

DESENVOLVIMENTO DE CARTAS DE CONTROLO PARA A DETEÇÃO DE ANOMALIAS SUPORTADA POR MONITORIZAÇÃO DINÂMICA CONTÍNUA

JOSÉ PEDRO EIRÓ DE LIMA TORCATO CARVALHO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS E GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Álvaro Alberto de Matos Ferreira da Cunha

Coorientador: Doutor Sérgio Bouça Pereira

Coorientador: Doutor Juan Tomé Caires da Mata

JULHO 2026

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2025/2026

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351-22-508 1901



m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2025/2026 - Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família

*“As cousas árduas e lustrosas
Se alcançam com trabalho e com fadiga”*

Luís Vaz de Camões

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação representa o culminar de um longo percurso académico, marcado por desafios, aprendizagens e momentos de crescimento pessoal e profissional. A sua concretização não teria sido possível sem o apoio e a dedicação de várias pessoas e instituições, às quais expresso o meu agradecimento.

À Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), por me ter acolhido durante todos estes anos.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pelo acolhimento no desenvolvimento desta dissertação.

À Movhera, dono de obra da barragem do Baixo Sabor, pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Ao meu orientador, Professor Doutor Álvaro Cunha, pelos conhecimentos e valores transmitidos enquanto meu docente, e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Ao meu coorientador, Doutor Sérgio Pereira, pelo acompanhamento, disponibilidade e partilha de conhecimento ao longo de todo o trabalho.

Ao meu coorientador, Doutor Juan Mata, pela orientação, pelo apoio, pela paciência, e pela transmissão de conhecimento ao longo do desenvolvimento desta tese.

A todos os docentes que contribuíram para o meu crescimento enquanto aluno e pessoa, ao longo do meu percurso académico.

A toda a minha família, em particular aos meus pais, à minha irmã, e ao meu irmão, por me terem acompanhado neste caminho, por vezes difícil, e por me terem dado todo o carinho e toda a força necessária para a conclusão deste capítulo.

A todos os amigos e colegas que tive o privilégio de conhecer, em particular ao André Rodrigues e ao João Festas pelas memórias e experiências inesquecíveis que vivi durante estes anos.

O trabalho desenvolvido enquadra-se no projeto 2023.14874.PEX – anoMaLy – Machine Learning-based Models for Advanced Anomaly Detection in Dam Structural Health Monitoring, com DOI: <https://doi.org/10.54499/2023.14874.PEX>.

RESUMO

A monitorização da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring*, SHM) de barragens de betão constitui uma área de crescente importância no domínio da engenharia civil, dado o papel crítico que estas infraestruturas desempenham e os riscos associados a eventuais falhas estruturais. A monitorização dinâmica contínua tem vindo a afirmar-se como uma abordagem de grande potencial para a deteção precoce de anomalias estruturais, permitindo a identificação automática e contínua das propriedades modais da estrutura.

O presente trabalho insere-se neste contexto e tem como objetivo o desenvolvimento e avaliação de um sistema de deteção de anomalias baseado em monitorização dinâmica contínua, aplicado à barragem do Baixo Sabor. O sistema de monitorização instalado na barragem regista séries temporais de aceleração com uma frequência de amostragem de 30 minutos, a partir das quais são identificadas automaticamente as frequências naturais.

A metodologia adotada assenta em três etapas principais. Em primeiro lugar, é ajustado um modelo de regressão linear múltipla que segue a estrutura do modelo HTT (*Hydrostatic-Thermal-Time*), utilizando o nível da água na albufeira, o seu quadrado e a média móvel da temperatura ambiente como variáveis preditoras, com o objetivo de remover os efeitos ambientais e operacionais das frequências naturais identificadas. Em segundo lugar, são calculados os resíduos, diferença entre as frequências naturais observadas e as previstas, que representam a componente das frequências não explicada pelas variáveis ambientais. Por fim, com os resíduos, são construídas cartas de controlo T^2 de *Hotelling*, que correlacionam a informação dos quatro primeiros modos de vibração, e permitem identificar automaticamente desvios face ao comportamento de referência estabelecido no período de treino. O desempenho do sistema de deteção é avaliado para valores de agrupamento de observações, entre 3 horas e 2 dias, para uma configuração de dano com quatro níveis de intensidade de dano crescentes, simulados artificialmente num modelo numérico de elementos finitos, através de reduções percentuais do módulo de elasticidade do betão em 10%, 30%, 50%, e 70%, para um conjunto restrito de elementos. Para estes vários cenários, são registados os valores das percentagens de pontos que estão acima do limite de controlo estabelecido, e também os valores medianos da estatística T^2 de *Hotelling*.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem do Baixo Sabor, Modelo de regressão HTT, Monitorização dinâmica contínua, Carta de controlo, Resíduos.

ABSTRACT

The structural health monitoring (SHM) of concrete dams constitutes an area of growing importance in the field of civil engineering, given the critical role these infrastructures play and the risks associated with eventual structural failures. Continuous dynamic monitoring has been establishing itself as an approach of great potential for the early detection of structural anomalies, allowing the automatic and continuous identification of the modal properties of the structure.

The present work is inserted in this context and aims at the development and evaluation of an anomaly detection system based on continuous dynamic monitoring, applied to the Baixo Sabor dam. The monitoring system installed in the dam records time series of acceleration with a sampling frequency of 30 minutes, from which the natural frequencies are automatically identified.

The adopted methodology is based on three main steps. Firstly, a multiple linear regression model is fitted following the structure of the HTT (Hydrostatic-Thermal-Time) model, using the reservoir water level, its square, and the moving average of the ambient temperature as predictor variables, with the aim of removing the environmental and operational effects from the identified natural frequencies. Secondly, the residuals, the difference between the observed and predicted natural frequencies, are calculated, which represent the component of the frequencies not explained by the environmental variables. Finally, with the residuals, Hotelling T^2 control charts are constructed, which correlate the information from the first four vibration modes, and allow the automatic identification of deviations from the reference behaviour established during the training period. The performance of the detection system is evaluated for observation grouping values, between 3 hours and 2 days, for a damage configuration with four increasing intensity levels, artificially simulated in a finite element numerical model through percentage reductions of the concrete elastic modulus of 10%, 30%, 50%, e 70%, applied to a restricted set of elements. For these various scenarios, the percentage of points above the established control limit are recorded, as well as the median values of the Hotelling T^2 statistic.

KEYWORDS: Baixo Sabor dam, HTT regression model, Dynamic continuous monitoring, Control charts, Residuals.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
2 CONTROLO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE BETÃO.....	5
2.1 INTRODUÇÃO.....	5
2.2 CONTROLO DE SEGURANÇA	8
2.3 BARRAGENS DE BETÃO	10
2.4 PRINCIPAIS AÇÕES	12
2.4.1 Peso Próprio	12
2.4.2 Temperatura.....	13
2.4.3 Pressão Hidrostática	14
2.5 OBSERVAÇÃO DO COMPORTAMENTO.....	15
2.5.1 Deslocamentos	15
2.5.2 Movimentos de juntas	18
2.5.3 Tensões e extensões no betão	19
2.5.4 Caudais	20
2.5.5 Ações Dinâmicas	21
2.6 ERROS DE MEDIÇÃO	22
2.7 METODOLOGIA PROPOSTA PARA A DETEÇÃO DE ANOMALIAS	23
2.8 MODELOS DE PREVISÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO	25

2.9 CARTAS DE CONTROLO DE <i>HOTELLING</i> T^2	26
3 CASO DE ESTUDO – BARRAGEM DO BAIXO SABOR	29
3.1 BARRAGEM E SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO	29
3.2 MONITORIZAÇÃO DINÂMICA CONTÍNUA	32
3.3 PREVISÃO DO COMPORTAMENTO	36
4 DESENVOLVIMENTO DE CARTAS DE CONTROLO PARA A DETEÇÃO DE ANOMALIAS	43
4.1 CENÁRIOS BASE	43
4.2 SIMULAÇÃO DE DANOS	46
4.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS DE DETEÇÃO DE ANOMALIAS	48
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
5.1 TRABALHO REALIZADO	61
5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	62
5.3 TRABALHOS FUTUROS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Barragens em Portugal Continental (APA 2021a).	7
Figura 2.2 - Legislação e enquadramento normativo nacional no âmbito da segurança de barragens (APA 2021b).	8
Figura 2.3 - Componentes de segurança em barragens (Silva 2022).	9
Figura 2.4 - Barragem <i>Grande-Dixence</i> – Barragem de gravidade (Switzerland Tourism 2026).	10
Figura 2.5 - Barragem <i>Daniel-Johnson</i> – Barragem de contraforte (Hydro-Québec 1996).	11
Figura 2.6 - Barragem do Alto Lindoso – Barragem em abóbada (EDP 2024).	12
Figura 2.7 - Estação meteorológica (Mata 2007) e termómetro de máxima e mínima (Moura 2005).	13
Figura 2.8 - Escala limnimétrica (Mata 2007).	14
Figura 2.9 - Vista da base de coordenómetro do fio de prumo (LNEC 2025).	17
Figura 2.10 - Cabeça de extensómetro de fundação (Mata 2007).	17
Figura 2.11 - Bases de alongâmetro no paramento do vazamento da barragem da Bemposta (Rebelo 2020).	18
Figura 2.12 - Base tridimensional (Mata 2007).	19
Figura 2.13 - Grupo de extensómetros de resistência elétrica (Mendes 2023).	19
Figura 2.14 - Terminal de um dreno (Moura 2005).	20
Figura 2.15 - Bica totalizadora com medidor (Mata 2007).	20
Figura 2.16 - Acelerómetro uniaxial com cabo (Pereira 2019).	22
Figura 2.17 - Fluxograma da metodologia proposta para a deteção de anomalias estruturais.	24
Figura 2.18 – Exemplo de uma carta de controlo.	28
Figura 3.1 - Barragem do Baixo Sabor (APA 2026).	30
Figura 3.2 – Posição dos pontos de medição no sistema de monitorização da barragem do Baixo Sabor (Pereira 2019).	31
Figura 3.3 – Distribuição dos acelerómetros pela barragem do Baixo Sabor (Pereira 2019).	32
Figura 3.4 - Evolução das frequências naturais dos quatro primeiros modos de vibração – desde o primeiro enchimento da albufeira até maio de 2018.	33
Figura 3.5 - Evolução do nível da água da albufeira.	35
Figura 3.6 - Evolução da média móvel da temperatura.	35
Figura 3.7 – Relação entre frequência natural e nível da água na albufeira.	36
Figura 3.8 – Frequências naturais observadas e previstas dos quatro primeiros modos de vibração.	38
Figura 3.9 – Resíduos dos quatro primeiros modos de vibração.	39
Figura 3.10 - Histogramas das frequências naturais originais e dos resíduos dos quatro primeiros modos de vibração, do primeiro modo no topo, para o quarto na base.	41
Figura 4.1 - Carta de controlo sem dano ($r=24$).	44
Figura 4.2 - Carta de controlo sem dano ($r=48$).	44
Figura 4.3 - Localização e tipo de dano simulado (Pereira 2019).	46

Figura 4.4 - Cartas de controlo para um agrupamento de 6 pontos e intensidade de dano 2 (esquerda) e 4 (direita).....	50
Figura 4.5 - Cartas de controlo para um agrupamento de 12 pontos e intensidade de dano 2 (esquerda) e 3 (direita).....	52
Figura 4.6 - Cartas de controlo para um agrupamento de 24 pontos e intensidade de dano 2 (esquerda) e 4 (direita).....	54
Figura 4.7 - Cartas de controlo para um agrupamento de 48 pontos e intensidade de dano 1 (esquerda) e 2 (direita).....	56
Figura 4.8 - Cartas de controlo para um agrupamento de 96 pontos e intensidade de dano 1 (esquerda) e 2 (direita).....	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Grandezas medidas, equipamentos utilizados, e incerteza associada a cada equipamento, adaptado de (Silva 2022).	23
Tabela 3.1 - Valores de coeficiente de determinação para os primeiros quatro modos de vibração. ...	38
Tabela 4.1 - Valores do limite do UCL e da mediana de T^2 num cenário sem dano e com diferentes agrupamentos de pontos.	45
Tabela 4.2 - Valores das variações das frequências naturais nos quatro primeiros modos de vibração.	47
Tabela 4.3 - Valores da percentagem de pontos acima do UCL e da mediana de T^2 ($r=6$).	49
Tabela 4.4 – Valores da percentagem de pontos acima do UCL e da mediana de T^2 ($r=12$).	51
Tabela 4.5 - Valores da percentagem de pontos acima do UCL e da mediana de T^2 ($r=24$).	53
Tabela 4.6 - Valores da percentagem de pontos acima do UCL e da mediana de T^2 ($r=48$).	55
Tabela 4.7 - Valores da percentagem de pontos acima do UCL e da mediana de T^2 ($r=96$).	57
Tabela 4.8 - Percentagem de pontos acima do UCL para um dano de intensidade 2	59

Símbolos, Acrónimos e Abreviaturas

<i>APA</i>	Agência Portuguesa do Ambiente
<i>DTA</i>	Documentos Técnicos de Apoio
<i>EDP</i>	Energias de Portugal
<i>FEUP</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
<i>DECG</i>	Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i>
<i>GV1</i>	Galeria de Visita 1
<i>GV2</i>	Galeria de Visita 2
<i>GV3</i>	Galeria de Visita 3
<i>HTT</i>	<i>Hydrostatic-Thermal-Time</i>
<i>LNEC</i>	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
<i>NE</i>	Nordeste
<i>NMC</i>	Nível Máximo de Cheia
<i>NO</i>	Noroeste
<i>NPA</i>	Nível de Pleno Armazenamento
<i>RPB</i>	Regulamento de Pequenas Barragens
<i>RSB</i>	Regulamento de Segurança de Barragens
<i>SE</i>	Sudeste
<i>SHM</i>	<i>Structural Health Monitoring</i>
<i>SMS</i>	Sistema de Monitorização Sísmica
<i>SO</i>	Sudoeste
<i>SPC</i>	<i>Statistical Process Control</i>
<i>SSI-Cov</i>	<i>Covariance-driven Stochastic Subspace Identification</i>
<i>UCL</i>	<i>Upper Control Limit</i>
<i>WES</i>	<i>Waterways Experiment Station</i>
<i>°C</i>	Graus Celcius

$\%$		Porcentagem
$f(k, g)$		Frequência natural original do modo g no instante k
hm^3		Hectómetro cúbico
km		Quilómetro
kN		Quilo-Newton
m		Metros
m^3		Metro cúbicos
mm		Milímetros
p		Número de modos de vibração considerados
r		Número de observações consecutivas agrupadas
R^2		Coefficiente de determinação
S		Matriz de covariância de dimensão $p * p$
S^{-1}		Inversa de S
T^2		Estatística multivariada da <i>Hotelling</i>
ton		Toneladas
β_i		Coefficiente da regressão linear
$\bar{x}_m$		Vetor da média amostral do bloco m de dimensão $p * 1$
μ		Vetor de média de referência, com dimensão $p * 1$
$\Delta f(g)$		Variação percentual associada ao modo de vibração g
E	$[GPa]$	Módulo de elasticidade
f_i	$[Hz]$	Frequência natural
H_i	$[m]$	Altura da água na albufeira
H_i^2	$[m^2]$	Quadrado da altura da água na albufeira
k	$[kN/m]$	Rigidez
m	$[ton]$	Massa
Pp	$[kN]$	Peso Próprio
T_i	$[^{\circ}C]$	Temperatura medida num ponto do corpo da barragem
V	$[m^3]$	Volume

ε_i	$[Hz]$	Resíduos
Δt	$[s]$	Variação do tempo
γ	$[kN/m^3]$	Peso Específico
γ_c	$[kN/m^3]$	Peso Específico do betão

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

As barragens de betão constituem infraestruturas críticas cujo papel no desenvolvimento das sociedades é inegável, desempenhando funções essenciais ao nível da produção de energia hidroelétrica, do abastecimento público, do controlo de cheias e da irrigação. Dado o elevado potencial de risco associado a eventuais falhas estruturais, a garantia da sua segurança ao longo de toda a vida útil constitui uma prioridade da engenharia de barragens.

O controlo de segurança destas estruturas inclui a exploração de sistemas de monitorização baseados na medição de grandezas como deslocamentos e temperaturas, complementados mais recentemente por sistemas de monitorização dinâmica contínua. Neste contexto, a monitorização dinâmica contínua tem vindo a afirmar-se como uma abordagem complementar de grande potencial, permitindo a identificação automática e contínua das propriedades modais da estrutura, como frequências naturais. As frequências naturais, em particular, são sensíveis a alterações das propriedades mecânicas da estrutura e constituem, por isso, indicadores promissores para a deteção precoce de anomalias estruturais. No entanto, são também significativamente influenciadas por fatores ambientais e operacionais, que introduzem variações de magnitude superior às esperadas em resultado de danos de pequena intensidade, tornando indispensável a remoção desses efeitos antes de qualquer tentativa de deteção de anomalias.

Para tal, recorre-se a modelos de previsão do comportamento estrutural que relacionam as frequências naturais com as variáveis ambientais, como o nível de água da albufeira, e a temperatura ambiente, permitindo obter resíduos livres desses efeitos. Neste contexto, os resíduos resultam da diferença entre o valor observado e o valor previsto pelo modelo de previsão, e refletem a parte não explicada da grandeza em análise. Estes resíduos são posteriormente utilizados para a construção de cartas de controlo T^2 de *Hotelling*, que permitem identificar automaticamente desvios face ao comportamento de referência e sinalizar a possível ocorrência de dano estrutural.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de deteção de anomalias estruturais em barragens de betão, com base em dados de monitorização dinâmica contínua.

Para tal, pretende-se em primeiro lugar analisar a influência das variáveis ambientais e operacionais sobre as frequências naturais identificadas pelo sistema de monitorização, nomeadamente o nível de água na albufeira e a temperatura do ar. Com base nessa caracterização, desenvolve-se e ajusta-se um modelo de regressão linear múltipla, seguindo uma abordagem HTT (*Hydrostatic-Thermal-Time*), com o objetivo de remover os efeitos ambientais e operacionais das frequências naturais, obtendo resíduos sensíveis à presença de anomalias estruturais.

Com esses resíduos, constrói-se uma carta de controlo T^2 de *Hotelling*, avaliando a sua estabilidade em condições saudáveis e a sua capacidade de detetar variações de frequência associadas à ocorrência de dano. O desempenho do sistema é avaliado para diferentes agrupamentos de observações e diferentes intensidades de dano simulado, quantificando a percentagem de pontos acima do limite de controlo superior estabelecido e a mediana de T^2 em cada período temporal considerado, com o intuito de identificar a configuração mais adequada para a deteção precoce de anomalias estruturais.

Este trabalho foi desenvolvido com recurso ao *software Matlab* (The MathWorks Inc. 2025).

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos, cujo conteúdo se descreve sumariamente de seguida.

O primeiro capítulo corresponde à introdução, onde se apresenta o enquadramento do tema, os objetivos do trabalho e a estrutura da dissertação.

O capítulo segundo é dedicado ao controlo de segurança de barragens de betão. Começa por contextualizar a importância das barragens na sociedade e o enquadramento regulamentar em Portugal, nomeadamente o Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) e o Regulamento de Pequenas Barragens (RPB). São apresentados os três pilares do controlo de segurança, seguidos de uma descrição das tipologias de barragens de betão e das principais ações a que estão sujeitas. São ainda descritos os métodos e equipamentos de observação do comportamento estrutural, bem como os erros de medição associados. Por fim, é feita a apresentação da metodologia proposta para a deteção de anomalias, dos modelos de previsão do comportamento estrutural e das cartas de controlo T^2 de *Hotelling*.

O terceiro capítulo apresenta o caso de estudo, a barragem do Baixo Sabor, onde é descrita a estrutura e o sistema de monitorização dinâmica contínua instalado. São caracterizadas as frequências naturais dos modos de vibração e analisada a sua relação com as variáveis ambientais que condicionam o comportamento dinâmico da barragem. É, também, apresentado o modelo de regressão linear múltipla HTT ajustado para a remoção desses efeitos, avaliada a sua qualidade através do coeficiente de determinação R^2 , e apresentados os resíduos obtidos e os respetivos histogramas, que validam a adequação do modelo adotado.

O capítulo quarto é dedicado à deteção de anomalias. São primeiro apresentados os cenários base, que permitem avaliar a estabilidade do modelo em condições saudáveis. De seguida, descreve-se a metodologia de simulação de dano e apresentam-se as variações de frequência associadas ao cenário considerado para quatro intensidades crescentes. Por fim, é avaliado o desempenho do sistema de deteção para vários agrupamentos de observações, analisando a percentagem de pontos acima do limite estabelecido e a mediana de T^2 para diferentes intensidades de dano.

Finalmente, no quinto capítulo, apresentam-se as considerações finais do trabalho, incluindo as principais conclusões retiradas e sugestões para trabalhos futuros.

2

CONTROLO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE BETÃO

2.1 INTRODUÇÃO

As barragens constituem, desde o início da civilização, um dos feitos mais importantes da Engenharia, e desempenham um papel fulcral no desenvolvimento das sociedades. Estas estruturas têm como principal função a retenção e regularização de volumes de água, que pode mais tarde ser utilizada para vários fins: abastecimento público, produção de energia elétrica, controlo de cheias, irrigação e recreação, entre outras (Tata & Howard 2026).

A barragem mais antiga de que se tem registo será a barragem de *Jawa*, na Jordânia, construída há cerca de 5000 anos. Era uma barragem de gravidade construída em pedra de basalto com um núcleo reforçado com argila e cinzas, cuja principal finalidade seria captar e armazenar água de cheias sazonais e garantir o abastecimento de água às populações durante os períodos de seca (Šafarek 2018).

Existem em Portugal cerca de 260 grandes barragens definidas de acordo com o Regulamento de Segurança de Barragens (RSB 2018) em vigor, representadas na Figura 2.1. Estas são barragens com uma altura superior a 15 metros ou uma altura entre 10 e 15 metros, com volume de armazenamento igual ou superior a 1 hm³ (APA 2021a).

A distribuição geográfica das barragens no território nacional reflete as necessidades de utilização da água e a irregular disponibilidade hídrica, tanto no espaço como ao longo das estações do ano, condicionada pelas características geográficas, climáticas e fisiográficas do país. No Norte, onde os recursos hídricos são mais abundantes e regulares, predominam os aproveitamentos hidroelétricos orientados para a produção de energia. Nas regiões de maior irregularidade hídrica, nomeadamente no Sul e no interior do país, a utilização das albufeiras destina-se essencialmente à rega e ao abastecimento público (APA 2021a).

O controlo de segurança de barragens constitui um conjunto de atividades sistemáticas de observação, medição e análise do comportamento estrutural, com o objetivo de garantir que a estrutura se mantém dentro dos limites de segurança estabelecidos ao longo de toda a sua vida útil. Este controlo assume particular importância dado o carácter crítico destas infraestruturas e as consequências potencialmente graves associadas a eventuais falhas, que podem incluir perdas humanas, danos ambientais e prejuízos económicos de grande magnitude. A observação do comportamento das barragens é realizada através de sistemas de monitorização que registam continuamente um conjunto de grandezas físicas relevantes, permitindo acompanhar a evolução do estado da estrutura ao longo do tempo e detetar precocemente quaisquer anomalias.

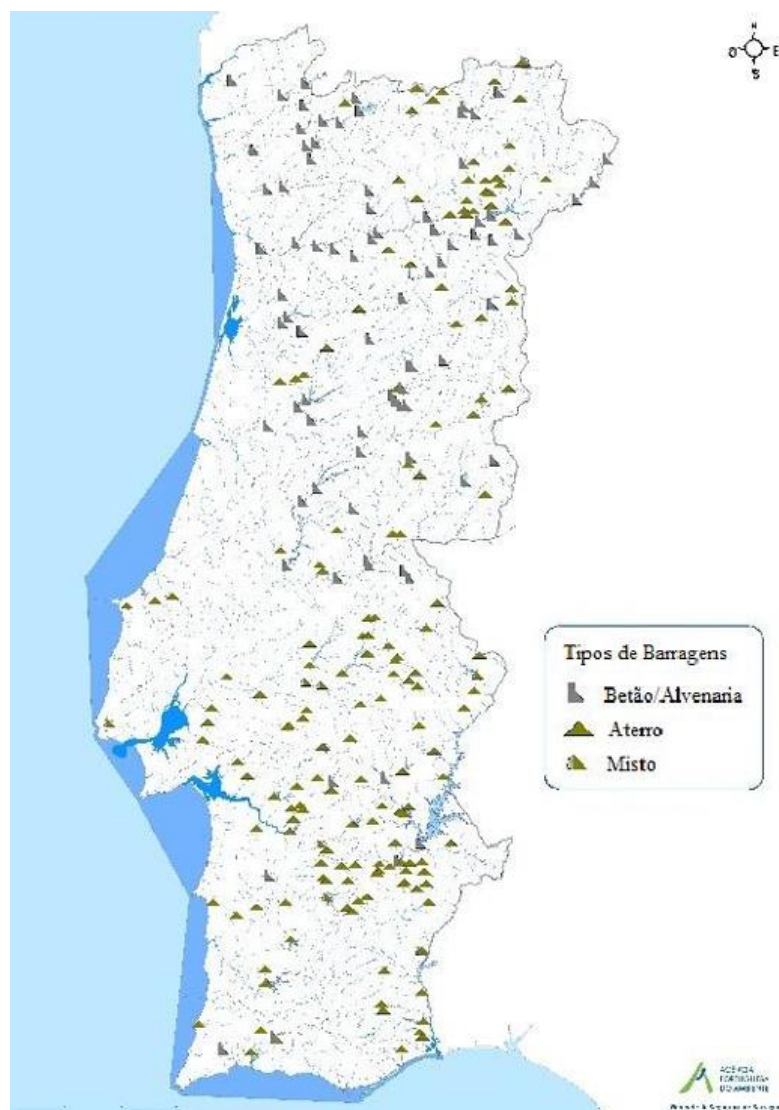


Figura 2.1 - Barragens em Portugal Continental (APA 2021a).

2.2 CONTROLO DE SEGURANÇA

Em Portugal, o controlo de segurança das barragens ao longo de toda a sua vida útil é regulado pelo Regulamento de Segurança de Barragens (RSB), aplicável às grandes barragens, e pelo Regulamento de Pequenas Barragens (RPB), destinado às estruturas de menor dimensão, ambos publicados em anexo ao Decreto-Lei n.º 21/2018, de 28 de março. De acordo com o Regulamento de Segurança de Barragens, as barragens classificam-se em dois grupos. As grandes barragens englobam as estruturas com altura igual ou superior a 15 metros, medida desde o ponto mais baixo da superfície de fundação até ao coroamento, bem como as barragens com altura igual ou superior a 10 metros cuja albufeira apresente uma capacidade de armazenamento superior a 1 hm³ (APA 2021a). As pequenas barragens correspondem às estruturas com altura inferior a 15 metros que não se enquadrem no grupo anterior, mas cuja albufeira possua uma capacidade superior a 100 000 m³ (APA et al. 2018).

A Figura 2.2 apresenta um esquema da legislação e enquadramento normativo nacional no âmbito da segurança de barragens.



Figura 2.2 - Legislação e enquadramento normativo nacional no âmbito da segurança de barragens (APA 2021b).

As atividades de controlo de segurança de barragens assentam em três pilares fundamentais que, de forma complementar e integrada, permitem garantir a segurança da estrutura ao longo de toda a sua vida útil: a segurança estrutural, a segurança ambiental, e a segurança operacional e hidráulica (Figura 2.3).

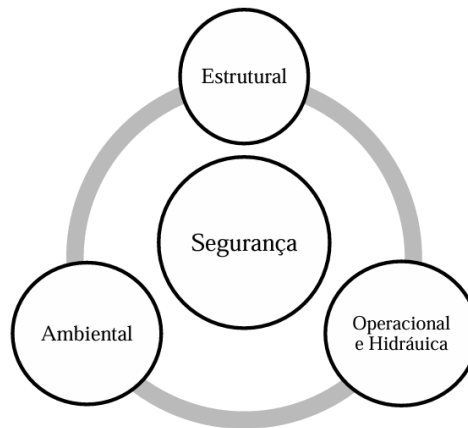


Figura 2.3 - Componentes de segurança em barragens (Silva 2022).

A segurança estrutural, tema abordado neste trabalho, traduz-se na capacidade da obra em satisfazer as exigências de comportamento ao longo de toda a sua vida útil, prevenindo a ocorrência de acidentes e incidentes. A sua verificação é efetuada para os principais cenários de análise, correntes e de rotura, que possam ocorrer ou cujo desenvolvimento se observe durante o período de exploração da estrutura (Mata 2007).

A segurança ambiental assume particular relevância na proteção do meio natural e das comunidades vizinhas. Entre os principais aspetos a considerar destacam-se o impacto ecológico da barragem sobre os ecossistemas aquáticos, a flora e a fauna, nomeadamente no que diz respeito às alterações de habitat, à qualidade da água e à biodiversidade, bem como a correta gestão dos materiais de construção e dos resíduos gerados durante a operação da obra. A conformidade com a legislação ambiental em vigor e a obtenção das licenças necessárias constituem igualmente requisitos fundamentais a assegurar desde a fase de projeto e ao longo de toda a vida útil da estrutura (Sejas 2024).

Por fim, a segurança hidráulica e operacional, que depende da gestão eficiente da barragem, assegurando o correto funcionamento dos órgãos de descarga e a adequada resposta a variações de caudal. Para tal, são fundamentais a realização de inspeções regulares, a manutenção preventiva dos equipamentos e a utilização de sistemas de monitorização que permitam a deteção atempada de eventuais anomalias. A implementação de planos de emergência e de sistemas de aviso à população constitui igualmente um requisito de elevada importância, garantindo uma resposta eficaz em situações de ocorrência excecional (Barbosa 2025; Oliveira 2000).

A articulação entre estes três domínios, suportada por sistemas de observação e monitorização contínua, por modelos de análise e interpretação do comportamento estrutural e por inspeções visuais periódicas, constitui a base de um controlo de segurança eficaz e abrangente.

2.3 BARRAGENS DE BETÃO

As barragens de betão são estruturas com uma elevada resistência mecânica e rigidez, permitindo a construção de estruturas de grande altura e capacidade de armazenamento. Do ponto de vista estrutural, as barragens de betão podem ser divididas em barragens de gravidade, barragens de contraforte, e barragens em arco.

As barragens de gravidade (Figura 2.4) foram o primeiro tipo de barragens de betão a serem construídas. Este tipo de barragem resiste à pressão hidrostática através do seu peso próprio, ou seja, o impulso exercido pela água no paramento de montante é equilibrado pelo atrito mobilizado pelo peso da estrutura, sendo o esforço resultante transmitido diretamente à fundação (Cardoso 2013).



Figura 2.4 - Barragem *Grande-Dixence* – Barragem de gravidade (Switzerland Tourism 2026).

Mais tarde, construíram-se as barragens de contraforte (Figura 2.5). Este tipo de barragem apresenta, geralmente, uma laje de betão com inclinação para montante, responsável pela impermeabilização e pela transmissão das ações aos contrafortes. Trata-se de uma barragem do tipo gravidade aligeirada, cuja estabilidade face à ação da massa de água sobre o paramento de montante é assegurada pela mobilização do seu peso próprio e pela existência dos contrafortes. A utilização de contrafortes como elementos transversais à secção contribui para a redução do volume de betão, para a dissipação do calor de hidratação e para a diminuição das subpressões na base (Jesus 2011).



Figura 2.5 - Barragem *Daniel-Johnson* – Barragem de contraforte (Hydro-Québec 1996).

Por fim, surgiram as barragens em arco. Este tipo de barragens constituem a tipologia mais recente e podem ser subdivididas em dois grupos: as barragens de arco-gravidade e as barragens abóbada. Esta distinção relaciona-se essencialmente com a curvatura da estrutura. Enquanto as barragens de arco-gravidade apresentam apenas curvatura em planta, as barragens abóbada apresentam dupla curvatura, tanto em planta como em alçado. Comparativamente com as restantes tipologias, as barragens em arco requerem um menor volume de betão, o que as torna economicamente mais vantajosas em determinadas condições. A adequabilidade desta solução depende das características geotécnicas e topográficas do local de implantação, bem como das condições climáticas e hidrológicas da bacia hidrográfica (Cardoso 2013). A Figura 2.9 apresenta a barragem do Alto Lindoso, uma barragem em arco-abóbada.



Figura 2.6 - Barragem do Alto Lindoso – Barragem em abóbada (EDP 2024).

2.4 PRINCIPAIS AÇÕES

As barragens de betão estão sujeitas a várias ações em simultâneo, quer estáticas, quer dinâmicas. Destas ações, destacam-se o peso próprio, a temperatura, e a pressão hidrostática.

2.4.1 Peso Próprio

A ação do peso próprio é atribuída à gravidade, e a sua quantificação é determinada pelo peso específico dos materiais que constituem a estrutura. No caso das barragens de betão, o peso específico pode variar entre $\gamma_c=23$ a 25 kN/m^3 , consoante o tipo de agregado (Chen 2015).

O peso próprio da estrutura pode ser calculado através do produto entre o peso específico do material e o volume usado desse mesmo material ((2.1)).

$$Pp = \gamma * V \quad (2.1)$$

Onde:

- Pp representa o peso próprio da estrutura [kN]
- γ representa o peso específico do material [kN/m^3]
- V representa o volume do material [m^3]

2.4.2 Temperatura

As barragens estão em funcionamento sob temperatura ambiente em condições variáveis ao longo do tempo. Logo, serão introduzidas tensões no betão, provocadas pela sua expansão e retração, devido a deformações impostas resultantes das alterações de temperatura do material. As variações de temperatura são também denominadas de “ações térmicas”, uma vez que, indiretamente, provocam deformações e tensões nas estruturas de betão.

O efeito das ações térmicas varia consoante o tipo de estrutura, propriedades dos materiais, processo construtivo, incluindo processos de aquecimento ou arrefecimento artificiais, trocas térmicas entre a estrutura e a fundação, e variações da temperatura ambiente, quer durante o processo de construção, quer durante o período operacional. Ações térmicas são, geralmente, dependentes do espaço e do tempo (Chen 2015).

Os valores da temperatura do ar podem ser medidos através de termómetros, instalados em locais representativos das condições ambientais em obra, e devidamente protegidos da ação direta dos raios solares (Figura 2.7). As temperaturas no interior do corpo da barragem são usualmente obtidas através de instrumentos de resistência elétrica embebidos no betão da obra, nomeadamente por termómetros de resistência elétrica (Mata 2007).



Estação meteorológica.



Termómetro de máxima e mínima.

Figura 2.7 - Estação meteorológica (Mata 2007) e termómetro de máxima e mínima (Moura 2005).

2.4.3 Pressão Hidrostática

A ação da água relativamente à pressão hidrostática é avaliada através da medição periódica do nível da água na albufeira e, quando necessário, da medição do nível da água a jusante. Esta medição pode ser feita através de escalas limnimétricas localizadas na albufeira (Figura 2.8). Atualmente são comuns sistemas de recolha automática que permitem a medição remota do nível da água nas albufeiras (Mata 2007).

O impacto da água na segurança estrutural é significativo, podendo levar a efeitos mecânicos ou químicos, tais como as pressões hidrostáticas nas faces da barragem, pressões internas nas fissuras do betão da barragem e nas superfícies de descontinuidade nos maciços de fundação, forças devidas à percolação de água na fundação da barragem, alterações químicas dos materiais na fundação, erosão de materiais e dispositivos no interior da barragem, e deterioração mecânica do maciço rochoso devido à percolação de água através de descontinuidades (Sejas 2024).



Figura 2.8 - Escala limnimétrica (Mata 2007).

2.5 OBSERVAÇÃO DO COMPORTAMENTO

A observação do comportamento estrutural de uma barragem constitui uma componente essencial do seu controlo de segurança, tendo como objetivo acompanhar a evolução do estado da estrutura ao longo do tempo e detetar eventuais anomalias de forma atempada.

O comportamento estrutural de cada barragem é único de obra para obra, uma vez que as características do sistema albufeira-barragem-fundação são próprias da estrutura. Os materiais que constituem a obra são especificados em caderno de encargo tendo em conta o meio em que se insere e as exigências a que a estrutura estará sujeita. A fundação tem também particularidades, quer seja um maciço mais ou menos heterogéneo quer seja nas condições geológicas que o compõem (Silva 2022).

As barragens de betão estão sujeitas a um conjunto de ações permanentes e variáveis que provocam respostas estruturais. As respostas estruturais normalmente observadas nas barragens são deslocamentos, movimentos de juntas, tensões e extensões no betão, caudais drenados e infiltrados, e acelerações (Mendes 2023).

2.5.1 Deslocamentos

Os deslocamentos tanto podem ser caracterizados pelas suas componentes horizontal e vertical. O deslocamento, absoluto ou relativo, é normalmente determinado em pontos que representam o comportamento da barragem e da fundação, através de fios de prumos, métodos geodésicos, e extensómetros de fundação (Mata 2007).

Os deslocamentos horizontais são medidos através de fios de prumo (Figura 2.9) e métodos geodésicos. Os métodos geodésicos são utilizados para complementar a medição dos deslocamentos obtidos através dos fios de prumo.

Em relação à aplicação em barragens de betão, os sistemas de observação geodésicos são compostos por dois sistemas independentes, planimétrico para a medição de deslocamentos horizontais e altimétrico para a medição de deslocamentos verticais (Mendes 2023).

Os métodos mais utilizados para a medição de deslocamentos horizontais são os de triangulação. A rede de triangulação exterior é composta por vértices, em pilares com uma fundação adequada nas encostas. Estes vértices vão servir como locais onde são realizadas as observações, e por alvos de pontaria colocados ao longo da superfície do paramento e no maciço de fundação. Para a medição, os peritos fazem a observação da rede com recurso à topografia de precisão, e com base no princípio da triangulação obtêm-se os resultados que são ajustados, validados e transformados em deslocamentos (Silva 2022).

A utilização de fios de prumo para a medição de deslocamentos horizontais é comum na maioria das grandes barragens de betão. Os fios de prumo tanto podem ser direitos, como invertidos, e são colocados em furos verticais no corpo da barragem. Os fios de prumo direitos são materializados por cabos de aço fixos a uma cota elevada da estrutura, com um peso na extremidade inferior que mantém o cabo esticado. Uma vez que o ponto de fixação se encontra no topo, os deslocamentos medidos ao longo do cabo são relativos entre esse ponto fixo e o local de medição. Os fios de prumo invertidos funcionam segundo um princípio semelhante, mas com o mecanismo invertido. O ponto de fixação está situado na fundação e o cabo é mantido tensionado (“esticado”) por meio de um flutuador imerso num reservatório com água instalado no topo da estrutura. Uma vez que o ponto de ancoragem se encontra a uma profundidade suficiente para que o seu deslocamento seja considerado nulo, os deslocamentos medidos ao longo dos fios de prumo invertidos são considerados absolutos (Rebelo 2020).

As medições podem ser feitas manualmente, com coordenómetros óticos. Contudo, a implementação de sistemas automáticos de recolha de dados é cada vez mais comum em grandes barragens, e permitem um registo contínuo dos deslocamentos, com a frequência desejada (Barbosa 2025).



Figura 2.9 - Vista da base de coordenómetro do fio de prumo (LNEC 2025).

Os extensómetros de fundação (Figura 2.10) são utilizados para medir os deslocamentos da fundação, e são constituídos por uma vara instalada num furo na fundação (Mata 2007). A medição é efetuada com recurso a um defletómetro, que mede o deslocamento relativo entre a cabeça da vara e um ponto fixo na barragem (normalmente situado na galeria geral de drenagem). A medição de deslocamentos horizontais na fundação é usualmente conseguida através de fios de prumos invertidos ou através de inclinómetros (Barbosa 2025).



Figura 2.10 - Cabeça de extensómetro de fundação (Mata 2007).

2.5.2 Movimentos de juntas

A medição de dos movimentos de juntas pode ser feito com recurso a bases de alongâmetro (Figura 2.11), instaladas nas galerias, no coroamento da barragem e, em alguns casos, no paramento de jusante. Estas bases formam um triângulo equilátero com o qual se conseguem determinar os deslocamentos relativos entre os vértices, através do estabelecimento de relações geométricas (Silva 2022).



Figura 2.11 - Bases de alongâmetro no paramento do vazamento da barragem da Bemposta (Rebelo 2020).

As bases tridimensionais, que permitem a leitura da abertura e do fecho de juntas, e o seu deslocamento relativo vertical e horizontal têm sido soluções cada vez mais adotadas, em detrimento das bases de alongâmetro, já que permitem a medição dos movimentos relativos nas três direções e o processo de medição é mais simples (Mata 2007).

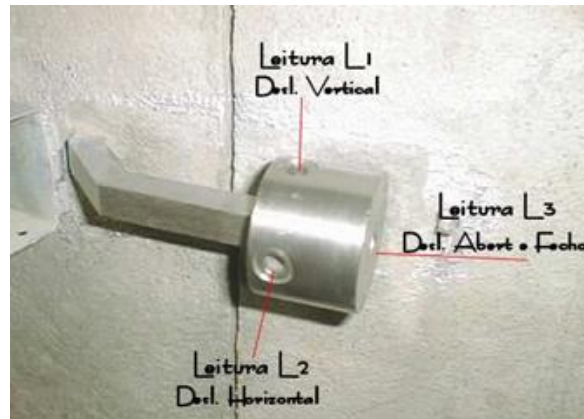


Figura 2.12 - Base tridimensional (Mata 2007).

2.5.3 Tensões e extensões no betão

As extensões podem ser medidas em extensómetros embebidos no corpo da barragem. Na maior parte das barragens em Portugal os extensómetros adotados são os extensómetros de resistência elétrica tipo *Carlson* (Figura 2.13), sendo que já foram adotados extensómetros de corda-vibrante, nomeadamente na barragem do Alto Tâmega. Estes aparelhos obtêm informação sobre o estado de deformação do betão em pontos no interior da estrutura. (Mendes 2023).

A determinação do estado de tensão é feita, normalmente, de forma indireta, também com a utilização de extensómetros de resistência elétrica ou de corda vibrante embebidos durante a construção. A conversão em tensões é feita a partir do conhecimento das características de deformabilidade do betão crivado que envolve estes instrumentos (Mata 2007).



Figura 2.13 - Grupo de extensómetros de resistência elétrica (Mendes 2023).

2.5.4 Caudais

A monitorização dos caudais drenados é efetuada, o nível individual de cada dreno (Figura 2.14) e de forma integrada através de bicas totalizadoras (Figura 2.15) estrategicamente distribuídas, permitem quantificar os caudais drenados e infiltrados por zonas, bem como caracterizar o respetivo comportamento hidromecânico (Barbosa 2025).

A medição do caudal debitado por um dreno é efetuada de forma indireta medindo o tempo que um determinado reservatório de volume conhecido demora a ser cheio (Mata 2007).

As bicas totalizadoras destinam-se a coletar os caudais medidos numa série de drenos, e têm por objetivo o conhecimento dos caudais drenados e infiltrados por zonas da fundação e dos caudais infiltrados no corpo da barragem (Moura 2005).

A monitorização dos caudais drenados permite a identificação precoce de potenciais anomalias, nomeadamente o desenvolvimento de fissuras ou a degradação da estanquidade das juntas e da cortina de impermeabilização, cujo agravamento progressivo pode comprometer a segurança estrutural da barragem a longo prazo.



Figura 2.14 - Terminal de um dreno (Moura 2005).



Figura 2.15 - Bica totalizadora com medidor (Mata 2007).

2.5.5 Ações Dinâmicas

As ações dinâmicas nas barragens são provocadas pelas condições ambientais envolventes, nomeadamente sismos e pequenos sismos induzidos pelo peso da albufeira, ação do vento e tráfego rodoviário nas proximidades ou no coroamento da barragem, bem como pelo funcionamento normal das centrais hidroelétricas associadas à albufeira (Pereira 2019).

Embora não se tenham registado acidentes associados a este tipo de solicitações, os sistemas de monitorização baseados em vibrações têm vindo a ser crescentemente implementados, por exemplo, nas barragens de Cabril (Mendes 2010) e de Foz Tua (Pereira et al. 2021a), com o objetivo de caracterizar a evolução do comportamento dinâmico da barragem ao longo do tempo e de identificar alterações decorrentes da degradação estrutural (Mendes 2023).

Os sistemas de monitorização dinâmica contínua instalados em Portugal são compostos por acelerómetros uniaxiais (Figura 2.16) dispostos na horizontal ao longo das galerias da barragem permitindo o registo de séries temporais de acelerações e posterior caracterização de níveis de vibração e de parâmetros modais como as frequências naturais, razões de amortecimento e formas modais (Mendes 2023).

Adicionalmente, de acordo com a regulação portuguesa é necessária a instalação de um Sistema de Monitorização Sísmica (SMS) para monitorizar a resposta dinâmica da estrutura durante eventos sísmicos. Consequentemente, este tipo de sistema tem sido instalado em barragens recentes. Para o efeito, são utilizados sistemas ativos, que se encontram permanentemente operacionais para garantir a medição e o registo da resposta da estrutura durante sismos. Adicionalmente, estes sistemas facilitam a caracterização rigorosa da ação dinâmica aplicada à barragem e, quando considerado útil, a propagação no solo ao longo da albufeira (Gomes et al. 2025).



Figura 2.16 - Acelerómetro uniaxial com cabo (Pereira 2019).

2.6 ERROS DE MEDIÇÃO

Na monitorização de estruturas, as medições obtidas pelos instrumentos de observação estão inevitavelmente sujeitas a erros e imprecisões, independentemente do rigor com que os procedimentos de recolha de dados são conduzidos. Estes erros podem ter origem em diversas fontes, nomeadamente falhas nos próprios sensores, condições ambientais adversas, ou até erros de calibração dos equipamentos. Os erros de medição obtêm-se através da diferença entre o valor real e o valor medido.

De maneira a minimizar esses erros, estabelecem-se procedimentos adequados de recolha de dados, por repetição, por verificação, ou por aplicação de relações entre quantidades observáveis diferentes, calibrações periódicas e conservação adequada dos instrumentos (Mata 2007).

A Tabela 2.1 apresenta as principais grandezas medidas e os equipamentos utilizados para medir as mesmas bem como a incerteza associada a cada um deles.

Tabela 2.1 - Grandezas medidas, equipamentos utilizados, e incerteza associada a cada equipamento, adaptado de (Silva 2022).

Grandeza	Equipamento de medição	Incerteza
Nível da água	Medidor de nível	$\pm 0,01$ m
Altura de sedimentação	Medidor de profundidade da água	$\pm (0,2 \text{ a } 0,5)$ m
Temperatura do ar e água	Termómetros	$\pm 0,15$ °C
	Termómetros de máxima e mínima	$\pm 0,5$ °C
Temperatura do betão	Termómetro de resistência	$\pm 0,15$ °C
Pluviosidade	Pluviómetro	± 10 %
Deslocamento horizontal	Fio de prumo	$\pm 0,2$ mm
Deslocamento vertical	Nivelamento	$\pm 0,5$ mm/km
Deslocamento das fundações	Extensómetros de varas	$\pm 0,01$ mm
Movimentos em juntas e fissuras	Base de alongâmetro	$\pm 0,02$ mm
	Base tridimensional	$\pm 0,01$ mm
Caudal	Dreno	Variável, normalmente inferior a 5%
	Bica totalizadora	
Subpressão	Piezómetro	Normalmente $\pm 0,1$ bar
Atividade sísmica	Sismógrafo	$\Delta t \leq 0,005$ segundos

2.7 METODOLOGIA PROPOSTA PARA A DETEÇÃO DE ANOMALIAS

A metodologia adotada no presente trabalho para a deteção de anomalias estruturais baseia-se na análise das frequências naturais identificadas pelo sistema de monitorização dinâmica contínua. O procedimento, apresentado no fluxograma da Figura 2.17, consiste em três etapas principais.

Em primeiro lugar, as frequências naturais medidas são relacionadas com as principais variáveis ambientais e operacionais que condicionam o comportamento dinâmico da barragem, nomeadamente o nível de água na albufeira e a temperatura do ar, através de um modelo de previsão (modelo HTT, apresentado em 2.8). Este modelo, ajustado com dados do período de referência em estado saudável, permite estimar a resposta estrutural esperada em função das condições ambientais registadas em cada instante.

De seguida, os resíduos são calculados como a diferença entre as frequências naturais medidas e as frequências previstas pelo modelo. Estes resíduos representam a componente da resposta estrutural não explicada pelas variáveis ambientais e operacionais consideradas, constituindo um indicador mais sensível à presença de anomalias estruturais do que as frequências naturais originais.

Por fim, numa terceira etapa, os resíduos são submetidos a uma ferramenta de controlo estatístico, a carta de controlo T^2 de *Hotelling* (apresentadas em 2.9), que permite avaliar se o comportamento da estrutura se mantém dentro dos limites considerados normais, ou se apresenta desvios que possam indiciar a ocorrência de dano estrutural.

Nas secções seguintes descrevem-se em detalhe os modelos de previsão e as cartas de controlo utilizados, apresentando os fundamentos teóricos que suportam a metodologia adotada.

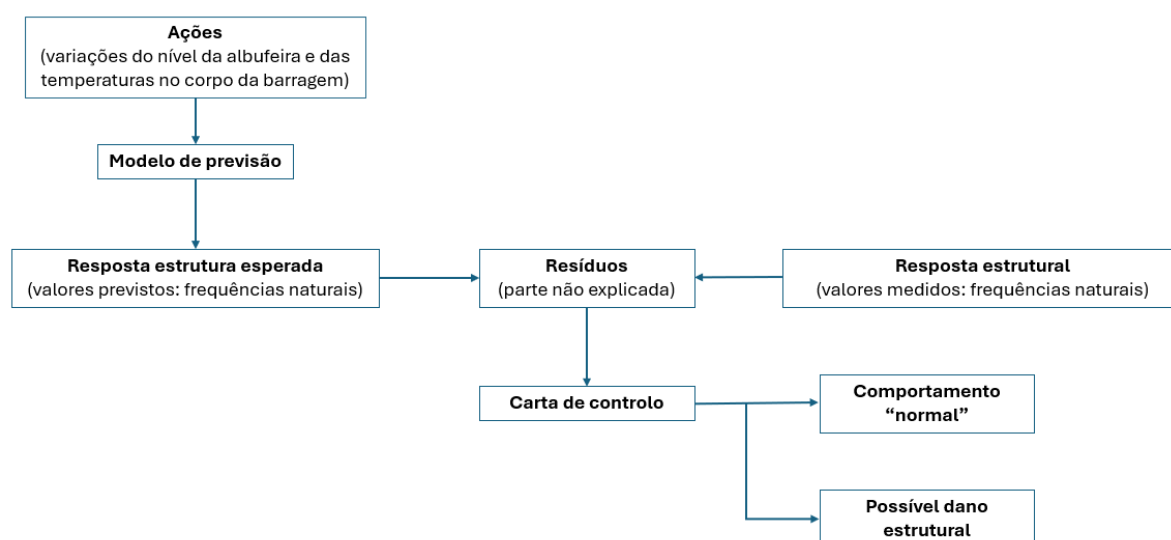


Figura 2.17 - Fluxograma da metodologia proposta para a deteção de anomalias estruturais.

2.8 MODELOS DE PREVISÃO DO COMPORTAMENTO OBSERVADO

Os modelos de previsão e de caracterização do comportamento observados constituem um elemento central das atividades de controlo de segurança estrutural baseada em monitorização contínua, desempenhando o papel de identificar padrões entre os dados de monitorização da resposta estrutura e nos efeitos das variáveis ambientais e operacionais. A sua função, no âmbito desta tese, consiste em estimar o valor esperado das frequências naturais em função das condições ambientais medidas em cada instante, permitindo quantificar e separar a componente de variação da frequência natural associada ao efeito térmico da componente associada ao efeito resultante das variações do nível da albufeira. No presente trabalho, o modelo de previsão adotado é um modelo de regressão linear múltipla que segue a estrutura do modelo HTT (*Hydrostatic-Thermal-Time*), amplamente utilizado na monitorização de barragens de betão (Pereira et al. 2021b). Para cada modo de vibração, o modelo estima a frequência natural prevista f como uma combinação linear das variáveis preditoras seleccionadas, Equação (2.2):

$$f_i = \beta_0 + \beta_1 H_i + \beta_2 H_i^2 + \beta_3 T_i + \varepsilon_i \quad (2.2)$$

Em que H_i representa a altura da água na albufeira na época i ; T_i é a temperatura medida num ponto do corpo da barragem (podem ser considerados valores medidos em vários pontos do corpo da barragem) ou em alternativa, valores “suavizados” da temperatura do ar; e ε_i representa a parte não explicada pelo modelo – também designado por resíduos (Mata 2007).

Os coeficientes β são estimados pelo método dos mínimos quadrados, minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre as frequências observadas e as frequências previstas no período de treino (Mata 2007). No âmbito deste trabalho, o período de treino corresponde aos primeiros dois anos de monitorização (dezembro de 2015 a dezembro de 2017), e é utilizado exclusivamente para o ajuste do modelo, garantindo que os parâmetros estimados caracterizam o comportamento da estrutura em estado saudável.

A qualidade do modelo de previsão é avaliada através do coeficiente de determinação R^2 e do desvio padrão dos resíduos, calculados tanto no período de treino como no período de validação. Um valor de R^2 próximo de 1 indica que o modelo explica uma grande parte da variabilidade das frequências naturais. O desvio padrão dos resíduos, por sua vez, quantifica a dispersão dos resíduos em torno de zero. Quanto menor o seu valor, maior a precisão do modelo e menor a variabilidade dos resíduos que entram na carta de controlo, que utilizaremos para a identificação das alterações no padrão de comportamento que podem ser relacionadas a novidades ou danos estruturais. Assim, é ainda importante referir que o modelo de previsão assume implicitamente que a relação entre as variáveis ambientais e as frequências naturais se mantém estável ao longo do tempo. A adequação desta hipótese pode ser avaliada através do comportamento da carta de controlo no período de validação — se a percentagem de pontos acima do limite de controlo superior (UCL, do inglês *Upper Control Limit*, abordado em 2.9) for próxima dos valores esperados em condições representativas do comportamento normal (com base no comportamento passado da estrutura), pode-se assumir que o modelo generaliza bem para além do período de treino.

2.9 CARTAS DE CONTROLO DE *HOTELLING* T^2

Uma carta de controlo é uma das principais técnicas do controlo estatístico de processos (SPC, *Statistical Process Control*), que representa graficamente a evolução de uma característica de qualidade ao longo do tempo. A carta inclui tipicamente limites de controlo, calculados com base em considerações estatísticas, que definem a região de variação considerada aceitável (Montgomery 2009).

No presente trabalho, a carta de controlo é aplicada aos resíduos do modelo de previsão, sendo definido um limite de controlo superior, calculado com base no percentil 95 dos valores de T^2 obtidos no período de treino. Pontos que excedam este limite são interpretados como potenciais indicadores de comportamento anómalo e possível dano estrutural.

O T^2 de *Hotelling* é uma estatística multivariada que generaliza o teste t de *Student* para o caso em que se analisam simultaneamente várias variáveis correlacionadas (Johnson et al. 2007).

Os valores da estatística T^2 de *Hotelling* são calculados através da equação (2.3).

$$T_m^2 = r * (\bar{x}_m - \mu)' * S^{-1} * (\bar{x}_m - \mu) \quad (2.3)$$

Nesta equação, r representa a dimensão amostral, ou seja, o número de observações consecutivas no bloco m . Neste trabalho, foram utilizados valores de r igual a 6, 12, 24, 48, e 96 observações (as observações foram realizadas com uma frequência de amostragem de 30 minutos, produzindo 48 registos por dia); $\bar{x}_m$ representa o vetor da média amostral do bloco m , de dimensão $p * 1$, sendo p o número de modos de vibração considerados; μ representa o vetor de média de referência, com dimensão $p * 1$, calculado com base nos blocos do período de treino; e S representa a matriz de covariância, de dimensão $p * p$, e simétrica. S^{-1} representa a inversa da matriz S , e pondera as diferenças entre $\bar{x}_m$ e μ , tendo em conta a variabilidade e as correlações entre os modos de vibração considerados (Johnson et al. 2007). A matriz de covariância é fundamental porque estabelece as correlações entre os resíduos dos diferentes modos. Se dois modos estão fortemente correlacionados e os valores de ambos aumentam em simultâneo devido a uma variação ambiental não removida, o T^2 reconhece isso como comportamento normal. Mas se os resíduos se afastam da correlação habitual, como se esperaria no caso de se verificar a ocorrência de dano, o T^2 aumenta significativamente (Johnson et al. 2007).

Para cada conjunto de pontos, é calculado o valor de T^2 e procede-se ao cálculo do limite de controlo superior (UCL, do inglês *Upper Control Limit*). Este valor pode ser definido como o percentil da distribuição de T^2 no período de treino, tendo-se neste trabalho utilizado o percentil 95.

Na Figura 2.18 apresenta-se um exemplo de uma carta de controlo, considerando a influência de um determinado dano durante a parte final do período analisado. As cartas de controlo costumam apresentar três períodos diferentes, o de treino, o de validação e o de teste. Neste exemplo, apresenta-se a azul o período de treino, período que se espera corresponder a um estado de boa condição estrutural e por isso se utiliza para que o modelo aprenda o comportamento normal da estrutura em estado saudável, a laranja apresenta-se o período de validação, que serve para verificar se o modelo generaliza bem para dados não utilizados durante o treino, em condições igualmente saudáveis, e por fim, a verde é apresentado o período de teste, utilizado para avaliar a deteção de anomalias. O exemplo apresentado considera um conjunto de dados para o período de teste para o qual foi simulado numericamente o efeito de um dano nas frequências naturais da estrutura, razão pela qual se observa um crescimento considerável do número de pontos acima do UCL, quando comparado com o período de validação.

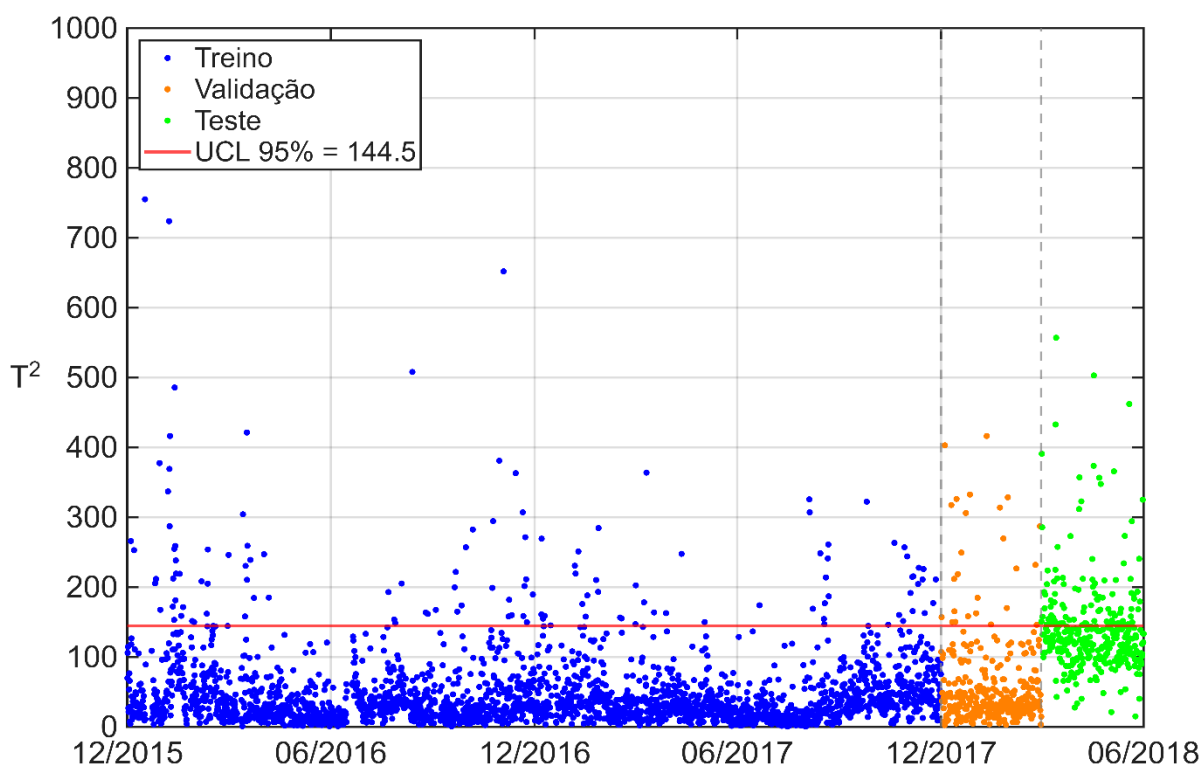


Figura 2.18 – Exemplo de uma carta de controlo.

3

CASO DE ESTUDO – BARRAGEM DO BAIXO SABOR

3.1 BARRAGEM E SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

A barragem do Baixo Sabor está localizada no rio Sabor, a aproximadamente 12,6 km da sua confluência no rio Douro e a cerca de 7 km a montante da ponte rodoviária que estabelece a ligação entre a povoação de Horta da Vilariça e a vila de Torre de Moncorvo.

É uma barragem abóbada de dupla curvatura, com uma altura máxima, acima da fundação, de 123 m, que permite criar uma albufeira com uma capacidade total de 1095 hm³ para o nível de pleno armazenamento (NPA = 234 m).

O coroamento da barragem está situado à cota 236 m, tem um desenvolvimento total de 505 m e uma espessura de cerca de 6 m. A abóbada, de betão, é composta por 32 blocos, separados por juntas de contração verticais, afastadas de cerca de 15,4 m na margem direita, 17 m na zona central e 15,7 m na margem esquerda. O descarregador de superfície, com perfil do tipo WES (LNEC 2025), está integrado nos cinco blocos centrais da abóbada, tem crista à cota 224 m e é formado por 4 vãos equipados com comportas segmento de 16 m de largura por 12,25 m de altura. Tem uma capacidade máxima de vazão de 5000 m³/s para o nível de máxima cheia (NMC = 235,00 m), sendo a descarga efetuada para uma bacia de receção e dissipação por impacto a jusante, com soleira à cota 122 m (LNEC 2025).

A descarga de fundo está localizada na prumada do pilar central do descarregador de cheias, tem a soleira à cota 140,00 m e uma capacidade máxima de vazão de 222 m³/s para o nível de pleno armazenamento (NPA). É provida de uma comporta de guarda a montante, do tipo vagão, e de uma comporta de serviço a jusante, do tipo segmento (LNEC 2025).

A barragem é dotada das seguintes galerias:

- Uma galeria geral de drenagem que acompanha o contacto com a fundação, do lado de montante;
- Seis galerias horizontais que ligam as margens direita e esquerda, com exceção da galeria de visita superior, que é interrompida na zona central pela existência do descarregador de superfície;
- Uma galeria de drenagem a jusante, na zona central inferior da abóbada, que comunica com a galeria geral de drenagem através de três galerias radiais.

A fundação é composta por um granito de grão médio a grosseiro, porfiróide e de duas micas, por vezes com massas biotíticas concentradas. Apresenta uma tonalidade branca acinzentada, por vezes rosado em zonas de maior concentração de feldspatos. Ocorrem extensas massas de quartzo, associadas a fraturas a nível regional com orientação NE-SO a NO-SE. Na proximidade destas estruturas verifica-se, por vezes, um estiramento do maciço, adquirindo os minerais uma evidente orientação (LNEC 2025).



Figura 3.1 - Barragem do Baixo Sabor (APA 2026).

Para garantir uma boa caracterização do comportamento dinâmico da barragem e estudar a sua evolução no tempo, foi implementado um sistema de aquisição que recolhe os registos de 20 acelerómetros instalados radialmente ao longo das galerias GV1, GV2 e GV3:

- 12 acelerómetros na galeria de coroamento GV1;
- 5 acelerómetros na parte central da galeria GV2;
- 3 acelerómetros na parte central da galeria GV3.

A Figura 3.2 apresenta a posição dos acelerómetros, assinalados a vermelho, juntamente com a divisão em três subsistemas. Esta disposição está também representada na Figura 3.3, numa fotografia da estrutura, onde os pontos azuis representam a posição aproximada dos acelerómetros. Os doze acelerómetros da galeria GV1 estão divididos em dois grupos de seis, dispostos de cada lado do descarregador de cheias. Cada um destes grupos de seis está ligado a um digitalizador, que por sua vez está ligado a um computador. Os oito acelerómetros das duas galerias inferiores estão ligados a um conjunto diferente de digitalizadores. Todo o equipamento está interligado por fibra ótica e a sincronização dos dados é assegurada por antena GPS (Gomes et al. 2015; Pereira 2019).

O sistema de monitorização contínua está também ligado à rede de fibra ótica entre a barragem e a central, permitindo assim o acesso remoto ao computador central. Os três subsistemas são independentes, pelo que se um falhar os outros continuam a recolher dados. Todos os acelerómetros instalados são do tipo uniaxial e *force balance*, tendo sido configurados para recolher dados entre -0,25 g e 0,25 g (Pereira 2019).

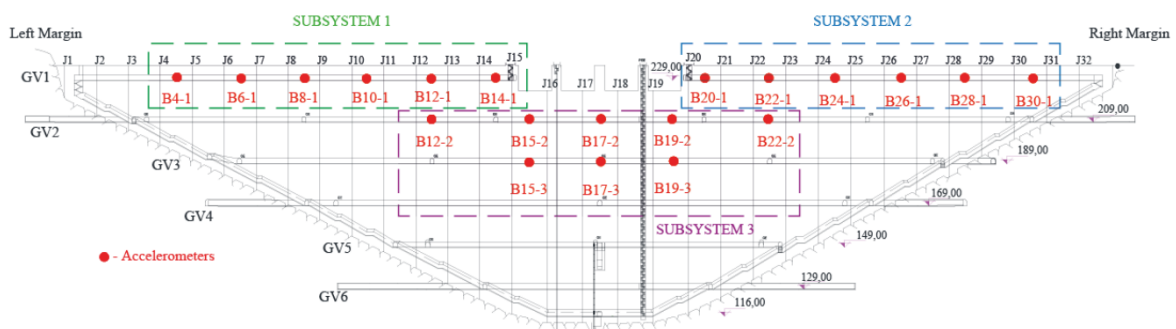


Figura 3.2 – Posição dos pontos de medição no sistema de monitorização da barragem do Baixo Sabor (Pereira 2019).



Figura 3.3 –Distribuição dos acelerómetros pela barragem do Baixo Sabor (Pereira 2019).

3.2 MONITORIZAÇÃO DINÂMICA CONTÍNUA

A monitorização da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring*, SHM) consiste na avaliação da condição de uma estrutura baseada em registos experimentais obtidos enquanto esta está em funcionamento em condições normais, podendo esses dados ser usados para construir um modelo de comportamento de referência. Durante o funcionamento do sistema, novos dados podem ser comparados com o modelo de comportamento de referência e quaisquer desvios significativos indicam novos comportamentos que podem corresponder a danos estruturais (Pereira et al. 2021b).

Este trabalho apresenta o sistema de monitorização dinâmica contínua instalado na barragem do Baixo Sabor, e descreve a aplicação prática da metodologia usada para a deteção de dano com base na análise da evolução das propriedades modais nomeadamente as frequências naturais e os modos de vibração, medidas ao longo de 2,5 anos, entre dezembro de 2015 e junho de 2018.

As frequências naturais dos quatro primeiros modos de vibração são identificadas automaticamente através da aplicação do método de Identificação Estocástica por Subespaços baseada em Covariâncias (SSI-Cov, do inglês *Covariance-driven Stochastic Subspace Identification*), combinado com algoritmos de análise de *clusters* baseados na comparação de frequências e de configurações modais (Pereira et al. 2021b). Deste modo, este trabalho foca-se na análise da evolução das frequências naturais dos primeiros quatro modos de vibração, apoiando-se ainda esta análise na evolução temporal o nível da água na albufeira, em medições de temperatura ambiente, e em médias moveis da mesma. Na Figura 3.4 apresenta-se a evolução das frequências naturais dos primeiros quatro modos de vibração, sendo possível observar em todos eles variações sazonais consideráveis.

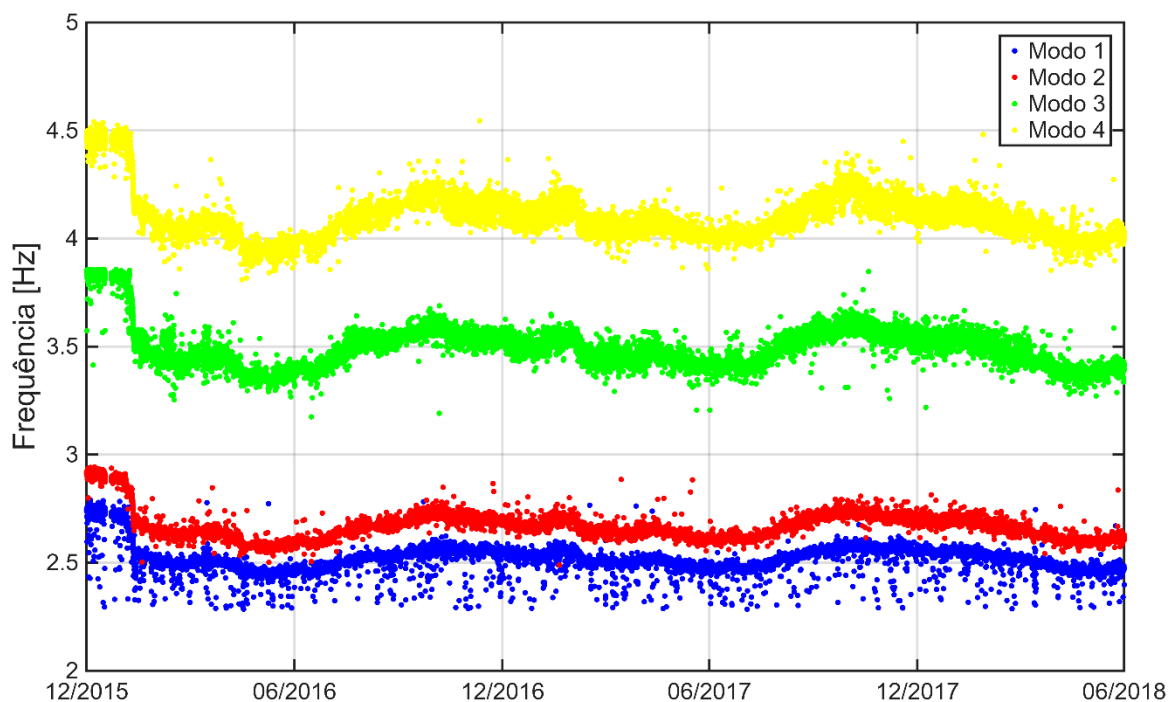


Figura 3.4 - Evolução das frequências naturais dos quatro primeiros modos de vibração – desde o primeiro enchimento da albufeira até maio de 2018.

As variações observadas para as frequências naturais analisadas ao longo do período de monitorização, devidas essencialmente a dois tipos de fatores ambientais e operacionais: o nível de água na albufeira (que se traduz na pressão hidrostática instalada), assim como a temperatura da estrutura.

Quanto ao nível de água na albufeira, verifica-se uma relação inversa bem definida com as frequências naturais da estrutura – um aumento do nível de água conduz a uma diminuição das frequências, e vice-versa. Isto porque, de acordo com a equação (3.1), onde f representa a frequência natural da estrutura, k representa a rigidez da estrutura, e m representa a massa total, incluindo a água da albufeira, se a massa aumentar, a frequência diminuirá.

$$f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.1)$$

Este efeito é particularmente evidente durante o primeiro enchimento da albufeira, em que uma subida rápida do nível da água provocou uma diminuição abrupta das frequências naturais, como se pode verificar pela análise da Figura 3.4, entre dezembro de 2015 e junho de 2016.

Quanto à temperatura, as variações sazonais introduzem flutuações relevantes nas frequências naturais. As variações sazonais, associadas às diferenças de temperatura no verão e no inverno, produzem oscilações de baixa frequência (correspondente aos primeiros modos de vibração) ao longo do ano. Já as variações diárias são particularmente relevantes nesta barragem, para os modos de vibração de ordem superior, efeito que não será explorado neste trabalho (Pereira et al. 2021b).

Não estando disponíveis medições de temperatura no betão, foram utilizados, em alternativa, valores médios da temperatura do ar, eliminando assim a variabilidade diária e obtendo-se valores “suavizados” mais representativos das variações sazonais verão-inverno. Neste contexto, a média móvel da temperatura ambiente foi calculada tendo em conta a média dos dias anteriores considerando várias janelas temporais, tendo-se concluído que os melhores resultados foram alcançados com a média móvel de 8 dias (Pereira et al. 2024).

Na Figura 3.5 e na Figura 3.6 apresentam-se a evolução do nível da água, que após um período inicial de enchimento se mantém estável dentro de um intervalo definido, e a evolução da média móvel da temperatura, respetivamente, entre dezembro de 2015 e junho de 2018.

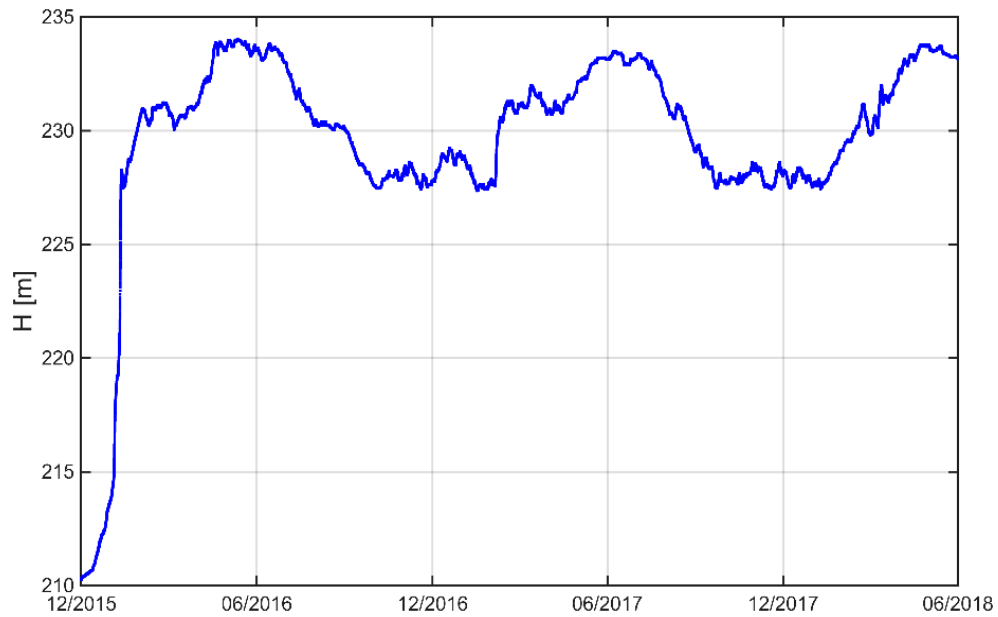


Figura 3.5 - Evolução do nível da água da albufeira.

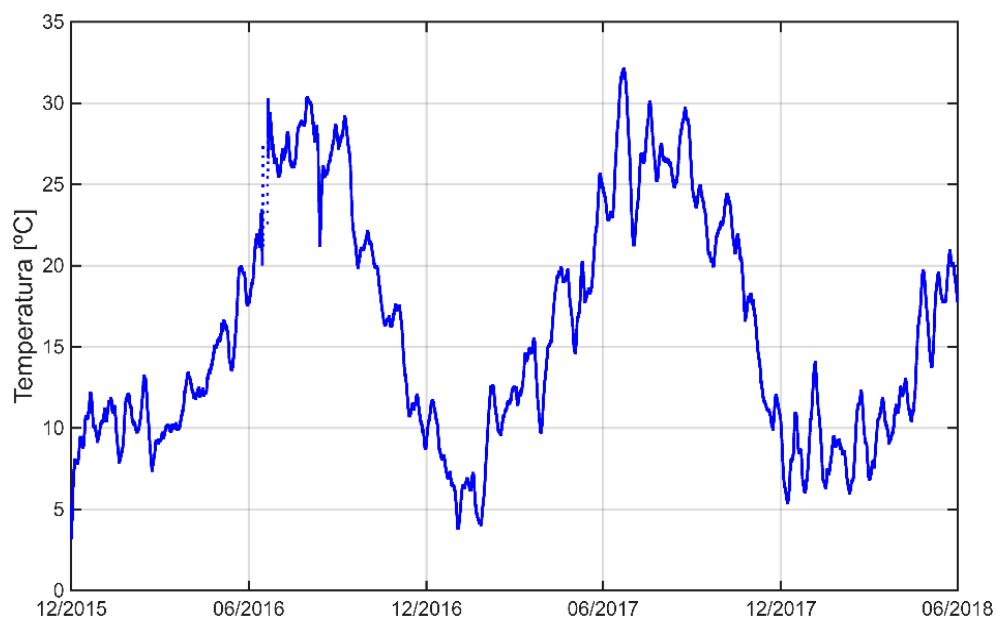


Figura 3.6 - Evolução da média móvel da temperatura.

Finalmente, na Figura 3.7, apresenta-se a relação entre a frequência natural do primeiro modo de vibração e o nível da água na albufeira, para o primeiro ano de dados, entre dezembro de 2015 e dezembro de 2016. É possível observar uma relação inversa clara entre as duas variáveis: à medida que o nível de água aumenta, a frequência natural diminui, e vice-versa.

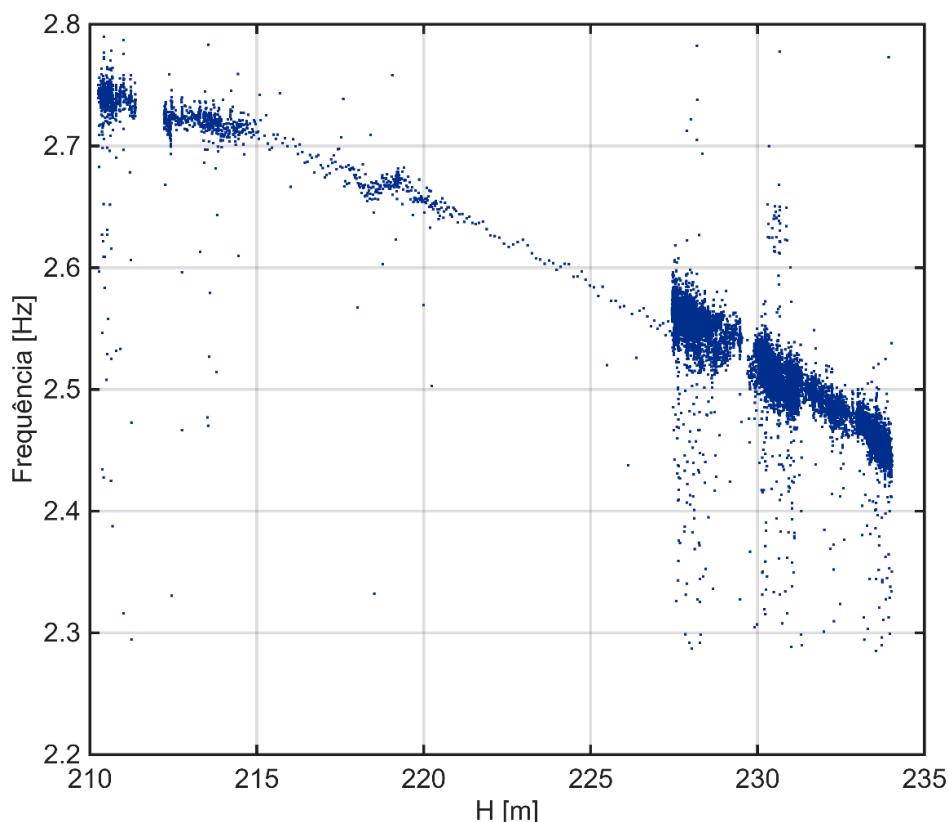


Figura 3.7 – Relação entre frequência natural e nível da água na albufeira.

3.3 PREVISÃO DO COMPORTAMENTO

A previsão da evolução do comportamento dinâmico da barragem foi efetuada através da consideração de modelos de Regressão Linear Múltipla, adotando-se uma abordagem “HTT” (*Hydrostatic-Thermal-Time*), amplamente utilizada na monitorização de barragens. Nesta abordagem, as variáveis organizam-se em três grupos:

H – Hidrostático: o nível da água na albufeira e o seu quadrado (H e H^2) são incluídos como variáveis preditoras. A inclusão do valor quadrático justifica-se pela relação não linear entre o nível da água e as frequências naturais, já mencionado anteriormente.

T – Térmico: a média móvel da temperatura ambiente é utilizada como preditor para capturar o efeito térmico sobre a rigidez da estrutura. A utilização da média móvel da temperatura do ar em detrimento da temperatura instantânea permite reduzir a variabilidade diária (que é pouco relevante para o comportamento estrutural) e capturar melhor a tendência térmica que efetivamente influencia o comportamento estrutural da barragem e que está associada à sazonalidade (de período temporal) entre a época quente e a época fria.

T – Tempo: esta componente destina-se a modelar processos lentos e irreversíveis ao longo do tempo, como a fluência ou a retração do betão, cuja influência nas frequências naturais pode ser relevante especialmente nos primeiros anos após a construção. Neste trabalho, esta componente não foi incluída no modelo, uma vez que o seu efeito é considerado de menor relevância face aos efeitos hidrostático e térmico para o período de monitorização considerado.

Para cada modo de vibração, o modelo tem a seguinte forma da Equação (3.2):

$$f_i = \beta_0 + \beta_1 H_i + \beta_2 H_i^2 + \beta_3 T_i + \varepsilon_i \quad (3.2)$$

onde f_i é a frequência natural do modo no instante i , H_i é a altura de água na albufeira, H_i^2 é o seu quadrado, T_i é a média móvel da temperatura ambiente, β são os coeficientes estimados, e ε é o resíduo.

Os resíduos são calculados como a diferença entre as frequências naturais observadas e as frequências previstas pelo modelo de regressão linear múltipla. O modelo foi treinado durante o período de treino, que corresponde aos primeiros dois anos de dados, entre dezembro de 2015 e dezembro de 2017.

Na Figura 3.8 apresentam-se as frequências naturais originais dos quatro primeiros modos de vibração, bem como as suas previsões, sobrepostas, para comparação. Nesta figura temos a azul a frequência natural do primeiro modo de vibração, a cor-de-laranja a frequência natural do segundo modo de vibração, a amarelo a frequência natural do terceiro modo de vibração, a roxo a frequência natural do quarto modo de vibração, e a preto, sobreposta, as frequências previstas de cada um dos modos de vibração já mencionados. Visualmente é possível verificar uma boa concordância entre os valores experimentais e os previstos pelos coeficientes de determinação obtidos, apresentados na Tabela 3.1. Os valores de R^2 situam-se entre 0,88 e 0,97, o que demonstra uma boa capacidade do modelo em capturar os efeitos do nível de água e da temperatura sobre as frequências naturais da barragem, e validam a adequação do modelo HTT para a normalização dos dados de monitorização da barragem do Baixo Sabor.

Tabela 3.1 - Valores de coeficiente de determinação para os primeiros quatro modos de vibração.

Modo de Vibração	R ²	Desvio Padrão
1	0,884	0.011
2	0,970	0.008
3	0,956	0.013
4	0,946	0.018

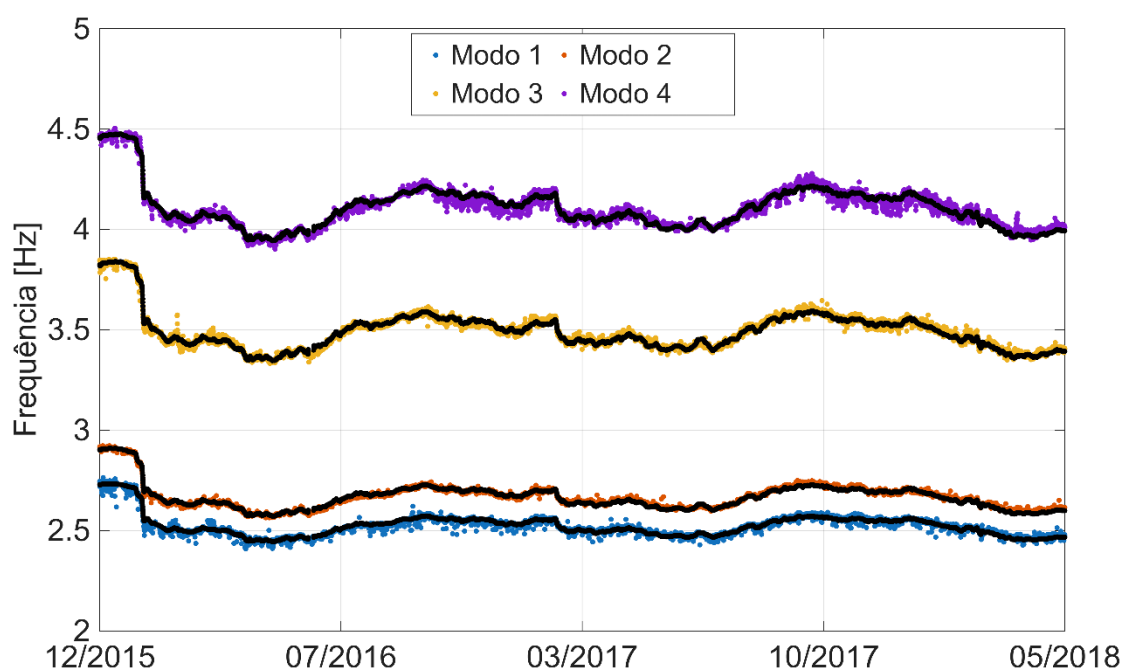
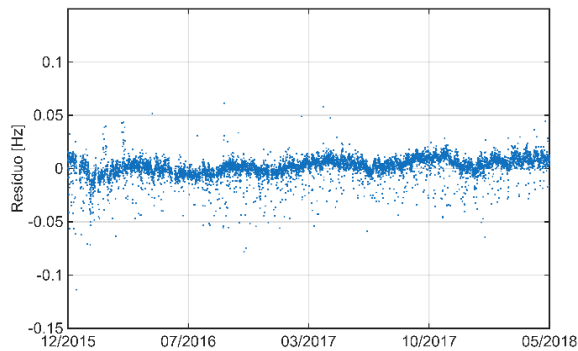


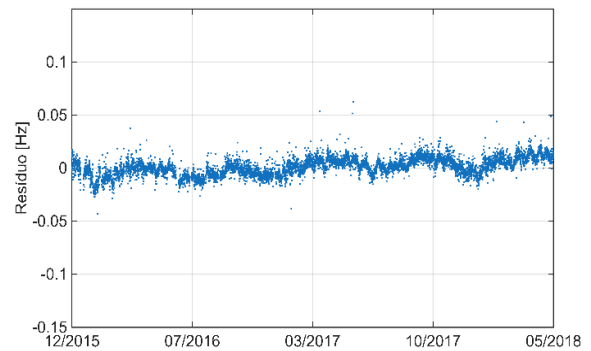
Figura 3.8 – Frequências naturais observadas e previstas dos quatro primeiros modos de vibração.

Com as frequências observadas e previstas, calculam-se os resíduos, que são depois utilizados para construir as cartas de controlo de *Hotelling T²* mencionadas em 2.9, e abordadas em detalhe no capítulo 4. Na Figura 3.9 é apresentada a evolução dos resíduos dos quatro primeiros modos de vibração, entre dezembro de 2015 e junho de 2018.

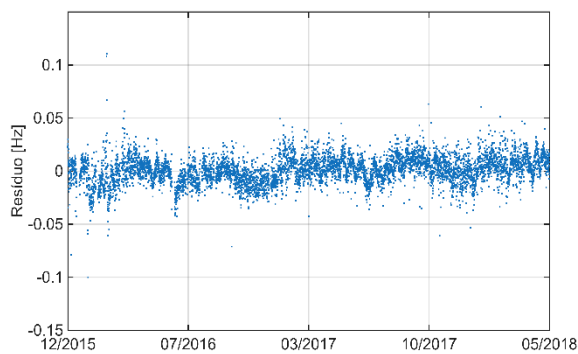
Em todos os modos, os resíduos distribuem-se de forma aproximadamente simétrica em torno de zero, sem apresentar tendências sistemáticas ou derivadas claras ao longo do tempo, o que confirma que o modelo de regressão HTT remove eficazmente os efeitos ambientais e operacionais das frequências naturais. Nos modos 3 e 4 a dispersão é superior à dos modos 1 e 2.



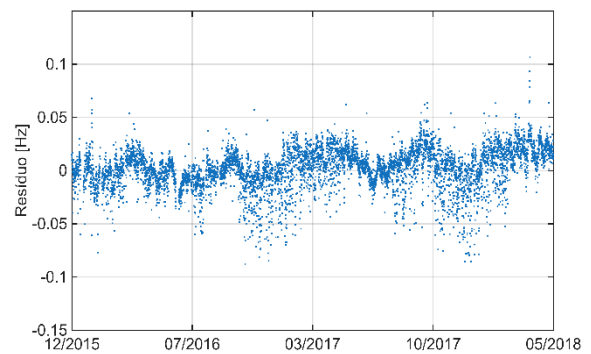
Resíduos do primeiro modo de vibração



Resíduos do segundo modo de vibração



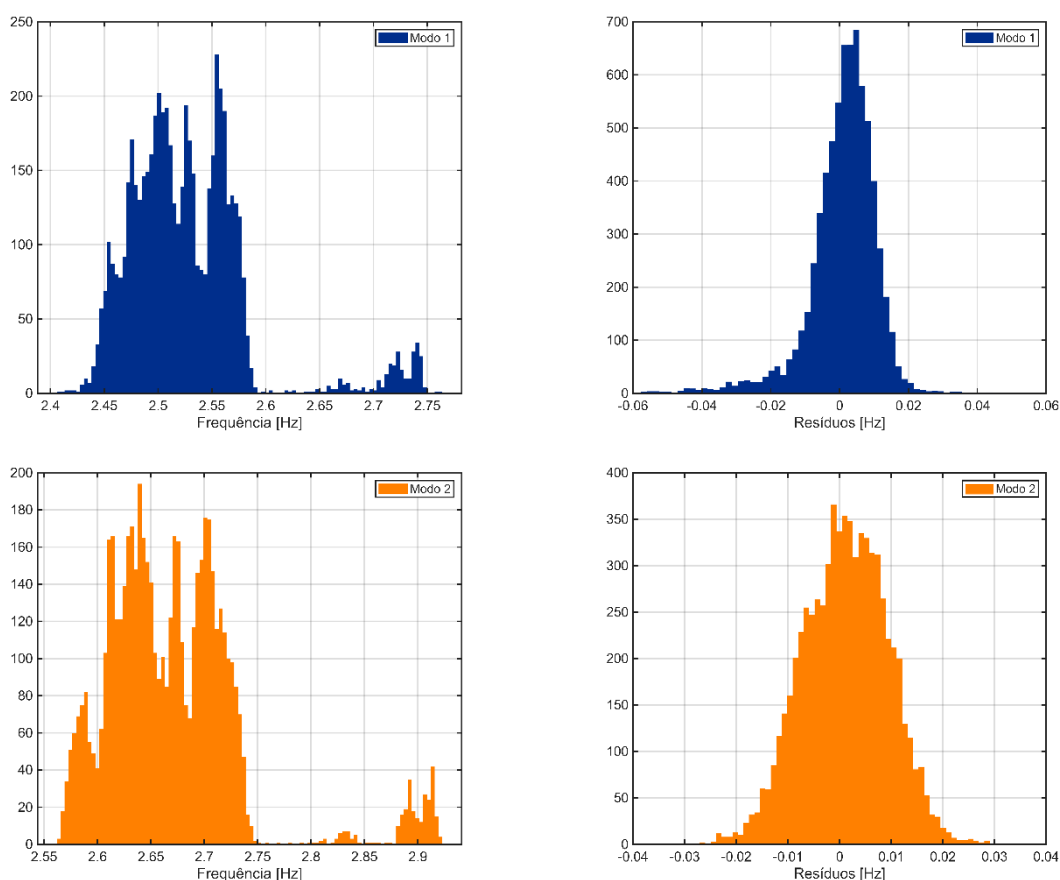
Resíduos do terceiro modo de vibração



Resíduos do quarto modo de vibração

Figura 3.9 – Resíduos dos quatro primeiros modos de vibração.

Na Figura 3.10 apresentam-se os histogramas das frequências naturais originais e dos resíduos correspondentes para os quatro primeiros modos de vibração da barragem. Relativamente às frequências naturais observadas/originais (coluna da esquerda), observa-se uma distribuição dispersa, com uma amplitude de variação considerável. Esta dispersão reflete a forte influência das variáveis ambientais e operacionais, nomeadamente o nível da água na albufeira e a temperatura, que provocam variações significativas e sistemáticas nas frequências naturais ao longo do período de monitorização. Após a aplicação do modelo de regressão HTT, os resíduos obtidos (coluna da direita) apresentam uma distribuição aproximadamente simétrica e centrada em zero, com uma dispersão significativamente mais reduzida em todos os modos representados. Esta transformação ilustra a eficácia do modelo de regressão na minimização dos efeitos ambientais e operacionais sobre as frequências naturais. Os resíduos mostram-se, assim, um indicador mais sensível à presença de anomalias estruturais do que as frequências naturais originais.



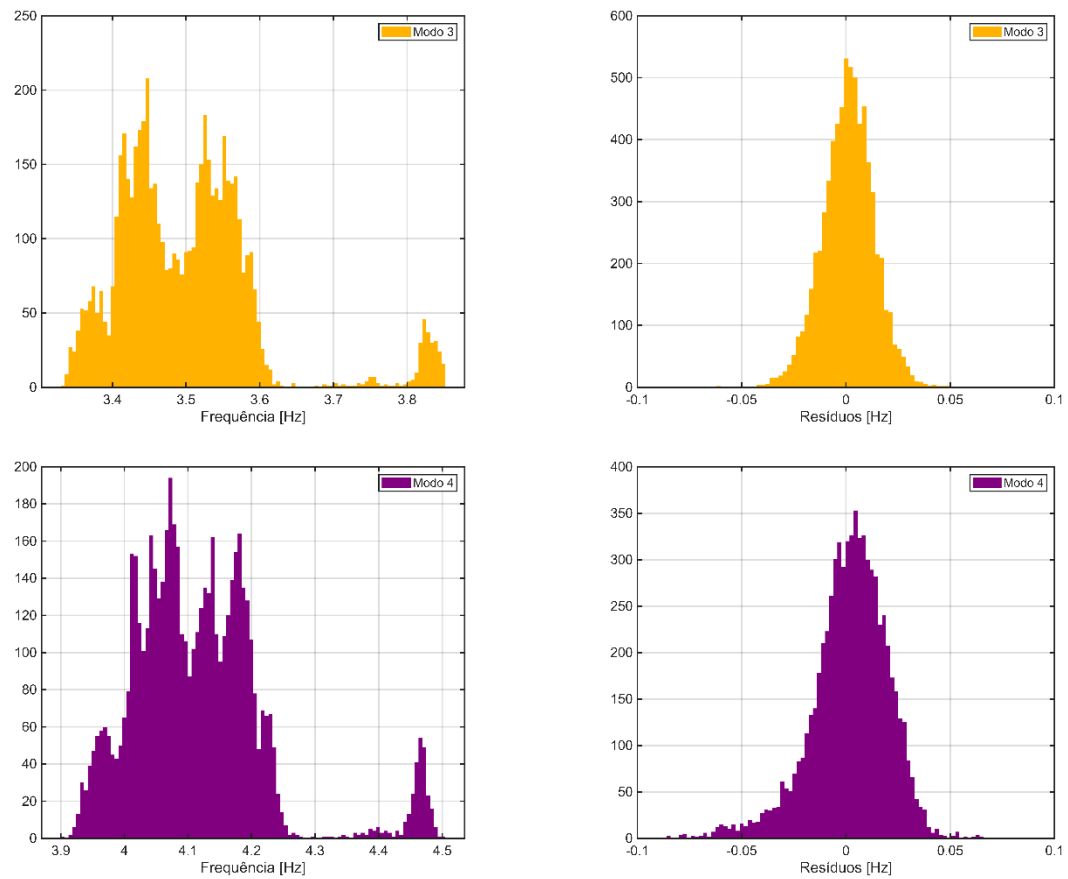


Figura 3.10 - Histogramas das frequências naturais originais e dos resíduos dos quatro primeiros modos de vibração, do primeiro modo no topo, para o quarto na base.

4

DESENVOLVIMENTO DE CARTAS DE CONTROLO PARA A DETEÇÃO DE ANOMALIAS

4.1 CENÁRIOS BASE

A estrutura analisada neste trabalho não apresenta qualquer tipo de dano. Neste sentido, não seria de esperar que se pudessem detetar anomalias de maior relevo na evolução do seu comportamento dinâmico, pelo que se optou por simular estas anomalias numericamente, e posteriormente introduzir o seu efeito nos dados experimentais através de manipulação aritmética. Assim, o trabalho assentará num cenário base, correspondente aos dados experimentais obtidos, e a um conjunto de cenários que simulam um estado estrutural danificado e que foram desenvolvidos no âmbito de uma tese de doutoramento (Pereira 2019).

O cenário base corresponde ao estado estrutural considerado normal, sem a presença de qualquer dano. Este cenário é caracterizado pelo comportamento esperado e estável da estrutura, no qual, os dados da monitorização refletem a resposta normal às variáveis ambientais, como as variações da temperatura e do nível da água. O modelo de regressão é calibrado com base neste cenário, estabelecendo assim um padrão de referência face ao qual futuros desvios possam ser identificados como possíveis danos estruturais. A definição rigorosa deste cenário é fulcral para garantir a fiabilidade e rigor do método de deteção de anomalias.

O cenário apresentado foi repartido em três períodos distintos, de acordo com a sua finalidade no processo de modelação. Primeiramente, temos o período de treino. Para garantir uma boa caracterização do comportamento da estrutura, este período foi definido com a duração de dois anos, entre dezembro de 2015 e dezembro de 2017, e foram utilizados dados de monitorização para fazer o ajuste e a calibração do modelo de regressão. De seguida, temos o período de validação, com uma duração de três meses, entre dezembro de 2017 e março de 2018. A sua finalidade é a verificação da generalização da estabilidade e robustez do modelo sob condições estruturais usuais, ou seja, sem qualquer tipo de dano. Por fim, temos o período de teste, também com uma duração de três meses, entre março e junho de 2018, que corresponde ao intervalo de tempo no qual se procura detetar anomalias no comportamento da estrutura.

A partir dos resíduos obtidos no capítulo anterior, e utilizando a estatística de *Hotelling* T^2 abordada no Capítulo 2, foi possível construir cartas de controlo, baseadas na condição de base da estrutura.

De seguida, apresentam-se duas cartas de controlo num cenário sem dano para agrupamentos de 24 pontos (Figura 4.1) e de 48 pontos (Figura 4.2). Nestas cartas, podemos ver os três períodos mencionados anteriormente. Como não foi aplicado nenhum dano, os períodos de validação (cor-de-laranja) e teste (verde) apresentam resultados semelhantes.

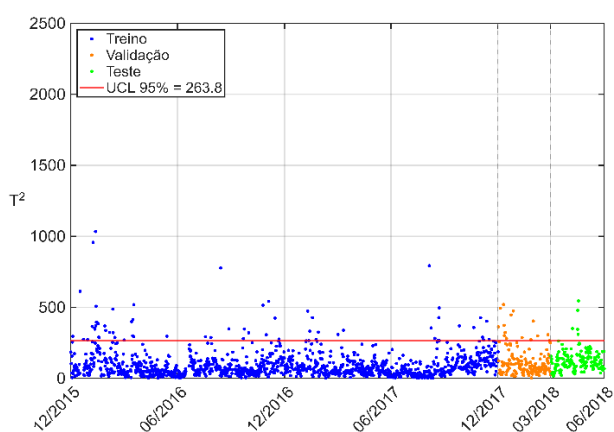


Figura 4.1 - Carta de controlo sem dano ($r=24$).

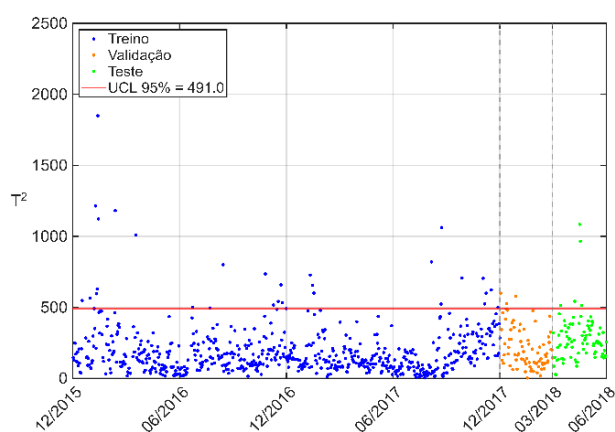


Figura 4.2 - Carta de controlo sem dano ($r=48$).

Na Tabela 4.1, apresentam-se os valores das percentagens de pontos acima do UCL, e também os valores das medianas de T^2 , para diferentes agrupamentos de pontos. Estes dois indicadores ajudam-nos não só a entender se o número de pontos acima do limite definido varia durante o período de teste, por comparação com o período de validação, mas também se se verifica algum salto no comportamento mediano, que pudesse não gerar valores extremos, mas ainda assim indicar uma alteração de comportamento.

Tendo sido definido um limite superior de controlo de 95%, é de esperar que o número de pontos acima deste limite seja desta ordem de grandeza em todos os períodos analisados. É ainda de notar que à medida que se aumenta a dimensão dos agrupamentos, a carta de controlo se torna mais sensível, perdendo-se, no entanto, precisão para períodos curtos imediatamente após a ocorrência de dano, por se trabalhar com um menor número de pontos. Verifica-se que durante o período de teste, a mediana de T^2 é já ligeiramente superior à verificada durante a validação, mas o número de pontos anómalos ainda é inferior, sendo em ambos os casos superiores ao verificado durante o treino. Estas pequenas variações são expectáveis, considerando que tanto o modelo de regressão como a carta de controlo foram construídos para o período de treino e estão a ser generalizados para dados novos nos restantes períodos, pelo que se aceitam pequenas variações.

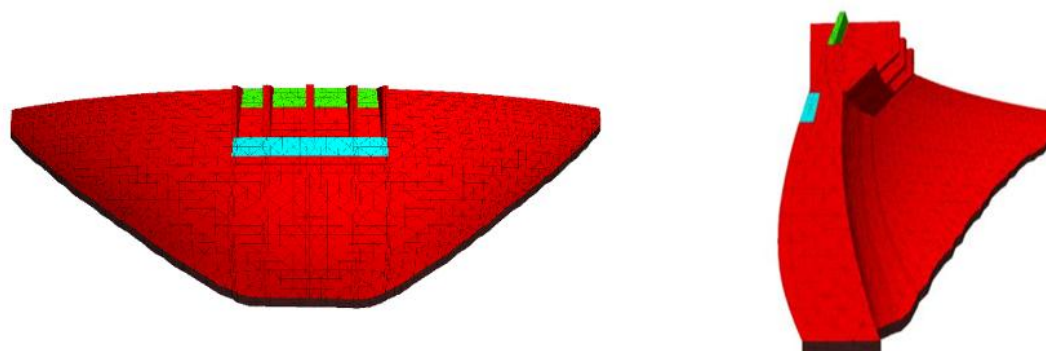
Tabela 4.1 - Valores do limite do UCL e da mediana de T^2 num cenário sem dano e com diferentes agrupamentos de pontos.

	Percentagem de pontos acima do UCL					Mediana de T^2				
	Agrupamentos de pontos					Agrupamentos de pontos				
	6	12	24	48	96	6	12	24	48	96
Treino	5,0%	5,0%	4,9%	4,9%	4,7%	13,8	30,8	65,4	140,6	289,7
Validação	7,8%	8,0%	9,6%	3,9%	12,8%	17,7	37,8	86,7	169,3	311,1
Teste	3,6%	3,3%	3,0%	6,0%	9,5%	21,5	49,1	114,8	255,7	576,0

4.2 SIMULAÇÃO DE DANOS

Os danos considerados neste trabalho foram simulados em trabalhos anteriores através da redução do módulo de elasticidade do betão, em determinado conjunto de pontos de um modelo numérico da barragem, afetando zonas coerentes com danos encontrados em estruturas semelhantes e em zonas de maior concentração de tensões. Foram considerados 4 níveis de danos, com reduções de módulo de elasticidade 10, 30, 50 e 70%, respetivamente (Pereira et al. 2021b).

Na Figura 4.3 apresenta-se o cenário de dano abordado. O cenário de dano (D1) corresponde à diminuição do módulo de elasticidade num grupo de 11 elementos na parte central da barragem, a uma cota de 200 m acima do nível do mar. Apenas os elementos da camada mais a montante foram considerados, o que corresponde a uma zona da estrutura sujeita a tensões elevadas e potencialmente suscetível à fissuração. O dano D está representados a azul claro (Pereira 2019).



Cenário de dano D

Figura 4.3 - Localização e tipo de dano simulado (Pereira 2019).

Na Tabela 4.2 apresentam-se as variações das frequências naturais dos quatro primeiros modos de vibração associadas ao cenário de dano considerado (cenário D), para as quatro intensidades de dano analisadas. Como era de esperar, a variação da intensidade é maior em valor absoluto quanto maior for a intensidade do dano. O primeiro modo de vibração é o mais afetado pelo dano, apresentando variações de 0,18% a 1,79%. Os modos segundo e quarto apresentam resultados idênticos (variações de 0,06% a 0,60% e 0,62%, respetivamente), enquanto que o terceiro modo aparenta ser o menos afetado dos quatro, com a frequência natural a variar entre os 0,02% e 0,16%.

No início do período de teste, o dano é introduzido artificialmente nas frequências naturais identificadas pelo sistema de monitorização. Para cada modo de vibração e para cada intensidade de dano considerada, as frequências naturais originais, antes de qualquer processo de remoção de efeitos ambientais, são multiplicadas pelo fator correspondente à variação percentual apresentada na Tabela 4.2, de acordo com a equação (4.1):

$$f_{dano}(k, g) = f(k, g) * \left(1 + \frac{\Delta f(g)}{100} \right) \quad (4.1)$$

onde $f(k, g)$ representa a frequência natural original do modo g no instante k , e $\Delta f(g)$ representa a variação percentual associada ao modo de vibração g para a intensidade de dano considerada cujos valores são apresentados na Tabela 4.2. Este procedimento é aplicado a partir do instante correspondente ao início do período de teste, mantendo-se as frequências originais inalteradas nos períodos de treino e validação.

Tabela 4.2 - Valores das variações das frequências naturais nos quatro primeiros modos de vibração.

		Nível de dano (Redução do módulo de elasticidade em %)			
		1 (10%)	2 (30%)	3 (50%)	4 (70%)
Modo de vibração	1	-0,18%	-0,59%	-1,10%	-1,79%
	2	-0,06%	-0,20%	-0,37%	-0,60%
	3	-0,02%	-0,05%	-0,10%	-0,16%
	4	-0,06%	-0,20%	-0,38%	-0,62%

4.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS DE DETEÇÃO DE ANOMALIAS

Com os valores dos resíduos procedeu-se à construção de novas cartas de controlo, agora considerando os dados simulados.

Nas seguintes tabelas, apresentam-se os valores das percentagens de pontos acima do UCL, e também os valores da mediana de T^2 para agrupamentos de 6, 12, 24, 48, e 96 pontos, respetivamente, para danos de intensidade 1 a 4.

Na Tabela 4.3 vemos os valores para um agrupamento de 6 pontos, correspondente a 3 horas de monitorização. No período de treino, a percentagem de pontos acima do UCL mantém-se nos 5% em todas as intensidades, o que é esperado, uma vez que o UCL é definido como o percentil 95 dos valores de T^2 , logo, aproximadamente 5% dos pontos irão exceder esse limite, e porque apenas o período de teste é alterado com a simulação de dano. Os valores da mediana de T^2 também se mantêm constantes a 13,8, independentemente da intensidade, confirmando que o período de treino corresponde exclusivamente ao estado saudável da estrutura e não é afetado pelo dano.

No período de validação, há um ligeiro aumento do número de pontos acima do UCL para 7,8%. Apesar de ser ligeiramente mais elevado do que os 5% esperado, continua a ser um valor aceitável. A mediana de T^2 continua semelhante, neste caso com um valor de 17,7, em linha com o verificado durante o treino do modelo.

Por último, no período de teste, começam-se a observar as diferenças mais significativas entre as diferentes intensidades de dano. Para as duas primeiras intensidades, a percentagem de pontos acima do UCL (3,9% e 3,7%) e a mediana de T^2 (17,6 e 18,9) são praticamente iguais às do estado sem dano. A partir da intensidade 3, observa-se um aumento mais significativo para a mediana de T^2 . A percentagem de pontos acima do UCL sobe para 8,2% e a mediana de T^2 para 39,2, sugerindo que o dano começa a ser detetável. Para a intensidade 4, os valores acima do percentil 95 aumentam drasticamente para 86,8% de pontos acima do UCL e uma mediana de T^2 de 98,2, indicando uma deteção clara do dano. Estes resultados demonstram que o sistema é capaz de detetar danos de intensidade elevada, mas apresenta limitações na deteção de danos de menor severidade.

Na Figura 4.4 apresentam-se duas cartas de controlo para o cenário com intensidade de dano 2 (esquerda) e intensidade de dano 4 (direita). Nesta figura, é visível que não existe uma diferença notória entre os vários períodos para um dano de baixa intensidade. No entanto, estas diferenças ficam evidentes para um dano maior, onde se vê claramente um número elevado de pontos acima do UCL no período de teste (verde) em relação aos períodos de treino (azul) e de validação (laranja).

Tabela 4.3 - Valores da percentagem de pontos acima do UCL e da mediana de T^2 ($r=6$).

	Percentagem de pontos acima do UCL					Mediana de T^2				
	Sem dano	Intensidade do dano				Sem dano	Intensidade do dano			
		1	2	3	4		1	2	3	4
Treino	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8
Validação	7,8%	7,8%	7,8%	7,8%	7,8%	17,7	17,7	17,7	17,7	17,7
Teste	3,6%	3,9%	3,7%	8,2%	86,8%	17,6	17,6	18,9	39,2	98,2

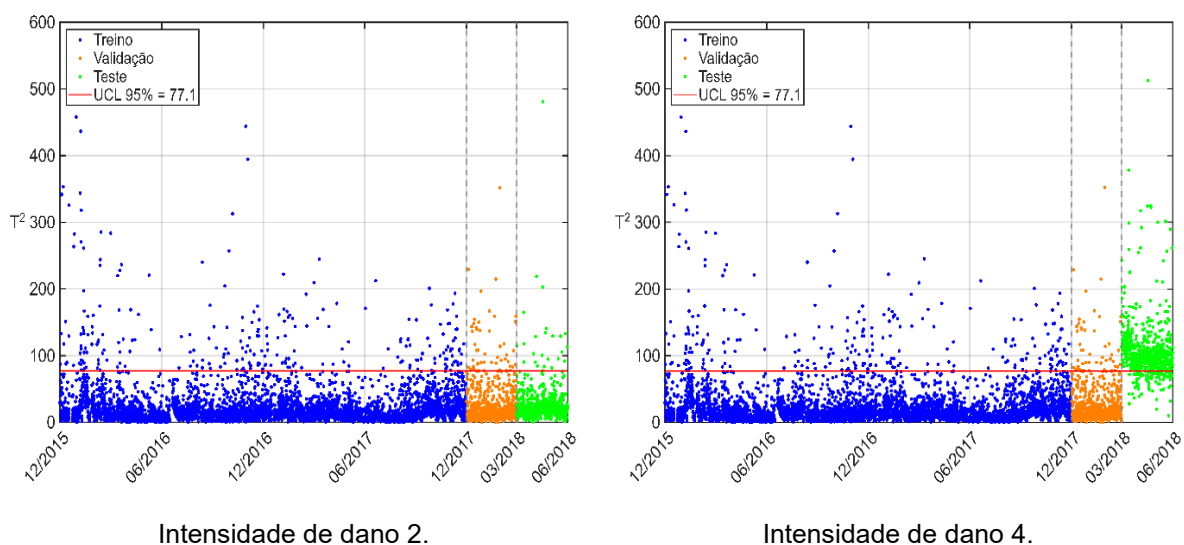


Figura 4.4 - Cartas de controlo para um agrupamento de 6 pontos e intensidade de dano 2 (esquerda) e 4 (direita).

Na Tabela 4.4 apresentam-se novamente a percentagem de pontos acima do UCL e a mediana de T^2 , mas desta vez para um agrupamento de 12 pontos, correspondente a 6 horas de monitorização.

Para o período de treino, a percentagem de pontos acima do UCL é de 5,0% em todas as intensidades, confirmando que o UCL foi corretamente definido como o percentil 95% dos valores de T^2 do treino. A mediana de T^2 mantém-se constante em 30,8 independentemente da intensidade, o que é esperado uma vez que o dano é introduzido apenas no período de teste.

Em relação ao período de validação, a percentagem de pontos acima do UCL é de 8,0% em todas as intensidades, ligeiramente acima dos 5% esperados, mas ainda assim num valor aceitável. A mediana de T^2 mantém-se constante em 37,8, confirmando que o comportamento da estrutura no período de validação é consistente com o estado saudável.

Finalmente, no período de teste, são observadas as maiores diferenças para as diferentes intensidades de dano. Para a intensidade 1, a percentagem de pontos acima do UCL (3,6%) e a mediana de T^2 (42,4) são próximas do estado sem dano (3,3% e 49,1), indicando que o sistema não deteta o dano de forma clara nesta intensidade. Para a intensidade 2, a percentagem sobe para 6,2% e a mediana para 54,5, sugerindo um início de deteção ainda pouco expressivo. A partir da intensidade 3 observa-se um aumento significativo, onde 31,2% dos pontos estão acima do UCL e mediana de T^2 é de 126,6, indicando que o dano é claramente detetável. Para a intensidade 4, os valores atingem 99,1% de pontos acima do UCL e uma mediana de T^2 de 326,7, correspondendo a uma deteção praticamente total do dano.

Na Figura 4.5 apresentam-se as cartas de controlo para cenários de diferentes intensidades de dano. À esquerda, temos a carta de controlo para uma intensidade de dano 2, onde ainda é pouco perceptível a deteção do dano, e à direita a carta de controlo para uma intensidade de dano 3, onde já é possível identificar a deteção de dano no período de teste.

Tabela 4.4 – Valores da percentagem de pontos acima do UCL e da mediana de T^2 ($r=12$).

	Percentagem de pontos acima do UCL					Mediana de T^2				
	Sem dano	Intensidade do dano				Sem dano	Intensidade do dano			
		1	2	3	4		1	2	3	4
Treino	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	5,0%	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8
Validação	8,0%	8,0%	8,0%	8,0%	8,0%	37,8	37,8	37,8	37,8	37,8
Teste	3,3%	3,6%	6,2%	31,2%	99,1%	49,1	42,4	54,5	126,6	326,7

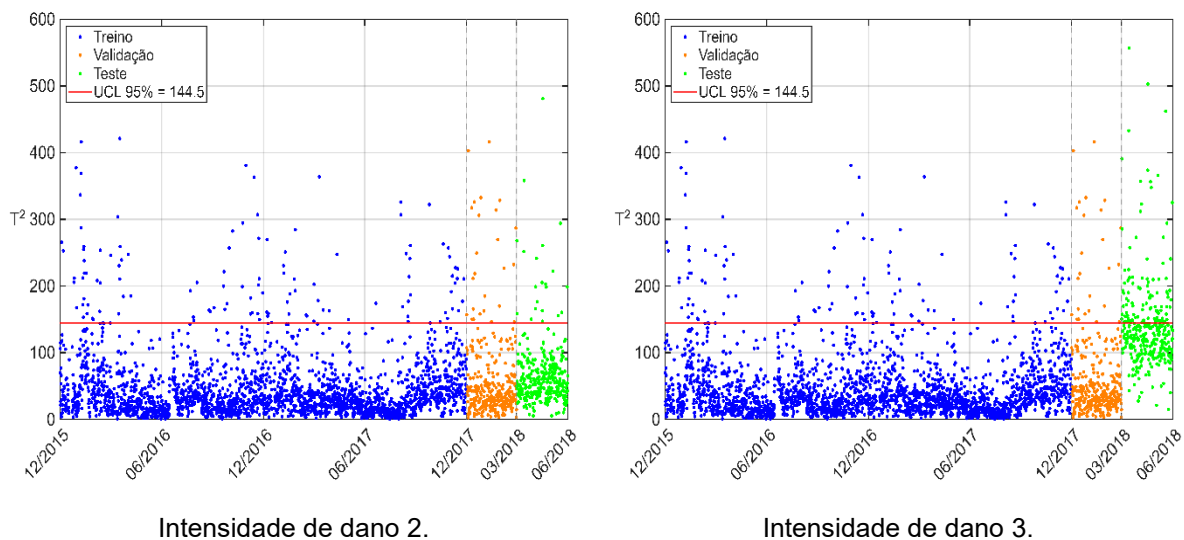


Figura 4.5 - Cartas de controlo para um agrupamento de 12 pontos e intensidade de dano 2 (esquerda) e 3 (direita).

A Tabela 4.5 é semelhante às duas tabelas anteriores, mas apresenta os valores para um agrupamento de 24 pontos, correspondentes a um período de 12 horas.

No período de treino, a percentagem de pontos acima do UCL é de 4,9% em todas as intensidades, confirmando que o UCL foi corretamente definido como o percentil 95% dos valores de T^2 do treino. A mediana de T^2 mantém-se constante em 65,4.

No período de validação, a percentagem de pontos acima do UCL é de 9,6% em todas as intensidades, ligeiramente acima dos 5% esperados, mas ainda assim num valor aceitável para um sistema de deteção de dano. A mediana de T^2 mantém-se constante em 86,7, confirmando que o comportamento da estrutura no período de validação é consistente com o estado saudável e não é influenciado pelo dano simulado.

Por fim, no período de teste, mais uma vez, estão representadas as maiores diferenças. Para a intensidade 1, a percentagem de pontos acima do UCL (4,2%) e a mediana de T^2 (100,0) são próximas do estado sem dano (3,0% e 114,8), indicando que o sistema não deteta o dano de forma clara nesta intensidade. Para a intensidade 2, observa-se um aumento mais expressivo, 17,9% de pontos acima do UCL e mediana de T^2 de 162,9, o que corresponde aproximadamente a uma duplicação em relação à validação, tanto da percentagem de pontos acima do UCL como do T^2 mediano, sugerindo que o dano pode ser considerado detetável com esta carta de controlo mais sensível. Para a intensidade 4, praticamente todos os pontos do período de teste excedem o UCL (100,0%), com uma mediana de T^2 de 326,7.

De seguida, na Figura 4.6, apresentam-se duas cartas de controlo para diferentes intensidades. Na carta de controlo da esquerda, está o cenário com intensidade de dano 2, onde o dano começa a ser detetado. Já na carta de controlo da direita, está representado o cenário com uma intensidade de dano 4, onde é clara a deteção de dano.

Tabela 4.5 - Valores da percentagem de pontos acima do UCL e da mediana de T^2 ($r=24$).

	Percentagem de pontos acima do UCL					Mediana de T^2				
	Sem dano	Intensidade do dano				Sem dano	Intensidade do dano			
		1	2	3	4		1	2	3	4
Treino	4,9%	4,9%	4,9%	4,9%	4,9%	65,4	65,4	65,4	65,4	65,4
Validação	9,6%	9,6%	9,6%	9,6%	9,6%	86,7	86,7	86,7	86,7	86,7
Teste	3,0%	4,2%	17,9%	93,7%	100%	114,8	100,0	162,9	426,1	326,7

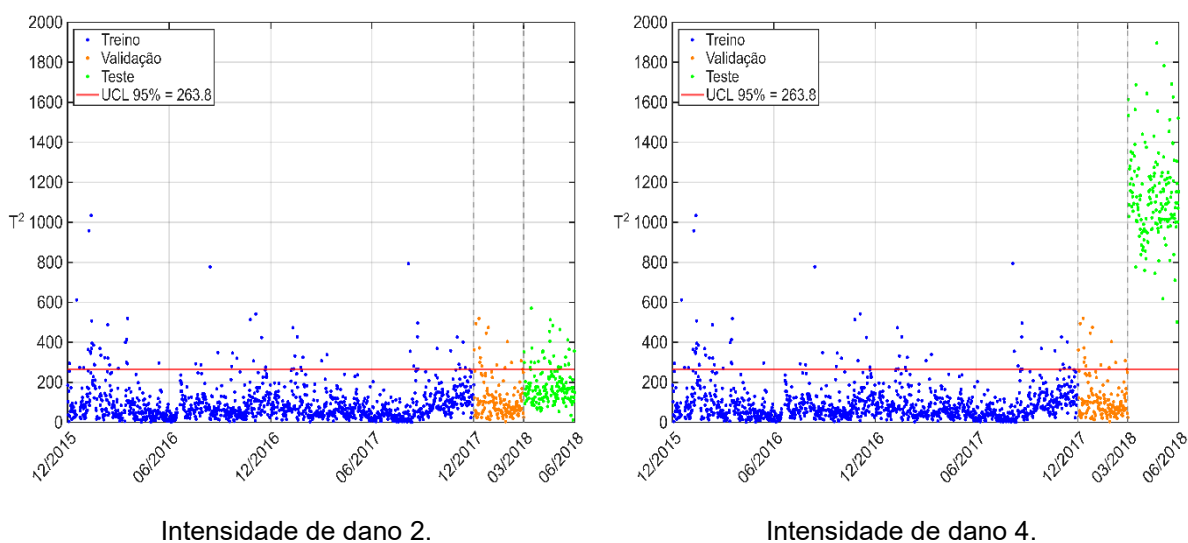


Figura 4.6 - Cartas de controlo para um agrupamento de 24 pontos e intensidade de dano 2 (esquerda) e 4 (direita).

Na Tabela 4.6 estão apresentadas as percentagens de pontos acima do UCL e os valores da mediana de T^2 para um agrupamento de 48 pontos, correspondentes a 24 horas de monitorização.

No período de treino, a percentagem de pontos acima do UCL é de 4,9% em todas as intensidades, confirmando que o UCL foi corretamente definido como o percentil 95% dos valores de T^2 do treino. A mediana de T^2 mantém-se constante em 140,6.

No período de validação, a percentagem de pontos acima do UCL é de 3,9% em todas as intensidades, valor próximo e ligeiramente abaixo dos 5% do período anterior, indicando que o modelo apresenta um comportamento estável em condições saudáveis. A mediana de T^2 mantém-se constante em 169,3, confirmando a estabilidade do modelo neste período.

É no período de teste que se observam as diferenças entre a capacidade de deteção para diferentes intensidades de danos simulados. Para a intensidade 1, a percentagem de pontos acima do UCL (7,1%) e a mediana de T^2 (236,7) são próximas do estado sem dano (6,0% e 255,7), indicando que o sistema não permite detetar o dano de forma clara nesta intensidade. Para a intensidade 2, observa-se um aumento muito expressivo, onde 53,6% de pontos estão acima do UCL e a mediana de T^2 é de 497,9, indicando que a anomalia corresponde ao dano de intensidade 2 é claramente detetável. Para as intensidades 3 e 4, a deteção é total, com 100% de pontos acima do UCL e medianas de T^2 de 1452,8 e 3843,2 respetivamente, evidenciando uma capacidade de deteção inequívoca para danos de maior severidade. O aumento progressivo da mediana de T^2 com a intensidade do dano reflete a maior distância dos resíduos face ao comportamento de referência.

Na Figura 4.7 apresentam-se as cartas de controlo para danos de intensidade 1 (esquerda) e 2 (direita). Para o cenário de intensidade 1, o dano ainda não é detetado, e não há diferenças relevantes para os outros dois períodos. No entanto, no cenário de intensidade 2, apesar de continuar a ser uma intensidade não muito elevada, a deteção do dano já é notória.

Tabela 4.6 - Valores da percentagem de pontos acima do UCL e da mediana de T^2 ($r=48$).

	Percentagem de pontos acima do UCL					Mediana de T^2				
	Sem dano	Intensidade do dano				Sem dano	Intensidade do dano			
		1	2	3	4		1	2	3	4
Treino	4,9%	4,9%	4,9%	4,9%	4,9%	140,6	140,6	140,6	140,6	140,6
Validação	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	3,9%	169,3	169,3	169,3	169,3	169,3
Teste	6,0%	7,1%	53,6%	100%	100%	255,7	236,7	497,9	1452,8	3843,2

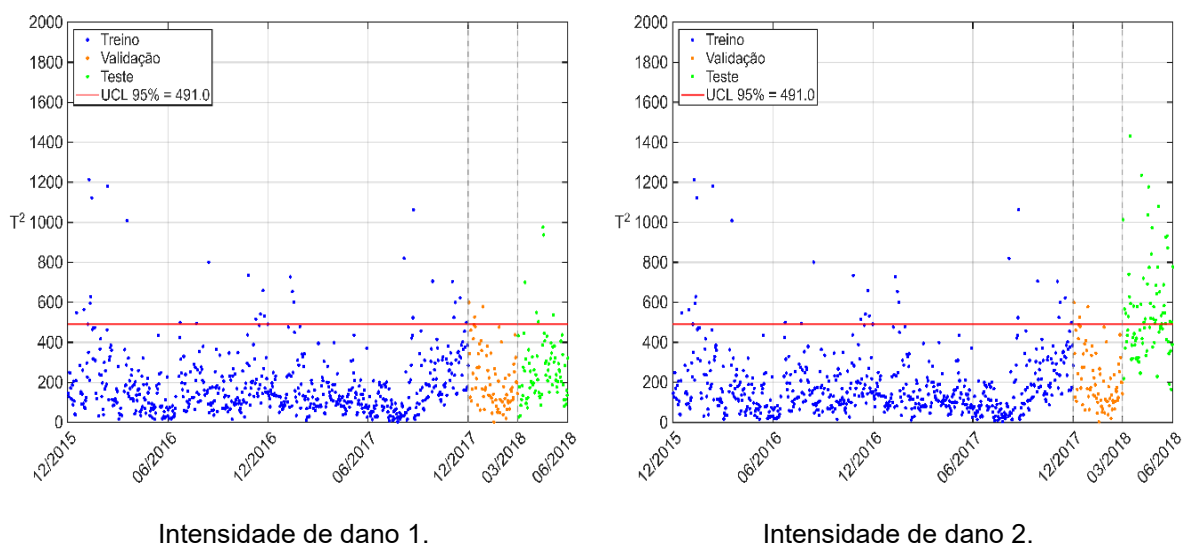


Figura 4.7 - Cartas de controlo para um agrupamento de 48 pontos e intensidade de dano 1 (esquerda) e 2 (direita).

Finalmente, é apresentada a Tabela 4.7, semelhante às tabelas já apresentadas, mas desta vez com um agrupamento de 96 pontos, correspondentes a 48 horas de monitorização.

Como era de esperar, no período de treino, a percentagem de pontos acima do UCL é de 4,7% em todas as intensidades, confirmando que o UCL foi corretamente definido como o percentil 95% dos valores de T^2 do treino. A mediana de T^2 mantém-se constante em 289,7.

No período de validação, a percentagem de pontos acima do UCL é de 12,8% em todas as intensidades, valor superior aos 5% esperados. Esta situação pode indicar que o modelo é demasiado sensível e por isso afetado por pequenos erros derivados do processo de identificação modal e da minimização de efeitos ambientais e operacionais, ou porque em termos de proporção (para a amostra do conjunto de validação), um valor fora do limite tem um peso (em percentagem de amostra) mais significativo do que nos casos em que o agrupamento é maior. A mediana de T^2 mantém-se constante em 311,1, confirmando que o comportamento da estrutura no período de validação não é influenciado pelo dano simulado.

É no período de teste que se encontram as maiores diferenças. Para a intensidade 1, a percentagem de pontos acima do UCL (19,1%) e a mediana de T^2 (576,3) apresentam já um aumento face ao estado sem dano (9,5% e 576,0), embora a mediana seja praticamente igual. Para a intensidade 2, observa-se um aumento muito expressivo, 97,6% de pontos acima do UCL, e mediana de T^2 de 1619,5, indicando que o dano é claramente detetável. Para as intensidades 3 e 4, a deteção é total, com 100% de pontos acima do UCL e medianas de T^2 de 4847,0 e 12806 respetivamente, evidenciando uma capacidade de deteção inequívoca para danos de maior intensidade.

Na Figura 4.8 são apresentadas duas cartas de controlo, para intensidades de 1 (esquerda) e 2 (direita). No cenário com intensidade de dano 1, ainda é pouco perceptível a deteção do dano. No entanto, no cenário com intensidade de dano 2, a deteção de dano já é inequívoca, já que a maior parte dos pontos se encontra acima do limite imposto.

Tabela 4.7 - Valores da percentagem de pontos acima do UCL e da mediana de T^2 ($r=96$).

	Percentagem de pontos acima do UCL					Mediana de T^2				
	Sem dano	Intensidade de dano				Sem dano	Intensidade de dano			
		1	2	3	4		1	2	3	4
Treino	4,7%	4,7%	4,7%	4,7%	4,7%	289,7	289,7	289,7	289,7	289,7
Validação	12,8%	12,8%	12,8%	12,8%	12,8%	311,1	311,1	311,1	311,1	311,1
Teste	9,5%	19,1%	97,6%	100%	100%	576,0	576,3	1619,5	4847,0	12806

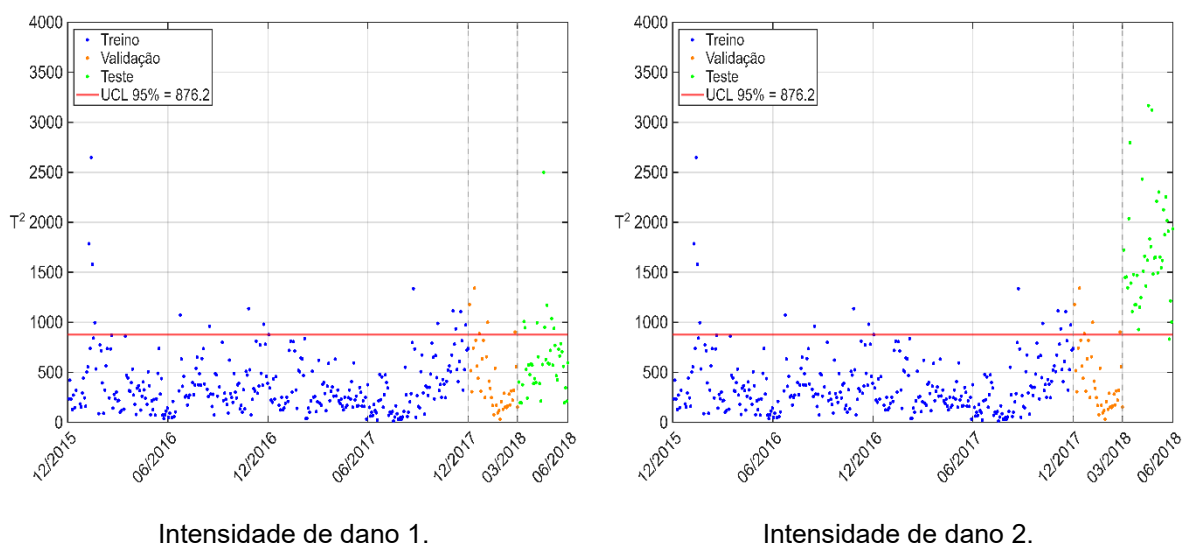


Figura 4.8 - Cartas de controlo para um agrupamento de 96 pontos e intensidade de dano 1 (esquerda) e 2 (direita).

Com base nos resultados apresentados nas tabelas anteriores, é possível tecer algumas conclusões sobre o desempenho do sistema de deteção de dano para as diferentes intensidades e valores de agrupamentos de pontos considerados.

Em todas as abordagens, o período de treino apresenta percentagens de pontos acima do UCL próximas de 5%, confirmando que o UCL foi corretamente definido em todas as configurações testadas. A mediana de T^2 mantém-se constante para todas as intensidades de dano no treino e na validação, demonstrando que estes períodos correspondem exclusivamente ao estado saudável da estrutura e não são influenciados pelo dano simulado no período de teste.

Relativamente à capacidade de deteção, os resultados mostram que todas as abordagens conseguem detetar claramente o dano para as intensidades mais elevadas (intensidades 3 e 4), atingindo percentagens de pontos acima do UCL próximas ou iguais a 100%. As diferenças entre abordagens são mais evidentes para intensidades intermédias, em particular a intensidade 2, onde alguns agrupamentos de pontos apresentam uma deteção clara enquanto outras mostram apenas indícios de anomalia.

Com o agrupamento de 96 pontos é possível indiciar a deteção de uma anomalia para o primeiro nível de intensidade de dano, no entanto, esta conclusão não deve ser definitiva pois trata-se de uma carta de controlo muito sensível, em termos da percentagem de pontos acima do UCL, à existência de valores acima do percentil 95.

Em síntese, os resultados demonstram que a carta de controlo T^2 de *Hotelling* constitui uma ferramenta eficaz para a deteção de dano estrutural na barragem do Baixo Sabor, para o cenário simulado, sendo a sua capacidade de deteção influenciada pelo número de pontos agrupados adotado e pela intensidade do dano simulado.

Por fim, é apresentada a Tabela 4.8. Esta tabela apresenta a percentagem de pontos acima do UCL para um cenário de dano de intensidade 2, para os cinco valores de agrupamento r considerados. No período de treino, os valores situam-se entre 4,7% e 5,0% em todas as configurações, confirmando a correta definição do UCL. No período de validação, os valores variam entre 3,9% e 12,8%, apresentando alguma instabilidade consoante o valor de r adotado. No período de teste, observa-se uma variação muito significativa em função do valor de r . Para $r=6$ e $r=12$, a percentagem de pontos acima do UCL é de 3,7% e 6,2% respetivamente, valores próximos dos obtidos em condições saudáveis, indicando que o dano não é detetado de forma clara. A partir de $r=24$, a percentagem aumenta progressivamente, demonstrando que valores de agrupamento mais elevados proporcionam uma maior capacidade de deteção para esta intensidade de dano. Este comportamento sugere que, para danos de intensidade intermédia como o considerado, a escolha de valores de r mais elevados é determinante para uma deteção eficaz.

Tabela 4.8 - Percentagem de pontos acima do UCL para um dano de intensidade 2

	Percentagem de pontos acima do UCL				
	Agrupamentos de pontos				
	6	12	24	48	96
Treino	5,0%	5,0%	4,9%	4,9%	4,7%
Validação	7,8%	8,0%	9,6%	3,9%	12,8%
Teste	3,7%	6,2%	17,9%	53,6%	97,6%

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 TRABALHO REALIZADO

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de deteção de anomalias estruturais em barragens de betão, com base em dados de monitorização dinâmica contínua. A metodologia adotada assenta em três etapas principais: a remoção dos efeitos ambientais e operacionais sobre as frequências naturais através de um modelo de regressão linear múltipla HTT, o cálculo dos resíduos resultantes e a sua submissão a uma carta de controlo T^2 de *Hotelling* para deteção de anomalias.

O capítulo 2 apresentou os conceitos principais sobre o controlo de segurança de barragens de betão, abordando os tipos de barragem de betão e as principais ações a que estão sujeitas. Também foram apresentados os métodos de observação do comportamento estrutural, bem como os instrumentos utilizados para a observação da resposta, e os erros e incertezas associados. Por fim, foi apresentada a metodologia proposta para a deteção de anomalias, incluindo os modelos de previsão do comportamento estrutural e as cartas de controlo T^2 de *Hotelling*.

No capítulo 3 apresentou-se o caso de estudo. O estudo foi aplicado à barragem do Baixo Sabor, onde a metodologia descrita anteriormente foi aplicada. Caracterizou-se a evolução das frequências naturais dos quatro primeiros modos de vibração e ficou demonstrada a forte influência do nível de água e da temperatura do ar sobre o comportamento da estrutura. O modelo de regressão HTT ajustado revelou-se eficaz na remoção desses efeitos, com coeficientes de determinação R^2 elevados, e os resíduos obtidos apresentaram distribuições aproximadamente centradas em zero, validando a adequação do modelo como base para a deteção de anomalias.

O capítulo 4 avaliou o desempenho do sistema de deteção de anomalias desenvolvido, considerando cinco valores do parâmetro de agrupamento r (6, 12, 24, 48, e 96 observações) e quatro intensidades de dano crescentes. Foram primeiro apresentados os cenários base sem dano, que permitiram verificar a estabilidade das cartas de controlo em condições saudáveis e analisar a influência do valor de r no UCL e na mediana de T^2 . De seguida, foram introduzidos os cenários de dano simulado e avaliada a capacidade do sistema em detetar as variações de frequência associadas a cada intensidade. Os resultados demonstraram que danos de intensidade elevada são detetados de forma clara e inequívoca em todas as configurações testadas, enquanto a deteção de danos de intensidade intermédia depende significativamente do valor de r adotado.

Em suma, os resultados obtidos demonstram que as cartas de controlo T^2 de *Hotelling* são uma ferramenta eficaz para a deteção de valores anómalos no comportamento de barragens de betão com monitorização dinâmica contínua.

5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Relativamente ao modelo de regressão, os coeficientes de determinação R^2 obtidos para os quatro primeiros modos de vibração situam-se entre 0,88 e 0,97, demonstrando que o modelo é eficaz na remoção dos efeitos do nível de água e da temperatura do ar sobre as frequências naturais. A análise dos resíduos confirmou a adequação do modelo, com distribuições aproximadamente simétricas e centradas em zero para todos os modos considerados.

No que diz respeito à deteção de anomalias, em todos os valores de r testados, o período de treino apresenta percentagens de pontos acima do UCL próximas de 5%, confirmando que o UCL foi corretamente definido em todas as configurações. Já o período de validação apresenta percentagens ligeiramente superiores em alguns casos. No período de teste, os resultados demonstram que a capacidade de deteção do sistema depende do valor de r adotado e da intensidade do dano simulado. Danos de intensidade elevada são detetados de forma clara em todas as configurações testadas, com percentagens de pontos acima do UCL próximas ou iguais a 100%. Já os danos de baixa intensidade revelam-se difíceis de detetar em todas as configurações testadas.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

Com base no trabalho desenvolvido e nas limitações identificadas, propõem-se os seguintes tópicos para investigação futura.

Um primeiro aspeto a explorar prende-se com o critério de deteção utilizado. No presente trabalho, a deteção de anomalias é avaliada com base na percentagem total de pontos acima do UCL no período de teste. Uma abordagem alternativa consiste em considerar apenas sequências de pontos consecutivos acima do UCL como indicadores de anomalia, reduzindo a probabilidade de alertas isolados serem indevidamente valorizados. Neste contexto, seria relevante estudar qual o número mínimo de pontos consecutivos acima do UCL necessário para se ter confiança na existência de uma anomalia real, e a que intervalo de tempo esse conjunto de pontos corresponde para cada valor de r considerado.

No que diz respeito à simulação de dano, no presente trabalho este é introduzido de forma abrupta no início do período de teste, com uma variação de frequência constante ao longo de todo esse período. Uma abordagem mais realista consistiria em simular a introdução progressiva do dano ao longo do tempo, refletindo o carácter gradual dos processos de degradação estrutural. Este cenário permitiria avaliar a capacidade do sistema em detetar danos em fase inicial de desenvolvimento e acompanhar a sua evolução temporal.

Relativamente aos cenários de dano considerados, o presente trabalho analisa apenas um cenário. A extensão da análise a outros cenários, correspondentes a diferentes localizações, extensões e tipos de dano, como os quatro cenários estudados em (Pereira et al. 2021b) assim como cenários adicionais, permitiria avaliar de forma mais abrangente a capacidade e as limitações do sistema de deteção desenvolvido, bem como estudar a possibilidade de localizar o dano com base no padrão de variações entre modos de vibração.

Por fim, a aplicação de outras grandezas de controlo de segurança, nomeadamente os deslocamentos observados através dos sistemas de monitorização, permitiria avaliar se a metodologia utilizada neste trabalho é igualmente eficaz na deteção de anomalias a partir de outro tipo de grandezas, e contribuiria para o desenvolvimento de sistemas de monitorização mais abrangentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APA, Agência Portuguesa do Ambiente. 2021a. 'Barragens de Portugal', Acedido em 12/06/2026. <https://apambiente.pt/prevencao-e-gestao-de-riscos/barragens-de-portugal>.
- APA, Agência Portuguesa do Ambiente. 2021b. 'Legislação e guias', Acedido em 12/06/2026. <https://apambiente.pt/prevencao-e-gestao-de-riscos/legislacao-e-guias>.
- APA, Agência Portuguesa do Ambiente. 2026. 'Baixo Sabor', Acedido em 30/05/2026. <https://cnpqgb.apambiente.pt/content/baixo-sabor>.
- APA, Agência Portuguesa do Ambiente, e LNEC. 2018. '*Classificação de Pequenas Barragens*'.
- Barbosa, Paulo Alexandre Rodrigues. 2025. '*Previsão de deslocamentos numa barragem de betão com recurso a modelos estatísticos e ao comportamento dinâmico observado*', *Dissertação de Mestrado*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Cardoso, Manuel Ferreira de Lemos Bastos. 2013. '*Estudo da espessura das camadas de betonagem e do ritmo de construção de uma barragem abóbada de grandes dimensões*', *Dissertação de Mestrado*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Chen, Sheng-Hong. 2015. *Hydraulic Structures* (Springer: Berlin; Heidelberg). ISBN 978-3-662-47330-6.
- EDP, Energias de Portugal. 2024. 'Central Hidroelétrica do Alto Lindoso', Acedido em 11/06/2026. <https://edp.com/pt/europa/portugal/central-hidroeletrica-do-alto-lindoso>.
- Gomes, Jorge P., José V. Lemos, Sérgio Pereira, e Álvaro Cunha. 2025. "*Monitoring and interpretation of the dynamic behavior of concrete dams*." In The 28th ICOLD Congress. Chengdu, China. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003642428>.
- Gomes, Jorge P., e Filipe Magalhães. 2015. '*Barragem de montante do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor. Caracterização do comportamento dinâmico da barragem através de monitorização em contínuo. Relatório de instalação*'.
- Hydro-Québec. 1996. 'Daniel-Johnson dam', Acedido em 11/06/2026. <https://www.hydroquebec.com/facility-tours/tours-general-public/daniel-johnson-manic-5-cote-nord.html>.

- Jesus, Rafael Diegues. 2011. '*Optimização Estrutural de Uma Barragem*', *Dissertação de Mestrado*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Johnson, Richard A., e Dean W. Wichern. 2007. *Applied Multivariate Statistical Analysis* (Pearson Prentice Hall). ISBN 0-13-187715-1.
- LNEC. 2025. '*Barragem do Baixo Sabor. Inspeção à estrutura e ao sistema de observação efetuada em fevereiro e março de 2024. LNEC - Proc. 0403/1201/20761. Nota Técnica 127/2025 – DBB/NO*'.
- Mata, Juan. 2007. '*Aplicação de redes neuronais ao controlo de segurança de barragens de betão*', *Dissertação de Mestrado*, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Mendes, José. 2023. '*Identificação de novidades no comportamento observado em barragens de betão com recurso a modelos de machine learning*', *Dissertação de Mestrado*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Mendes, Paulo Jorge Henrique. 2010. '*Observação e Análise do Comportamento Dinâmico de Barragens de Betão*', *Tese de Doutoramento*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Montgomery, Douglas C. 2009. *Introduction to Statistical Quality Control* (John Wiley & Sons, Inc). ISBN 978-0-470-16992-6.
- Moura, Graça Maria Gomes. 2005. '*Determinação De Tensões a Partir De Extensões Observadas em Barragens De Betão*', *Dissertação de Mestrado*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Oliveira, Sérgio Bruno Martins de. 2000. '*Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo. Formulações de dano*', *Tese de Doutoramento*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pereira, Sérgio. 2019. '*Structural condition assessment of dams based on continuous dynamic monitoring* ', *Tese de Doutoramento*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pereira, Sérgio, Filipe Magalhães, Jorge P. Gomes, e Álvaro Cunha. 2021a. '*Modal tracking under large environmental influence. Sistema implementado na barragem de Foz Tua*.', *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00536-2>.

Pereira, Sérgio, Filipe Magalhães, Jorge P. Gomes, Álvaro Cunha, e José V. Lemos. 2021b. 'Vibration-based damage detection of a concrete arch dam', Engineering Structures. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112032>.

Pereira, Sérgio, Juan Mata, Filipe Magalhães, Jorge Gomes, e Álvaro Cunha. 2024. "Predicting the Dynamic Behaviour of a Concrete Dam using Statistical and Machine Learning Models " In 11th European Workshop on Structural Health Monitoring. Potsdam, Germany.

Rebelo, Rodolfo Pereira Basílio Trigos. 2020. 'Estudo do comportamento estrutural de barragens arco-gravidade afetadas por expansões do betão. Aplicação à barragem da Bemposta', Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa.

RSB. 2018. 'Regulamento de Segurança de Barragens.', Decreto-Lei n.º 21/2018 de 28 de março, Diário da República, Lisboa.

Šafarek, Goran. 2018. 'The oldest dams in the world', Acedido em 22-04-2026. <https://worlddrivers.net/2025/07/27/the-oldest-dams-in-the-world/>.

Sejas, Andrés. 2024. 'Dynamic behaviour of a concrete dam: development of statistical and machine learning models for interpretation of monitoring data', Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Silva, José. 2022. 'Desenvolvimento de modelos de machine learning baseados em dados de monitorização contínua de barragens de betão para interpretação do comportamento estrutural observado', Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Switzerland Tourism 2026. 'Barragem de Grande Dixence', Acedido em 11/06/2026. <https://www.myswitzerland.com/pt/interesses/grande-dixence-a-represa-de-285-metros/>.

Tata & Howard 2026. 'A History of Dams: From Ancient Times to Today', Acedido em 05/06/2026. <https://tataandhoward.com/a-history-of-dams-from-ancient-times-to-today/>.

The MathWorks Inc. 2025. "MATLAB." In version 24.2.0 (R2025b). Natick, MA: The MathWorks Inc.