise e gestão dos dados (como é o caso, p.ex., dos módulos **Modal\_Id\_Auto2.0** e **Modal\_Id2.0** desenvolvidos para a barragem do Cabril), deve ser ajustado para cada obra e deve incluir módulos computacionais para análise automática e para análise interativa, nomeadamente:

- i) módulos para analisar a amplitude das vibrações medidas no corpo da obra e na fundação, com vista à identificação automática e/ou interativa de ações sísmicas e de outros tipos de ações dinâmicas (funcionamento dos grupos de produção, descargas de água, etc.);
- ii) módulos para identificação modal automática e/ou interativa, baseados em métodos de identificação no domínio da frequência (Peeters; 2000), (Rodrigues; 2004) com adequados algoritmos para deteção automática de picos espetrais, e/ou módulos de identificação modal baseados em métodos de identificação modal no domínio do tempo;
- e
- iii) módulos que permitam a comparação automática e/ou interativa dos resultados identificados (frequências naturais, configurações modais e amortecimentos modais) com os resultados obtidos numericamente com base em modelos de elementos finitos tridimensionais (EF3D), tendo em conta, como se referiu, as variações da cota de água na albufeira que ocorrem ao longo do ano, as variações térmicas sazonais e eventuais alterações estruturais associadas a processos de deterioração.

Com estes módulos computacionais, os técnicos responsáveis pela segurança das obras podem obter informação referente: i) à amplitude da resposta dinâmica das obras, para diversos tipos de excitação, nomeadamente para ações sísmicas de diferente intensidade; ii) à variação dos principais parâmetros modais em função da cota de água; e iii) à comparação entre os parâmetros modais identificados em obra e os respetivos valores calculados com base nos modelos numéricos de elementos finitos.

---

<sup>1</sup> Atualmente o equipamento disponível no mercado é, em geral, tecnologicamente bastante avançado: sensores (acelerómetros) com elevada sensibilidade e boa gama dinâmica, digitalizadores com grande resolução (24 bits), concentradores de dados com elevada capacidade, cabos de cobre e/ou fibra ótica com boa capacidade de transmissão, servidores com boa capacidade de armazenamento, etc.

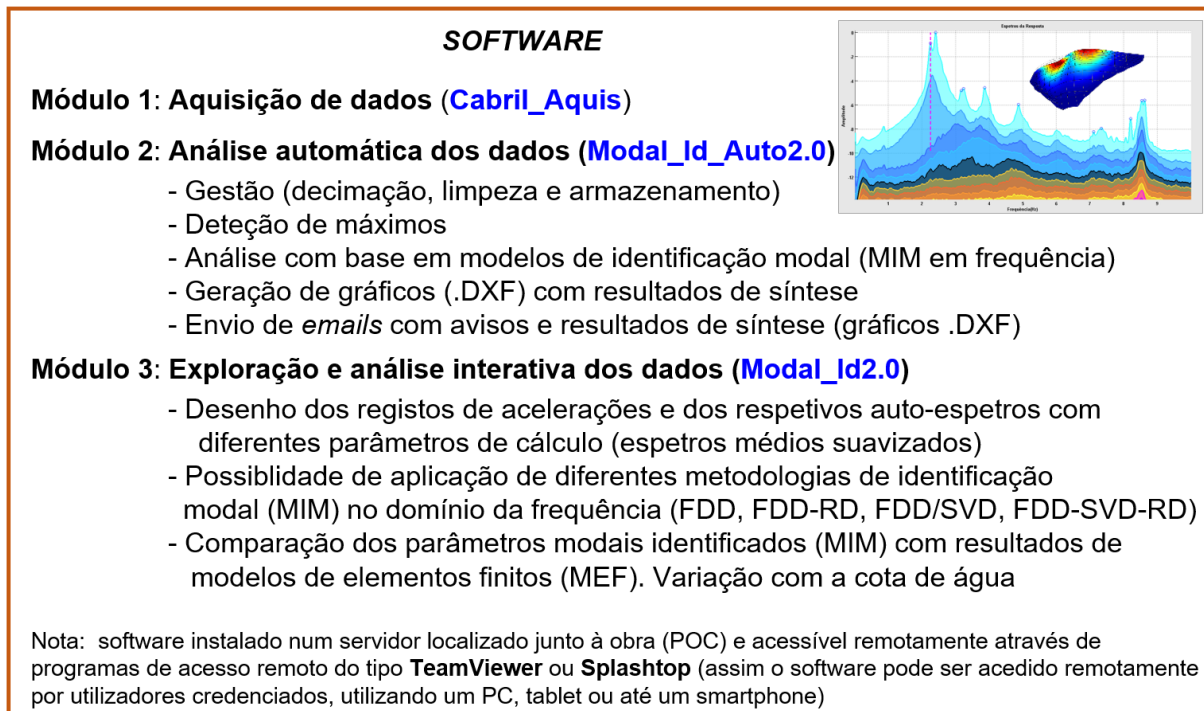
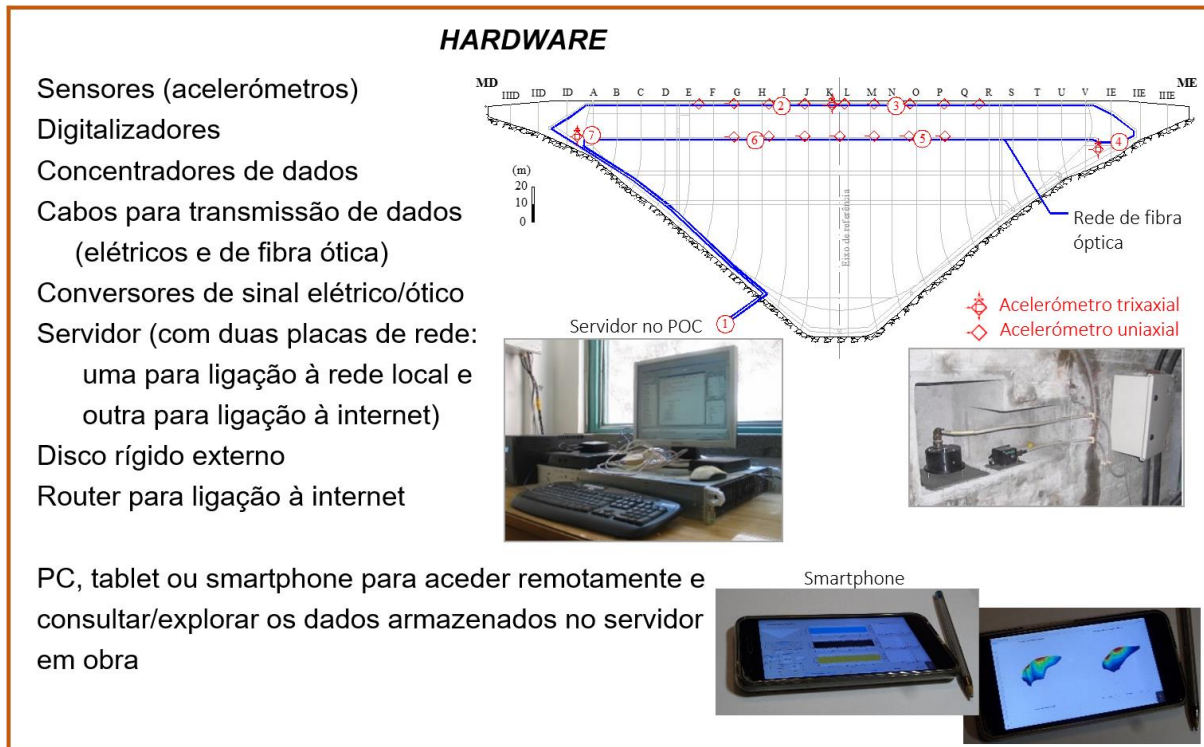


Figura 2.1 – Componentes de um sistema de monitorização de vibrações: *hardware* e *software*

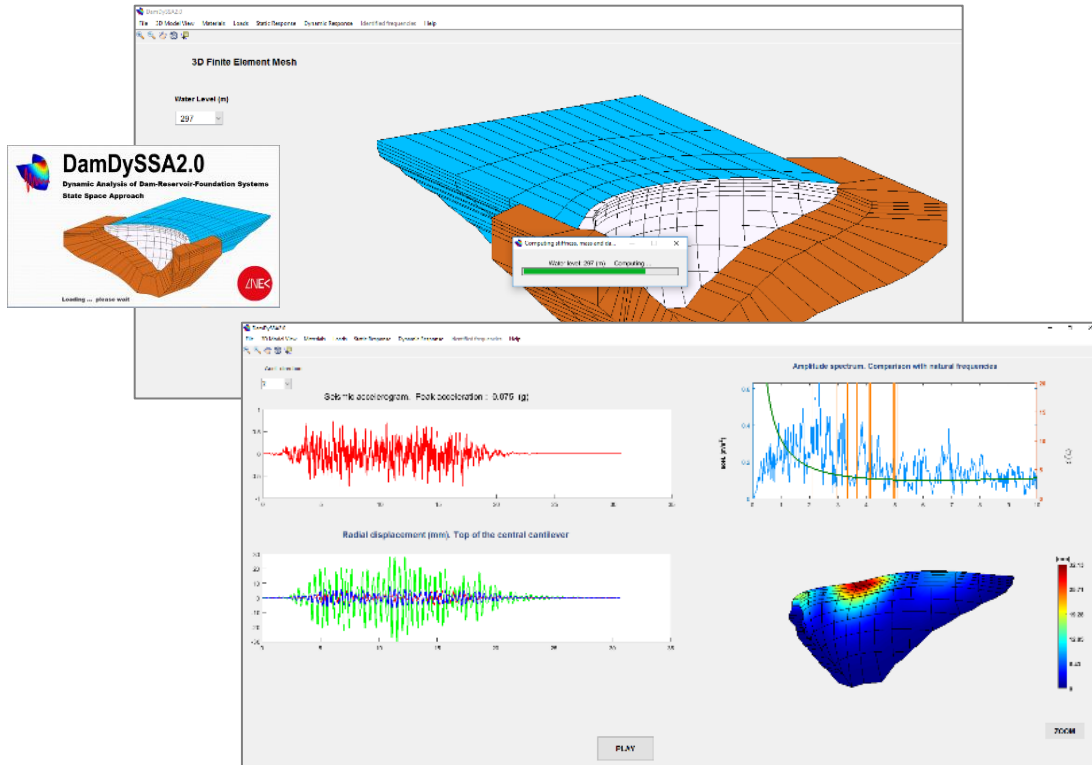
Desta forma os técnicos responsáveis pela segurança podem obter informação experimental sobre a resposta dinâmica das obras, a qual é de grande interesse para o desenvolvimento de novos modelos numéricos de EF3D e para a respetiva calibração. Estes modelos numéricos, devidamente calibrados, são posteriormente utilizados na elaboração de estudos de interpretação do comportamento dinâmico observado e em estudos de verificação da segurança das obras sob ações

sísmicas. No caso presente da barragem do Cabril utiliza-se o programa DamDySSA2.0 (“Dam Dynamic State Space Analysis”), baseado numa formulação “*coupled*” em pressões e deslocamentos (Zienkiewicz *et al.*; 2005) e numa abordagem de estado (Oliveira *et al.*; 2012), (Oliveira *et al.*; 2014), (Oliveira; 2015), (Oliveira *et al.*; 2015; 2016). Neste programa a solução numérica é obtida com base no MEF e envolve a discretização da albufera em elementos finitos de pressão, o que permite simular a propagação das ondas de pressão na albufera e a interação dinâmica estrutura-albufera. O programa DamDySSA2.0, desenvolvido no LNEC/DBB (em MATLAB), permite simular com elevada eficiência computacional a resposta dinâmica de barragens abóbada (mais concretamente, a resposta de sistemas barragem-fundação-albufera) em regime elástico linear, sob ações sísmicas, recorrendo à técnica de sobreposição modal, utilizando coordenadas modais complexas (Figura 2.2). Com este programa é possível obter um bom acerto entre os parâmetros modais identificados para diversas cotas de água e os correspondentes valores calculados numericamente, nomeadamente frequências naturais e configurações modais dos primeiros modos de vibração.

Neste ponto é importante referir que, em geral, para o caso de barragens abóbada, o pretendido acerto entre os parâmetros modais calculados e identificados em obra não se consegue obter tão facilmente recorrendo a programas baseados na utilização de massas de água associadas determinadas de acordo com a fórmula de Westergaard. A fórmula de Westergaard permite calcular a distribuição de pressões hidrodinâmicas em paramentos verticais indeformáveis. Para paramentos curvos e deformáveis, como é o caso das barragens abóbada, as pressões hidrodinâmicas são significativamente inferiores (Alegre *et al.*; 2016), pelo que vários autores têm proposto que, em barragens abóbada, se utilize a fórmula de Westergaard corrigida por um fator empírico de redução da ordem de 50% (Houqun; 2014).

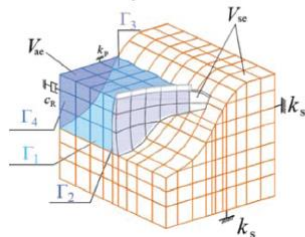
Quando ao número de sensores a utilizar nos sistemas de monitorização dinâmica em contínuo é conveniente ter em conta que para obter bons resultados ao nível da identificação modal é necessário efetuar medições num número de pontos relativamente elevado, em regra da ordem das dezenas. Desta forma será possível obter boas estimativas dos principais parâmetros modais mesmo para baixos níveis de excitação (com é o caso da excitação ambiente), nomeadamente em termos das frequências naturais e das configurações dos primeiros modos de vibração. Com os recentes avanços tecnológicos encontram-se disponíveis no mercado equipamentos perfeitamente adequados às exigências técnicas deste tipo de sistemas de monitorização, nomeadamente sensores, digitalizadores e equipamentos de aquisição e transmissão de dados.

Quanto ao *software* de aquisição fornecido pelos fabricantes dos equipamentos de medição e aquisição, é de salientar que também tem evoluído e, atualmente, é perfeitamente adequado aos objetivos. O problema é que o funcionamento destes sistemas de monitorização dinâmica não depende apenas dos equipamentos e do *software* de aquisição fornecido pelos fabricantes dos equipamentos. Na realidade, em face da grande quantidade de dados recolhidos, a eficácia destes sistemas de monitorização em contínuo está fortemente dependente do *software* para análise automática dos dados, que, no caso presente da barragem do Cabril foi desenvolvido especificamente no LNEC/DBB.



**Formulação em pressões e deslocamentos. Discretização em EF3D**

Discretização do sistema em EF3D



Formulação clássica em deslocamentos

$$\underline{m} \ddot{\underline{u}} + \underline{c} \dot{\underline{u}} + \underline{k} \underline{u} = \underline{f}_G$$

Formulação em pressões e deslocamentos

$$\underline{M} \ddot{\underline{q}} + \underline{C} \dot{\underline{q}} + \underline{K} \underline{q} = \underline{F}_{SF} \quad \underline{q} = \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{p} \end{bmatrix}$$

Deslocamentos na barragem  
Pressões hidrodinâmicas na albufeira

$$\underline{M} = \begin{bmatrix} \underline{m} & \underline{0} \\ \underline{m}_i \underline{Q}^T & \underline{S} \end{bmatrix} \quad \underline{C} = \begin{bmatrix} \underline{c} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{C}_R \end{bmatrix} \quad \underline{K} = \begin{bmatrix} \underline{k} & -\underline{Q} \\ \underline{0} & \underline{H} \end{bmatrix} \quad \underline{F}_{SF} = \begin{bmatrix} \underline{F}_S \\ \underline{F}_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{f}_G \\ \approx 0 \end{bmatrix}$$

Forças no sólido  
Forças no fluido

↙ Interação dinâmica barragem-albufeira      ↘ Amortecimento de radiação

**Abordagem de estado: introdução da incógnita  $\underline{v} = \dot{\underline{q}}$**

$$\begin{bmatrix} \underline{C} & \underline{M} \\ \underline{M}^T & \underline{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\underline{q}} \\ \underline{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{K} & \underline{0} \\ \underline{0} & -\underline{M}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{q} \\ \underline{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{F}_{SF} \\ \underline{0} \end{bmatrix}$$

Sistema de  $2N_{GL}$  equações dif. de 1ª ordem

A resposta dinâmica em pressões e deslocamentos (e respetivas derivadas no tempo  $\underline{v}$ ) é obtida por integração no tempo da equação anterior, após diagonalização recorrendo a coordenadas modais complexas [4]

$$\begin{bmatrix} \underline{q} \\ \underline{v} \end{bmatrix}_{(2N_{GL} \times 1)} = \begin{bmatrix} \underline{u} \\ \underline{p} \\ \dot{\underline{u}} \\ \dot{\underline{p}} \end{bmatrix}$$

Figura 2.2 – Programa DamDySSA2.0: formulação em pressões e deslocamentos. Discretização em elementos finitos tridimensionais (tipo cubo isoparamétricos de 20 pontos nodais) e resolução numérica recorrendo a uma abordagem de estados e a coordenadas modais complexas (Oliveira et al.; 2015; 2016)

### 3 | Sistema de monitorização de vibrações instalado na barragem do Cabril

#### 3.1 Arquitetura do sistema

A definição da arquitetura do sistema baseou-se na informação obtida a partir de modelos de comportamento (ver Figura 3.1) existentes no LNEC e em resultados experimentais obtidos com a realização de alguns ensaios de vibração forçada e ambiente (Mendes *et al.*; 2007). Com esta informação foi definida a localização da aparelhagem para caracterização da ação sísmica e da resposta da obra a este tipo de ação. Devido à fendilhação horizontal existente entre a galeria do coroamento e a segunda galeria (Oliveira; 2000), (Florentino *et al.*; 2003) optou-se por colocar sensores (acelerómetros) nestas duas galerias (Figura 3.2).

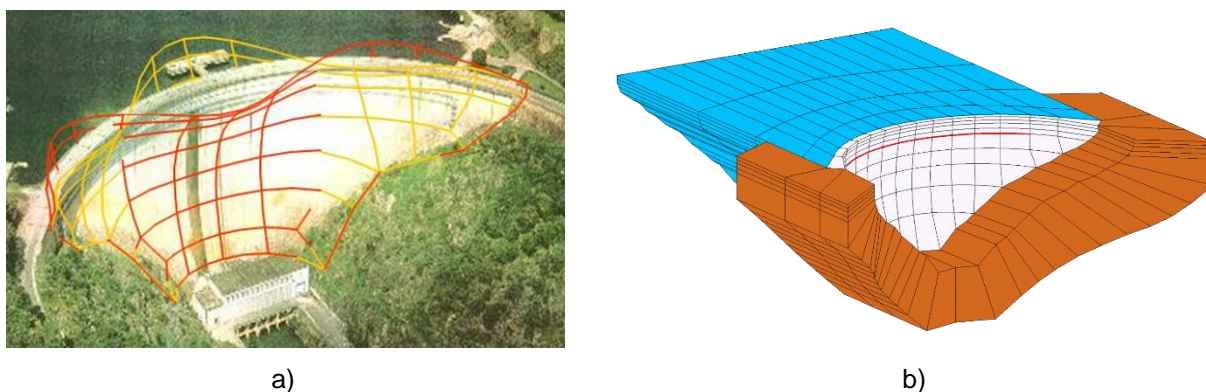


Figura 3.1 – Barragem do Cabril: a) fotografia com representação esquemática do 1º modo de vibração; b) modelo de EF3D (DamDySSa2.0) com representação simplificada da zona fendilhada (elemento de junta)

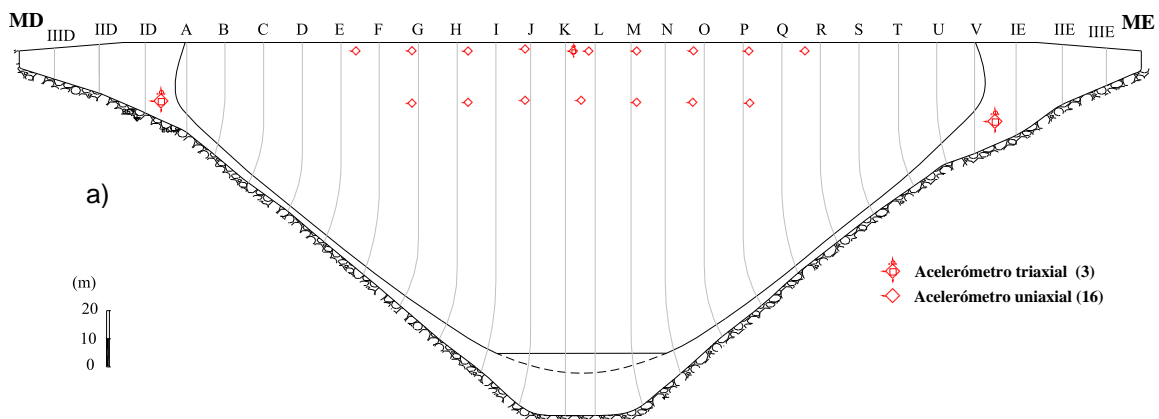
Na perspetiva da instrumentação, foram avaliadas as necessidades metrológicas exigidas para as grandezas a observar, designadamente o campo de medição, a incerteza e a frequência de amostragem requeridas, tendo igualmente por base os modelos de comportamento previamente referidos e resultados de ensaios *in situ* (Oliveira *et al.*; 2003; 2004), (Mendes 2005; 2010). Para além de outros aspetos, foram também considerados: o equipamento disponível no mercado, na época em que se iniciou o desenvolvimento do sistema, os custos envolvidos, bem como a experiência tecnológica acumulada ao longo dos anos, pelo LNEC, em diversas obras (Garrett; 2007).



### 3.2 Componentes do sistema

O sistema instalado na barragem do Cabril é constituído por 3 acelerómetros triaxiais e 16 acelerómetros uniaxiais (Oliveira *et al.*; 2010; 2011). Os acelerómetros uniaxiais (para medição de acelerações na direção radial) estão instalados na galeria do coroamento, à cota 293,0 m (9 acelerómetros uniaxiais), e na segunda galeria, sob a zona fendilhada, à cota 274,5 m (7 acelerómetros uniaxiais). No centro da galeria do coroamento foi instalado um acelerómetro triaxial e os dois restantes foram instalados nos encontros junto à inserção, um em cada margem (no topo das respetivas galerias de drenagem), como se mostra na Figura 3.2.

Os acelerómetros triaxiais (ver Figura 3.2a) têm como objetivo a caracterização da ação sísmica (nomeadamente para situações com grandes amplitudes de vibração), enquanto os acelerómetros uniaxiais (ver Figura 3.2b) visam essencialmente a caracterização do comportamento dinâmico da obra para vibrações de baixa amplitude.



b)



Marca: Kinemetrics (<http://www.kinemetrics.com>)

Modelo: Episensor ES-T (triaxial)

Gama de amplitudes: configurável em  $\pm 0,25g$ ,  $\pm 0,5g$ ,  $\pm 1g$ ,  $\pm 2g$  ou  $\pm 4g$

Gama dinâmica: 155 dB

Resposta dinâmica: de DC a 200 Hz

c)



Marca: Kinemetrics (<http://www.kinemetrics.com>)

Modelo: Episensor ES-U2 (uniaxial)

Gama de amplitudes: configurável em  $\pm 0,25g$ ,  $\pm 0,5g$ ,  $\pm 1g$ ,  $\pm 2g$  ou  $\pm 4g$

Gama dinâmica: 145 dB

Resposta dinâmica: de DC a 200 Hz

Figura 3.2 – Acelerómetros instalados na barragem do Cabril. a) Posicionamento dos acelerómetros. b) acelerómetro triaxial; c) acelerómetro uniaxial

Atendendo à referida circunstância optou-se por configurar os acelerómetros de forma diferenciada. Assim, dado que as amplitudes das vibrações ambientais são baixas, optou-se por ajustar o campo de medida dos acelerómetros uniaxiais para valores limite de  $\pm 0,25$  g, enquanto no caso dos acelerómetros triaxiais optou-se por um campo de medida que garantisse a não saturação para um sismo intenso, utilizando como valores limite  $\pm 1,0$  g.

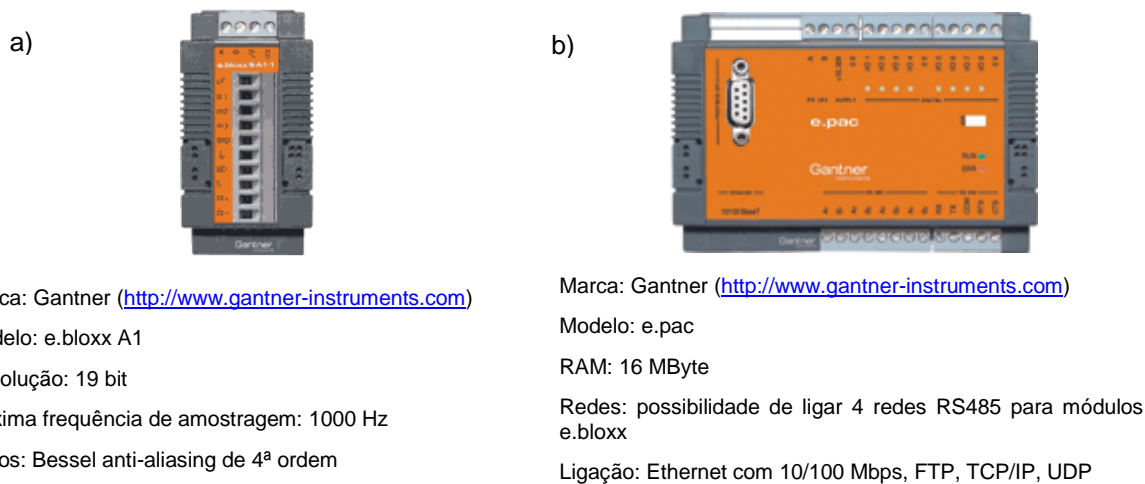
Nestas condições, caso ocorra um sismo, os acelerómetros triaxiais localizados nos encontros permitem a medição das acelerações na inserção em três direções, enquanto o acelerómetro triaxial colocado a meio da galeria do coroamento permite a medição das três componentes de aceleração num ponto em que, segundo os modelos de comportamento, serão atingidos os maiores valores de aceleração, possibilitando assim a caracterização do coeficiente de amplificação dinâmica correspondente à razão entre a aceleração máxima registada no corpo da obra e a aceleração de pico registada na superfície de inserção. Os acelerómetros uniaxiais também podem medir a resposta a sismos, todavia, caso ocorra um sismo de grande intensidade, poderão saturar em face da sua configuração (campo de medida ajustado para valores limite de  $\pm 0,25$  g).

A opção por este tipo de acelerómetros “*force balance*” foi tomada tendo em conta a sua boa gama dinâmica e a sua grande sensibilidade, o que é conveniente para aplicações a estruturas de engenharia civil, nomeadamente o caso das barragens de betão, em que a resposta dinâmica se caracteriza por vibrações de baixa amplitude.

Relativamente à solução adotada para aquisição dos dados, optou-se por um sistema do tipo modular, bastante versátil, que possibilita, com relativa facilidade, a acoplagem de mais canais de medida de aceleração ou qualquer outro tipo de grandeza (deslocamentos, extensões, temperaturas, etc.). Neste tipo de sistema existem dois componentes distintos, os módulos “e.bloxx A1”, responsáveis pela aquisição de sinais e sua conversão analógica digital (AD), aos quais daqui em diante será atribuída a designação de unidades de aquisição e digitalização (ver Figura 3.3 a), e os módulos “e.pac”, cuja principal função é concentrar os dados, já digitalizados, provenientes dos módulos “e.bloxx A1”, aos quais doravante será atribuída a designação de concentradores de dados (ver Figura 3.3 b).

A ligação entre as unidades de aquisição e digitalização e os concentradores de dados é assegurada por redes RS485, até um máximo de quatro redes por cada concentrador de dados, todavia, em cada uma destas redes é possível ligar mais do que uma unidade de aquisição e digitalização.

As unidades de aquisição e digitalização, para além de assegurarem a aquisição dos sinais e a sua digitalização, também aplicam, aos sinais medidos, um filtro Bessel *anti-aliasing* de 4ª ordem. Estas unidades de aquisição permitem a obtenção de sinais digitais com uma resolução de 19 bit e a aquisição de frequências de amostragem até 1000 Hz.



Marca: Gantner (<http://www.gantner-instruments.com>)

Modelo: e.bloxx A1

Resolução: 19 bit

Máxima frequência de amostragem: 1000 Hz

Filtros: Bessel anti-aliasing de 4ª ordem

Marca: Gantner (<http://www.gantner-instruments.com>)

Modelo: e.pac

RAM: 16 MByte

Redes: possibilidade de ligar 4 redes RS485 para módulos e.bloxx

Ligação: Ethernet com 10/100 Mbps, FTP, TCP/IP, UDP

**Figura 3.3 – Componentes do sistema modular adotado (marca Gantner): a) Unidade de digitalização e aquisição: ebloxx A1; b) Concentrador de dados: e.pac.**

Os concentradores de dados, para além da função de recolha/concentração dos dados provenientes das redes RS485, asseguram imediatamente a sincronização entre os sinais obtidos para cada uma dessas redes. Têm um *buffer* interno configurável, que permite a utilização de uma memória RAM até 16 MBytes. Vêm dotados com um *switch* que permite a sua ligação a uma rede do tipo Ethernet com uma velocidade de transmissão de dados de 10/100 Mbps. Neste tipo de ligação é possível atribuir-lhe um endereço IP, possibilitando assim o seu controlo e configuração a partir de qualquer computador que tenha acesso à rede na qual estes se encontrem ligados. Este tipo de ligação é igualmente utilizado como meio preferencial para encaminhar os dados referentes aos sinais medidos e concentrados nestes módulos, para um computador central vocacionado para esse efeito.

No caso concreto do sistema desenvolvido para a barragem do Cabril, atendendo ao número de aparelhos de medida utilizados, à sua localização em obra e à frequência de amostragem adotada para os vários canais (1000 Hz), foi necessário recorrer à utilização de quatro concentradores de dados.

Como os concentradores de dados não têm capacidade para armazenar uma grande quantidade de dados (apenas 16 MBytes), foi necessário conceber e implementar uma rede local com características adequadas para assegurar a transmissão de dados, desde os vários concentradores de dados até um computador central, instalado num escritório localizado na central da barragem. Em face do volume de dados a transmitir, das distâncias a percorrer e da inevitabilidade da passagem por zonas em que podem ocorrer tensões eletromagnéticas elevadas, optou-se por instalar uma rede de fibra ótica, adequada para todas estas situações, cujo esquema de colocação em obra se apresenta na Figura 3.4.

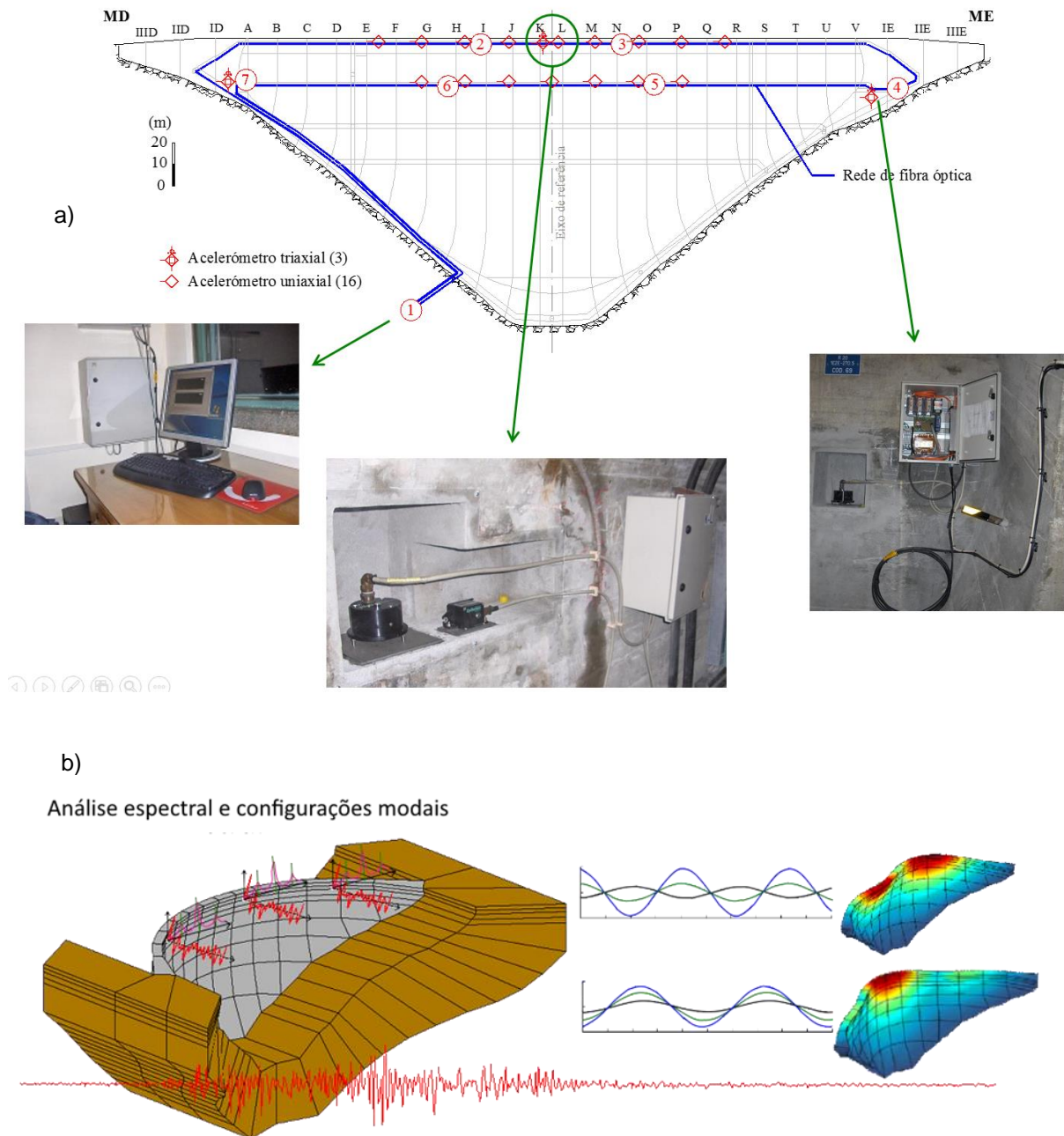


Figura 3.4 – Sistema de monitorização do comportamento dinâmico instalado na barragem do Cabril. a) Acelerómetros, digitalizadores, concentradores de dados, rede de fibra ótica e servidor instalado no posto de observação e controlo (POC); b) Resultados obtidos com o *software* de tratamento e análise instalado no servidor no POC: identificação modal e comparação com resultados da modelação numérica

No traçado da rede de fibra ótica optou-se por uma solução em anel que permite dois caminhos alternativos para a circulação dos pacotes de dados entre os concentradores de dados e o servidor instalado no Gabinete de Observação, situado no edifício da central da barragem, no pé de jusante. Nestas circunstâncias, caso ocorra uma interrupção num ponto do cabo de fibra ótica, a informação poderá ainda ser encaminhada num dos sentidos não afetado.

As posições assinaladas de 1 a 7 na Figura 3.4 representam pontos de ligação de equipamentos à rede de fibra ótica: a posição 1 corresponde à localização do servidor na central da barragem, onde o anel formado pela rede de fibra ótica começa e acaba, neste local existe um conversor ótico/elétrico; as posições 2, 3, 5 e 6 correspondem à localização dos concentradores de dados, onde estão colocados conversores elétrico/ótico, que funcionam igualmente como “*switch*” (também conhecidos como “*hub*”), o que significa que por intermédio destes dispositivos é possível aceder a todos os pontos da rede; as posições 4 e 7 correspondem à localização dos acelerómetros na zona dos encontros, justificando-se esta ligação à rede pela necessidade de utilizar um dos pares de fibra ótica disponíveis para transportar os sinais destes acelerómetros até aos concentradores de dados, dada a grande distância entre estes pontos e os concentradores de dados mais próximos (nas posições 5 e 6, respetivamente), uma vez que para distâncias grandes (da ordem de uma centena de metros ou mais) a ligação em cabo de cobre não é adequada devido a possíveis perdas (degradação do sinal transmitido).

Na Figura 3.5 apresenta-se um esquema em que se mostram as componentes mais importantes do sistema. Existe, porém, um conjunto de outras componentes igualmente relevantes para o funcionamento do sistema, que se encontram instaladas em caixas existentes junto dos vários transdutores.

Com o objetivo de apresentar as restantes componentes do sistema é conveniente começar por referir as três tipologias de caixas montadas em obra, onde essas componentes foram instaladas (ver Figura 3.6):

- caixa tipo 1, contém concentrador de dados;
- caixa tipo 2, localizadas na zona dos encontros;
- caixa tipo 3, apenas para estabelecimento de ligação aos transdutores.

Nas caixas tipo 1, para além dos concentradores de dados encontram-se também instalados conversores de sinal elétrico em ótico, um conjunto de circuitos desenvolvidos no LNEC/CIC que: i) asseguram a alimentação das várias componentes; ii) gerem a transmissão de dados entre as unidades de aquisição e os concentradores de dados; iii) permitem aplicar fatores de ganhos aos sinais medidos nas unidades de aquisição (com fatores de 1, 2, 4, 8, 16 e 32); e iv) asseguram a sincronização de dados entre os vários concentradores de dados.

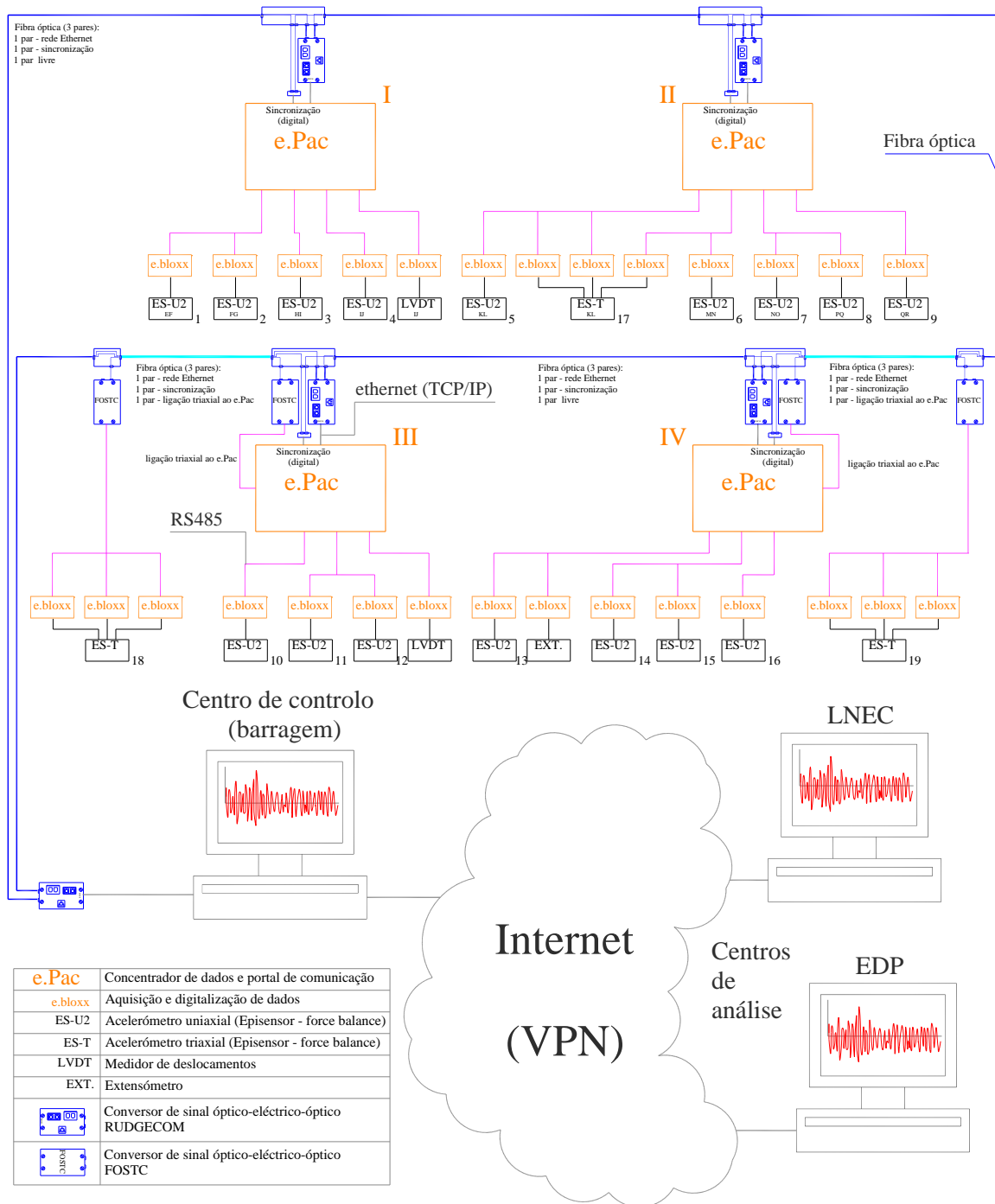


Figura 3.5 – Esquema com as várias componentes do sistema de observação do comportamento dinâmico em contínuo, instalado na barragem do Cabril

Nestas caixas encontram-se igualmente instalados dispositivos que asseguram a redução da tensão de corrente elétrica, dos usuais 220 Volts, para valores entre 12 Volts e 15,75 Volts, adequados para a alimentação das diversas componentes do sistema. Estes dispositivos englobam limitadores de sobretensões (sob a forma de fusíveis) e transformadores de isolamento, que contribuem igualmente

de forma decisiva para diminuir efeitos nefastos causados por sobretensões, sobretudo as causadas por descargas atmosféricas induzidas na linha de distribuição de energia.

Nas caixas tipo 2, para além dos dispositivos que regulam a tensão de corrente elétrica, idênticos aos existentes nas caixas do tipo 1, destacam-se as três unidades de aquisição e digitalização (uma para cada canal dos acelerómetros triaxiais) e um sistema de conversão de sinal elétrico em ótico, que envia os dados através da rede de fibra ótica disponível até ao concentrador de dados mais próximo. Nestas caixas existem também circuitos desenvolvidos pelo LNEC/CIC para gestão da energia e da transmissão de dados entre componentes.

Finalmente, nas caixas do tipo 3 apenas existem circuitos que asseguram a alimentação dos transdutores e a gestão de dados através das redes RS485 que ligam às caixas do tipo 1.

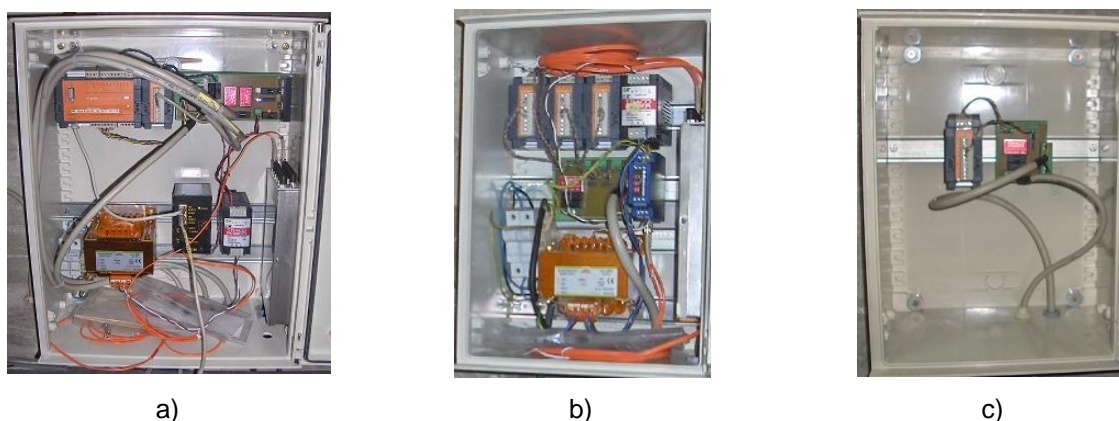


Figura 3.6 – Caixas instaladas junto dos transdutores: a) tipo 1; b) tipo 2; c) tipo 3

Este sistema encontra-se igualmente dotado de um sistema alternativo de fornecimento de energia, composto por baterias junto às caixas do tipo 1 e 2 e por uma UPS (com capacidade para cerca de 1 hora) junto ao computador nos escritórios da central da barragem.

### 3.3 Trabalhos de preparação e instalação do sistema

A instalação na barragem do Cabril do sistema de monitorização do comportamento dinâmico em contínuo, foi precedida de um conjunto de trabalhos, em laboratório e em obra, envolvendo a receção e teste do equipamento no LNEC, a instalação de uma rede local de transmissão de dados em obra (em fibra ótica) e a abertura de nichos no betão para colocação dos acelerómetros.

Numa fase inicial, após a receção dessas componentes no LNEC, foi necessário proceder a vários testes, depois de montado o sistema nas instalações do LNEC/CIC, tal como se mostra na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Equipamento em fase de testes no laboratório de eletrónica no LNEC/CIC

Nesta fase efetuaram-se testes ao funcionamento conjunto das várias componentes do sistema. Testaram-se vários circuitos desenvolvidos pelo LNEC/CIC, nomeadamente circuitos de amplificação de sinal e de sincronização entre os vários e.pac. Esta fase foi igualmente aproveitada para testar o *software* que assegura a exploração em contínuo do sistema, que será apresentado em detalhe mais à frente, assim como o *software* para controlo remoto do sistema.

Nesta fase de preparação foi igualmente instalada em obra uma rede local, em fibra ótica, para transmitir os dados adquiridos em contínuo, das galerias da barragem para o computador instalado no Gabinete de Observação, na central da barragem. Na Figura 3.8 mostram-se algumas das operações realizadas nesta etapa.

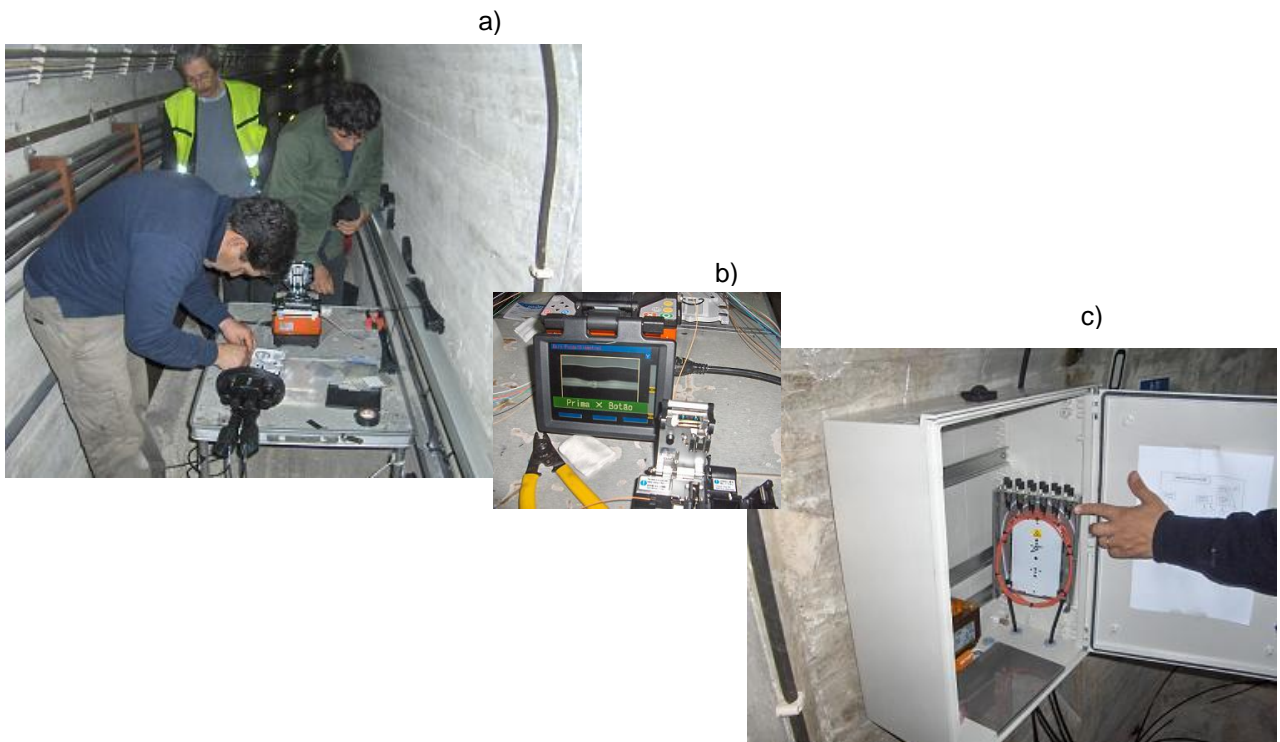


Figura 3.8 – Trabalhos de instalação da rede de fibra ótica: a) preparação das fibras; b) soldagem das fibras; c) ligações dos vários filamentos dentro de uma caixa



Com o objetivo de resguardar os acelerómetros, optou-se pela abertura de nichos no betão, cujo processo de execução se mostra na Figura 3.9.



Figura 3.9 – Trabalhos de abertura de nichos para colocação dos acelerómetros

Após os referidos trabalhos de preparação, procedeu-se à instalação do sistema em dezembro de 2008. Na Figura 3.10 apresentam-se algumas fotografias que mostram o aspeto final do sistema instalado, nas quais é possível ver alguns acelerómetros instalados acompanhados pelas respetivas caixas de acondicionamento de equipamento.

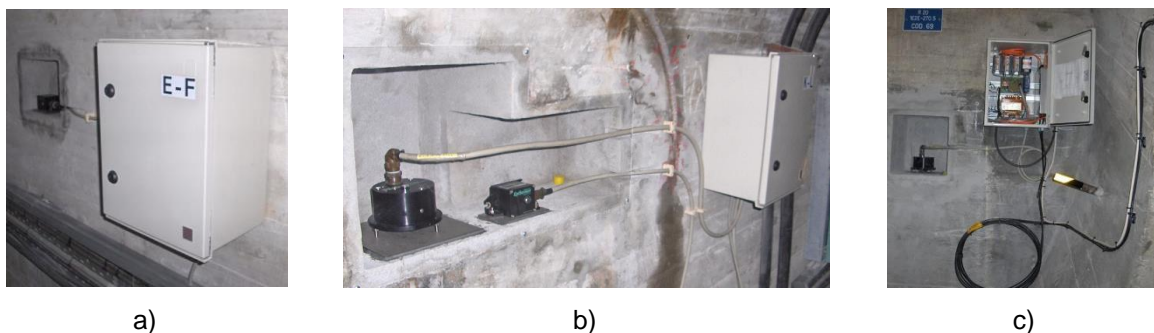


Figura 3.10 – Aspeto geral dos acelerómetros e respetivas caixas. Instalação em obra

Na Figura 3.11, mostra-se o centro de controlo do sistema, no Gabinete de Observação (edifício da central da barragem), o qual é essencialmente constituído por um servidor com duas placas de rede: uma para efectuar a ligação à rede interna de onde chegam os dados ao servidor para serem analisados e armazenados e outra para ligação externa, à internet através de um *router* (ligado à placa de rede do servidor através de um cabo de fibra ótica com vista à proteção do servidor de eventuais sobretensões na linha de dados).



Figura 3.11 – Servidor no Gabinete de observação da barragem do Cabril, onde é efectuado o controlo do sistema e o armazenamento dos dados, nos escritórios da central da barragem

### 3.4 Controlo remoto do sistema

Através da linha de dados ADSL instalada na barragem do Cabril e com o *router* colocado no POC especificamente para ligação ao servidor, o sistema pode ser acedido remotamente via internet (p.ex. a partir do centro de análise localizado no LNEC/DBB), utilizando software adequado como o TeamViewer (Figura 3.12) ou equivalente como o LogMeIn, RemoteDesktop do Windows ou o Splashtop para o caso de se pretender uma ligação a partir de smartphone.

Como foi referido, o servidor instalado em obra tem duas placas de rede (cada uma como o respetivo endereço de IP: um para a rede local e outro para ligação à rede exterior), o que permite a ligação às duas redes. Os endereços de IP assinalados a verde na Figura 3.12 correspondem à rede local, enquanto os endereços de IP a azul correspondem à ligação à rede através da internet.

Esta possibilidade de controlo remoto é de grande utilidade, pois permite controlar o sistema e explorar os dados remotamente. O controlo remoto de sistemas RAAD (sistemas de recolha e análise automática de dados) como o presente facilita o apoio às atividades relacionadas com a sua exploração e manutenção, sendo sempre necessário manter técnicos em obra para apoio às referidas

atividades e para a realização periódica de inspeções de rotina à obra e aos equipamentos instalados.

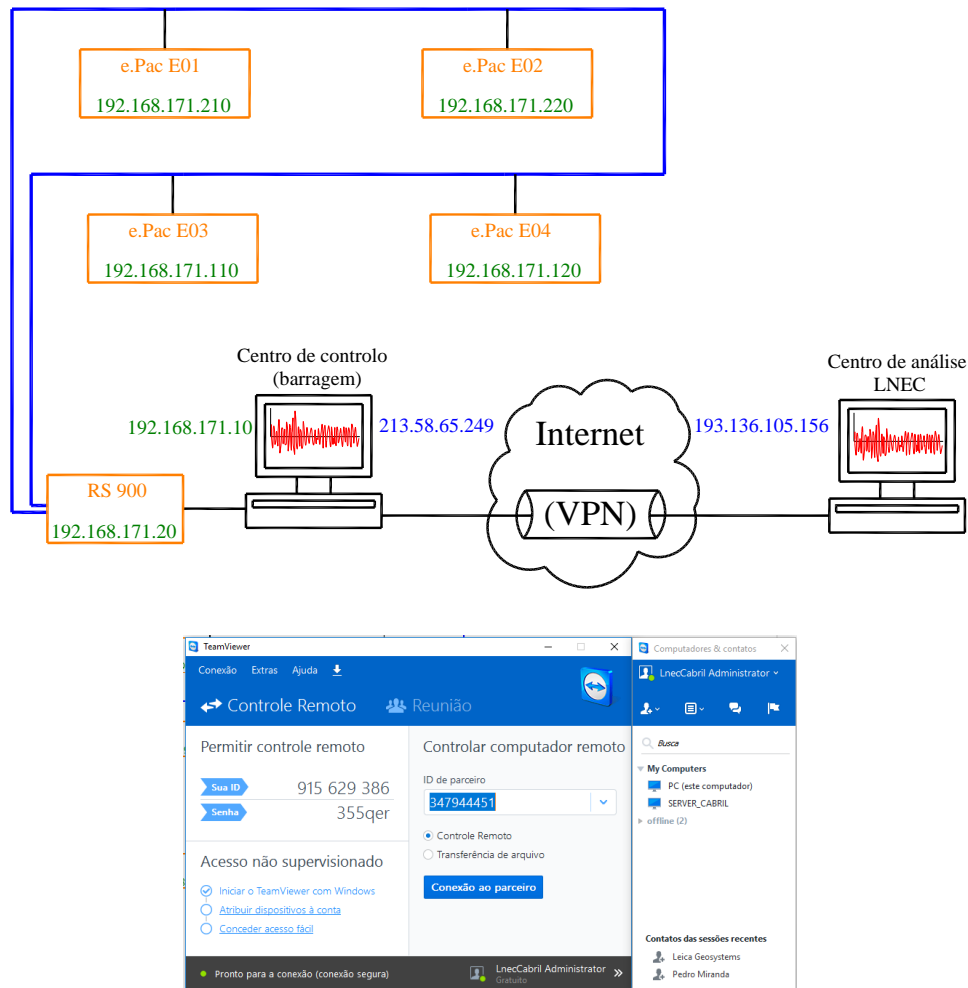


Figura 3.12 – Controlo remoto do sistema via internet, recorrendo ao *software* TeamViewer

### 3.5 Software de análise de dados

#### 3.5.1 Aspetos gerais

Atualmente, como se referiu atrás, um dos principais problemas dos sistemas RAAD de monitorização de vibrações em contínuo deve-se à falta de *software* que permita a análise dos dados de forma automática e o seu armazenamento em bases de dados que possibilitem a consulta de forma rápida e eficaz.

Na barragem do Cabril o sistema de monitorização de vibrações encontra-se em funcionamento desde dezembro de 2008 (desde então ocorreram vários tipos de falhas técnicas, nomeadamente relacionadas com avarias devido a sobretensões em períodos de trovoadas, que, em diferentes períodos, não permitiram a recolha e armazenamento dos dados) tendo o *software* de identificação modal automática sido renovado várias vezes, nomeadamente em novembro de 2013 e, mais recentemente, em novembro de 2016, com a instalação do programa **Modal\_ID2.0**. Este programa está preparado para efetuar uma identificação modal automática, hora a hora: permite obter espectros de amplitudes para cada um dos canais, espectros médios e espectros de valores singulares da matriz da densidade espectral de potência. Para aquisição e/ou visualização de ficheiros em obra o utilizador pode utilizar programas de acesso remoto (no âmbito deste trabalho tem sido utilizado o TeamViewer, o LogMeIn, e o RemoteDesktop do Windows).

### 3.5.2 Recolha automática de dados. Programa Cabril\_Aquis

A automatização da recolha de dados é uma operação chave na exploração deste tipo de sistemas. Neste caso, os pacotes de dados recolhidos nos vários concentradores de dados são enviados em contínuo para o computador onde são armazenados em ficheiros binários (um ficheiro por cada concentrador de dados). Estes ficheiros são "fechados" no final de cada hora e como a sua designação incorpora informação sobre a hora e a data (referente ao período da hora em que os dados foram adquiridos) é-lhes atribuída a designação de ficheiros horo-datados (Reis; Costa; 2009).

Esta operação de gestão de dados, ao nível dos concentradores de dados e de armazenamento dos pacotes de dados em ficheiros no computador, é assegurada por um programa desenvolvido em LabView no LNEC/CIC, ao qual foi atribuída a designação de Cabril\_Aquis, cuja interface gráfica se apresenta na Figura 3.13 (Reis; Costa; 2009).

**Cabril Aquis - Painel Remoto**

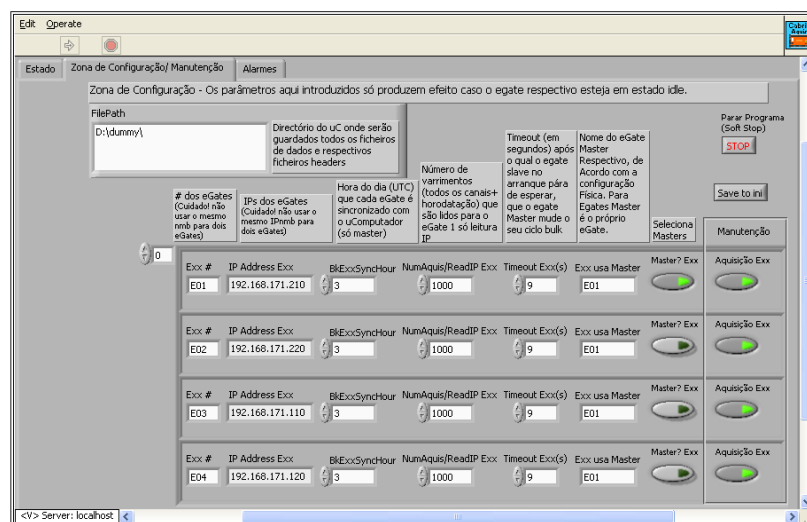


Figura 3.13 – Interface do programa de aquisição (Cabril\_Aquis) desenvolvido no LNEC/CIC

Este programa é utilizado como um serviço do Windows, que está preparado para ser inicializado automaticamente com o arranque do sistema operativo do computador. Para além da criação dos ficheiros que contêm os dados referentes aos valores das acelerações medidas, é igualmente gerado um conjunto de outros ficheiros, que se passa agora a descrever.

Com o início de funcionamento do sistema são automaticamente criados vários ficheiros que funcionam como uma espécie de bilhete de identidade dos concentradores de dados, os quais são caracterizados pela sigla BI (abreviatura de bilhete de identidade) e pelo endereço de IP referente a cada concentrador. Estes ficheiros contêm informação sobre a configuração dos módulos concentradores de dados e emitem informação sobre eventuais alterações à sua configuração.

Na Figura 3.14 apresenta-se o fluxograma do programa Cabril\_Aquis, no qual se mostra a sequência das diversas operações.

Para cada mês são gerados os designados ficheiros de teste e diagnóstico (um por cada concentrador), nos quais se regista mensalmente a análise funcional do sistema associada a cada concentrador de dados, bem como um relatório de diagnóstico das falhas eventualmente detetadas.

Para cada hora são gerados os já referidos ficheiros binários onde se armazenam os dados e os designados ficheiros de cabeçalho, os quais contêm informação sobre as configurações do sistema, também em formato binário, o que permite um acesso mais rápido à informação armazenada.

No fluxograma do Cabril\_Aquis as siglas E01, E02, E03 e E04 representam as designações atribuídas aos vários concentradores de dados, enquanto AAAA representa os dígitos do ano, AA refere-se aos últimos dois dígitos do ano, MM aos dígitos do mês, DD aos dígitos do dia e HH aos dígitos da hora.

A sigla Hdr representa a abreviatura de Header (designação de cabeçalho na literatura inglesa), enquanto xxx corresponde aos dígitos que indicam o número de vezes que os ficheiros de cabeçalho foram alterados desde o início de funcionamento do sistema.

Nos ficheiros de dados combinam-se as siglas E01, E02, E03 e E04. A primeira sigla refere-se ao concentrador mestre, a partir do qual é emitido um sinal de sincronismo (responsável pela sincronização dos dados entre os vários concentradores), enquanto a segunda sigla refere-se ao concentrador de onde são originários os dados. Os últimos seis dígitos referem-se ao número de vezes que os ficheiros de cabeçalho já foram criados (os três primeiros – mmm – são referentes ao ficheiro de cabeçalho para os dados do concentrador mestre e os três últimos – eee – para o concentrador, de onde são originários os dados).

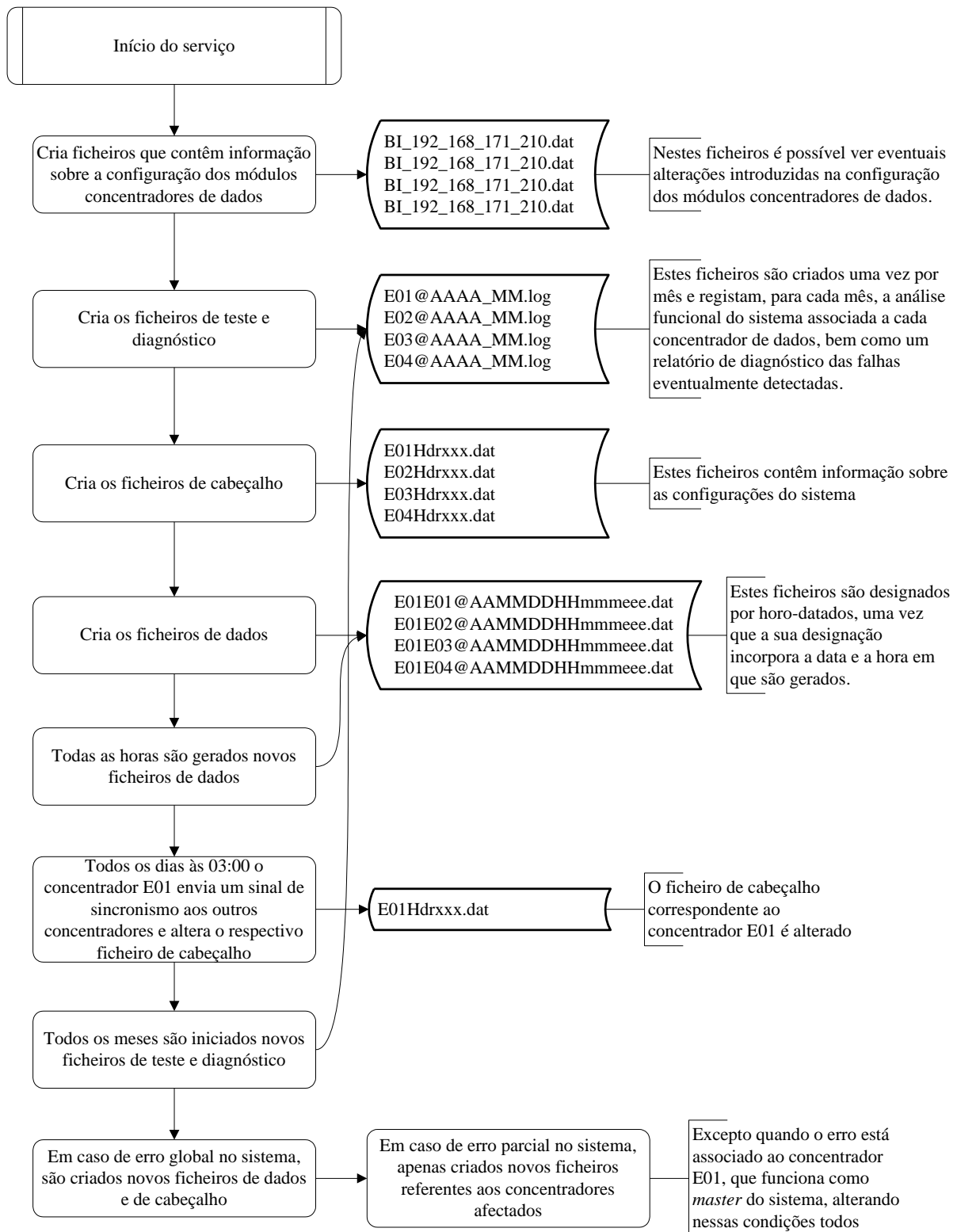


Figura 3.14 – Fluxograma do programa de aquisição de dados Cabril\_Aquis (LNEC/CIC)

### 3.5.3 Programa **Modal\_ID\_auto 2.0**

Com o objetivo de facilitar a análise automática dos dados, foi desenvolvido em MATLAB o programa **Modal\_ID\_auto 2.0** que efetua a análise dos dados em contínuo. Este programa é utilizado como um serviço do Windows, que está preparado para ser inicializado automaticamente com o arranque do sistema operativo do computador. Este programa está atualmente na pasta:

C:\Users\admin\Documents\PACABRIL

Para além da análise e gestão dos ficheiros de dados, com os valores das acelerações medidas nos vários canais, o programa **Modal\_ID\_auto 2.0** gera vários outros ficheiros e está configurado para enviar mensalmente ficheiros .dxf, via email, para os técnicos responsáveis pela segurança da obra, com resultados de síntese, na forma gráfica (nomeadamente acelerogramas registados em algumas horas e respetivos espetros de amplitudes, espetros dos valores singulares da matriz DEP com indicação das frequência dos principais picos e desenho das configurações dos correspondentes modos operacionais, etc.), para análise detalhada por parte dos referidos técnicos.

Para facilitar a introdução dos parâmetros de configuração do **Modal\_ID\_auto 2.0** (a introduzir no ficheiro **Parametros\_idModal.dad**) desenvolveu-se o programa **Param\_Id\_Modal\_Auto1.0**, em MATLAB (Figura 3.15), que permite a escolha dos referidos parâmetros por parte do utilizador, de forma interativa. Para uma correta escolha dos mesmos o utilizador deverá efetuar várias análises (para diferentes horas e diferentes condições de excitação e diferentes cotas de água), recorrendo ao programa **Modal\_ID 2.0.**, vocacionado para facilitar a realização de estudos de identificação modal de forma interativa.

Com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados obtidos pelo **Modal\_ID\_auto2.0**, os mesmos são apresentados sob a forma gráfica em ficheiros do tipo .dxf, como se mostra na Figura 3.16.

Neste ficheiro de *output*, designado “AnaliseCabrilAAAAMMDDHH.dxf” é possível visualizar:

- registos das acelerações medidas em obra (para determinadas horas ou em situação de evento sísmico);
- espetros de amplitudes correspondentes a cada um dos 25 acelerogramas registados em cada hora;
- espetros médios correspondentes à aplicação das diferentes técnicas implementadas para identificação modal no domínio da frequência:

FDD - “*Frequency Domain Decomposition*”;

FDD(RD) - “*Frequency Domain Decomposition and random decrement*”;

FDD-SVD - “*Frequency Domain Decomposition using the singular value decomposition technique*”; e

FDD(RD)-SVD - “*Frequency Domain Decomposition and random decrement using the singular value decomposition technique*” ;

- configurações modais correspondentes aos principais picos espectrais (incluindo a representação das ondas harmónicas representativas dos movimentos oscilatórios em cada ponto de medição (Oliveira; 2013) e a deformação modal da barragem, em 3D, para um dado instante de oscilação) identificados automaticamente através da aplicação da técnica de procura de picos espectrais que foi implementada;
- gráficos com os índices MAC (“*Modal Assurance Criterion*”) para as frequências dos principais picos espectrais identificados;

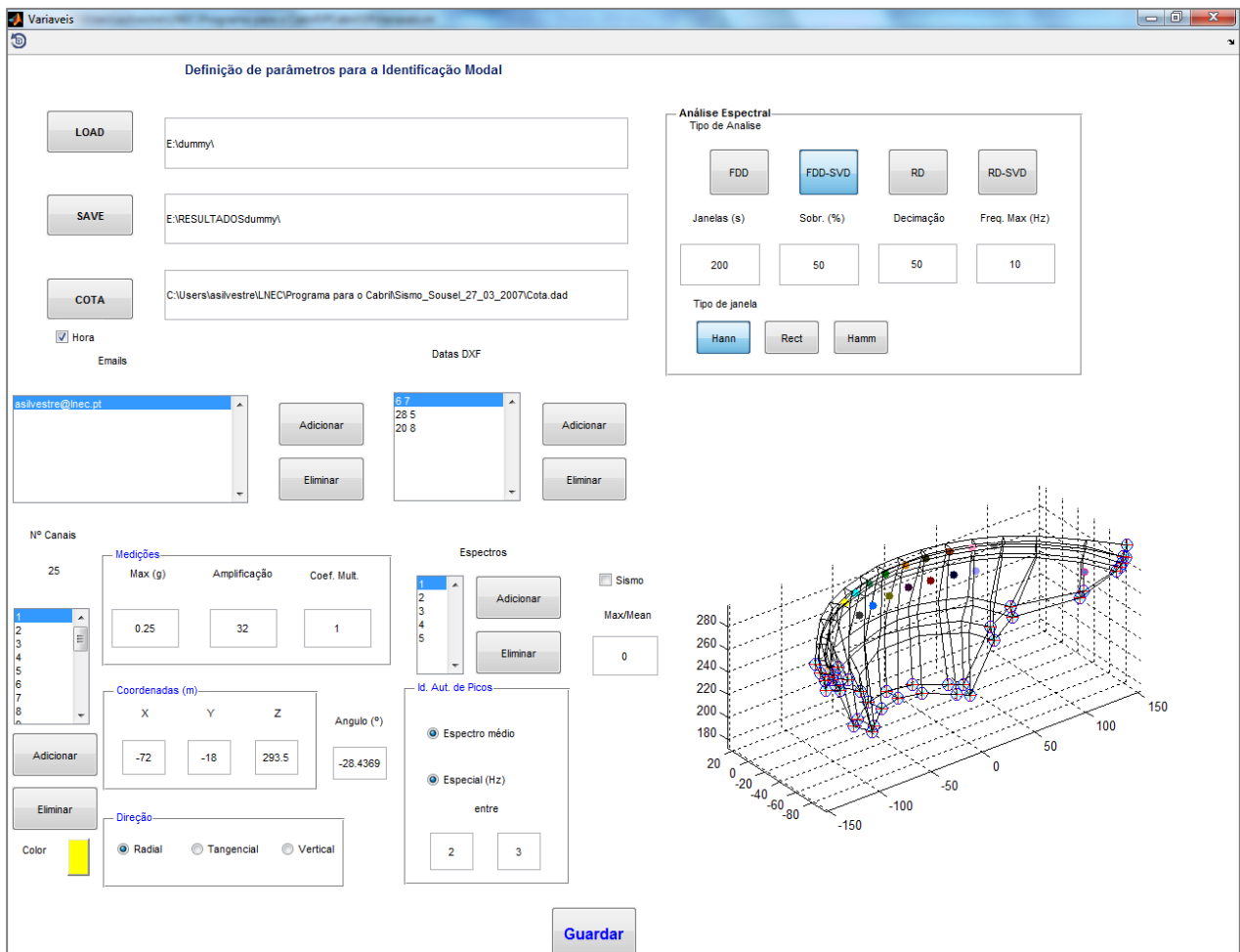


Figura 3.15 – Interface do programa *Param\_Id\_Modal\_Auto1.0* desenvolvido para facilitar o preenchimento do ficheiro *Parametros\_idModal.dad* com os valores dos parâmetros a utilizar no programa *Modal\_ID\_auto2.0* que efetua, para cada hora, a identificação modal automática



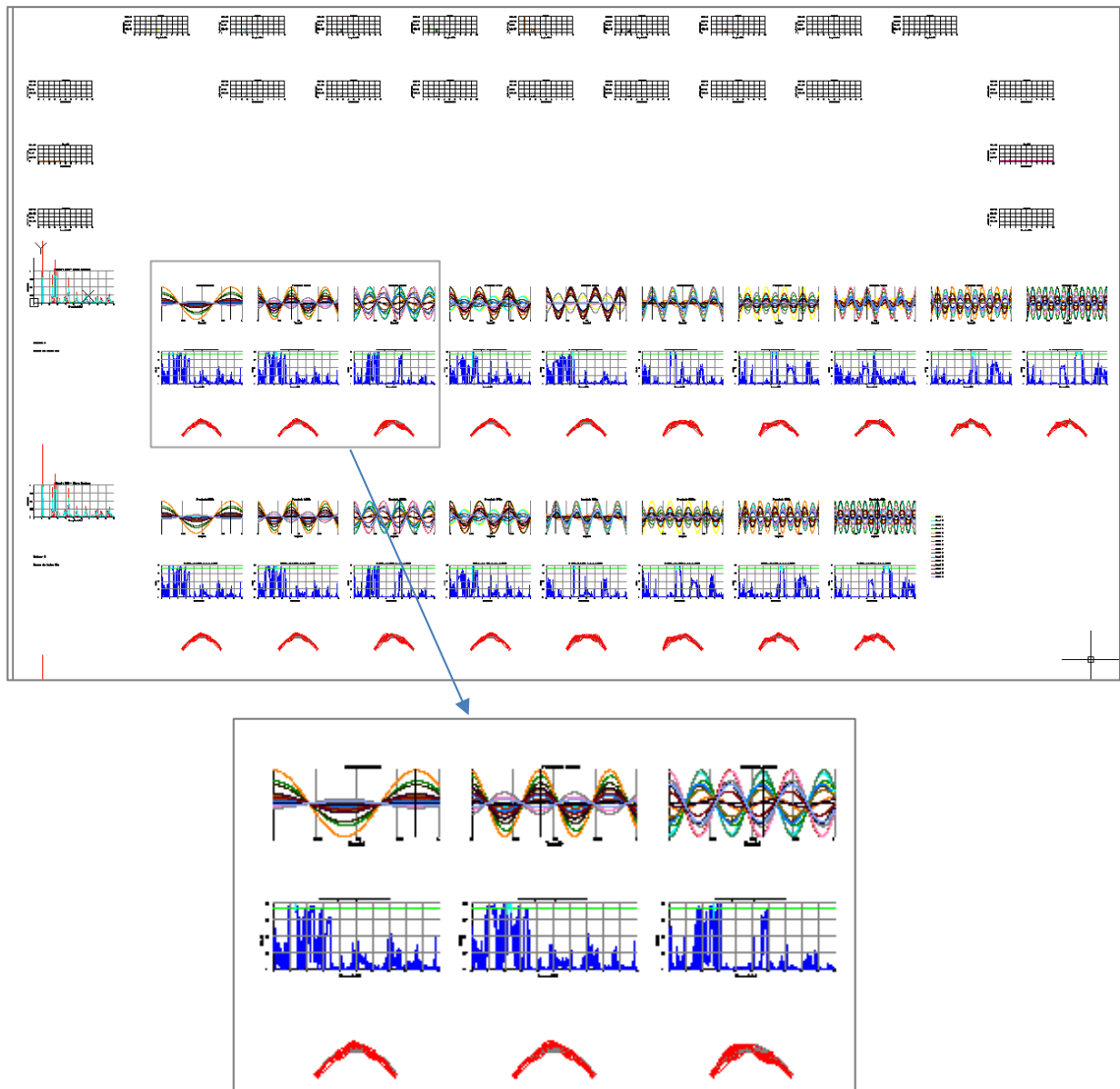


Figura 3.16 – Exemplo de um ficheiro de “output” (formato .dxf) do programa *Modal\_ID\_auto2.0*

Para além dos referidos ficheiros gráficos em formato .dxf, o programa **Modal\_ID\_auto2.0** também gera ficheiros de texto (formato ASCII) com extensão .dad, contendo:

- Registos das acelerações medidas nos 25 canais, em períodos de uma hora (decimados, em geral para 50 Hz), colocados em ficheiros de texto com a designação “DDEC@AAAAMMDDHNUM.dad”, onde DEC é o valor da decimação e NUM o número do ficheiro criado;
- Os valores de todas as frequências identificadas mensalmente (“LinfAAAAMM.dad”) e anualmente (“LinfAAAAMM.dad”) com indicação das datas, caudais, altura de água na albufeira, acelerações máximas e médias e o tipo de modo identificado (este ficheiro está configurado para facilitar a geração de gráficos, p.ex. em EXCEL); e
- Valores das frequências identificadas num formato de tabela concebido para facilitar a visualização dos resultados na forma numérica (Frequencias\_em\_AnáliseAAAAMM.dad).

Mensalmente os técnicos responsáveis pelo controlo da segurança da obra têm a possibilidade de receber via correio eletrónico resumos das análises efetuadas automaticamente. Estes *emails* contêm:

- listas com os valores das frequências identificadas automaticamente, cotas de água medidas, acelerações máximas e médias;
- gráficos com o andamento das frequências identificadas, variação da cota de água, caudais descarregados, acelerações máximas e médias nos acelerómetros colocados na rocha e variação das frequências naturais em função da variação do nível da albufeira.

#### 3.5.4 Programa **Modal\_ID2.0**

Com vista a facilitar a aplicação das técnicas de identificação modal implementadas, foi também desenvolvido no Núcleo de Modelação e Mecânica das Rochas (NMMR) do LNEC/DBB, em MATLAB, o programa **Modal\_ID2.0** (*Modal Identification*) que permite identificar de forma interativa, para cada hora, as frequências naturais, as formas dos modos e os amortecimentos modais. Este programa permite que os utilizadores escolham, de forma interativa, todos os parâmetros que se utilizam na identificação modal, como se refere em detalhe seguidamente.

##### ***Painel Inicial***

Na Figura 3.17 mostra-se o painel inicial do programa **Modal\_ID2.0** onde o utilizador pode escolher o dia e a hora em que pretende analisar as vibrações que foram registadas pelo sistema de monitorização instalado. O programa acede a uma base de dados em que os registos de acelerações de todas as horas são guardados, com uma frequência de amostragem de 50 Hz. O programa também acede ao registo das cotas de água para todas as horas.

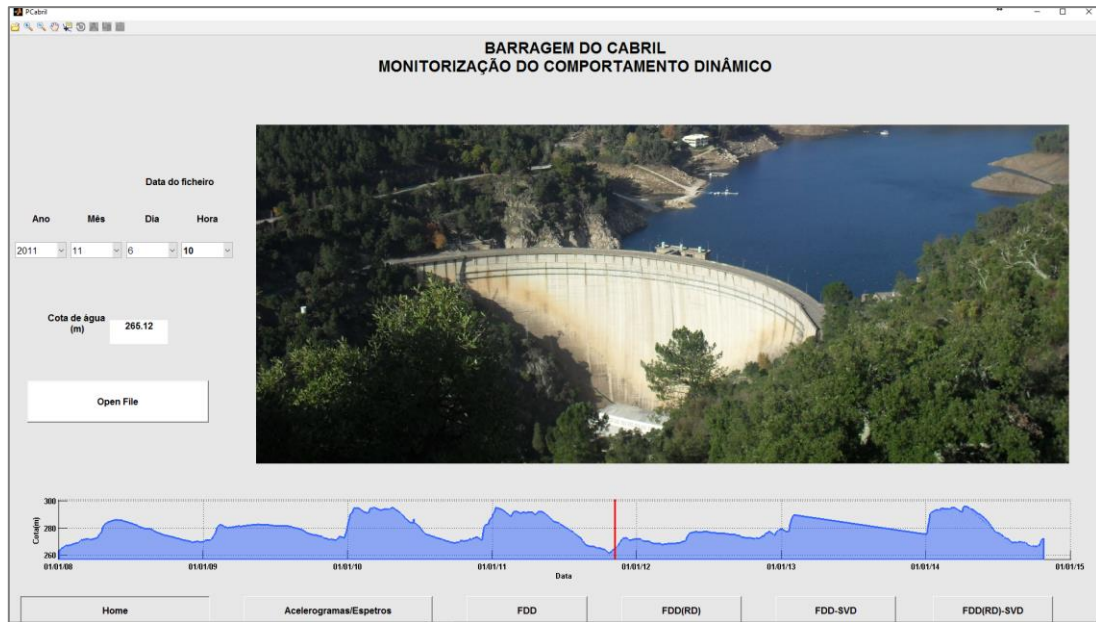


Figura 3.17 – Página inicial do programa *Modal\_ID2.0*

### **Painel Acelerogramas/Espetros**

Após a escolha do dia e da hora, este painel (ver Figura 3.18) permite visualizar graficamente conjuntos de três acelerogramas (à escolha de entre os 25 registados pelo sistema) e respetivos espectros. O utilizador dispõe de 25 botões do tipo “*pushbutton*” que permitem escolher facilmente qualquer conjunto de três acelerómetros de entre os 25 canais de medição (16 acelerómetros uniaxiais, 1 acelerómetro triaxial no centro da galeria do coroamento e dois acelerómetros triaxiais na superfície de inserção, junto a cada um dos encontros).

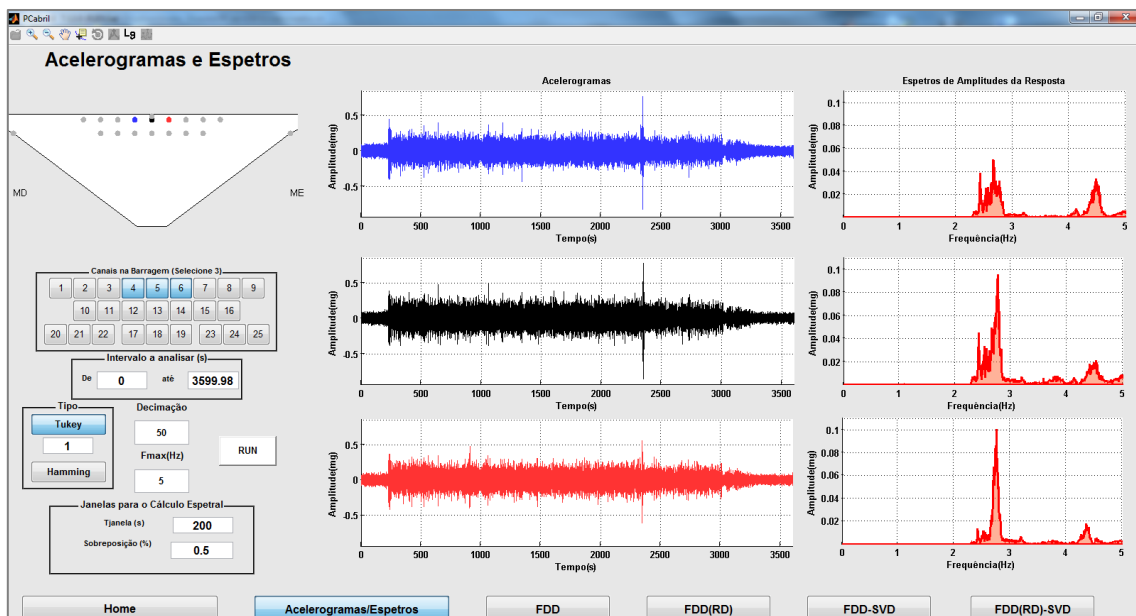


Figura 3.18 – Programa *Modal\_ID2.0*, separador referente aos acelerogramas e espectros de amplitudes

### **Painel FDD, Frequency Domain Decomposition**

Neste painel (Figura 3.19), acessível através do botão FDD (“*Frequency Domain Decomposition*”), é possível efetuar a identificação modal com base num dos métodos mais simples, denominado método de decomposição no domínio da frequência com escolha manual de picos espectrais (“*peak picking*”).

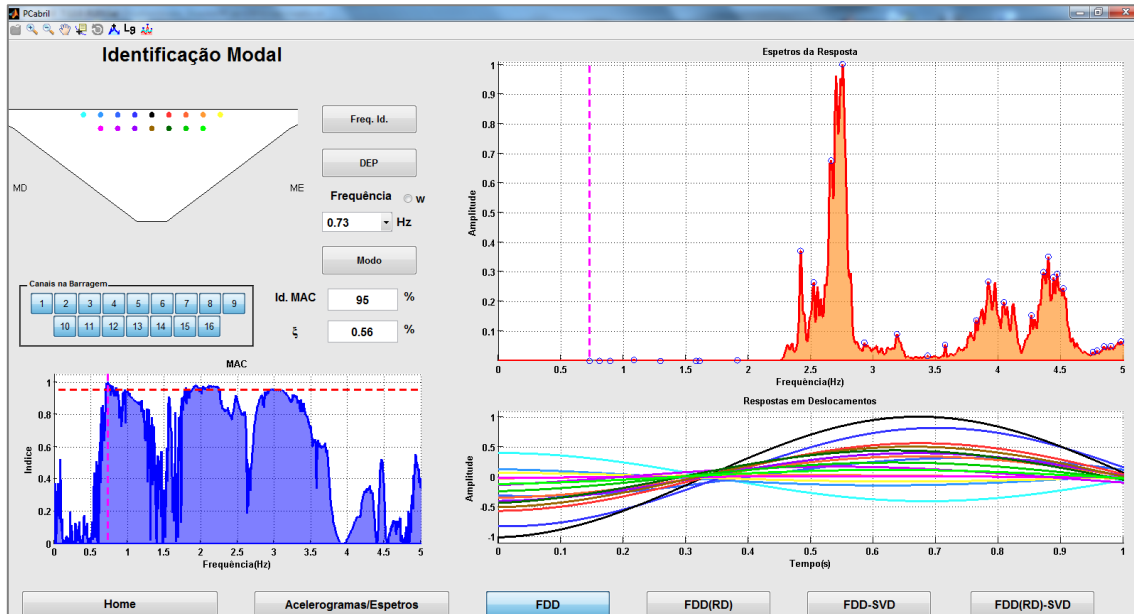


Figura 3.19 – Programa *Modal\_ID2.0*, separador referente à identificação modal através do método FDD

### **Painel FDD(RD), Frequency Domain Decomposition (Random Decrement)**

Neste painel, semelhante ao anterior, apresentam-se os resultados obtidos com base no método FDD(RD) em que se conjuga a técnica de decomposição no domínio da frequência com a técnica de Random Decrement (Rodrigues et al.; 2004), utilizada para obtenção de registos com decaimento por sobreposição de janelas temporais criteriosamente escolhidas.

### **Painel FDD-SVD, Frequency Domain Decomposition – Singular Value Decomposition**

O painel de identificação modal FDD-SVD “*Frequency Domain Decomposition - Singular Value Decomposition*” apresenta-se na Figura 3.20 e, como se pode verificar, é semelhante ao anterior painel FDD. A diferença é que agora são calculados e representados graficamente os espectros dos valores singulares da matriz de densidade espectral de potência  $M_{DEP} = M_{DEP}(\omega)$ . Esta matriz  $M_{DEP}$  é uma matriz complexa (com valores reais apenas na diagonal principal) que pode ser calculada para qualquer frequência  $\omega$ . Neste caso, como na identificação modal se consideram apenas os registos obtidos nos 16 acelerómetros uniaxiais instalados no corpo da barragem, a matriz  $M_{DEP} = M_{DEP}(\omega)$ , para uma dada frequência  $\omega$ , é uma matriz quadrada de dimensão 16x16. A configuração modal correspondente a um dado pico do espectro do 1º valor singular (analisa-se essencialmente o espectro

do 1º valor singular) é calculada com base no vetor singular (1º vetor singular) da matriz  $M_{DEP}$  correspondente à frequência do pico espectral em análise.

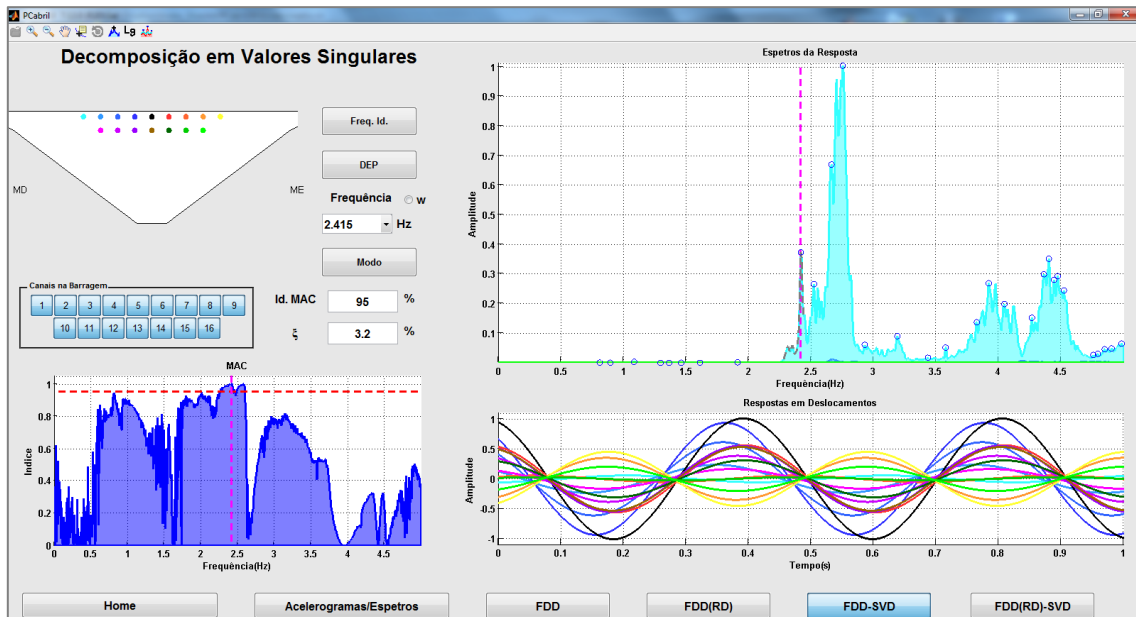


Figura 3.20 – Programa *Modal\_ID2.0*, separador referente à identificação modal através do método FDD-SVD

**Painel FDD(RD)-SVD, Frequency Domain Decomposition (Random Decrement) – Singular Value Decomposition**

Este painel (ver Figura 3.21) é semelhante ao anterior, a diferença é que agora são calculados os valores e vetores singulares da matriz  $M_{DEP}$  avaliada com base em registos temporais com decaimento obtidos com base no já referido método de *Random Decrement* (Rodrigues *et al.*; 2004).

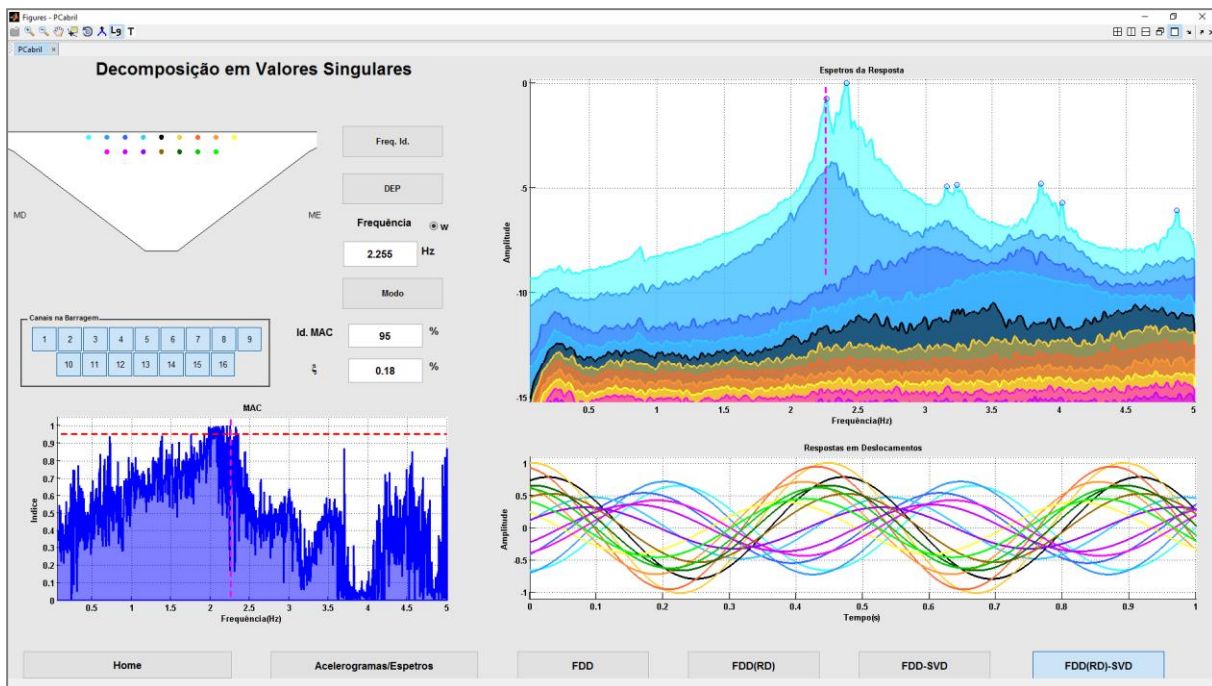


Figura 3.21 – Programa *Modal\_ID2.0*, separador referente à identificação modal através do método FDD(RD)-SVD

## 4 | Resultados do sistema de monitorização em contínuo

### 4.1 Utilização do programa Modal\_ID2.0

O programa **Modal\_ID2.0** está preparado para efetuar a identificação modal automática dos registos obtidos numa dada hora (à escolha do utilizador): permite obter espectros de amplitudes em cada um dos canais, espectros médios e espectros de valores singulares da matriz da densidade espectral de potência envolvendo os registos dos 16 acelerómetros uniaxiais instalados no corpo da barragem.

Para ilustrar as principais potencialidades do programa **Modal\_Id2.0** apresentam-se nas quatro figuras seguintes (Figura 4.1 a Figura 4.4) alguns resultados, nomeadamente referentes à análise dos registos de acelerações recolhidos a 1 de abril de 2014, entre as 10:00 e as 11:00 horas, com a água à cota 291,45 m, utilizando o método de identificação modal designado por *FDD(RD)-SVD* (“*Frequency Domain Decomposition (Random Decrement)– Singular Value Decomposition*”).

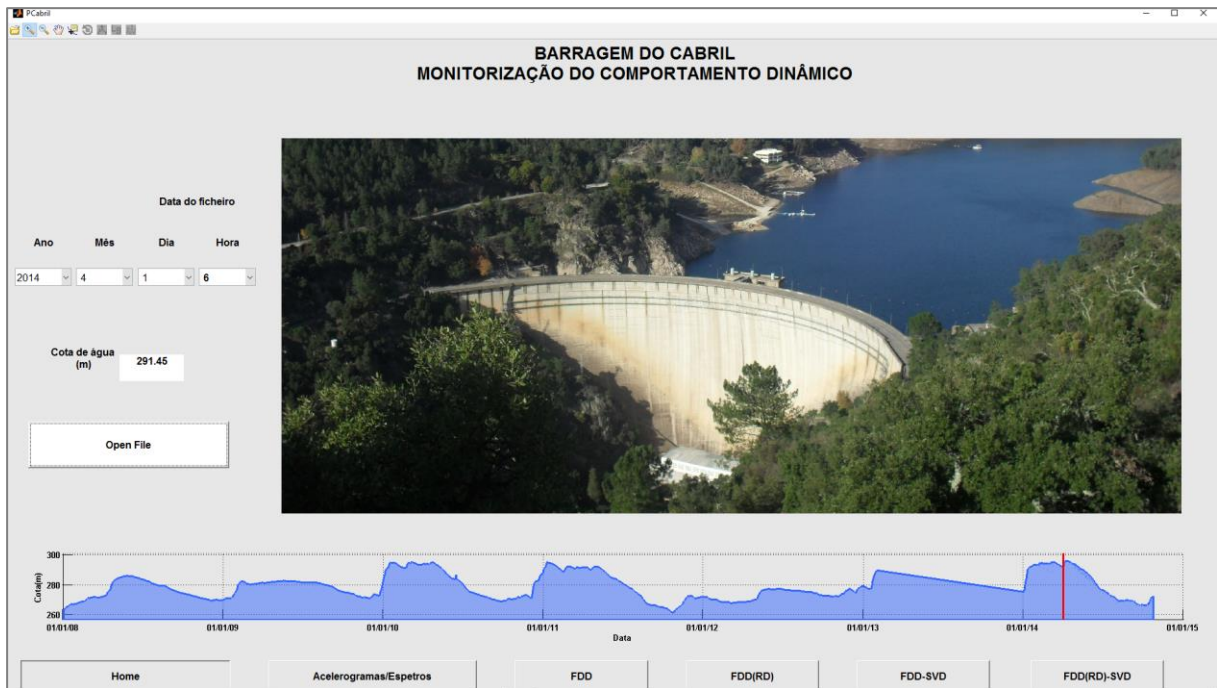
Na Figura 4.1a) mostra-se o painel inicial que permite escolher o ficheiro de dados a analisar (escolhendo o dia e a hora em que se pretende efetuar a identificação modal) no qual é visível um diagrama com a evolução da cota de água na albufeira ao longo do tempo, em que a data escolhida é representada graficamente por uma linha vertical a vermelho. Na Figura 4.1b) mostra-se o painel para visualização dos acelerogramas registados e dos respetivos espectros de amplitudes. Neste painel é possível escolher os principais parâmetros a utilizar na análise, nomeadamente pode-se escolher: i) um intervalo de tempo para análise inferior aos 3600 s correspondentes à hora completa que foi escolhida; ii) o comprimento das janelas temporais (200 s por defeito) a utilizar, assim como o tipo de janela (Tuckey de 0 a 1: retangular a sinusoidal) e a percentagem de sobreposição das janelas (com interesse nos casos em que não é utilizada a técnica de *random decrement*); iii) o fator de decimação, fornecendo o valor da nova frequência de amostragem (50 Hz por defeito); iv) o valor da frequência máxima (em Hz) a utilizar na representações espectrais.

Na Figura 4.2a) mostra-se o painel para escolha dos parâmetros a utilizar na deteção automática dos principais picos espectrais. Para este efeito foi implementada uma técnica baseada na deteção de interseções entre linhas correspondentes a diferentes níveis de suavização espectral (efetuada com base em filtros de médias móveis) a que se aplicam fatores de *shift* que o utilizador pode escolher com um “*scrollbar*”. Na Figura 4.2b) mostra-se o painel para visualização, neste caso, dos espectros dos valores singulares da matriz MDEP, com indicação dos principais picos do espectro do 1º valor singular. Neste painel é possível efetuar a escolha interativa de um dado pico, sobre o próprio gráfico, mostrando-se a correspondente configuração modal em termos das ondas harmónicas representativas do movimento oscilatório (modal) nos diversos pontos de medição, assim como o espectro do índice MAC (“*Modal Assurance Criterion*”) correspondente ao modo da frequência escolhida.

Na Figura 4.3a) mostra-se o painel em que são representadas as frequências naturais identificadas (neste caso, em 1 de abril de 2014, entre as 10:00 e as 11:00 horas) num gráfico com as linhas de influência das frequências naturais dos principais modos de vibração, calculadas numericamente com o programa **DamDySSA2.0**. O programa **Modal\_ID2.0** lê em ficheiro os valores das linhas de influência das frequências naturais calculada com o **DamDySSA2.0**. Na Figura 4.3b) mostra-se o painel inicial do programa **DamDySSA2.0** com indicação dos principais parâmetros que foram utilizados no cálculo numérico das frequências naturais para várias cotas de água, nomeadamente: módulo de elasticidade dinâmico do betão e da fundação ( $E_{din} = 32,5$  GPa), coeficiente de Poisson ( $\nu = 0,2$ ) e velocidade de propagação das ondas de pressão na albufeira ( $c_p = 1440$  m/s).

Na Figura 4.4 mostra-se o painel para comparação entre as configurações modais identificadas (em 1 de abril de 2014, entre as 10:00 e as 11:00 horas) e as calculadas numericamente com o programa **DamDySSA2.0**. Na Figura 4.4a) mostra-se a comparação entre o 1º modo de vibração identificado (água na albufeira à cota 291,45 m) e o 1º modo calculado para a água na albufeira à cota 290,0 m e na Figura 4.4b) mostra-se a mesma comparação para o caso do 2º modo de vibração. É de salientar o excelente acordo que se verifica entre as configurações modais identificadas e calculadas numericamente com o **DamDySSA2.0**.

a)



b)

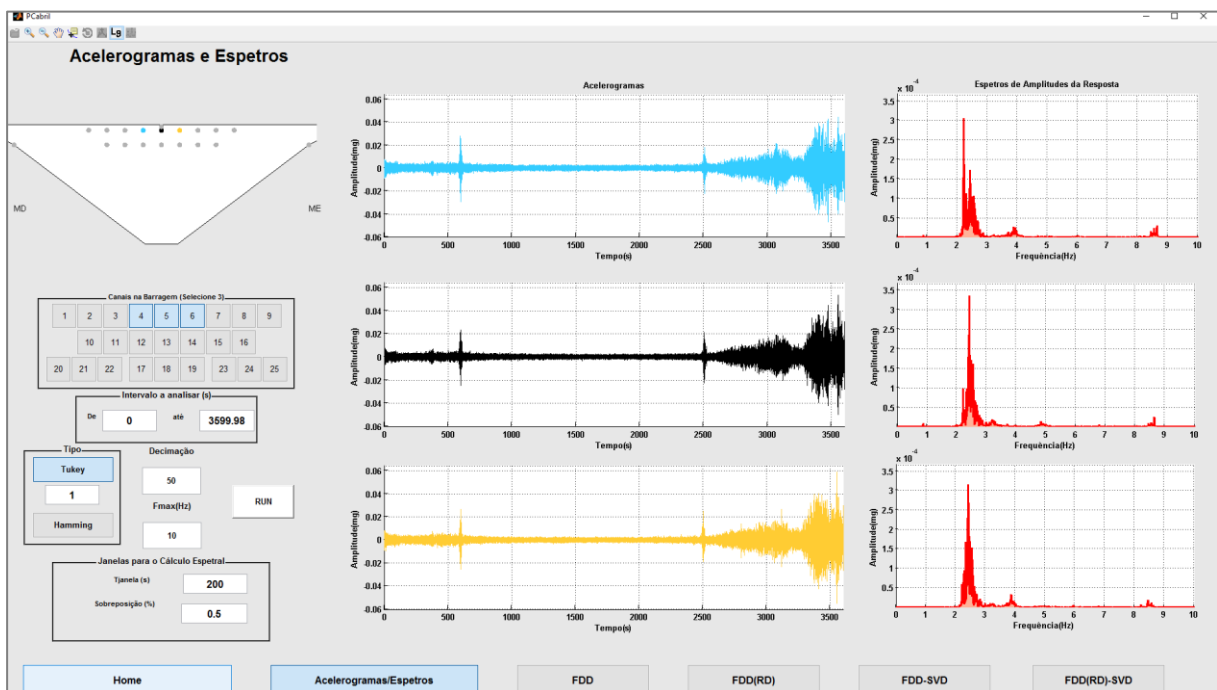
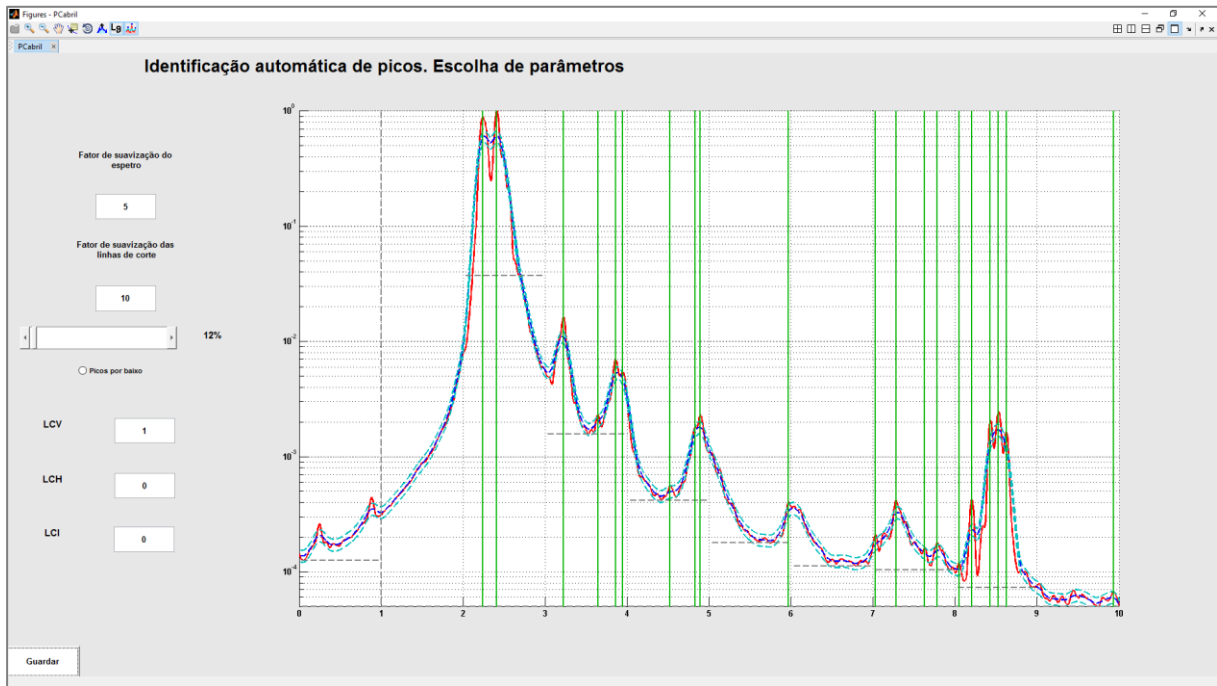


Figura 4.1 – Programa *Modal ID2.0*. Análise dos dados referentes a 1 de abril de 2014, entre as 10:00 e as 11:00 horas, com a água à cota 291,45 m. a) Painel inicial para escolha do ficheiro de dados a analisar (escolha do dia e da hora em que se pretende efetuar a identificação modal); b) Painel para visualização dos acelerogramas registados e dos respetivos espetros de amplitudes e para escolha dos parâmetros de análise



a)



b)

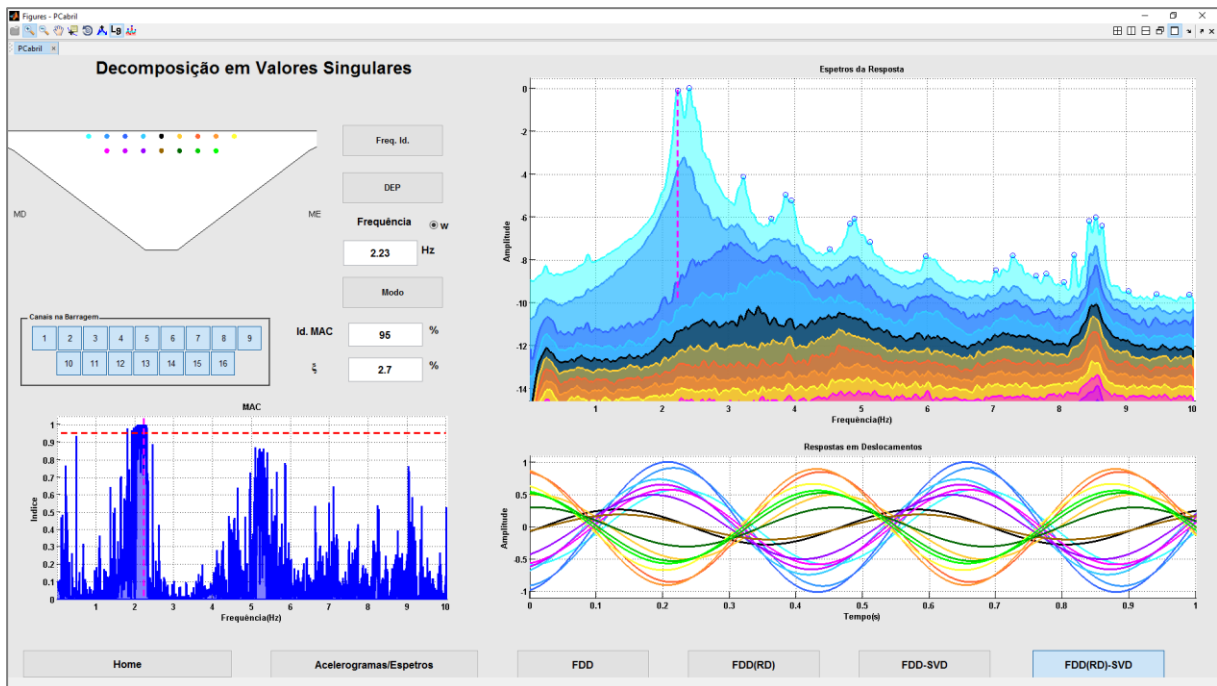
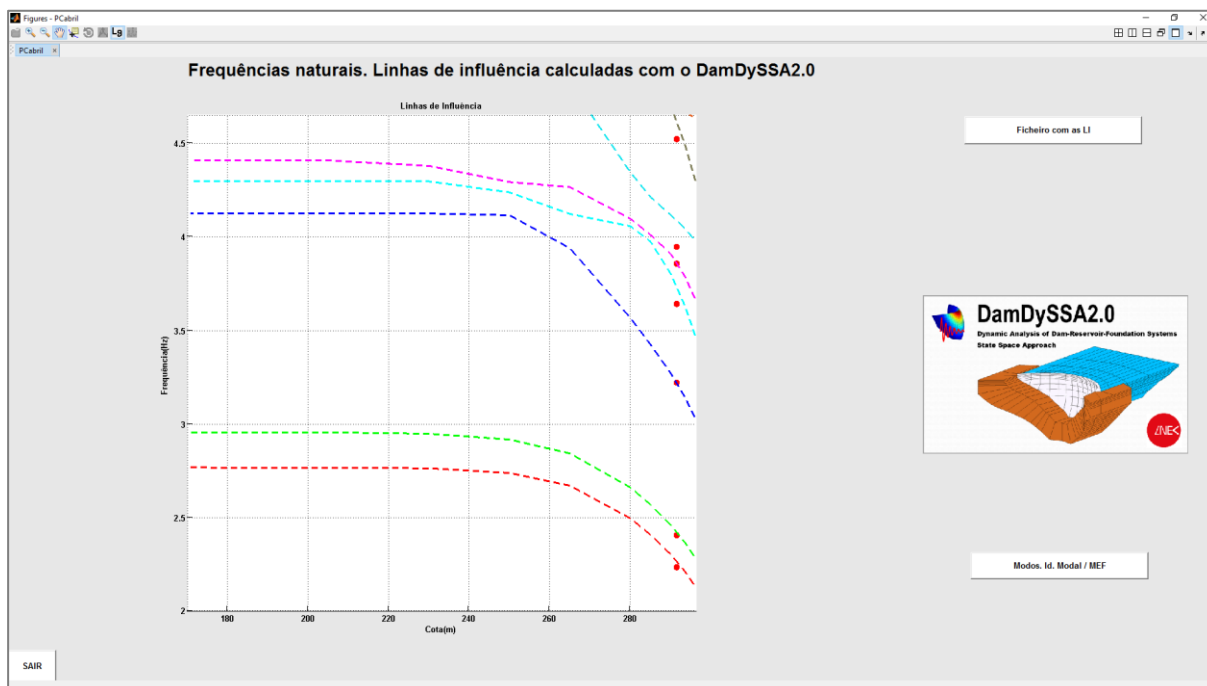


Figura 4.2 – Programa *Modal\_ID2.0*. Análise dos dados referentes a 1 de abril de 2014, entre as 10:00 e as 11:00 horas, com a água à cota 291,45 m. a) Painel para escolha dos parâmetros a utilizar para deteção automática dos principais picos espectrais (técnica baseada na deteção de intersecções entre linhas correspondentes diferentes níveis de suavização espectral a que se aplicam fatores de shift adequados); b) Painel para visualização dos espectros dos valores singulares, com indicação dos principais picos; neste painel é possível efetuar a escolha interativa de um dado pico mostrando-se a correspondente configuração modal em termos das ondas harmónicas nos diversos pontos de medição assim como o espectro do correspondente índice MAC

a)



b)

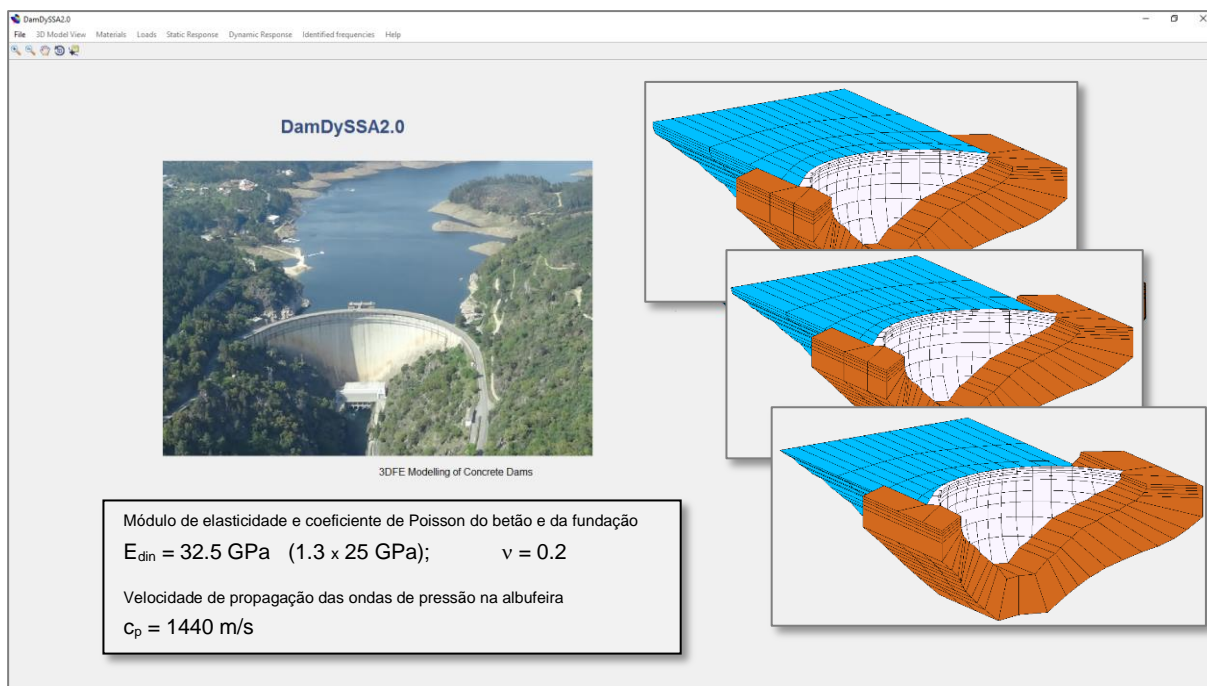
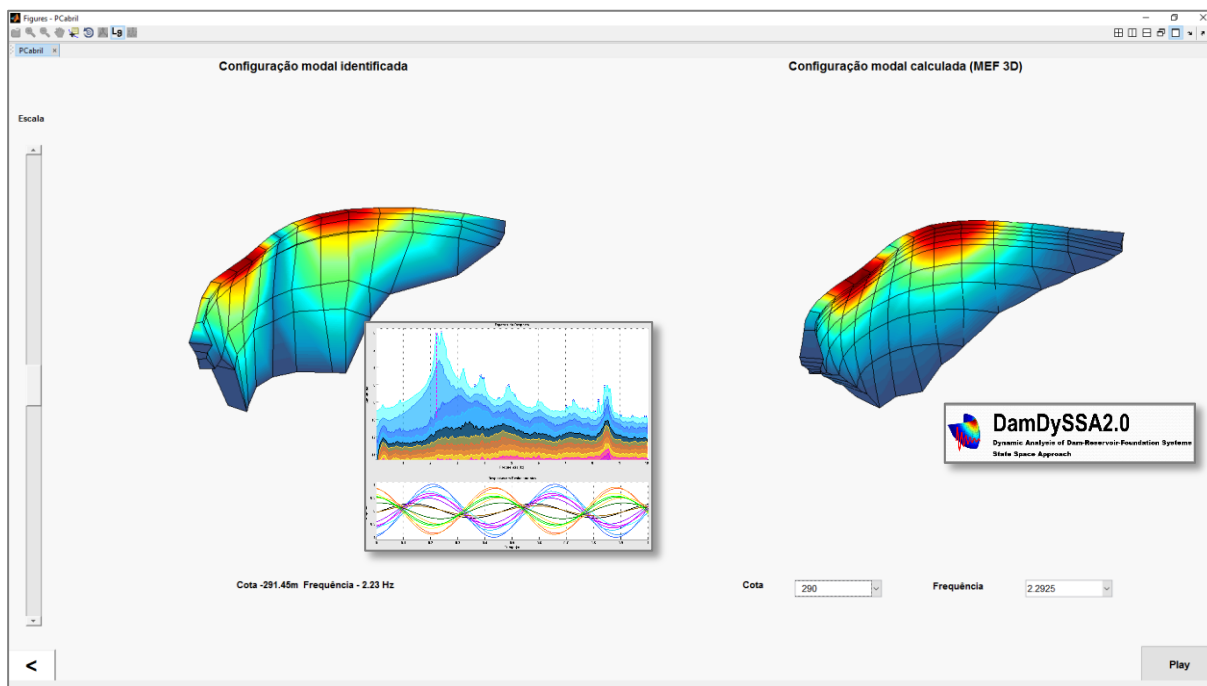


Figura 4.3 – a) Representação das frequências naturais identificadas (1 de abril de 2014, entre as 10:00 e as 11:00 horas) num gráfico com as linhas de influência das frequências naturais calculadas numericamente com o programa DamDySSA2.0. b) Painel inicial do programa DamDySSA2.0 com indicação dos principais parâmetros utilizados no cálculo numérico das frequências naturais para várias cotas de água

a)



b)

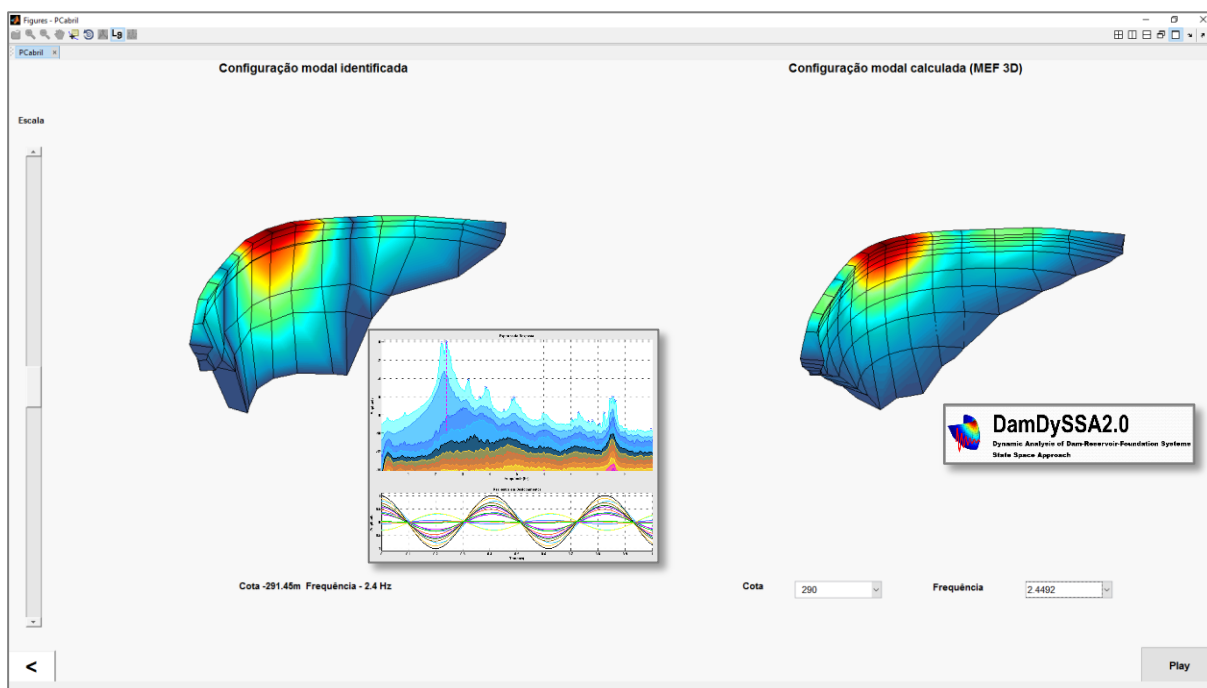


Figura 4.4 – Programa *Modal\_ID2.0*. Painel para comparação entre as configurações modais identificadas (1 de abril de 2014, entre as 10:00 e as 11:00 horas) e as calculadas numericamente com o programa *DamDySSA2.0*. a) 1º modo de vibração; b) 2º modo de vibração

## 4.2 Utilização do programa Modal\_ID\_Auto2.0

Na Figura 4.5 apresentam-se os resultados obtidos com o programa **Modal\_ID\_Auto2.0**, referentes à evolução ao longo do tempo das frequências naturais dos principais modos de vibração da barragem (e da torre de tomada de água (Espada; 2009), (Espada *et al.*; 2011), entre fevereiro e outubro de 2014. É possível verificar que as frequências dos principais picos (correspondentes a modos de vibração da barragem) diminuem quando aumenta a cota da água na albufeira (e vice-versa). As frequências naturais e a configuração dos modos de vibração são características intrínsecas de uma estrutura, caso esta sofra alguma alteração estrutural é de esperar que os seus parâmetros modais também se alterem. No caso de sistemas barragem-fundação-albufeira os parâmetros modais variam com a variação da cota de água e com eventuais alterações estruturais devidas a fenómenos de deterioração.

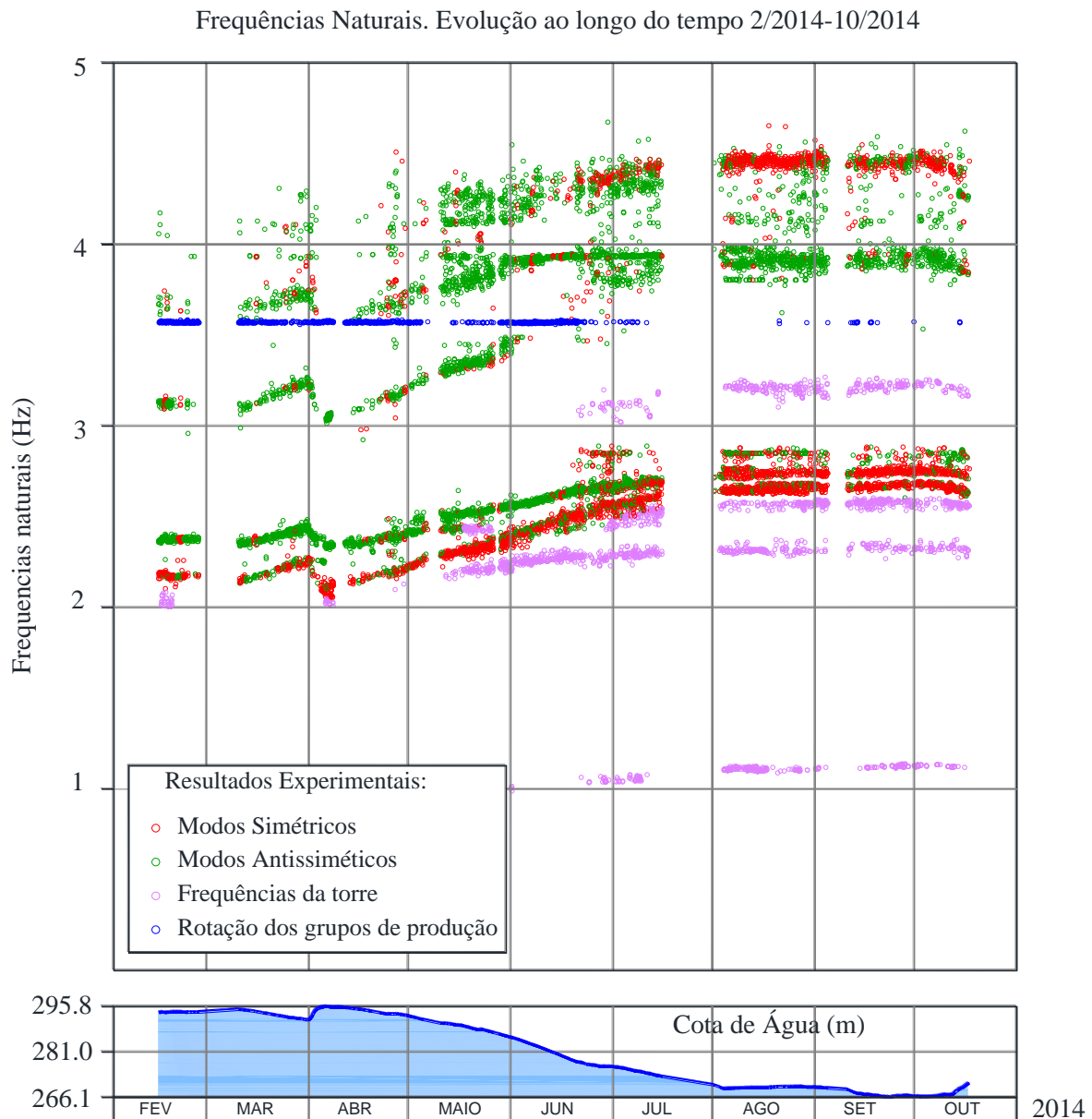
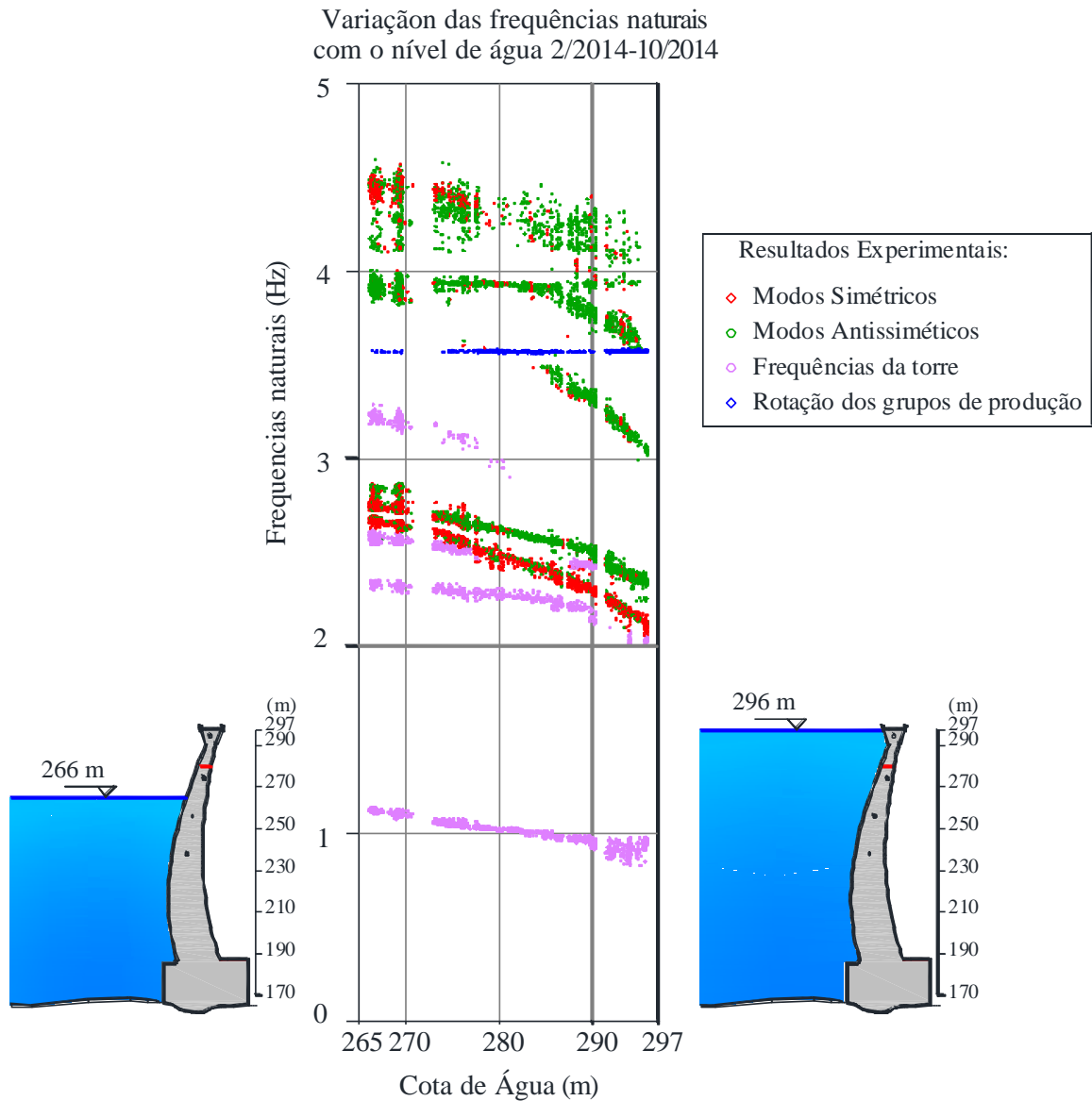


Figura 4.5 – Monitorização do comportamento dinâmico da barragem do Cabril: identificação modal automática. Resultados obtidos com o programa *Modal\_ID\_Auto2.0* entre fevereiro e outubro de 2014

Na Figura 4.6 os anteriores valores das frequências naturais obtidos com o **Modal\_Id\_Auto2.0** no período de fevereiro a outubro de 2014, são apresentados num gráfico em que se mostra o andamento das referidas frequências naturais (da barragem e da torre de tomada de água) em função do nível de água na albufeira.

Variação das frequências naturais com o  
nível de água na albufeira, entre fevereiro e  
outubro de 2014



Na Figura 4.7 apresenta-se uma comparação entre os valores das frequências naturais dos principais modos de vibração da barragem calculados com o **DamDySSa2.0** para várias cotas de água na albufeira (desde a cota máxima de 296 m e a cota 266 m) e os correspondentes valores das frequências naturais identificados com o **Modal\_Id\_Auto2.0** (no período de fevereiro a outubro de 2014). Apresenta-se ainda uma comparação entre as configurações modais calculadas e

identificadas, para a água à cota máxima. Como se pode verificar obtém-se um bom acordo entre os resultados numéricos e os resultados experimentais da identificação modal automática efetuada com o **Modal\_Id\_Auto2.0**.

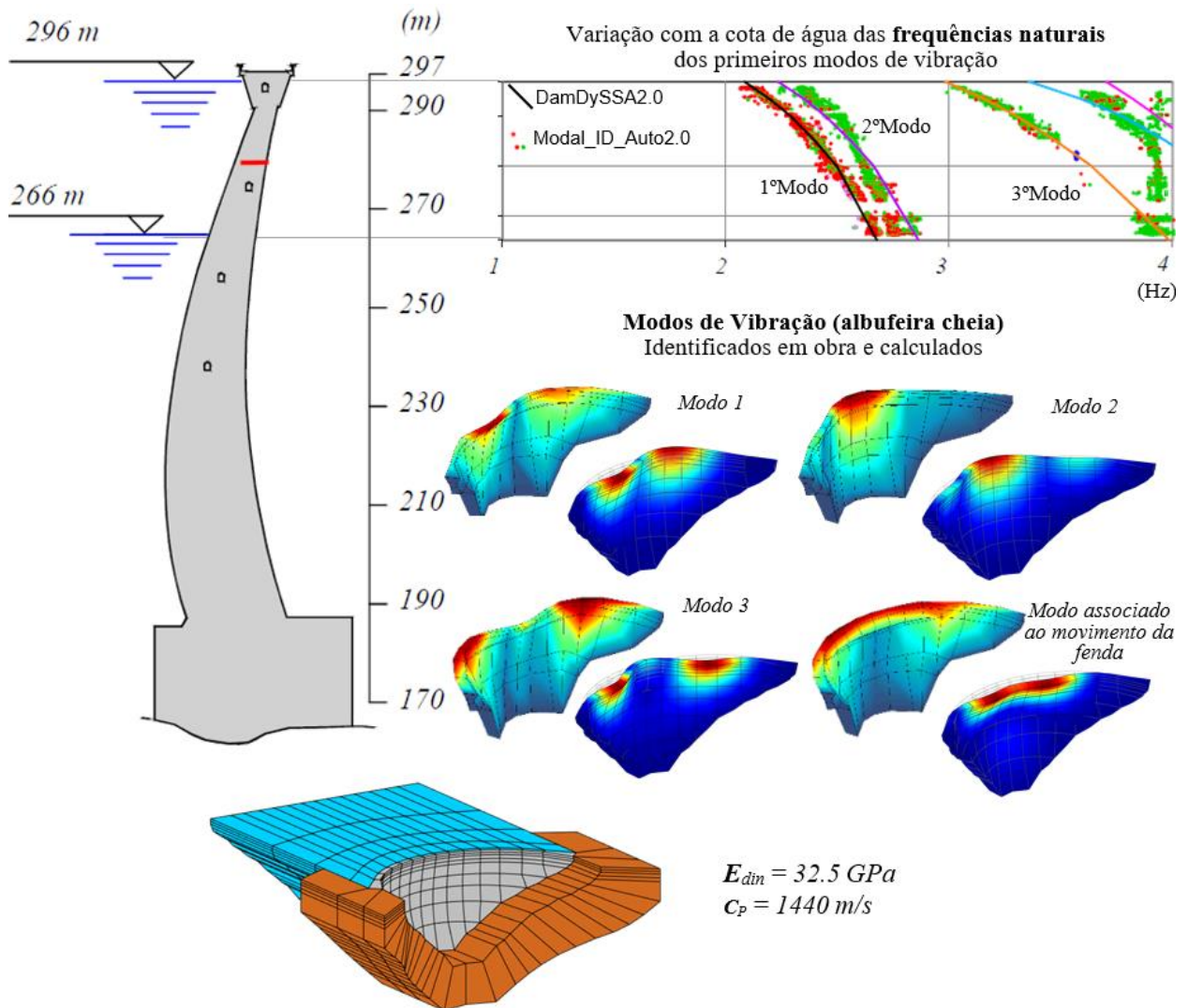


Figura 4.7 – Monitorização do comportamento dinâmico da barragem do Cabril. Variação das frequências naturais identificadas com o programa *Modal\_Id\_Auto2.0* em função da cota de água na albufeira e comparação com resultados numéricos obtidos com o DamDySSA2.0. Comparação entre as configurações modais identificadas e calculadas para a água à cota máxima

### 4.3 Amplitude das vibrações medidas na barragem do Cabril sob diferentes tipos de excitação, incluindo sob ações sísmicas

Na Figura 4.8 apresentam-se três dos acelerogramas registados na galeria do coroamento (pontos 1, 5 e 9) no dia 27 de março de 2010, entre as 13:00 e as 14:00 horas, nos quais se nota claramente o efeito das vibrações sísmicas devidas a um sismo de magnitude 4.1 que ocorreu em Sousel (às 13:37:52 horas), a uma distância da barragem de aproximadamente 130 km. Como se pode ver o sismo provocou uma aceleração de pico de 4 mg no ponto a meio da galeria do coroamento (aceleração medida na direção radial). Nesta data não foi possível registar as acelerações na inserção pois os dois acelerómetros triaxiais colocados junto aos encontros não estavam em funcionamento, tal como os acelerómetros uniaxiais instalados na 2ª galeria, sob a zona fendilhada.

Neste ponto é de salientar que a amplitude das vibrações na barragem do Cabril para os diferentes tipos de excitação pode ser atualmente bem caracterizada devido aos resultados que têm sido registados com o presente sistema de monitorização de vibrações, como se mostra no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Amplitude das vibrações medidas na barragem do Cabril sob diferentes tipos de excitação

<b>Tipo de excitação</b>	<b>Amplitude das vibrações no corpo da barragem</b>
Vibração ambiente	<b>0.001 mg ( 10<sup>-6</sup> g )</b>
Vibração operacional	<b>0.1 mg ( 10<sup>-4</sup> g )</b>
Ensaio de vibração forçada	<b>1 mg ( 10<sup>-3</sup> g )</b>
Sismos com período de retorno T=10 anos	<b>10 g ( 10<sup>-2</sup> g )</b>
SBP (T = 145 anos) (na base, 0.02 g ; no topo, 5x0.02g = 0.1g)	<b>100 mg ( 10<sup>-1</sup> g )</b>
SMP (T = 1000 anos) (na base, 0.2 g ; no topo, 5x0.2g = 1g)	<b>1000 mg ( 1 g )</b>

Como se pode ver pelos resultados do Quadro 4.1, a amplitude das vibrações sob excitação ambiente é cerca de 1000 a 10.000 vezes inferior às vibrações provocadas por pequenos sismos, com períodos de retorno inferiores a 10 anos.



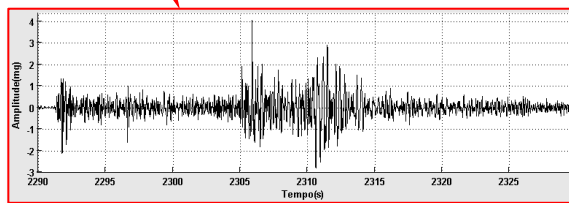
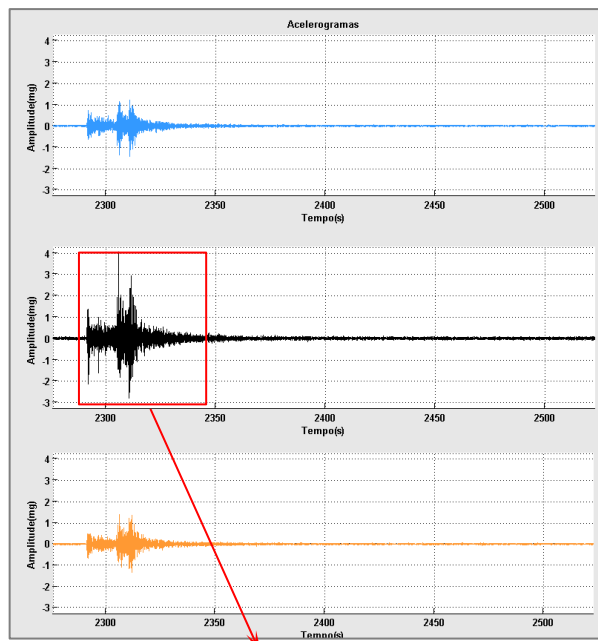
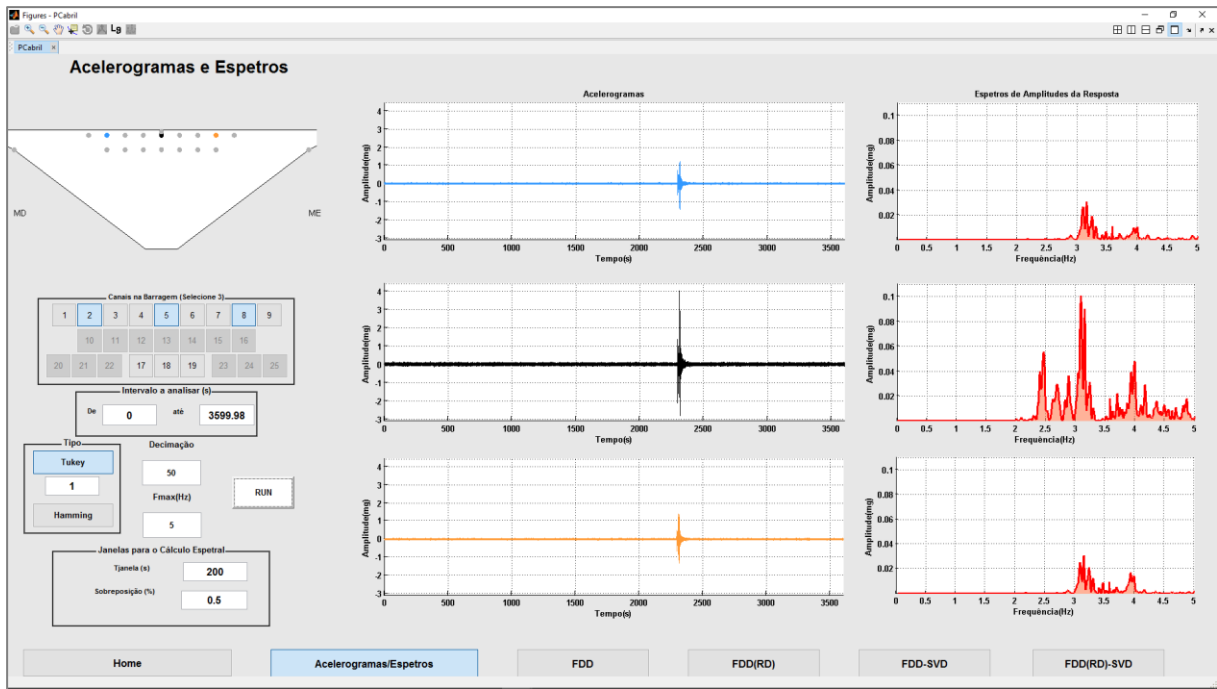


Figura 4.8 – Acelerogramas registados na barragem do Cabril em 27 de março de 2010, entre as 13:00 e as 14:00 horas (água à cota 293,24 m). Neste período ocorreu um sismo de magnitude 4.1 com epicentro em Sousel, a cerca de 130 km da barragem, que foi registado na barragem do Cabril (nesta data os dois acelerómetros triaxiais colocados na inserção e os uniaxiais da 2ª galeria não estavam em funcionamento). O sismo provocou uma aceleração de pico de 4 mg no ponto a meio da galeria do coroamento (direção radial)

## 5 | Conclusões e perspetivas futuras

A experiência adquirida pelo LNEC/DBB com a instalação e exploração do sistema para monitorização de vibrações em contínuo na barragem do Cabril, a qual tem vindo a ser divulgada através de vários artigos científicos em revistas e em congressos nacionais e internacionais, mostrou que, atualmente, com os recentes desenvolvimentos tecnológicos (ao nível do *hardware* e do *software*), a instalação deste tipo de sistemas pode contribuir de forma efetiva para melhorar o controlo da segurança das grandes barragens. De facto, estes sistemas: i) permitem obter informação útil sobre a evolução do estado de deterioração das obras na medida em que permitem identificar de forma fiável a evolução ao longo do tempo dos seus principais parâmetros modais (frequências, amortecimentos e configurações dos principais modos de vibração), os quais, como se sabe, podem ser diretamente correlacionados com o estado de conservação/deterioração das estruturas; e ii) permitem obter informação sobre a resposta sísmica das obras, a qual é de grande interesse para o desenvolvimento de modelos numéricos para simulação/previsão do comportamento dinâmico de barragens sob ações sísmicas, fundamentais em estudos de apoio ao projeto de novas obras e em estudos de revisão/verificação da segurança sísmica das obras existentes.

No âmbito deste trabalho foi dado um importante contributo para o desenvolvimento do *software* de tratamento, análise e gestão automática dos dados (pensando especificamente na perspetiva da monitorização e análise dinâmica de grandes barragens de betão), que, como salientado, é uma componente fundamental dos sistemas para monitorização em contínuo do comportamento dinâmico de barragens. Neste trabalho apresentaram-se os programas que têm vindo a ser desenvolvidos no LNEC, em MATLAB, para o caso da barragem do Cabril (estruturados de forma a serem facilmente adaptáveis a outras barragens): *software* de identificação modal no domínio da frequência (**Modal\_ID2.0** e **Modal\_ID\_Auto2.0**) e de análise dinâmica de barragens com modelos de EF3D (**DamDySSA2.0**). Mostrou-se como as análises baseadas na comparação entre resultados experimentais e numéricos (nomeadamente em termos de frequências naturais e configurações modais) podem potenciar, simultaneamente, o desenvolvimento das técnicas de monitorização e identificação modal e das técnicas de modelação numérica. Mostrou-se que a interação dinâmica barragem-fundação-albufera pode ser bem simulada com o programa de EF3D **DamDySSA2.0** (desenvolvido em MATLAB no âmbito do projeto de investigação do LNEC sobre monitorização e modelação do comportamento dinâmico de grandes barragens), no qual é adotada uma formulação “*coupled*” em deslocamentos e pressões (que requer uma discretização da albufera em EF3D de pressão) e uma abordagem de estado, que permite a consideração de amortecimento generalizado, garantindo uma elevada eficiência computacional através da aplicação do método de diagonalização da matriz de estado recorrendo a coordenadas modais complexas, o que facilita o processo de integração no tempo.

Desde 2008, com o permanente e empenhado apoio da EDP, o LNEC (DBB e CIC) tem levado a cabo diversas intervenções técnicas, em obra, as quais têm permitido melhorar as condições de

operacionalidade do sistema de monitorização de vibrações da barragem do Cabril. Nomeadamente, têm sido efetuadas intervenções para melhoramento do *software* de análise e gestão dos dados e intervenções periódicas de verificação/recalibração dos acelerómetros, para além de intervenções esporádicas para reparação de pequenas avarias e instalação de novos equipamentos para melhorar o nível de proteção da rede local e do servidor (instalado no Gabinete de Observação, no edifício da central) contra sobretensões.

Nas condições atuais, tendo em conta a robustez da solução técnica implementada pelo LNEC em termos de *hardware* e *software*, o elevado nível de automatização conseguido e a facilidade de acesso remoto (inclusivamente a partir de dispositivos do tipo *smartphone*), o sistema evoluiu para um estado de operacionalidade de crescente eficiência e atualmente já se pode considerar um sistema de grande utilidade para o controlo da segurança da obra, que envolve baixos custos de manutenção e exploração.

Para facilitar a manutenção e exploração do sistema considera-se de todo o interesse:

- estabelecer um plano de manutenção anual do sistema com vista à verificação/recalibração dos acelerómetros e à revisão das condições de operacionalidade da generalidade dos equipamentos instalados e do *software* de aquisição, análise, gestão e transmissão dos dados; e
- programar ações de formação/divulgação para as equipas técnicas da EDP sobre a utilização do presente *software* desenvolvido pelo LNEC para apoio à monitorização do comportamento dinâmico de barragens e, em particular, para o caso da barragem do Cabril.

Em termos de desenvolvimentos futuros há que:

- desenvolver aplicações *web* para apoio à análise e exploração dos dados da monitorização dinâmica que correspondam a uma evolução das atuais aplicações do tipo *stand-alone*; o desenvolvimento das referidas aplicações *web* envolverá o recurso a técnicas avançadas de Visualização de Informação (VI) para apresentar os dados sob diferentes formatos. É previsível recorrer à tecnologia HTML5 (HTML+Javascript+CSS), o que irá possibilitar a pretendida visualização da informação em formato *web* sob a forma de diferentes tipos de gráficos interativos, 2D e 3D. Em particular, prevê-se a utilização da biblioteca D3 (<http://www.d3js.org>), o *standard* na área do desenvolvimento de aplicações gráficas para a *web*.
- complementar o sistema de monitorização de vibrações instalado na barragem do Cabril com mais um acelerómetro triaxial no fundo do vale, junto à inserção, e, se possível, com ainda mais um ou dois acelerómetros no maciço rochoso com vista a medir as acelerações sísmicas em pontos da fundação afastados da zona de influência da barragem (a colocar na rocha em pontos afastados cerca de 10 a 20 m da superfície de inserção).

Por fim salienta-se que os resultados obtidos pelo LNEC/DBB com este sistema, sumariamente apresentados neste relatório, revestem-se de uma forte componente de investigação e de inovação, cuja divulgação a nível nacional e internacional tem constituído um estímulo e uma orientação para a instalação de sistemas do mesmo tipo em várias outras grandes barragens de betão, portuguesas e estrangeiras.

## Agradecimentos

O trabalho apresentado no presente relatório surge na sequência de um longo trabalho de investigação do LNEC/DBB, ainda em curso, que foi iniciado em 2002 com a apresentação de uma candidatura à FCT que permitiu obter financiamento para a instalação do sistema de monitorização de vibrações em contínuo na barragem do Cabril, o qual, recentemente, foi complementado com um sub-sistema para medição de deslocamentos por GNSS, também com financiamento da FCT.

A investigação que o LNEC/DBB tem desenvolvido nesta área da monitorização e modelação do comportamento dinâmico de grandes barragens de betão tem envolvido o trabalho de investigadores de vários departamentos do LNEC, de vários estudantes de doutoramento e de mestrado, e o empenhado apoio dos engenheiros e técnicos da EDP.

O trabalho envolveu diversas áreas, desde a montagem de componentes de *hardware* e desenvolvimento de *software* de aquisição, análise e gestão de dados até ao desenvolvimento de novas formulações matemáticas para simulação da resposta dinâmica de sistemas barragem-fundação-albufeira, passando pela resolução de problemas de transmissão/armazenamento de dados ao nível da rede local e via internet, e ainda de problemas relacionados com a proteção da rede local contra sobreensões.

Apenas para mencionar alguns dos que contribuíram para a instalação do sistema de monitorização de vibrações na barragem do Cabril agradece-se o inestimável apoio da EDP, em particular dos Eng.<sup>os</sup> Ilídio Ferreira e Carlos Rosário, da Eng.<sup>a</sup> Maria Olímpia Pereira e dos técnicos Jorge Fernandes e Maurício Henriques. Agradece-se por fim o permanente apoio do Eng.<sup>o</sup> Romano Câmara (investigador do DBB/NMMR) na fase de desenvolvimento do *software* de modelação numérica, e o envolvimento e apoio dos investigadores do LNEC/CIC, Carlos Oliveira Costa, José Almeida Garrett, João Palma e Carlos Santos, e ainda do bolsheiro de doutoramento João Reis e do técnico de informática Edgar Matias.

Lisboa, LNEC, junho de 2017

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Modelação e Mecânica  
das Rochas



Luís Nolasco Lamas

AUTORIA



Sérgio Oliveira  
Investigador Auxiliar

O Diretor do Departamento de Barragens de  
Betão



António Lopes Batista



André Silvestre  
Engenheiro Civil

## Referências Bibliográficas

- ALEGRE, A.; OLIVEIRA, S.; ESPADA, M.; CÂMARA, R.; LEMOS, V., 2016 – **Hydrodynamic pressures on dams. numerical and experimental results for non-vertical upstream faces**. 10<sup>o</sup> Congresso Nacional de Mecânica Experimental. LNEC, Lisboa.
- ESPADA, M., 2009 – **Desenvolvimento de Modelos para análise dinâmica de estruturas. Aplicação a barragens de betão e estruturas auxiliares**. Dissertação de Mestrado, ISEL.
- ESPADA, M.; MENDES, P.; OLIVEIRA, S., 2011 – **Observação e Análise do Comportamento Dinâmico da Torre das Tomadas de Água da barragem do Cabril**. Rev. da APAET ISSN 1646-7078. Experimental Mechanics, Vol 19, P. 153-163.
- ESPADA, M.; MENDES, P.; OLIVEIRA, S., 2011 – **Dynamic monitoring of Cabril dam under ambient vibration. Influence of the intake tower dynamic behaviour**. 6th International Conference on Dam Engineering. LNEC, Lisboa.
- GARRETT, J. A., 2007 – **A instrumentação no controlo de segurança de grandes obras. Perspectivas de desenvolvimento**. Lisboa, ICM2007, 2007. pp. 6-10.
- HOUQUIN, C., 2014 – **Seismic Safety of High Concrete Dams**. In CHINACOLD, Seismic Safety of Dams in China (pp. 1-54).
- LEMOS, J.; OLIVEIRA, S.; MENDES, P., 2008 – **Analysis of the Dynamic Behaviour of Cabril Dam Considering the Influence of Contraction Joints**. 7<sup>th</sup> EUROSDYN2008, UK.
- LNEC, 2003 – **Observação da barragem do Cabril (Período de exploração de 1982 a 2001) 3<sup>o</sup> relatório. Análise do comportamento e avaliação das condições de segurança**. LNEC - Proc. 0403/01/234. Relatório 397/2003 – DBB/NMMF.
- MENDES, P., 2005 – **Observação e análise do comportamento dinâmico de barragens de betão sob excitação ambiente**. Lisboa, IST - Universidade Técnica de Lisboa.
- MENDES, P., 2010 – **Observação e análise do comportamento dinâmico de barragens de betão**. Tese de doutoramento elaborada no LNEC e apresentada na FEUP, Porto.
- MENDES, P.; OLIVEIRA, C.; GARRETT, J. A.; OLIVEIRA, S., 2007 – **Dynamic Behaviour Characterization of Concrete Dams Based on Continuous Monitoring**. 5th International Conference on Dam Engineering. LNEC, Lisboa.
- OLIVEIRA, S., 2000 – **Modelos para Análise do Comportamento de Barragens de Betão considerando a Fissuração e os Efeitos do Tempo. Formulações de Dano**. Tese de Doutoramento elaborada no LNEC e apresentada na FEUP. Porto. (Prémio de Investigação Manuel Rocha 2002).
- OLIVEIRA, S., 2002 – **Continuous monitoring system for the dynamic performance assessment of arch dams**. Sub-programme D, do projeto “Study of evolutive deterioration processes in concrete dams. Safety control over time”. Re-equipment Programme of FCT (Project reference: REEQ/815/ECM/2005).

- OLIVEIRA, S., 2013 – **Análise de Fourier e Aplicações em Dinâmica de Estruturas**. In, Matemática do Planeta Terra. p.247. Ed.: F. Pestana da Costa, J. T. Pinto, & Jorge Buescu, IST Press. 1ª Ed.2013, 2ª Ed.2014.
- OLIVEIRA, S., 2015 – **Monitoring of Dynamic Behaviour. Part I: Continuous monitoring systems and models for seismic dam behaviour simulation. Water structure dynamic interaction**. Dam World Conference 2015. LNEC, Lisboa.
- OLIVEIRA, S.; ALEGRE, A.; ESPADA, M.; CÂMARA, R., 2016 – **Modelos de interação dinâmica água-estrutura na análise sísmica de barragens abóbada em regime elástico-linear. Aplicação à barragem de Luzzone**. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Número temático sobre Engenharia Sísmica e Sismologia, Novembro de 2016.
- OLIVEIRA, S.; ALEGRE, A.; SILVESTRE, A.; ESPADA, M.; CÂMARA, R., 2015 – **Seismic safety evaluation of Luzzone dam. Use of a 3DFEM state formulation in pressures and displacements**. 13th ICOLD Internacional Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams, EPFL, Lausanne.
- OLIVEIRA, S.; ESPADA, M.; CÂMARA, R., 2012 – **Long-term dynamic monitoring of arch dams. The case of Cabril dam, Portugal**. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa.
- OLIVEIRA, S.; ESPADA, M.; CÂMARA, R., 2012 – **Monitoring and modeling the dynamic behavior of arch dams**. 54º Congresso Brasileiro do Concreto. Dam World Conference, Maceió, Brasil.
- OLIVEIRA, S.; FERREIRA, I.; BERBERAN, A.; MENDES, P.; BOAVIDA, J.; BAPTISTA, B., 2010 – **Monitoring the structural integrity of large concrete dams. The case of Cabril dam, Portugal**. Hydro2010, 2010 Lisbon.
- OLIVEIRA, S., LIMA, N., 2012 – **Improvement of Cabril dam monitoring system using GNSS. Development of software MoniDam for automatic monitoring data analysis**. Task 5 do projeto “GNSS and accelerometers data fusion in large structures monitoring. (Project reference: PTDC/ECM-EST/2131/2012).
- OLIVEIRA, S.; MENDES, P.; GARRETT, A.; COSTA, O.; REIS, J., 2011 – **Long-term dynamic monitoring systems for the safety control of large concrete dams. The case of Cabril dam, Portugal**. 6th Int. Conf. on Dam Engineering. LNEC, Lisboa.
- OLIVEIRA, S.; OSÓRIO, A.; SILVESTRE, A.; CÂMARA, R., 2014 – **Identificação modal e simulação da resposta sísmica de barragens abóbada**. JPÉE2014. LNEC, Lisboa.
- OLIVEIRA, S.; RODRIGUES, J.; MENDES, P.; CAMPOS COSTA, A., 2003 – **Monitorização e modelação do comportamento dinâmico de barragens de betão**. VI Encontro Nacional de Mecânica Computacional. Évora.
- OLIVEIRA, S.; RODRIGUES, J.; MENDES, P.; COSTA, A. C., 2004 – **Damage Characterization in Concrete Dams Using Output-Only Modal Analysis**. IMACXXII Dearborn, USA.
- OLIVEIRA, S.; SALVADO, P.; SILVESTRE, A.; ESPADA, M.; CÂMARA, R., 2014 – **Monitorização e modelação do comportamento dinâmico de barragens de betão. Estudo da interação dinâmica água-estrutura**. JPÉE2014. LNEC, Lisboa.

- OLIVEIRA, S.; SILVESTRE, A.; ESPADA, M.; CÂMARA, R., 2012 – **Monitorização e modelação do comportamento dinâmico de barragens de betão. Interação barragem-fundação-albufeira.** Encontro Nacional Betão Estrutural - BE2012. FEUP, Porto.
- OLIVEIRA, S.; SILVESTRE, A.; ESPADA, M.; CÂMARA, R., 2014 – **Modeling the dynamic behavior of dam-reservoir-foundation systems considering generalized damping.** Development of a 3DFEM state formulation. EUROODYN2014. FEUP, Porto.
- OLIVEIRA, S., SILVESTRE, A., ESPADA, M., SALVADO, P., CÂMARA, R., 2015 – **Monitoring the dynamic behavior of Cabril Dam.** 2nd Int. Dam World Conf. LNEC, Lisboa.
- OLIVEIRA, S., TOADER, A. M., VIEIRA, P., 2010 – **Finding the elastic coefficients of a damaged zone in a concrete dam using material optimization to fit the measured natural frequencies.** IV European Conference on Computational Mechanics. Paris, France, May 16-21.
- PEETERS, B., 2000 – **System identification and damage detection in civil engineering.** S.l.: Tese de doutoramento, Univ. católica de Lovaina, Bélgica, 2000.
- REIS, J.; COSTA, C. O., 2009 – **Cabril\_Aquis. Manual do utilizador.** LNEC - Proc. 1102/11/16128. Relatório 211/2009 – CIC/NSE.
- RODRIGUES, J., 2004 – **Identificação modal estocástica. Métodos de análise e aplicações em estruturas de engenharia civil.** Tese de doutoramento. FEUP, Porto.
- RODRIGUES, J.; BRINKER, R., & P., A., 2004 – **Improvement of Frequency Domain Output-Only Modal Identification from the Application of the Random Decrement Technique.** IOMAC.
- ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. AND ZHU, J. Z., 2005 – **The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals.** Sixth ed., Elsevier Butterworth-Heinemann.



