

PREVISÃO DE DESLOCAMENTOS NUMA BARRAGEM DE BETÃO COM RECURSO A MODELOS ESTATÍSTICOS E AO COMPORTAMENTO DINÂMICO OBSERVADO

PAULO ALEXANDRE RODRIGUES BARBOSA

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

Orientador: Professor Doutor Álvaro Alberto de Matos Ferreira da Cunha

Coorientador: Doutor Juan Tomé Caires da Mata

Coorientador: Doutor Sérgio Bouça Pereira

JULHO DE 2025

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2024/2025

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

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 – 2024/2025 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2025*

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 e amigos,

*Aprender sem pensar é trabalho perdido,
pensar sem aprender é perigoso.*

Confúcio

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação assinala o encerramento do meu percurso académico, cuja concretização só foi possível graças ao apoio de pessoas especiais, a quem expresso o meu mais sincero agradecimento.

Agradeço à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, cuja excelência e rigor tornaram possível o meu desenvolvimento académico e pessoal, proporcionando-me um motivo de grande orgulho ao longo deste percurso.

Agradeço ao Departamento de Barragens de Betão do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (DBB-LNEC) pelo acolhimento e apoio durante o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço a colaboração e o apoio da Movhera – Hidroelétricas do Norte, S.A. e da ENGIE Douro – Hidroelétricas do Douro, nomeadamente pelo acesso aos dados experimentais da monitorização da barragem do Baixo Sabor.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Álvaro Cunha, pela oportunidade de realizar esta dissertação e pela disponibilidade desde o início.

Ao meu coorientador, Doutor Sérgio Pereira, pela ajuda, disponibilidade e conselhos ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador, Doutor Juan Mata pela orientação, pela motivação e transmissão de conhecimento desde o primeiro dia, pela disponibilidade que sempre demonstrou e pelos valiosos conselhos, que muito contribuíram ao longo destes meses.

À Associação de Estudantes da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pelas aprendizagens e ensinamentos que tanto me marcaram, pelas histórias inesquecíveis e, acima de tudo, pelas amizades verdadeiras que aí construí.

Aos meus pais, pelo amor, pelo apoio incondicional, pelos conselhos, por nunca desistirem e lutarem incansavelmente para me proporcionarem as melhores oportunidades ao longo da vida.

À minha irmã, Patrícia, pelos conselhos sinceros, pelo exemplo inspirador que sempre foi para mim e por estar sempre presente ao longo destes anos.

À minha família, mesmo aos que já partiram, pelo apoio e pelo exemplo que foram e são para mim.

A todos os amigos que tive o privilégio de conhecer, os quais levo para a vida, pelas memórias que guardo comigo, pelas vivências partilhadas e por tornarem este percurso imensamente especial.

Em especial, ao João, Duarte, José e Nuno, por nunca me falharem desde o primeiro dia na FEUP, pelos conselhos que nunca deixaram de dar, pelas histórias partilhadas e por uma amizade que sei que levo para a vida.

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 segurança estrutural de uma barragem de betão depende da sua capacidade de manter a sua estabilidade estrutural (evitando, por exemplo, cenários de deslizamento ou de derrubamento) e o bom comportamento estrutural ao longo do tempo, sob a atuação de diferentes condições. A avaliação contínua e sistemática do seu comportamento é realizada com base em dados obtidos por sistemas de monitorização, que integram instrumentos capazes de medir diversas grandezas relevantes, como deslocamentos, temperatura e nível da água da albufeira, que são grandezas de especial relevância neste caso de estudo. Em conjunto com as inspeções visuais, estas medições são essenciais para detetar variações anómalas no comportamento da estrutura, permitindo a antecipação de potenciais cenários de acidente ou alterações indesejadas no seu desempenho.

Estes dados depois de devidamente organizados e interpretados, permitem a construção de modelos que ajudam a caracterizar o comportamento estrutural destas infraestruturas.

Entre as abordagens mais utilizados, destaca-se o desenvolvimento de modelos HST (*Hydrostatic, Seasonal, Time*), que se baseia na relação de variáveis e o comportamento observado da estrutura. No entanto, estes modelos, embora eficazes, não incorporam diretamente informações sobre a resposta dinâmica da estrutura, nomeadamente as suas frequências naturais, aspetos que se pretendem potenciar no âmbito desta tese.

Com a crescente digitalização e automação dos sistemas de monitorização, surge a oportunidade de incorporar novas variáveis e metodologias que complementem os modelos empíricos existentes. Neste contexto, esta dissertação propõe um modelo alternativo, designado por $HT_{Freq}T$ (*Hydrostatic, Thermal based on frequencies, Time*), que amplia a formulação tradicional HTT (*Hydrostatic, Thermal, Time*) através da inclusão das frequências naturais da estrutura como variáveis explicativas adicionais, para a representação do efeito da temperatura. A integração destas frequências visa melhorar a representação do efeito térmico sobre os deslocamentos observados.

O trabalho inclui a comparação entre o modelo HST, o modelo $HT_{Freq}T$, e o modelo $HT_{Freq}T$ obtido com recurso à seleção automática de variáveis com base no critério de informação Akaike (AIC), modelo este que visa a simplificação do modelo $HT_{Freq}T$, reduzindo o número de variáveis de entrada. Esta etapa permite explorar o equilíbrio entre complexidades e desempenho preditivo, valorizando modelos que sejam simultaneamente robustos e eficientes.

A proposta metodológica insere-se na evolução dos modelos empíricos utilizados na monitorização de barragens e levanta a possibilidade de integração futura com sistemas preditivos em tempo real.

O caso de estudo adotado para a aplicação da metodologia proposta centra-se na barragem do Baixo Sabor, uma estrutura em abóbada de dupla curvatura, com um sistema de observação que permite medições manuais e automatizadas. A identificação das frequências naturais resulta do processamento de acelerações medidas num Sistema de Monitorização Dinâmica Contínua (SMDC), enquanto os deslocamentos radiais foram obtidos em bases de fio de prumo.

Este trabalho contribui para o desenvolvimento de novas abordagens no campo de análise do comportamento estrutural de barragens de betão, explorando o potencial das variáveis dinâmicas na melhoria dos modelos de interpretação quantitativa. A metodologia aqui proposta, visa apoiar uma gestão mais informada e preventiva, reforçando os processos de controlo de segurança estrutural de barragens de betão.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de Betão, Comportamento Estrutural Observado, Modelo Estatístico, Barragem do Baixo Sabor, Frequências Naturais.

ABSTRACT

The structural safety of a concrete dam depends on its ability to maintain its structural stability (avoiding, for example, scenarios of slippage or collapse) and good structural behaviour over time, under different conditions. The continuous and systematic assessment of its behaviour is carried out based on data obtained by monitoring systems, which integrate instruments capable of measuring various relevant parameters, such as displacements, temperature and reservoir water level, which are particularly relevant in this case study. Together with visual inspections, these measurements are essential for detecting abnormal variations in the behaviour of the structure, allowing the anticipation of potential accident scenarios or unwanted changes in its performance.

Once this data has been properly organised and interpreted, it can be used to build models that help to characterise the structural behaviour of these infrastructures.

Among the most commonly used approaches is the development of HST (Hydrostatic, Seasonal, Time) models, which are based on the relationship between variables and the observed behaviour of the structure. However, although effective, these models do not directly incorporate information about the dynamic response of the structure, namely its natural frequencies, aspects that this thesis aims to enhance.

With the increasing digitisation and automation of monitoring systems, there is an opportunity to incorporate new variables and methodologies that complement existing empirical models. In this context, this dissertation proposes an alternative model, called HT_{Freq}T (Hydrostatic, Thermal based on frequencies, Time), which extends the traditional HTT (Hydrostatic, Thermal, Time) formulation by including the natural frequencies of the structure as additional explanatory variables to represent the effect of temperature. The integration of these frequencies aims to improve the representation of the thermal effect on the observed displacements.

The work includes a comparison between the HST model, the HT_{Freq}T model, and the HT_{Freq}T model obtained using automatic variable selection based on the Akaike information criterion (AIC), a model that aims to simplify the HT_{Freq}T model by reducing the number of input variables. This step allows us to explore the balance between complexity and predictive performance, valuing models that are both robust and efficient.

The methodological proposal is part of the evolution of empirical models used in dam monitoring and raises the possibility of future integration with real-time predictive systems.

The case study adopted for the application of the proposed methodology focuses on the Baixo Sabor dam, a double-curvature arch structure, equipped with a monitoring system that allows both manual and automated measurements. The identification of natural frequencies is based on a Continuous Dynamic Monitoring System (CDMS), while radial displacements were obtained from plumb line base measurements.

This work contributes to the development of new approaches in the field of structural behaviour analysis of concrete dams, exploring the potential of dynamic variables in improving quantitative interpretation models. The methodology proposed here aims to support more informed and preventive management, reinforcing the structural safety control processes of concrete dams.

KEYWORDS: Concrete Dam, Observed Structural Behavior, Statistical Model, Baixo Sabor Dam, Natural Frequencies.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE FIGURAS	IX
ÍNDICE TABELAS	XII
SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS	XIII
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 ENQUADRAMENTO AO TEMA	17
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	18
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2 OBSERVAÇÃO E CONTROLO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE BETÃO	23
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
2.2 TIPOLOGIAS DE BARRAGENS	25
2.3 BARRAGENS DE BETÃO	26
2.4 BARRAGENS EM PORTUGAL	27
2.5 CONTROLO DE SEGURANÇA	29
2.6 OBSERVAÇÃO DAS PRINCIPAIS AÇÕES	30
2.6.1 PESO PRÓPRIO	30
2.6.2 AÇÃO DA ÁGUA	30
2.6.3 AÇÕES TÉRMICAS	32
2.6.4 AÇÕES DINÂMICAS	33
2.7 OBSERVAÇÃO DA RESPOSTA ESTRUTURAL	33
2.7.1 DESLOCAMENTOS	34
2.7.2 MOVIMENTOS DE JUNTAS E FISSURAS	36
2.7.3 TENSÕES E EXTENSÕES	37
2.7.4 CAUDAIS	37
2.7.5 PROPRIEDADES MODAIS	38
2.8 ERROS E INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS	40
2.9 FREQUÊNCIA DE LEITURAS E VALIDAÇÃO DE DADOS	41
3 INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL OBSERVADO COM RECURSO A MODELOS DE MACHINE LEARNING	45
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	45
3.2 MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA	47

3.2.1 ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES	48
3.2.2 MODELOS DE INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA UTILIZADOS NO CONTROLO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS	49
3.3 METODOLOGIA E TRABALHOS PROPOSTOS NO ÂMBITO DA DISSERTAÇÃO	52
4 CASO DE ESTUDO – BARRAGEM DO BAIXO SABOR	57
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	57
4.2 APRESENTAÇÃO DO APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DO BAIXO SABOR	57
4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM DO BAIXO SABOR	59
4.2.2 GRANDEZAS ANALISADAS E SISTEMA DE OBSERVAÇÃO.....	61
4.3 INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL COM RECURSO A MÉTODOS QUANTITATIVOS TRADICIONAIS	64
4.4 INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL COM RECURSO AO MODELO $HT_{FREQ}T$..	71
4.4.1 APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DO MODELO $HT_{FREQ}T$ COM OS MODELOS TRADICIONAIS	71
4.4.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO $HT_{FREQ}T$ COM RECURSO AO CRITÉRIO DE INFORMAÇÃO AIC	79
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
5 CONCLUSÕES	83
5.1 TRABALHO REALIZADO	83
5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	84
5.3 PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 - Barragem Sadd el-Kafara (Amusing Planet).	17
Figura 2 - Vila de <i>Longarone</i> (Itália) antes do acidente de <i>Vajont</i> (von Hardenberg, W., 2011).	24
Figura 3 - Vila de <i>Longarone</i> (Itália) depois do acidente de <i>Vajont</i> (von Hardenberg, W., 2011).	24
Figura 4 - Ruínas da barragem de <i>Malpasset</i> (Duffaut, P., 2013).	25
Figura 5 - Tipos de barragens de betão, retirado de (Silva, 2022).	26
Figura 6 - Barragens de irrigação como principal função (retirado de barragens.pt, visitado a 24/05/2025).	28
Figura 7 - Barragens de produção de energia como principal função (retirado de barragens.pt, visitado a 24/05/2025).	28
Figura 8 - Barragem do Cabril, retirado de cnpqb.apambiente.pt, visitado a 24/05/2025.	28
Figura 9 - Barragem do Alqueva, retirado de cnpqb.apambiente.pt, visitado a 24/05/2025.	28
Figura 10 - Componentes da segurança em barragens (Silva, J.A., 2022).	30
Figura 11 - Escala limnimétrica, retirado de (Moura, G.M.G., 2005).	31
Figura 12 - Medidor automático do nível de água, retirado de (da Costa Mendes, J.M., 2023).	31
Figura 13 - Manómetro de um piezómetro simples (Moura, G.M.G., 2005).	31
Figura 14 - Manómetros de um leque piezométrico (da Mata, J.T.C., 2007).	31
Figura 15 - Estação meteorológica, retirado de (Mata 2007).	32
Figura 16 - Fio de prumo direito, retirado de (Rebelo 2020).	35
Figura 17 - Nicho de Fio de prumo (direito e invertido), retirado de (Barros, P.S., J., 2016).	35
Figura 18 – Cabeça de extensómetro de varas na fundação, retirado de (Sampaio, 2015).	36
Figura 19 - Base tridimensional, retirado de (Barros, P.S., J., 2016).	37
Figura 20 - Base de alongâmetro, retirado de (Rebelo 2020).	37
Figura 21 - Bica totalizadora com medidor automático, retirado de (da Mata, J.T.C., 2007).	38
Figura 22 - Dreno de galeria drenante, retirado de (Moura, G.M.G., 2005).	38
Figura 23 - Acelerómetro, retirado de (Mata 2013).	39
Figura 24 - Vibradores: a) rotativos de massa excêntrica, com motor elétrico (LNEC); b) de translação com motor servo hidráulica (EMPA), retirado de (Mendes, 2010).	39
Figura 25 - Tipos de <i>Machine Learning</i> .	46
Figura 26 - Metodologia para a construção do modelo HT_{FreqT} com Regressão Linear Múltipla.	55

Figura 27 - Barragem do Feiticeiro, retirado de (Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens, Consult. 12/06/2025).	58
Figura 28 - Construção dos poços da barragem do Baixo Sabor, retirado de (FCM, Consult. 12/06/2025).	59
Figura 29 – Vista aérea da Barragem do Baixo Sabor, retirado de (FCM, Consult. 12/06/2025).	60
Figura 30 - Barragem do Baixo Sabor, em fase de construção, adaptado de (FCM, Consult. 12/06/2025).	60
Figura 31 – Alçado planificado com a localização dos acelerómetros, dedicados à monitorização contínua.	62
Figura 32 - Componentes do deslocamento horizontal, retirado de (Silva, J.A., 2022).	65
Figura 33 – Alçado planificado com a localização dos fios de prumo.	65
Figura 34 - Variação do nível da água da albufeira.	66
Figura 35 - Variação da temperatura da barragem entre dezembro de 2015 e dezembro de 2018.	66
Figura 36 - Corte da barragem pelo eixo do FP3.	67
Figura 37 – Resultados da interpretação quantitativa, modelo HST e série temporal dos deslocamentos radiais observados no FP3-233 m.	68
Figura 38 - Efeito do nível nos deslocamentos radiais medidos na base do FP3-233m.	69
Figura 39 - Efeito Térmico nos deslocamentos radiais medidos na base do FP3-233m.	69
Figura 40 – Evolução dos resíduos entre os deslocamentos radiais observados na base FP3-233m e os previstos com o modelo HST.	69
Figura 41 – Resultados do modelo HST para a previsão dos deslocamentos radiais observados no FP3-233m.	70
Figura 42 - Resultados do modelo HST para a previsão dos deslocamentos tangenciais observados no FP3-233m.	71
Figura 43 - Evolução da componente térmica da frequência (modo 1), isolada por remoção de efeitos não térmicos e suavização <i>loess</i> .	72
Figura 44 - Evolução da componente térmica da frequência (modo 2), isolada por remoção de efeitos não térmicos e suavização <i>loess</i> .	73
Figura 45 - Evolução da componente térmica da frequência (modo 3), isolada por remoção de efeitos não térmicos e suavização <i>loess</i> .	73
Figura 46 - Evolução da componente térmica da frequência (modo 4), isolada por remoção de efeitos não térmicos e suavização <i>loess</i> .	74
Figura 47 - Evolução da componente térmica da frequência (modo 5), isolada por remoção de efeitos não térmicos e suavização <i>loess</i> .	74
Figura 48 - Comparação do efeito no nível da água dos modelos HST e HT_{FreqT} nos deslocamentos radiais observados no FP3-233m.	76

Figura 49 - Comparação do efeito térmico dos modelos HST e $HT_{Freq}T$	76
Figura 50 - Comparação dos deslocamentos observados com os valores estimados pelos modelos $HT_{Freq}T$ e HST.....	77
Figura 51 – Comparação entre valores dos deslocamentos observados e previstos.	78
Figura 52 - Comparação dos resíduos dos modelos $HT_{Freq}T$ e HST.....	78
Figura 53 - Representação consolidada dos resultados dos modelos $HT_{FREQ}T$ e HST.....	79
Figura 54 - Comparação dos deslocamentos observados com os valores estimados pelos modelos $HT_{Freq}T$, $HT_{Freq}T$ (AIC) e HST.	81
Figura 55 - Comparação dos resíduos dos modelos $HT_{Freq}T$, $HT_{Freq}T$ (AIC) e HST.....	81

ÍNDICE TABELAS

Tabela 1 - Precisão das medições das grandezas, adaptado de (Lutz et al., 2006; Mata, 2007).	41
Tabela 2 - Síntese do sistema de observação com recolha manual de dados (RMD) (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2017).	63
Tabela 3 - Síntese do sistema de observação com recolha automática de dados (RAD), (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2017).	64
Tabela 4 – Termos usualmente utilizados na Interpretação Quantitativa com abordagem HST, adaptado de (Silva, J.A., 2022).	66
Tabela 5 - Resumo comparativo dos dois modelos lineares ajustados com os indicadores estatísticos mais relevantes.	75
Tabela 6 - Resumo comparativo dos modelos HST e $HT_{Freq}T$, com o modelo $HT_{Freq}T$ otimizado.	80

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

APA - Agência Portuguesa do Ambiente

DEC - Departamento de Engenharia Civil

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

CNPGB - Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens

FP - Fio de Prumo

GNSS - *Global Navigation Satellite System*

HST - *Hydrostatic, Seasonal, Time*

HTT - *Hydrostatic, Thermal based on concrete temperature, Time*

HT_{Air}T - *Hydrostatic, Thermal based on air temperature, Time*

HT_{Freq}T - *Hydrostatic, Thermal based on natural frequencies, Time*

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

RAD – Recolha Automática de Dados

RMD – Recolha Manual de Dados

NPA – Nível Pleno de Armazenamento

RSB – Regulamento de Segurança de Barragens

SMDC – Sistema de Monitorização Dinâmica Continua

AIC – Critério de Informação de *Akaike*

$U_h(h)$, $U_s(s)$, $U_t(t)$ - Parcelas das grandezas correspondentes ao efeito elástico do nível de água na albufeira, ao efeito elástico da variação da temperatura e ao efeito do tempo

a_i - Coeficiente da regressão a ajustar, relativo à $i^{\text{ésima}}$ função de aproximação para o efeito do nível da água na albufeira

b_i - Coeficiente da regressão a ajustar, relativo à $i^{\text{ésima}}$ função de aproximação para o efeito da temperatura

c_i - Coeficiente da regressão a ajustar, relativo à $i^{\text{ésima}}$ função de aproximação para o efeito do tempo

t_d - Número de dias decorridos desde o início do ano até à data da observação

ε_i - Resíduo da $i^{ésima}$ observação, dado pela diferença entre o valor estimado e o valor observado

X - Matriz dos termos independentes associados às ações

Y - Matriz do valor estimado da grandeza em análise

X_j - $j^{ésimo}$ termo associado às ações

β_j - Coeficiente linear correspondente ao termo X_j

$\delta(h_i, s_i, t_i)$ - Valor observado da grandeza em análise na observação i, que depende da pressão hidrostática, da temperatura e do instante em que se realiza a observação

m – Metros

mm – Milímetros

°C - Graus *Celsius*

seg – Segundos

Hz – *Hertz*

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO AO TEMA

Desde os primórdios da civilização, a água sempre desempenhou um papel essencial no quotidiano humano, muito além do simples consumo. Com o tempo, as sociedades começaram a perceber a necessidade de armazenar esse recurso precioso, o que levou ao desenvolvimento de técnicas específicas e, eventualmente, ao surgimento das barragens.

Inicialmente, as barragens eram construídas, sobretudo, para garantir o abastecimento de água à agricultura, como é exemplo a barragem *Sadd el-Kafara*, datada de 2900 aC, presente na Figura 1, considerada a mais antiga tentativa de construção de uma grande barragem, destacando-se não apenas pela sua função original de retenção de água, mas também pelo seu valor histórico e técnico, uma vez que evidencia os primeiros esforços humanos em engenharia hidráulica de grande escala.



Figura 1 - Barragem Sadd el-Kafara (Amusing Planet).

Com a evolução tecnológica e da sociedade, muitas vezes em torno deste bem essencial, e o crescimento das necessidades energéticas, políticas e ambientais, a sua construção passou a estar associada a interesses económicos e à produção de energia hidroelétrica.

Com o aumento da importância deste tipo de infraestruturas, surgiu também a necessidade de garantir a sua segurança. Em caso de falha estrutural, os danos podem ser catastróficos, ameaçando vidas humanas e o meio ambiente. A atividade de controlo da segurança das barragens começa ainda na fase de projeto e mantém-se ao longo de todo o seu ciclo de vida, incluindo a sua eventual desativação e demolição. O momento mais crítico em termos de teste de carga ocorre no primeiro enchimento da albufeira, uma vez que é o primeiro ensaio de carga real.

De forma a poder-se inferir sobre o comportamento estrutural, foram desenvolvidos sistemas de monitorização que permitem a medição, direta ou indireta, das principais ações a que a barragem está sujeita, das propriedades dos materiais e da resposta estrutural. O processo contínuo de monitorização, permite uma análise detalhada do comportamento da estrutura ao longo do tempo. Para a análise do comportamento observado, têm sido desenvolvidos modelos mais ou menos expeditos que permitem correlacionar a resposta estrutural com variáveis externas, como variações ambientais e operacionais ou a ocorrência de atividade sísmica.

Apesar de todos os meios disponíveis, com tecnologia de ponta, a segurança destas obras de arte necessita de elevado rigor técnico e atenção durante todas as fases de vida da obra. Embora atualmente já estejam desenvolvidas técnicas com ótimos resultados para a monitorização, é de elevada importância continuar o trabalho desenvolvido, procurando cada vez melhores resultados através de metodologias mais eficientes.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

A presente dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento, calibração e avaliação comparativa de distintos modelos estatísticos destinados à interpretação de grandezas representativas da resposta estrutural de barragens de betão, em particular o deslocamento radial. Para atingir esse propósito, foi realizada uma análise detalhada de metodologias e modelos previamente estabelecidos na literatura, com especial atenção às abordagens baseadas em técnicas estatísticas convencionais e em algoritmos de *Machine Learning*, áreas em constante evolução nos diversos domínios da engenharia.

Este trabalho insere-se na continuidade de investigações anteriores, procurando não apenas validar avanços obtidos, como também ampliar o conhecimento existente ao propor novas abordagens. A principal contribuição diferenciadora desta dissertação reside na introdução das frequências naturais da estrutura, como variável adicional nos modelos preditivos para representar o efeito térmico. Esta proposta reforça o compromisso, em especial da FEUP e do LNEC, com a inovação na monitorização e segurança de barragens, dando seguimento a um corpo consolidado de investigação nesta área, onde se destacam trabalhos focados na modelação do comportamento estrutural com recurso a técnicas de *Machine Learning*, como os desenvolvidos por (Silva, J.A., 2022), (da Costa Mendes, J.M., 2023) e (Sejas, A.M.G., 2024), nomeadamente com base em dados da barragem do Baixo Sabor. Através desta linha de investigação, a FEUP e o LNEC têm contribuído de forma significativa para o avanço do conhecimento técnico e científico no domínio da segurança de grandes infraestruturas hidráulicas.

Ao integrar estas novas variáveis de análise, pretende-se desenvolver modelos alternativos mais robustos e representativos, capazes de captar com precisão as variações no comportamento estrutural de barragens de betão. Este esforço visa, também tirar partido do conhecimento do comportamento dinâmico, promovendo o reforço das estratégias de monitorização e contribuindo para a melhoria das atividades de controlo de segurança estrutural.

Desta forma, a presente dissertação procura não apenas responder a desafios práticos associados à monitorização estrutural de barragens, mas também contribuir para o avanço do conhecimento técnico e científico na área. Ao conjugar fundamentos teóricos consolidados com abordagens inovadoras, nomeadamente a introdução de variáveis dinâmicas nos modelos preditivos, espera-se fornecer ferramentas mais eficazes para a avaliação do comportamento estrutural. Este contributo poderá, assim, revelar-se relevante no apoio à tomada de decisão em contextos de gestão da segurança e manutenção destas estruturas.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, organizados de forma a conduzir o leitor desde o enquadramento teórico e contextual até à aplicação prática e discussão dos resultados obtidos.

O capítulo 1 corresponde à introdução do trabalho, onde é apresentado o enquadramento geral do tema, destacando-se a motivação subjacente à investigação, os objetivos definidos e a estrutura adotada ao longo da dissertação.

No capítulo 2, é explorado o tema do controlo de segurança em barragens de betão, constituindo-se como a base teórica fundamental para o desenvolvimento do trabalho. Este capítulo apresenta uma descrição geral das barragens de betão, com ênfase no contexto nacional, e aborda os principais fatores externos que influenciam o comportamento estrutural, como variações térmicas, e as cargas hidrostáticas. São também discutidas as principais grandezas observadas, como as fissuras, deslocamentos, propriedades modais e tensões. Adicionalmente dedica-se uma secção à análise de aspetos fundamentais no processo de monitorização como os erros de medição, frequência de leitura e validação de dados.

O capítulo 3 foca-se na aplicação de modelos estatísticos e de *Machine Learning* à análise do comportamento estrutural da barragem. É feita uma introdução geral a esta área com especial atenção aos modelos de regressão linear múltipla. Este capítulo culmina com a descrição detalhada da metodologia adotada e dos trabalhos a desenvolver, definindo as abordagens estatísticas e computacionais utilizadas, dando especial atenção ao novo modelo desenvolvido $HT_{Freq}T$ (*Hydrostatic, Thermal based on frequencies, Time*), cuja principal inovação reside na representação do efeito térmico através da incorporação de dados do comportamento dinâmico, mais concretamente das frequências naturais da estrutura, permitindo uma caracterização da resposta estrutural às variações da temperatura fundamentada em dados da monitorização dinâmica.

O penúltimo capítulo é dedicado à apresentação do caso de estudo, centrado na barragem do Baixo Sabor, de onde foram extraídos todos os dados analisados ao longo da investigação. Inicialmente é feita uma caracterização técnica e estrutural da barragem, seguida da apresentação dos modelos clássicos utilizados, em especial, o modelo HST (*Hydrostatic, Seasonal, Time*), cuja construção e avaliação são descritas em detalhe. Em seguida, é introduzido o novo modelo proposto, cuja formulação e validação são exploradas em profundidade, uma vez que este constitui o principal

contributo inovador da presente dissertação. Por fim procede-se à comparação dos resultados obtidos por ambos os modelos, evidenciando-se as respetivas vantagens, limitações e potencial de aplicação.

Por fim, no capítulo 5, é feita uma reflexão sobre o trabalho desenvolvido, sintetizando os principais resultados alcançados e discutindo a sua relevância no contexto da monitorização estrutural de barragens. São ainda sugeridas possíveis direções para futuros estudos.

2

OBSERVAÇÃO E CONTROLO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE BETÃO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As barragens são obras construídas para reter ou controlar o fluxo de água, criando um reservatório artificial, sendo estruturas essenciais para a gestão hídrica e a produção de energia.

Além da irrigação e do crescimento urbano, um dos principais motivos para a construção de barragens é a geração de energia. Desde o século XV, a força da água tem sido utilizada para movimentar moinhos, tornando-se uma fonte essencial de energia mecânica. Com a vinda da eletricidade no início do século XX, a energia hidroelétrica passou a desempenhar um papel fundamental na criação de redes elétricas. Foi aquando da Revolução Industrial, que surgiram novos materiais, como o aço e o betão, auxiliando e criando possibilidades, como a construção de barragens para aproveitamento elétrico. Nos dias de hoje, a geração de eletricidade continua a ser uma das funções primordiais de muitas barragens modernas (Jackson, D.C., 2017).

Atualmente, estas obras atingiram dimensões elevadíssimas, como é exemplo, a barragem de *Jinpin-I*, na China, que possui o título de maior barragem em altura do mundo, com cerca de 305 metros, ou a barragem das Três Gargantas, também localizada na China, que possui a maior capacidade de geração de energia elétrica do mundo, gerando cerca de 22500 MW (International Hydropower Association, 2024).

O desenvolvimento tecnológico e a necessidade crescente do aumento da produção de energias renováveis têm impulsionado a construção de novas barragens. No entanto, há desafios associados a este tema, como a necessidade de incluir o estudo de impactos ambientais e sociais, entre outros aspetos que foram discutidos no ano de 2000 na *World Commission on Dams* (World Commission on Dams, 2000). Assim, a engenharia moderna continua a procurar alternativas que minimizem os impactos ambientais e sociais, mas que maximizem a produção de recursos vindos destas estruturas, demonstrando a preocupação em manter este equilíbrio. As barragens encontram-se,

em muitos casos, em avançado estado de envelhecimento, com diversas estruturas a atingirem ou ultrapassarem a sua vida útil estimada. Paralelamente, apesar de a maioria dos incidentes e acidentes registados ocorrerem em barragens de aterro, continuam a verificar-se eventos significativos em diferentes tipologias, frequentemente com consequências graves. Este contexto reforça a importância das atividades contínuas de controlo e monitorização da segurança estrutural.

A Figura 2 e a Figura 3 mostram um dos acidentes mais marcantes, pelo número de fatalidades, foi o acidente na barragem de *Vajont*, a 9 de outubro de 1963, em que houve um deslizamento numa das encostas a montante, provocando uma onda de cheia que galgou a barragem, com esta a ficar intacta e tendo provocado cerca de 2000 mortos (von Hardenberg, W., 2011).



Figura 2 - Vila de *Longarone* (Itália) antes do acidente de *Vajont* (von Hardenberg, W., 2011).

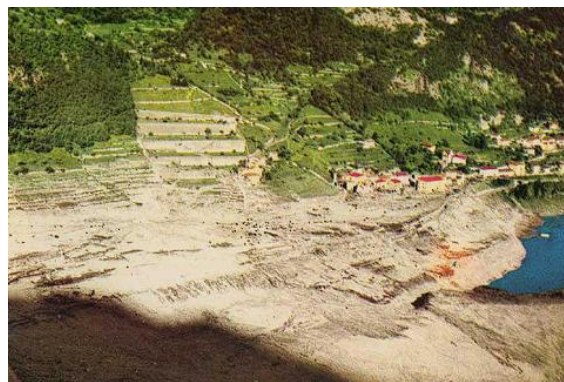


Figura 3 - Vila de *Longarone* (Itália) depois do acidente de *Vajont* (von Hardenberg, W., 2011).

A 2 de dezembro de 1959, aconteceu um dos piores desastres na França do século XX, onde devido à precipitação intensa, o nível da água da albufeira da barragem de Malpasset (barragem em abóbada construída sobre o rio *Reyran*, perto de *Fréjus*) subiu rapidamente, levando ao seu colapso, Figura 4. No momento da rotura, foi gerada uma onda de cheia com um volume estimado em aproximadamente 50 milhões de metros cúbicos de água, a qual provocou a destruição de várias aldeias, infraestruturas rodoviárias e uma instalação militar, resultando na morte de cerca de 423 pessoas. Posteriormente, investigadores concluíram que o colapso foi originado devido a problemas geotécnicos, incluindo a presença de uma falha geológica na fundação da barragem. Foram também identificados problemas de planeamento e supervisão inadequada (Duffaut, P., 2013).

Em Portugal, até ao dia de hoje, não houve registos de nenhum acidente, o que demonstra a importância dada à segurança destas estruturas, e a importância dada ao estudo das barragens.



Figura 4 - Ruínas da barragem de *Malpasset* (Duffaut, P., 2013).

2.2 TIPOLOGIAS DE BARRAGENS

Existem diversos critérios para a classificação de barragens, entre os quais a forma estrutural, os materiais empregues, as dimensões, a capacidade de armazenamento e a finalidade. A comissão Internacional de Grandes Barragens (GIGB/ICOLD) categoriza as barragens em grupos: pequenas barragens e grandes barragens, com base na altura e no volume de água armazenado. O Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) (Portugal. Governo, 2007), adota uma abordagem semelhante, baseada na sua perigosidade e nos danos potenciais associados à onda de inundação correspondente ao cenário de acidente mais desfavorável, sendo a perigosidade função da altura da barragem e da capacidade de albufeira.

A classificação mais comum baseia-se na forma estrutural, e consequentemente nos materiais utilizados. Os principais tipos são:

- **Barragens de aterro:** construídas muitas vezes com materiais provenientes de escavação, colocados em camadas compactadas posteriormente. Estas podem ser de terra homogénea, com parede de montante impermeabilizante, ou de enrocamento, sendo necessário o uso de barreiras impermeáveis. São particularmente adaptáveis a diferentes condições de fundação.
- **Barragens de betão:** caracterizam-se pela sua elevada resistência e subdividem-se em barragens de gravidade, barragens abóbada de curvatura simples ou de dupla curvatura, ou de contrafortes. As barragens de gravidade são estruturas, cuja estabilidade é assegurada pelo peso próprio (Chen, S.-H., 2015). Algumas variantes incluem as barragens de gravidade aligeiradas. As barragens de abóbada de curvatura simples apresentam uma curvatura em planta as barragens abóbada de dupla curvatura têm como base a distribuição da força hidrostática (ou parte desta) para as encostas do vale, sendo particularmente eficiente em vales estreitos. As barragens de contrafortes utilizam elementos estruturais (ou contrafortes) espaçados para reduzir o volume de betão (Rijo, M., 2007).

A seleção do tipo estrutural depende de vários fatores inerentes ao local de implantação, incluindo características geológicas, morfologia do vale, caudal máximo de cheia, bem como os recursos disponíveis.

2.3 BARRAGENS DE BETÃO

Atualmente, as barragens de betão são interessantes, devido à sua ótima capacidade de resistência à compressão e elevada durabilidade, entre outras. Para além disto, se for devidamente dimensionado e construído, as barragens de betão apresentam ótimas características de impermeabilização, o que acaba por ter elevada importância, uma vez que a retenção de água é o grande objetivo de uma barragem.

Existem diversos tipos de barragens de betão conforma demonstrado na Figura 5, sendo que cada uma tem as suas vantagens e desvantagens, e acabam por cumprir diferentes objetivos. Estes três tipos são: as barragens de gravidade, as barragens em abóbada e as barragens de contraforte (Safety, F.D., 1987).

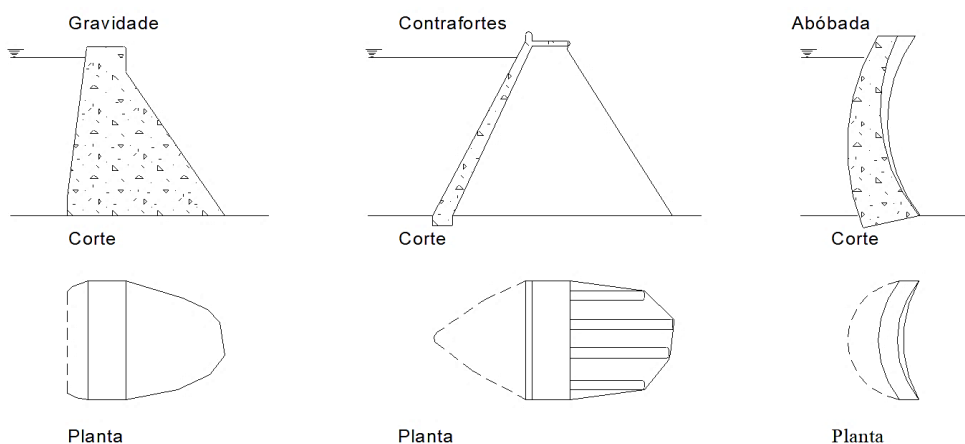


Figura 5 - Tipos de barragens de betão, retirado de (Silva, 2022).

As barragens de gravidade, têm como principal característica a dependência do seu próprio peso para resistir à pressão da água da albufeira (Varlet, H., 1966). A sua estabilidade é garantida pelo elevado peso da estrutura, que por mobilização do atrito do contato barragem-fundação, resiste à pressão hidrostática e evita o deslizamento. Por outro lado, tem um elevado custo inicial, uma vez que é utilizado um grande volume de betão.

As barragens de contraforte são uma variante das barragens de betão em que a pressão da água é transferida para uma série de contrafortes estruturais, com capacidade de transferência de carga para as suas fundações, sendo estas usualmente projetadas para alturas até aproximadamente 130 metros, sendo frequentemente usadas em locais onde o substrato rochoso oferece suporte adequado para os contrafortes (Léger, P., 2016).

As barragens de abóbada, representam uma solução extremamente eficiente para a contenção de grandes volumes de água devido à sua forma característica. Este tipo de barragens, utiliza a forma em arco para a transferência da carga hidrostática produzida pela água da albufeira, para as margens rochosas do vale onde está inserida, libertando assim as cargas sobre a estrutura em si,

diminuindo significativamente o volume de betão necessário à sua construção. Estas podem ser classificadas como barragens de curvatura simples, ou barragens de dupla curvatura. Tem como principais vantagens, tal como referido, a economia de materiais e uma maior resistência sísmica, devido à sua flexibilidade estrutural, uma vez que possuem uma excelente capacidade de absorção de cargas dinâmicas. Por outro lado necessita que o maciço rochoso tenha capacidade de suportar a transmissão das cargas (Léger, P., 2016).

Em síntese, o tipo de barragem de betão vai sempre depender das características da fundação e da envolvente onde a estrutura vai ser inserida.

2.4 BARRAGENS EM PORTUGAL

A construção de barragens em Portugal remonta à época romana, destacando-se a Barragem Romana de Belas, localizada na ribeira de Carenque, entre Amadora e Sintra. Construída no século III d.C., esta estrutura tinha como função abastecer a antiga cidade de Olisipo (Lisboa) através de um aqueduto de 10 km, sendo um notável exemplo da engenharia romana, com 8 metros de altura e 15,5 metros de comprimento.

Apesar destes registos muito embrionários, foi a partir da década de 50 que se verificou um impulso significativo no setor. Este período ficou marcado pelo início dos grandes empreendimentos hidroelétricos, como as barragens de Santa Luzia, Picote, Miranda do Douro, Bemposta e Vilarinho das Furnas, concluídas em 1942, 1958, 1961, 1964 e 1972, respetivamente, segundo as informações disponibilizadas no site da Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens (CNPGB). Estes projetos marcaram a eletrificação do país impulsionando a situação socioeconómica das regiões envolventes (Antunes, M.d.A. [et al.], 2006).

Ao dia de hoje, segundo a Agência Portuguesa do Ambiente, Portugal conta com cerca de 260 grandes barragens, com altura superior a 15 metros ou capacidade de armazenamento superior a 1 milhão de metros cúbicos (Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens). Este número inclui todos os tipos de barragens e estima-se que o número de barragens de betão seja superior a 100.

Em Portugal, a distribuição das barragens está diretamente relacionada com a disponibilidade e variabilidade dos recursos hídricos, e com a necessidade de otimizar o uso da água. Regiões com maior irregularidade hídrica, como o sul e o interior do país, dependem das albufeiras para suprimir as necessidades de irrigação e abastecimento de água, como está visível na Figura 6 (Agência Portuguesa do Ambiente, 2025). A agricultura, constitui o principal setor de consumo de água, destacando-se o regadio a partir de grandes infraestruturas, como o sistema do Alqueva. Por outro lado, no norte do país, onde há maior regularidade hídrica, o potencial hidroelétrico tem sido amplamente explorado, com barragens destinadas predominantemente à produção de energia, como fica evidente na Figura 7. Nos últimos anos observou-se uma evolução na gestão de recursos hídricos, sendo substituídos sistemas que originalmente foram concebidos para finalidades únicas, por sistemas de fins múltiplos.



Figura 6 - Barragens de irrigação como principal função (retirado de barragens.pt, visitado a 24/05/2025).



Figura 7 - Barragens de produção de energia como principal função (retirado de barragens.pt, visitado a 24/05/2025).

Destacam-se três obras pela sua importância: **i)** barragem do Cabril (Figura 8), no rio Zêzere, sendo até ao momento, a mais alta barragem de Portugal, com cerca de 132 metros de altura, tendo desempenhado um importantíssimo papel na produção hidroelétrica e na regulação do caudal; **ii)** barragem do Alqueva (Figura 9), construída sobre o rio Guadiana, é detentora do título de maior capacidade de armazenamento, com cerca de 4.15 hm³, garantindo abastecimento hídrico, irrigação e produção de energia; **iii)** barragem do Alto Tâmega, a última a ser construída em Portugal, e que faz a parte do sistema electroprodutor do Tâmega, que em conjunto com as barragens de Daivões e Gouvães, proporciona um sistema com uma capacidade combinada de 1.158MW, sendo uma das maiores iniciativas energéticas da história do país e uma das maiores instalações de armazenamento de energia da Europa.



Figura 8 - Barragem do Cabril, retirado de cnpgb.apambiente.pt, visitado a 24/05/2025.



Figura 9 - Barragem do Alqueva, retirado de cnpgb.apambiente.pt, visitado a 24/05/2025.

Ainda neste ano de 2025, foi apresentado um plano governamental, denominado “Água que une”, que prevê a construção de mais 14 barragens, com um orçamento total de cerca de cinco mil

milhões de euros, demonstrando o constante crescimento e preocupação de Portugal neste âmbito (Governo, P., 2025).

2.5 CONTROLO DE SEGURANÇA

A segurança das barragens em exploração assenta fundamentalmente na observação sistemática do seu comportamento ao longo do tempo, permitindo avaliar a fiabilidade dos modelos de simulação, a coerência das medições obtidas e a evolução dos parâmetros que condicionam a sua estabilidade. Este processo contínuo visa sustentar decisões informadas sobre o estado da estrutura, identificando precocemente eventuais anomalias de funcionamento (Castro, A., 1998). Com base neste princípio, o controlo de segurança adquire um papel central, articulando-se com diversas vertentes operacionais e ambientais que contribuem para a integridade global da infraestrutura.

É precisamente neste campo, onde entra a modelação numérica, desempenhando um papel fundamental para prever a resposta estrutural em diferentes condições (Léger, P., 2016).

Para além da segurança estrutural, existem mais dois pilares sobre os quais assenta a segurança das barragens, sendo que um deles é a segurança ambiental, que no contexto das barragens abrange a gestão e mitigação dos impactos induzidos pela estrutura, nos ecossistemas circundantes. Isto passa pela gestão de caudais ecológicos de forma a proteger a vida aquática e vegetação a jusante, garantindo que o fluxo da água mantém o equilíbrio natural (Portela, E., 1999). Além disso, é fundamental existir um controlo da qualidade da água na albufeira e monitorização da erosão dos solos, evitando problemas futuros com a sustentabilidade.

Por fim, temos a segurança hidráulica e operacional, que depende diretamente da gestão eficiente da barragem, garantindo o bom funcionamento dos órgãos de descarga e a resposta a variações de caudais. Isto envolve inspeções regulares, manutenção preventiva e utilização de técnicas de monitorização para detetar eventuais anomalias (de Oliveira, S.B.M., 2000). É de elevada importância a implementação de planos de emergência e sistemas de aviso à população.

Em conclusão, a segurança de barragens assenta em três pilares fundamentais que são a integridade estrutural, a proteção ambiental e a gestão hidráulica e operacional, como identificado na Figura 10. A inspeção regular, a monitorização contínua e a manutenção preventiva são essenciais para prevenir falhas e garantir a estabilidade da estrutura. Além disso, a gestão dos caudais ecológicos e o controlo da qualidade da água asseguram a sustentabilidade ambiental. Por fim, a eficiência operacional é fundamental para minimizar riscos e proteger as comunidades a jusante. Uma abordagem integrada permite garantir a segurança e a longevidade destas infraestruturas.

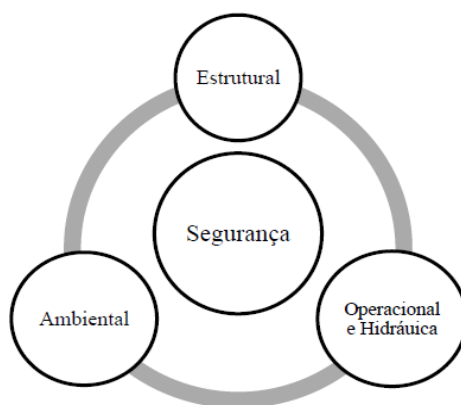


Figura 10 - Componentes da segurança em barragens
(Silva, J.A., 2022).

2.6 OBSERVAÇÃO DAS PRINCIPAIS AÇÕES

De uma forma geral, todas as estruturas estão sujeitas a uma combinação de forças permanentes, variáveis e dinâmicas, que devem ser caracterizadas de forma a perceber o seu impacto na resposta estrutural. No caso das barragens, entre as ações mais relevantes destacam-se o peso próprio da estrutura, a pressão hidrostática gerada pela água da albufeira, as ações térmicas e as ações ditas do tempo, como o envelhecimento da estrutura.

2.6.1 PESO PRÓPRIO

O peso próprio de uma estrutura corresponde à carga imposta pelos materiais utilizados na sua construção. No âmbito da análise estrutural, esta carga é classificada como uma ação permanente, uma vez que se mantém constante ao longo da vida útil da estrutura.

Durante a construção de uma barragem, a monitorização da resposta da fundação à aplicação do peso próprio é uma etapa fundamental, permitindo avaliar a adaptação das fundações ou maciços rochosos às cargas progressivamente introduzidas.

Em suma, o peso próprio representa uma carga permanente e determinante na conceção e análise estrutural, influenciando tanto o comportamento estático da estrutura, como a sua resposta dinâmica quando combinada com outras ações variáveis ao longo do tempo.

2.6.2 AÇÃO DA ÁGUA

A água é um elemento fundamental no estudo sobre as barragens, pois tem influência direta sobre o comportamento e a segurança destas estruturas. Esta exerce ações mecânicas, manifestadas pela pressão hidrostática e pelas subpressões que influenciam a estabilidade da barragem. Adicionalmente, atua por meio de ações físicas, resultantes da interação hidrodinâmica durante eventos sísmicos e da sua influência nas características dinâmicas.

A pressão hidrostática atua perpendicularmente às superfícies da barragem, aumentando com a profundidade e sendo um dos principais fatores considerados na análise estrutural. A sua monitorização, por meio da medição do nível da albufeira, permite avaliar os esforços

hidrostáticos, que influenciam, por exemplo, os deslocamentos da estrutura. O nível da albufeira é monitorizado por meio de escalas limnimétricas para medições manuais, como se observa na Figura 11, limnigrafos que realizam registos contínuos e medidores automáticos baseados (Figura 12) em tecnologia de radar ou sensores de pressão de alta precisão, permitindo uma monitorização em tempo real.



Figura 11 - Escala limnimétrica, retirado de (Moura, G.M.G., 2005).



Figura 12 - Medidor automático do nível de água, retirado de (da Costa Mendes, J.M., 2023).

Já as subpressões, resultam da percolação de água na fundação e em descontinuidades do betão, podendo afetar a estabilidade da obra. A sua monitorização é realizada através de piezómetros instalados em furos estrategicamente distribuídos na fundação, integrados na rede piezométrica, garantindo a recolha sistemática de dados para a análise do comportamento hidráulico da fundação. Em piezómetros instalados em galerias ou em pontos onde a pressão hidráulica supera a cota do piso, a quantificação da pressão é realizada por meio de manómetros acoplados, como exemplificado na Figura 13 e na Figura 14. Adicionalmente, a avaliação dos caudais pode ser efetuada através de uma válvula de medição estrategicamente posicionada nas proximidades do manómetro. Nos cenários em que a coluna de água não atinge o manómetro, a determinação do nível freático é conduzida com recurso a uma sonda piezométrica, assegurando uma monitorização das condições hidráulicas na fundação da barragem (da Mata, J.T.C., 2007).



Figura 13 - Manómetro de um piezómetro simples (Moura, G.M.G., 2005)



Figura 14 - Manómetros de um leque piezométrico (da Mata, J.T.C., 2007).

A interação dinâmica entre a barragem e a albufeira altera a resposta estrutural, sendo influenciada pelo nível da água. Em cotas elevadas, ocorrem aumentos significativos das pressões hidrodinâmicas e potenciais efeitos de amortecimento na propagação das ondas de pressão. Além disso, a criação da albufeira pode induzir alguma sismicidade localizada.

As ações físico-químicas da água podem degradar os materiais da barragem e da fundação. São conduzidos ensaios que permitem determinar o potencial de agressividade da água em relação ao betão e aos produtos utilizados nos tratamentos de impermeabilização da fundação. Adicionalmente a caracterização dos materiais transportados pela água, possibilita a monitorização de processos de deposição de sedimentos, alterações na estrutura do maciço rochoso e a evolução da decomposição das cortinas de injeção ao longo do tempo (da Mata, J.T.C., 2007).

2.6.3 AÇÕES TÉRMICAS

As ações termo-higrométricas constituem um conjunto de solicitações físicas resultantes das variações de temperatura e humidade, tanto no meio envolvente, como no interior da estrutura. Embora em barragens de betão, caracterizadas pela sua elevada rigidez, estas ações possam gerar respostas de pequena amplitude, a sua influência na integridade estrutural ao longo do tempo, não pode ser negligenciável.

Principais manifestações das ações térmicas

- **Variações da temperatura do ar:** As oscilações térmicas diárias e sazonais provocam gradientes térmicos na superfície da barragem, induzindo expansões e contrações no betão. A monitorização é usualmente realizada através de estações meteorológicas, como a presente na Figura 15, que permitem medir diversos parâmetros, como temperatura do ar, humidade relativa, precipitação e velocidade do vento.



Figura 15 - Estação meteorológica, retirado de (Mata 2007).

- **Variações de temperatura no interior do betão:** Durante a cura do betão, o calor de hidratação gera temperaturas elevadas que, associadas às trocas térmicas com o meio e a albufeira, originam um campo térmico não homogêneo na barragem. Estas variações internas podem introduzir tensões e deformações, afetando o desempenho estrutural da obra. Para a sua monitorização, os instrumentos mais usados são os termómetros,

permitindo a caracterização e evolução térmica no interior da estrutura. Existem também outros tipos de dispositivos embebidos no corpo da barragem que permitem a medição da temperatura (ex: extensómetros de resistência elétrica, entre outros).

2.6.4 AÇÕES DINÂMICAS

As barragens de betão estão sujeitas a diversas ações dinâmicas, incluindo eventos sísmicos, vibrações geradas pelo funcionamento de centrais hidroelétricas e ações associadas a órgãos de descarga. As vibrações induzidas pelos grupos de produção de energia e pelos mecanismos de descarga constituem fatores dinâmicos relevantes a ter em conta na observação de comportamento dinâmico (Mendes, P.J.H., 2010). Além disso, a interação entre a estrutura, a fundação e a albufeira pode impactar o efeito das solicitações dinâmicas.

Outros fenómenos, como vibrações geradas por atividades nas imediações, nomeadamente explosões, tráfego de veículos pesados, e operação de máquinas pesadas, podem induzir solicitações significativas (Andersen, P. [et al.], 2008).

As ações sísmicas podem ter origem tectónica ou ser induzidas pela criação da albufeira. Em geral, as barragens de betão apresentam elevada resistência estrutural a eventos sísmicos, devido ao seu dimensionamento para suportar forças horizontais significativas decorrentes da pressão hidrostática e à sistematização dos critérios de projeto frente a cargas dinâmicas. No entanto, em situações de elevada aceleração sísmica, danos estruturais relevantes podem comprometer a funcionalidade e segurança da barragem (Mendes, P.J.H., 2010).

A caracterização das ações sísmicas, especialmente em regiões de elevado risco ou em barragens de grande porte, requer a instalação de uma rede de estações sísmicas distribuídas ao longo da zona de influência do sistema barragem-fundação-maço rochoso, de forma a garantir uma avaliação precisa da sismologia regional. A instrumentação empregada nessa caracterização baseia-se, predominantemente, em acelerómetros instalados na base das barragens e em pontos estratégicos nas margens das albufeiras.

Em suma, a monitorização contínua do comportamento dinâmico, realizada através do Sistema de Monitorização Dinâmica Contínua (SMDC), permite a obtenção de dados sobre frequências naturais, modos de vibração e amortecimento modal ao longo do tempo, fornecendo a informação necessária para a avaliação da segurança estrutural diante de eventos sísmicos e para o acompanhamento de possíveis processos de degradação. Este sistema integra o conjunto mais alargado de auscultação da barragem, conhecido como Sistema de Observação da Segurança (SOS).

As ações dinâmicas decorrentes de eventos sísmicos são também relevantes, mas não analisadas no âmbito deste trabalho.

2.7 OBSERVAÇÃO DA RESPOSTA ESTRUTURAL

A monitorização da resposta estrutural é uma atividade essencial na avaliação da segurança das barragens de betão ao longo do tempo. Esta prática permite fornecer dados sobre o estado da estrutura, detetar problemas com antecedência e agir de forma eficaz sempre que necessário.

As respostas estruturais mais frequentemente monitorizadas incluem os deslocamentos de pontos da estrutura e da fundação, os movimentos relativos entre blocos, os caudais drenados e

infiltrados, bem como as tensões e deformações associadas (Bartholomew, C.L. and Haverland, M.L., 1987).

2.7.1 DESLOCAMENTOS

A medição dos deslocamentos, sejam absolutos ou relativos, desempenha um papel fundamental na avaliação da segurança e do desempenho da barragem, da fundação e das interfaces da estrutura (da Mata, J.T.C., 2007). O estudo de deslocamentos recorre a uma variedade de métodos e equipamentos que estão em constante evolução, desde sistemas manuais para sistemas automatizados de aquisição e processamento de dados. A adoção de tecnologias de recolha automática visa aumentar a frequência, precisão e eficiência das medições.

A medição dos deslocamentos pode ser horizontal ou vertical, de modo que os métodos para cada um destes deslocamentos variam. Destacam-se os métodos geodésicos, como a planimetria e a altimetria que são utilizadas para definir a posição relativa de pontos na estrutura ao longo do tempo com base em marcas geodésicas previamente instaladas (Casaca, J. and Henriques, M.J., 2002). A planimetria permite quantificar os deslocamentos horizontais em termos de componentes radiais e tangenciais. De forma a contribuir para a automatização, foram criadas técnicas como GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) e os taqueómetros motorizados dotados de reconhecimento automático de alvos refletores, permitindo uma recolha de dados mais frequente e eficiente. Do outro lado temos o nivelamento geodésico de precisão, mais conhecido como altimetria, que é um método empregado para a medição de deslocamentos verticais, ou seja, as variações de cota em pontos específicos da barragem, que funciona estabelecendo pontos de nivelamento de alta precisão geralmente localizados no coroamento da barragem, em galerias internas ou em qualquer outro ponto que se ache relevante.

Outra forma, usada na maioria das grandes barragens, são os fios de prumo, que podem ser direitos, como o da Figura 16, ou invertidos, como o da Figura 17. Estes são colocados em furos verticais no corpo da barragem. Os fios de prumo diretos funcionam como um pêndulo suspenso a partir de um ponto fixo na parte superior da estrutura, sendo que a medição obtida representa o deslocamento relativo entre o ponto de fixação superior e o ponto de leitura, que geralmente fica localizado em galerias. Já os fios de prumo invertidos, são fixados na sua extremidade inferior, na fundação da barragem. A extremidade superior está ligada a um flutuador num líquido, sendo que as medições realizadas nestes fios definem os deslocamentos absolutos em relação à fundação.



Figura 16 - Fio de prumo direito, retirado de (Rebelo 2020).



Figura 17 - Nicho de Fio de prumo (direito e invertido), retirado de (Barros, P.S., J., 2016)

As medições podem ser efetuadas manualmente com coordenómetros óticos, no entanto a implementação de sistemas automáticos de recolha de dados (RAD) está cada vez mais presente nas barragens, permitindo um registo contínuo dos deslocamentos, com a frequência desejada.

Estes fios são instalados em zonas estratégicas das barragens para obter informação relevante sobre o seu comportamento. Em barragens de abóbada, podem ser colocados no bloco central. Estes dados obtidos permitem analisar deslocamentos, frequentemente nas suas componentes radial e tangencial.

Os deslocamentos no maciço de fundação são usualmente medidos por extensómetros de varas, que permitem a medição de movimentos relativos da fundação entre o ponto de fixação da vara e a cabeça da vara. 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). Na Figura 18, é possível observar a cabeça de extensómetro de varas na fundação.

A medição de deslocamentos horizontais na fundação é usualmente conseguida através de fios de prumos (invertidos) ou através de inclinómetros.



Figura 18 – Cabeça de extensómetro de varas na fundação, retirado de (Sampaio, 2015).

2.7.2 MOVIMENTOS DE JUNTAS E FISSURAS

As juntas de contração constituem elementos construtivos verticais concebidas para permitir a acomodação das deformações induzidas pela dissipação térmica associada ao calor de hidratação e pela retração do betão durante o processo construtivo (Leitão, N.S. [et al.], 2020). Mesmo quando injetadas, estas juntas continuam a apresentar movimentos de abertura e fecho em respostas a variações térmicas e ao nível da albufeira, influenciando a rigidez estrutural global. Durante ações sísmicas podem ocorrer movimentos diferenciais entre blocos monolíticos, com abertura/fecho das juntas e o aparecimento de fissuras locais. A monitorização (de medição manual) desta grandeza nas galerias de visita é realizada através de bases tridimensionais, Figura 19, ou de bases de alongâmetro constituídas por três pontos dispostos em triângulo equilátero, como é possível ver na Figura 20, permitindo a determinação de deslocamentos relativos entre os vértices com base em relações geométricas (Moura, G.M.G., 2005).

É importante notar que os diferentes dispositivos não medem os mesmos tipos ou direções de deslocamentos: as bases tridimensionais captam movimentos relativos em três eixos, as bases de alongâmetro registam deslocamentos lineares específicos, e os medidores elétricos ou de corda vibrante detetam variações locais de abertura nas juntas.

Uma outra forma passa pela utilização de medidores de juntas baseados em resistência elétrica ou em corda vibrante, sendo que este material é embebido aquando da construção. Estes dispositivos fornecem dados relevantes sobre o comportamento inicial dos blocos da barragem, sendo posteriormente complementados por medições obtidas através de instrumentação de superfície. No entanto apresentam como limitação o facto de que em caso de avaria, não há a possibilidade de proceder à sua reparação ou substituição (Silva, J.A., 2022).



Figura 19 - Base tridimensional, retirado de (Barros, P.S., J., 2016).



Figura 20 - Base de alongâmetro, retirado de (Rebelo 2020).

2.7.3 TENSÕES E EXTENSÕES

A análise das tensões e extensões no contexto da monitorização do comportamento estrutural de barragens possibilita a caracterização do comportamento quase-estático da estrutura ao longo do tempo, a avaliação da sua integridade estrutural, a análise dos efeitos de ações externas como cargas permanentes, pressão hidrostática, variações térmicas e reações expansivas no betão, e ainda validar pressupostos de projeto através da comparação com os resultados obtidos por modelos numéricos.

Correntemente estas grandezas são determinadas de forma indireta, com recurso a extensómetros de resistência elétrica (tipo *Carlson*), que são embebidos no betão durante a fase de construção, o que impossibilita a sua troca em caso de avaria. A conversão das extensões medidas em tensões é efetuada com base no conhecimento das características de deformabilidade do betão.

A medição direta do estado tensional por meio de tensómetros é menos recorrente na prática de instrumentação estrutural, devido às limitações associadas à sua instalação e ao elevado custo. Estes sensores apresentam a capacidade para a monitorização de tensões de compressão, mas não permitem a avaliação direta de tensões de tração. Todavia, quando corretamente posicionados em regiões estratégicas da estrutura e utilizados em conjugação com grupos de extensómetros, os tensómetros constituem uma ferramenta valiosa para a caracterização experimental das relações tensão-deformação no betão (Braga, L., 2000).

Em barragens abóbada, a análise de tensões é de uma importância acrescida, uma vez que auxilia na verificação das exigências de continuidade estrutural. Devido à curvatura destas estruturas, os esforços são distribuídos para os encontros com as fundações, minimizando as tensões de tração (U.S. Army Corps of Engineers, 1994).

2.7.4 CAUDAIS

A análise de caudais, quer individuais, ao nível de cada dreno, quer integrados, através de bicas totalizadoras estrategicamente posicionadas, permite inferir sobre o grau de permeabilidade do corpo da barragem e do seu maciço de fundação, bem como caracterizar o seu comportamento hidromecânico. Este tipo de observação permite a deteção precoce de potenciais anomalias, como

o desenvolvimento de fissuras ou falhas de estanquidade das juntas e/ou na cortina de impermeabilização, que a longo prazo pode comprometer a segurança estrutural.

As medições individuais são geralmente realizadas de forma indireta, cronometrando o tempo de enchimento de reservatórios com volume conhecido. Já os caudais totais por zonas, como fundação ou galerias, são tipicamente avaliados por bicas equipadas com descarregadores em V, que permitem estimar o caudal com base na altura da lâmina de água. O nível de precisão destas medições depende da adequada manutenção destes dispositivos (Silva, J.A., 2022).

Atualmente, com a modernização dos sistemas de observação, foram adotadas soluções automáticas de recolha de caudais, como o sistema presente na Figura 21 que permitem aumentar a frequência e precisão das leituras. A análise integrada dos dados de caudais com outros parâmetros, contribui para um controlo de segurança robusto, podendo detetar desvios que antecedam situações de risco.

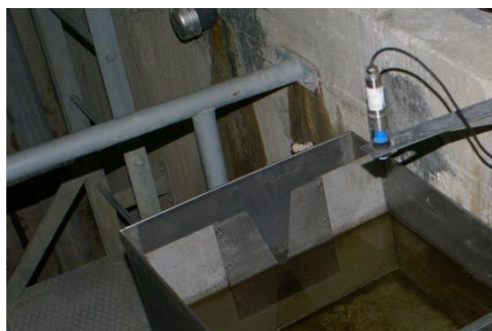


Figura 21 - Bica totalizadora com medidor automático, retirado de (da Mata, J.T.C., 2007)



Figura 22 - Dreno de galeria drenante, retirado de (Moura, G.M.G., 2005)

2.7.5 PROPRIEDADES MODAIS

No contexto da avaliação da resposta estrutural de grandes barragens de betão, a identificação e monitorização das propriedades modais, nomeadamente as frequências naturais de vibração, configurações modais e os amortecimentos modais, assume particular relevância.

Através de sistemas de monitorização dinâmica, é possível obter estas propriedades de forma contínua, recorrendo à resposta vibratória da estrutura sob diversas fontes de excitação, como micro-sismos, vento, operação de órgãos hidráulicos, ou pontualmente, excitação forçada (Gomes, J.P. and Lemos, J.V., 2020, Ventura, C. and Horyna, T., 1996).

O acelerómetro apresentado na Figura 23, que está estrategicamente instalado na superfície ou galerias da barragem e, em alguns casos, no maciço rochoso da fundação, permite captar as vibrações. Os sinais adquiridos por uma rede de acelerómetros são tratados por sistemas de aquisição de dados (RAD), os quais podem realizar a conversão, quantificação e pré-processamento dos dados.



Figura 23 - Acelerómetro, retirado de (Mata 2013).

Dada a baixa amplitude destas respostas, é necessária instrumentação de elevada sensibilidade. Podemos também obter dados relativos a excitação forçada, como os presentes na Figura 24, em que se aplicam cargas controladas à estrutura através de vibradores (do tipo aleatório, transitório ou harmónico), permitindo uma análise mais direta da resposta estrutural, sendo comum o uso de técnicas como o varrimento contínuo em frequência (Gomes, J.P. and Lemos, J., 2016).

A análise das medições de vibração permite extrair as propriedades modais por meio de métodos de identificação modal.



Figura 24 - Vibradores: a) rotativos de massa excêntrica, com motor elétrico (LNEC); b) de translação com motor servo hidráulica (EMPA), retirado de (Mendes, 2010).

A operação contínua dos sistemas de monitorização é viabilizada por rotinas automáticas de identificação modal, com algoritmos adaptados à complexidade dos sistemas barragem-fundação-albufeira sendo a utilização conjunta de vários métodos de identificação, é considerada uma prática recomendável para a validação cruzada dos resultados (Mendes, P.J.H., 2010). A análise modal operacional automatizada permite o seguimento no tempo das propriedades modais da estrutura e, por sua vez, a deteção de comportamento anómalo (Pereira, S. [et al.], 2021).

A interpretação dos resultados experimentais é por vezes realizada por comparação com modelos numéricos, permitindo não só validar os modelos computacionais como também aprofundar a compreensão do comportamento dinâmico da estrutura.

2.8 ERROS E INCERTEZAS DA MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS

A medição precisa de grandezas em barragens de betão é essencial para uma boa avaliação da sua segurança ao longo do tempo. No entanto este processo está inevitavelmente sujeito a diversas fontes de erro, cuja origem pode ser atribuída a limitações dos equipamentos, condições dos dados, fatores operacionais, bem como a própria incerteza associada aos modelos de interpretação de dados.

Os sensores e sistemas de aquisição devem possuir elevada sensibilidade e resolução, uma vez que, tratando-se de estruturas rígidas, as barragens frequentemente apresentam repostas de baixa amplitude a estímulos externos. Equipamentos com características inadequadas podem não captar essas variações, comprometendo a utilidade e a qualidade dos dados recolhidos.

Os modelos numéricos, embora indispensáveis à análise do comportamento da barragem, incorporam aproximações e simplificações que introduzem incerteza adicional. A validação desses modelos com base nos medidos é fundamental, sendo que discrepâncias significativas podem indicar problemas tanto na medição como na modelação.

Para mitigar estas limitações, é essencial recorrer a equipamentos adequados, adotar procedimentos rigorosos de ensaio e aquisição de dados e desenvolver modelos interpretativos robustos. A compreensão profunda das possíveis fontes de erro e a aplicação de boas práticas, em todas as fases, são condições essenciais para garantir a fiabilidade das medições.

A Tabela 1, apresenta as principais grandezas monitorizadas, como foi mencionado anteriormente, os respetivos equipamentos de medição e a precisão associada a cada um. Os valores apresentados refletem a influência combinada de diversos fatores que afetam a precisão de medição, nomeadamente a precisão dos instrumentos, os métodos operacionais utilizados, a intervenção do operador, o modelo funcional adotado para o cálculo da grandeza e a configuração do sistema de medição (Portela, E., 1999).

Tabela 1 - Precisão das medições das grandezas, adaptado de (Lutz et al., 2006; Mata, 2007).

Grandeza	Equipamento ou método de medição	Precisão
Nível da água	Medidor de nível	$\pm 0,01$ m
Altura de sedimentação	Medidor da profundidade água	$\pm (0,2 \text{ a } 0,5)$ m
Temperatura ar e água	Termómetros e termómetro de máxima e mínima	$\pm 0,15$ °C
		$\pm 0,5$ °C
Temperatura betão	Termómetro de resistência	$\pm 0,15$ °C
Pluviosidade	Pluviómetro	± 10 %
Deslocamento horizontal	Triangulação	Depende de caso para caso
Deslocamento vertical	Nivelamento	0,5 mm/km
Deslocamento horizontal	Fio de prumo	$\pm 0,2$ mm
Deslocamento das fundações	Extensómetro de varas	$\pm 0,01$ mm
Movimentos em juntas e fissuras	Base de alongâmetro	$\pm 0,02$ mm
	Base tridimensional	$\pm 0,01$ mm
Temperatura	Extensómetro de resistência elétrica	$\pm 0,5$ °C
Extensão		-
Temperatura	Tensómetro de resistência elétrica	$\pm 0,5$ °C
Tensão		-
Caudal	Dreno	Variável, usualmente inferior a 5 %
	Bica totalizadora	Usualmente $\pm 0,1$ bar
	Piezómetro	$\Delta t \leq 0,005$ seg.
Subpressão		
Atividade Sísmica	Sismómetro	

Obs.: (*) Os equipamentos de resistência elétrica têm uma precisão de $0,01\Omega$.

2.9 FREQUÊNCIA DE LEITURAS E VALIDAÇÃO DE DADOS

A frequência das leituras das diversas grandezas observadas é definida pelo Plano de Observação, que é um documento específico a cada barragem, e de grande importância para o suporte de atividades de controlo de segurança. Este documento tem em conta recomendações de documentos técnicos de apoio (Ministério do Ambiente (Portugal), 2007). As frequências de leitura podem variar ao longo das diferentes fases da vida de obra, nomeadamente durante a

construção, o primeiro enchimento e a exploração. Nos períodos iniciais de exploração, as medições podem ser mais frequentes, e em situações onde alguma das grandezas esteja a tender para valores fora do esperado, as frequências de leitura são necessariamente aumentadas.

Como dito anteriormente, verifica-se uma transição para a digitalização do processo de registo, com a utilização de sistemas de recolha automática de dados. Estes sistemas permitem um registo com a frequência que for necessária. No caso da monitorização dinâmica contínua, por exemplo, a frequência de aquisição está diretamente relacionada com a gama de frequências que se procura analisar, pelo que é usual a consideração de taxas superiores a 20 Hz.

Após a recolha, os dados devem ser submetidos a um processo sistemático de validação. No caso de aquisição manual, esta validação poderá ser no local, através da comparação da leitura efetuada com valores de leituras anteriores, e poderá não ocorrer de forma imediata no local, mas sim numa fase posterior, através da comparação com séries históricas relativas à mesma variável. Nos sistemas de aquisição automática, os dados são transmitidos diretamente para uma central de registos, onde são submetidos a procedimentos de validação. A validação é geralmente realizada com base em limites pré-definidos.

A elevada quantidade de dados gerada, torna essencial a utilização de modelos expeditos baseados em dados da observação. Estes modelos são ferramentas valiosas para a deteção precoce de desvios entre os valores medidos e os previstos, contribuindo significativamente para a gestão proativa da segurança.

3

INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL OBSERVADO COM RECURSO A MODELOS DE MACHINE LEARNING

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O *Machine Learning* (também referido como Aprendizagem Automática) é um ramo fundamental da Inteligência Artificial (IA), dedicado ao desenvolvimento de algoritmos computacionais com a capacidade de aprender automaticamente a partir de dados e da experiência previamente obtida, sem a necessidade de instruções explícitas. A IA, por sua vez, é uma área mais vasta da ciência da computação que tem como objetivo procurar métodos ou dispositivos computacionais que possuam ou simulem a capacidade racional de resolução de problemas, atingindo assim uma capacidade de desenvolver ferramentas de realizar tarefas cognitivas que tradicionalmente eram realizadas por humanos. O interesse no desenvolvimento do *Machine Learning* surgiu da necessidade de criar sistemas que pudessem aprender e melhorar o seu desempenho ao longo do tempo, sem serem explicitamente programados para cada tarefa específica. Esta capacidade de aprendizagem permite que os sistemas se adaptem a novos dados e identifiquem relações complexas que podem não ser facilmente detetadas por métodos estatísticos tradicionais.

Os principais ramos de Machine Learning, presentes na Figura 25, distinguem-se com base no modo como os algoritmos aprendem a partir dos dados existentes, sendo habitualmente categorizados em aprendizagem supervisionada, não supervisionada, semi-supervisionada e por reforço (Goodfellow, I. [et al.], 2016). Na aprendizagem supervisionada os algoritmos utilizam dados com saídas conhecidas para aprender a fazer previsões, enquanto na aprendizagem não supervisionada procuram identificar padrões de dados não rotulados, ou seja, têm a capacidade de reconhecer relações nos dados, sem que haja previamente uma indicação sobre o que esses dados significam. A aprendizagem por reforço baseia-se na interação entre um agente e um

ambiente, ajustando decisões com base em recompensas. Já a aprendizagem semi-supervisionada, combina dados rotulados e não rotulados para melhorar o desempenho com menor esforço. Diversas técnicas são utilizadas neste campo, como redes neuronais artificiais, modelos estatísticos, e outros, muitas vezes combinados em abordagens híbridas para tirar partidos das suas diferentes vantagens.

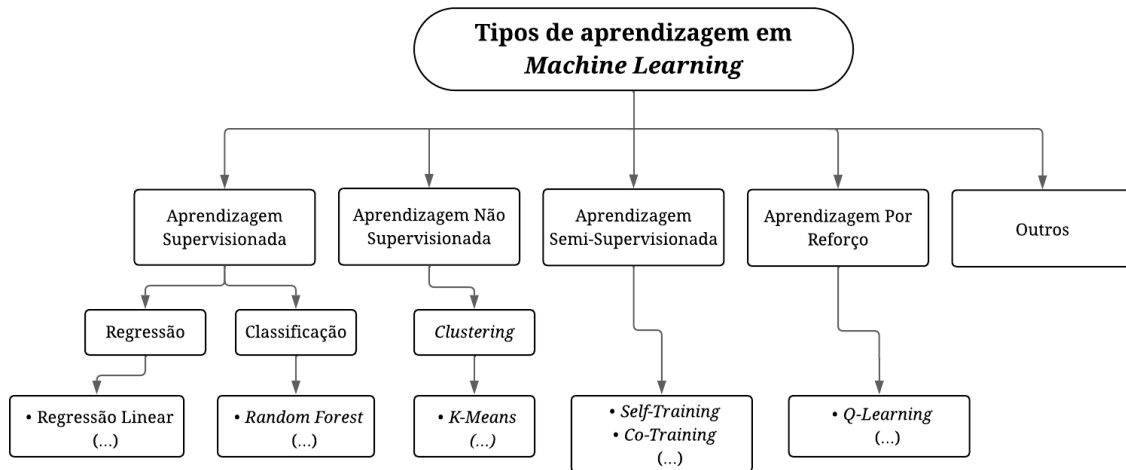


Figura 25 - Tipos de *Machine Learning*.

A avaliação do comportamento estrutural de barragens ao longo do tempo é uma peça-chave nos sistemas de vigilância e gestão da segurança destas infraestruturas. Recolher dados, por si só, não é suficiente: é essencial interpretá-los de forma quantitativa para compreender como diferentes fatores afetam a resposta da estrutura, identificar padrões e tendências, antecipar comportamentos e, sempre que necessário, fundamentar intervenções técnicas.

Neste contexto, a engenharia de barragens recorre a diferentes metodologias analíticas, que podem ser agrupadas em três grandes categorias: os modelos numéricos, os métodos baseados em inteligência artificial que incluem os métodos clássicos de interpretação. Estes últimos, também conhecidos como modelos de interpretação quantitativa, são o foco principal deste trabalho.

Os métodos clássicos partem do princípio de que a resposta estrutural pode ser decomposta em componentes associadas a causas distintas, como o nível da albufeira, a temperatura ambiente ou as resultantes de processos evolutivos no tempo. A sua aplicação baseia-se, sobretudo, em técnicas estatísticas, com destaque para a regressão linear múltipla, sendo comum a utilização de formulações como os modelos *Hydrostatic-Season-Time* (HST) ou *Hydrostatic-Temperature-Time* (HTT). Estes modelos semi-empíricos são amplamente usados na análise de grandezas e, muitas vezes, complementam os modelos numéricos de elementos finitos, permitindo comparar a resposta observada com a prevista.

No entanto, o crescente volume de dados disponível — resultado da instrumentação cada vez mais sofisticada das estruturas — e a complexidade dos fenómenos analisados têm impulsionado o recurso a abordagens mais avançadas. É neste cenário que o *Machine Learning* ganha protagonismo. Ao contrário dos métodos determinísticos tradicionais, que exigem a modelação explícita dos fenómenos físicos, o *Machine Learning* apoia-se na identificação de padrões entre

variáveis, com base em dados observados. Essa abordagem tornou-se particularmente relevante nos dias de hoje, em que as barragens são monitorizadas por sistemas capazes de gerar enormes quantidades de informação.

Na análise de deslocamentos estruturais, por exemplo, algoritmos como as Redes Neurais Artificiais (RNA) do tipo Perceptrão Multicamada ou o modelo Random Forest têm sido aplicados com sucesso, especialmente em séries temporais longas.

Em suma, a aplicação de técnicas de *Machine Learning* na engenharia civil, e em particular na análise estrutural de barragens de betão, representa um avanço significativo na forma como os dados são interpretados. Estas ferramentas não substituem os métodos tradicionais nem os modelos numéricos — mas sim, complementam-nos. Juntas, proporcionam uma visão mais robusta e abrangente, contribuindo para a previsão de deslocamentos, deteção precoce de anomalias e apoio à tomada de decisão na gestão e manutenção destas infraestruturas críticas.

No âmbito desta tese foram utilizados os modelos clássicos de interpretação quantitativa para a demonstração da metodologia proposta, não tendo sido desenvolvidos modelos com recurso a outros métodos de *Machine Learning*. No entanto, é expectável a adequabilidade de modelos baseados em redes neurais artificiais ou de *random forest*, pelo que poderão ser desenvolvidos em trabalhos futuros.

3.2 MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

A Regressão Linear Múltipla (RLM) é uma técnica estatística amplamente utilizada na modelação de sistemas em que se pretende estabelecer uma relação linear entre uma variável dependente e múltiplas variáveis independentes. No contexto da análise do comportamento de barragens de betão, a RLM apresenta um papel central no desenvolvimento de modelos de separação de efeitos, que procuram descrever e interpretar os diferentes contributos das ações a que estas estruturas estão sujeitas.

Estes modelos, de natureza semi-empírica, baseiam-se na hipótese de linearidade entre as grandezas estruturais observadas e as ações internas ou externas que as provocam. O seu objetivo principal é quantificar separadamente os efeitos das principais solicitações de serviço, nomeadamente o nível da albufeira e a temperatura ambiente.

A forma geral de um modelo de Regressão Linear Múltipla, pode ser expressa pela equação [1] (Castro, A., 1998):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_j X_j + \cdots + \beta_p X_p \quad [1]$$

em que:

- Y - Variável dependente;
- X_j - $j^{\text{ésima}}$ variável independente;
- β_j - $j^{\text{ésima}}$ coeficiente desconhecido a estimar;
- p - Número de variáveis independentes;

Os coeficientes da regressão, β_j e a constante β_0 são tradicionalmente obtidos através da aplicação do método dos mínimos quadrados, que procura minimizar a soma dos quadrados dos resíduos (ε), isto é, a diferença entre os valores observados e os valores previstos.

A validade dos parâmetros obtidos está condicionada ao domínio de variação das variáveis envolvidas. Atualmente, diversas plataformas computacionais, como o *RStudio*, através da função *lm*, permitem realizar este tipo de análise de forma eficiente e automatizada (Kabacoff, R., 2011).

A principal vantagem da RLM reside na sua simplicidade, interpretabilidade e fundamentação física dos parâmetros utilizados. Além disso apresenta boa robustez com conjuntos de dados moderados, desde que o sistema se mantenha aproximadamente estacionário. Este modelo tem-se revelado particularmente útil na fase de exploração das barragens, quando existe um histórico suficiente e adequado do comportamento observado.

3.2.1 ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES

A etapa onde se estimam os coeficientes ou parâmetros de um modelo é essencial quando se pretende analisar e acompanhar o comportamento estrutural de barragens. Esses coeficientes servem para quantificar como variáveis externas (nível da albufeira, temperatura ou tempo) influenciam as respostas estruturais como deslocamentos, deformações ou frequências naturais.

Nos chamados Modelos de Interpretação Quantitativa, também conhecidos como Modelos de Separação de Efeitos, procura-se descrever matematicamente a relação entre as solicitações atuantes e as respostas observadas da estrutura. Para isso, utilizam-se expressões paramétricas, compostas por termos matemáticos associados a coeficientes que representam o peso ou influência de cada ação sobre a resposta.

A equação [2], que descreve o comportamento de uma grandeza observada (U), com base neste tipo de modelo pode ser escrita da seguinte forma (da Mata, J.T.C., 2007):

$$U = Y + \varepsilon = \sum_{j=1}^P X_j * \beta_j + k + \varepsilon \quad [2]$$

com,

U	- Valores observados da grandeza em análise;
Y	- Valor estimado;
X_j	- j-ésimo termo associado às ações (com P termos);
β_j	- Coeficiente linear correspondente ao termo X_j ;
k	- Constante que ajusta o modelo à linha de base do período de calibração;
ε	- Resíduos da observação, dado pela diferença entre os valores estimados e os valores observados.

A calibração do modelo consiste em ajustar os coeficientes (β_j), e a constante (k) de modo a minimizar o erro global durante um determinado período de análise. Esta minimização é feita resolvendo a expressão matricial [3]:

$$(Y - X * \beta)^T * (Y - X * \beta) \quad [3]$$

em que:

- Y - Vetor das variáveis dependentes;
- X - Matriz dos termos independentes;
- β - Vetor dos parâmetros a serem ajustados.

Se a matriz $X^T \cdot X$ for inversível, a solução para o vetor de coeficientes é dada por:

$$\beta = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad [4]$$

Este processo é suportado por softwares estatísticos e no âmbito desta tese, operacionalizado com o software Rstudio, que disponibiliza funções para estimar automaticamente estes coeficientes.

3.2.2 MODELOS DE INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA UTILIZADOS NO CONTROLO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS

O controlo da segurança de barragens, particularmente em estruturas de betão durante a fase de exploração, exige uma análise contínua e criteriosa dos dados provenientes da instrumentação instalada. Neste contexto, como já mencionado, os modelos de separação de efeitos assumem particular relevância. Estes modelos têm como principal finalidade suportar a interpretação do comportamento observado, permitindo isolar e quantificar os contributos das diferentes ações que atuam simultaneamente sobre a estrutura.

A base destes modelos assenta na construção de relações funcionais semi-empíricas entre as variáveis observadas (deslocamentos, tensões, entre outras) e as ações físicas que lhe estão associadas, tais como variações de carga hidráulica, temperatura e efeitos temporais. O desenvolvimento dos métodos da separação de efeitos faz uso aos métodos estatísticos de ajuste de modelos aos dados registados, sendo a regressão linear múltipla, frequentemente através do método dos mínimos quadrados, uma das abordagens mais aplicadas devido à sua robustez e simplicidade interpretativa (Cardoso, J.F.H.d.S., 2021).

A separação dos efeitos no comportamento das barragens é essencial, uma vez que este resulta de ações simultâneas e interdependentes, com especial destaque para a variação do nível da albufeira, a variação térmica e os efeitos do tempo. Entre os modelos de separação de efeitos, atualmente mais utilizados, destaca-se a abordagem HST, uma abordagem que irá ser avaliada numa próxima fase deste trabalho (Mendes, E.J.G., 2014). Este modelo baseia-se na separação dos três componentes principais: o efeito hidrostático, U_h , o efeito térmico sazonal, U_s , e o efeito do tempo, U_t . A modelação da componente térmica é feita com base em funções harmónicas (seno e cosseno), assumindo uma variação periódica anual que representa a influência da temperatura do ar. A sua formulação típica assume uma combinação linear destas parcelas, acrescida de uma

constante e de um termo residual que contempla as diferenças entre os valores observados e estimados:

$$U(h_i, s_i, t_i) = U_h(h_i) + U_s(s_i) + U_t(t_i) + k + \varepsilon_i \quad [5]$$

onde:

$\delta(h_i, s_i, t_i)$	- Valor observado da grandeza em análise na observação i , que depende da pressão hidrostática, da temperatura e do instante em que se realiza a observação;
$U_h(h_i), U_s(s_i), U_t(t_i)$	- São, respetivamente, as parcelas das grandezas correspondentes ao efeito elástico do nível de água na albufeira, ao efeito elástico da variação sazonal da temperatura e ao efeito do tempo na $i^{\text{ésima}}$ observação;
k	- Constante que corresponde à diferença entre valores observados e calculados no início do período utilizado para o ajuste do modelo;
ε_i	- Resíduo da $i^{\text{ésima}}$ observação, dado pela diferença entre o valor estimado e o valor observado.

Efeito hidrostático ($U_h(h)$)

Este termo modela o efeito elástico instantâneo da pressão exercida água. A variável de entrada é o nível da albufeira, h , sendo comum a utilização de funções polinomiais como:

$$U_h(h) = a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 + a_4 h^4 + a_5 h^5 \quad [6]$$

com:

h	- Altura da água da albufeira;
a_1, a_2, a_3, a_4, a_5	- Coeficientes a ajustar.

Muitos modelos simplificados utilizam apenas o termo h^4 dada a sua boa correlação com a resposta estrutural observada. Os coeficientes a_i são estimados estatisticamente com base nos dados históricos.

Efeito térmico sazonal ($U_s(s)$)

O componente térmico, no modelo HST, é representado por funções harmónicas que descrevem a variação cíclica da temperatura do ar ao longo do ano. A variável de entrada s é geralmente função do dia do ano, tipicamente definida como:

$$U_s(s) = b_1 * \cos(s) + b_2 * \sin(s) + b_3 * \sin^2(s) + b_4 * \cos(s) * \sin(s) \quad [7]$$

com:

$$s = \frac{2\pi \cdot t_d}{365} \quad 1 \leq t_d \leq 365 \quad [8]$$

onde:

- t_d - Número de dias decorridos desde o início do ano até à data de observação;
- b_1, b_2, b_3, b_4 - Coeficientes a ajustar.

Estas funções permitem captar o efeito da onda térmica anual. Contudo, este método assume implicitamente que o comportamento térmico segue uma sazonalidade regular, o que pode ser limitante em condições climáticas atípicas.

Um outro modelo com bastante relevância neste campo, é o modelo HTT, que se diferencia do modelo HST pela forma como trata o efeito térmico. Enquanto o modelo HST usa funções sinusoidais com período anual para simular a temperatura, o modelo HTT utiliza diretamente as temperaturas medidas. Esta abordagem tende a ser mais precisa, embora dependa da disponibilidade e qualidade dos dados da temperatura.

No modelo alternativo proposto no presente trabalho, esta é a principal alteração fundamental, pois a caracterização do efeito térmico irá ser realizada através do estudo da variação das frequências fundamentais de vibração.

Efeito do tempo ($U_t(t)$)

O efeito do tempo procura descrever as alterações graduais que ocorrem ao longo da vida útil da barragem e que não são diretamente explicadas pelos efeitos hidrostáticos nem pelas variações térmicas. Esta componente é particularmente relevante porque incorpora diversos fenómenos de natureza progressiva, entre os quais se destacam os comportamentos viscoelásticos (como a fluência do betão) e processos evolutivos ou patológicos como as reações expansivas internas (da Mata, J.T.C., 2007).

Do ponto de vista matemático, a modelação deste efeito pode adotar diferentes formas, consoante o tipo de evolução temporal que se pretende captar, sendo que frequentemente são usadas funções polinomiais, havendo diversas formas de escrever a equação [9].

$$U_t(t) = c_1 * t^3 + c_2 * t^2 + c_3 * t + c_4 * \ln(1 + \frac{t}{a}) \quad [9]$$

com,

- t - Número de dias entre a campanha e o início da observação;
- a - Número de dias entre o primeiro enchimento e a data do início da análise;
- c_1, c_2, c_3, c_4 - Coeficientes a ajustar.

Termo constante (k)

O termo constante k corresponde à diferença entre os valores observados e os calculados no início do período utilizado para o ajuste do modelo.

3.3 METODOLOGIA E TRABALHOS PROPOSTOS NO ÂMBITO DA DISSERTAÇÃO

Com base no enquadramento teórico previamente desenvolvido, este subcapítulo apresenta uma metodologia inovadora para a previsão de deslocamentos em barragens de betão, alicerçada na análise conjunta de diversas variáveis representativas das ações e do comportamento observado, nomeadamente relacionadas com o nível da água na albufeira, a temperatura, as frequências naturais, e o tempo. Estas variáveis são tratadas de forma integrada num modelo estatístico com o intuito de captar com maior precisão a relação dos fenómenos físicos que afetam o comportamento estrutural destas obras de arte.

A metodologia apresentada será aplicada num caso prático real, detalhado no capítulo seguinte, e recorre a técnicas de Machine Learning, em particular à Regressão Linear Múltipla, aplicada sobre um conjunto de dados de recolha manual. O modelo irá ser avaliado, comparando com um existente, o modelo HST, que é um modelo conceptual amplamente validado no contexto da monitorização de barragens. O modelo HST constitui a base da abordagem proposta, sendo adaptado de forma a incorporar novas componentes como as que irão ser mencionadas.

A metodologia será representada de forma sistemática através de um fluxograma que detalha os diferentes passos da análise, desde a construção dos modelos base, até à avaliação comparativa entre as variantes propostas, na Figura 26. Esta abordagem permite não só validar as hipóteses subjacentes com o modelo tradicional HST, como também testar extensões que visam aumentar a robustez, flexibilidade e aplicabilidade dos modelos em contextos onde os dados disponíveis estão incompletos.

A metodologia proposta assenta na construção de dois blocos complementares de modelação. O primeiro corresponde à análise de variáveis relativas à evolução temporal das frequências naturais da estrutura $Freq_j$, com o objetivo de captar a sua sensibilidade às variações térmicas ao longo do tempo. O segundo bloco foca-se nas grandezas estruturais de interesse $Grand_i$, estimando o seu comportamento térmico a partir da relação estabelecida com as componentes extraídas da variável $Freq_j$.

Inicialmente são aplicados modelos do tipo HST às frequências naturais j , $Freq_j$, através das expressões [10] e [11]

$$Freq_j = Y^{Freq_j} + \varepsilon^{Freq_j} \quad [10]$$

$$Y^{Freq_j} = E(H) + E(S) + E(T) + k \quad [11]$$

Subsequentemente, procede-se à extração da componente térmica da variável $Freq_j$, incluindo os resíduos, removendo os efeitos estimados do nível da albufeira e da tendência temporal, resultando na expressão [12], mencionada abaixo:

$$Y_S^{Freq_j} + \varepsilon^{Freq_j} = Freq_j - E(H) - E(T) + k \quad [12]$$

Com esta subtração de efeitos pretendeu-se representar as variações que estão correlacionadas com o comportamento térmico da estrutura.

De modo a captar tendências sazonais de média e longa duração nesta parcela (removendo ou minimizando a variabilidade associada a efeitos de curta duração, como variações térmicas diárias, e os resíduos ε^{Freq_j}), aplica-se uma técnica de suavização baseada em *Local Polynomial Regression Fitting*, através da função *loess* (*Locally Estimated Scatterplot Smoothing*), como expresso na equação [13], (Kabacoff, R., 2011). Esta função é utilizada para ajustar modelos de regressão local, permitindo a suavização das variáveis. Este método baseia-se em regressões polinomiais ajustadas localmente, ou seja, em cada ponto da variável independente, é ajustado um modelo polinomial simples, com base num subconjunto dos dados vizinhos, ponderados de acordo com a sua proximidade, onde o grau do polinómio é definido pelo *degree*, onde *degree* igual a 1 corresponde a uma função linear, e *degree* igual a 2, corresponde a uma função quadrática. A quantidade de suavização é controlada pelo parâmetro *span*, que define a proporção dos dados utilizados em cada regressão local, onde valores mais baixos resultam numa curva mais flexível e sensível à variabilidade local, enquanto os valores mais elevados produzem curvas mais suaves. O modelo resultante é particularmente útil para explicar tendências gerais em dados com grande dispersão, sem impor uma forma funcional rígida, como acontece na regressão linear tradicional.

$$Y_{T^*}^{Freq_j} = loess(Y_S^{Freq_j}, span, degree) \quad [13]$$

O resultado é uma série suavizada da frequência natural, isenta de ruído, que funciona como estimativa indireta do comportamento térmico da estrutura.

Num segundo momento, o mesmo modelo HST é aplicado às grandezas $Grand_i$, de forma a decompor os efeitos determinísticos:

$$Y_{HST}^{Grand_i} = E(H) + E(S) + E(T) + k \quad [14]$$

$$Grand_i = Y_{HST}^{Grand_i} + \varepsilon_{HST}^{Grand_i} \quad [15]$$

Para essa mesma parcela da grandeza, é novamente retirado o efeito do nível da albufeira e a tendência temporal, mantendo uma vez mais apenas o efeito sazonal e os resíduos, permitindo assim concentrar a análise na resposta térmica da estrutura, como expresso na equação [16]:

$$Y_S^{Grand_i} + \varepsilon_{HST}^{Grand_i} = Grand_i - E(H) - E(T) + k \quad [16]$$

Esta parcelas representa a resposta da estrutura aos efeitos térmicos residuais, que se pretende modelar em função da componente suavizada da frequência. Assim, assume-se que a parte

significativa da variabilidade térmica presente na grandeza pode ser explicada com base nas oscilações da variável $Y_{T^*}^{Freq_j}$, conforme expresso pela seguinte relação:

$$Y_{TFreq}^{Grand_i} = f(Y_{T^*}^{Freq_{j=1,...,n}}) \quad [17]$$

Este passo representa uma das principais contribuições metodológicas desta abordagem que é a utilização da variável de frequência, para explicar o comportamento das grandezas estruturais.

Por fim temos o último passo, que representa uma das principais inovações da metodologia, considerar que o comportamento térmico de uma estrutura pode ser explicado, ou parcialmente previsto, através de padrões implícitos obtidos a partir das frequências naturais. Assumindo esta relação, constrói-se um modelo $HT_{Freq}T$, onde o efeito térmico tradicionalmente modelado com base na temperatura é agora substituído pela componente suavizada das componentes térmicas das frequências naturais, juntamente com os seus resíduos.

$$Y_{HTFreqT}^{Grand_i} = E(H) + E(Y_{T^*}^{Freq_{j=1,...,n}}) + E(T) + k \quad [18]$$

Este enquadramento inovador permite contornar limitações relacionadas com a qualidade ou disponibilidade de dados de temperatura medida no corpo da barragem, enquanto oferece uma representação mais flexível e adaptada ao efeito térmico na estrutura. A integração de variáveis derivadas com significado físico, como a frequência, acrescenta robustez e interpretabilidade ao modelo, tornando-o particularmente relevante para aplicações em monitorização estrutural e previsão de comportamento destas estruturas hidráulicas.

Adicionalmente, de forma a tornar os modelos mais leves, e estatisticamente mais robustos, é aplicada a função *step*, que permite a seleção automática de variáveis em modelos de regressão, com base em critérios de informação, como o Critério de Informação de Akaike (AIC) (Burnham, K.P., 1998). Esta função tem como objetivo encontrar um modelo que, mantendo uma boa capacidade explicativa, utilize o menos número possível de variáveis, sendo que neste caso, são as frequências dos diferentes modos de vibração.

O AIC é amplamente utilizado na seleção de modelos estatísticos, sobretudo quando se pretende alcançar um equilíbrio entre a qualidade do ajustamento aos dados e a simplicidade estrutural do modelo. Proposto por Hirotugu Akaike em 1974, este critério assenta na ideia de que modelos mais complexos tendem a ajustar-se melhor aos dados observados, mas tal ajustamento nem sempre se traduz numa maior capacidade de generalização (Cavanaugh, J.E. and Neath, A.A., 2019). A sua formulação é dada pela equação [19]:

$$AIC = -2 * \ln(L) + 2k \quad [19]$$

onde,

- L - Valor da verossimilhança máxima do modelo ajustado (a verossimilhança indica o grau de compatibilidade entre um modelo estatístico e os dados que foram observados);
- k - Número de parâmetros estimados;

Para evitar modelos excessivamente complexos sejam automaticamente favorecidos, o AIC inclui um termo de penalização proporcional a k , promovendo assim a parcimónia.

A função *step* implementa este critério através de um processo iterativo que adiciona ou remove variáveis explicativas ao modelo inicial, avaliando a cada passo o impacto da modificação no valor do AIC. Este procedimento pode seguir diferentes estratégias, sendo elas a eliminação regressiva, a seleção progressiva ou a combinação de ambas, mais conhecida como seleção bidirecional. Esta última, utilizada por defeito na função, permite uma maior flexibilidade, avaliando continuamente se a inclusão ou exclusão de uma variável contribui para um modelo estatisticamente mais adequado, ajustando-se de forma dinâmica à qualidade estatística de cada combinação testada.

Este modelo tem o potencial de representar uma alternativa robusta em contextos onde os dados térmicos diretos não se encontram disponíveis, estão sujeitos a falhas, ou não refletem adequadamente a resposta real da estrutura.

A Figura 26, apresenta de forma resumida, a metodologia proposta para analisar e prever o comportamento estrutural da barragem, conforme previamente descrito:

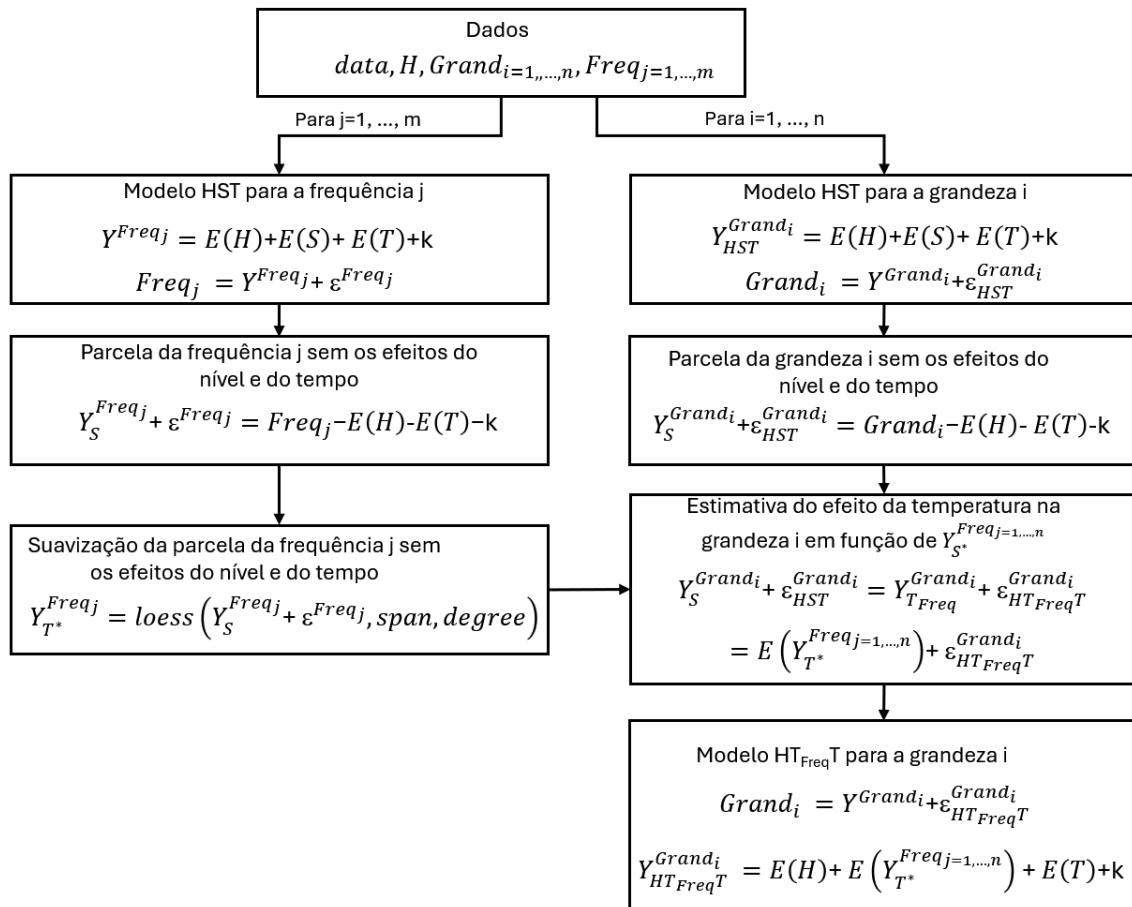


Figura 26 - Metodologia para a construção do modelo HT_{FreqT} com Regressão Linear Múltipla.

4

CASO DE ESTUDO – BARRAGEM DO BAIXO SABOR

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo dedica-se à apresentação de um caso de estudo real, a barragem do Baixo Sabor, com o objetivo de avaliar a metodologia proposta no capítulo 3.

Num primeiro momento, procede-se à caracterização do aproveitamento hidroelétrico, com particular ênfase nas grandezas monitorizadas e no sistema de aquisição de dados. De seguida, é efetuada uma análise do comportamento observado da barragem através de métodos quantitativos convencionais, do tipo HST, os quais servem de base de comparação para o modelo alternativo proposto.

A última parte do capítulo centra-se na aplicação do modelo proposto, cuja estrutura permite a incorporação das frequências naturais nas variáveis de entrada, visando uma melhoria nos resultados do modelo de interpretação quantitativa.

Com esta estrutura, pretende-se proporcionar uma análise comparativa abrangente entre métodos tradicionais e abordagens inovadoras, demonstrando o potencial de soluções mais avançadas para uma interpretação mais precisa e eficiente do comportamento estrutural da barragem.

4.2 APRESENTAÇÃO DO APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DO BAIXO SABOR

O Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor (AHBS) constitui uma das mais recentes infraestruturas hidroelétricas em Portugal e localiza-se no distrito de Bragança. Integrado no Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH), este aproveitamento é composto por duas barragens de betão, sendo a principal a barragem do Baixo Sabor, e a barragem do Feiticeiro, apresentada na Figura 27, localizada a jusante, que corresponde a uma estrutura em betão de gravidade, apresentando uma altura máxima de 45 m e um coroamento com cerca de 315 m de comprimento. O descarregador de cheias da barragem do Feiticeiro é constituído por quatro vãos centrais equipados com comportas, permitindo uma capacidade de vazão máxima de $4 \times 1250 \text{ m}^3/\text{s}$. Complementarmente, dispõe de uma descarga de

fundo dimensionada para um caudal de $51,5 \text{ m}^3/\text{s}$. A central hidroelétrica associada encontra-se equipada com duas turbinas-bomba do tipo *Francis* de eixo vertical, aptas para assegurar tanto a função de bombagem como a de produção de energia elétrica.



Figura 27 - Barragem do Feiticeiro, retirado de (Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens, Consult. 12/06/2025).

A albufeira da barragem do Feiticeiro possui uma capacidade de 31 hm^3 , situando-se o seu nível de pleno armazenamento à cota de 138 m, contando com um caudal de dimensionamento de cheia estimado em $6400 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondente a um período de retorno de 5000 anos (Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens).

A barragem do Baixo Sabor conta com um descarregador de cheias implantado na zona central do coroamento da barragem, constituído por quatro vãos equipados com comportas radiais, permitindo uma vazão máxima combinada de $5000 \text{ m}^3/\text{s}$. Adicionalmente, a estrutura dispõe de uma descarga de fundo com capacidade de $220 \text{ m}^3/\text{s}$, assegurando a regulação controlada dos níveis da albufeira em condições operacionais e extremas (Agência Portuguesa do Ambiente, 2025).

A central hidroelétrica encontra-se equipada com dois grupos de turbinas *Francis*, aptas a funcionar em regime de bombagem e de produção. Cada grupo está instalado em poços independentes com 79 m de altura e 11,5 m de diâmetro interior, apresentados na Figura 28. Estes poços são cobertos por um edifício técnico, destinado à descarga, montagem e movimentação de equipamentos, assim como às instalações de comando da central.

Contígua a este edifício, junto à encosta, situa-se a subestação elétrica, responsável pela elevação da tensão e integração da energia produzida na rede elétrica nacional.

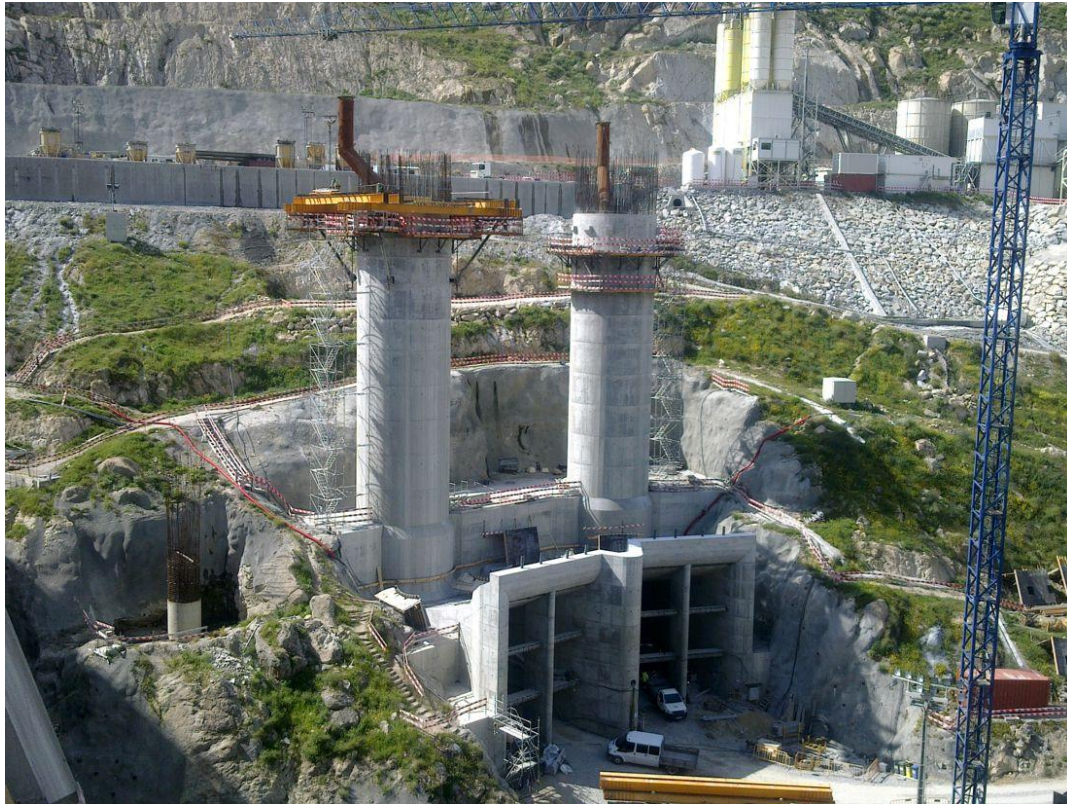


Figura 28 - Construção dos poços da barragem do Baixo Sabor, retirado de (FCM, Consult. 12/06/2025).

4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM DO BAIXO SABOR

A barragem do Baixo Sabor é uma das mais recentes e relevantes infraestruturas hidroelétricas construídas em Portugal (ver Figura 29). Localiza-se no concelho de Torre de Moncorvo, no distrito de Bragança, e está implantada sobre o rio Sabor, um importante afluente da margem direita do Rio Douro. A promoção do projeto e da construção das obras que integram o aproveitamento hidroelétrico na qual a barragem se inclui foi da responsabilidade da EDP. A barragem foi concluída em 2016. Até dezembro de 2020 a concessão e a exploração da obra foram da EDP, tendo então a concessão passado para a Movhera, que mobilizou a Engie Douro para a sua exploração.



Figura 29 – Vista aérea da Barragem do Baixo Sabor, retirado de (FCM, Consult. 12/06/2025).

A barragem situa-se a cerca de 12,6 km da confluência do rio Sabor com o Rio Douro, numa zona em que o vale se estreita significativamente, condição que foi aproveitada para otimizar a sua conceção. Trata-se de uma barragem em abóbada de dupla curvatura, como se pode verificar pela análise da Figura 30, com uma altura máxima de 123 m acima da fundação e um comprimento de coroamento de 505 m, é constituída por 32 blocos com cerca de 15,7 m cada. No interior da barragem, foram previstas seis galerias horizontais de visita, que asseguram a inspeção e manutenção regulares da estrutura, complementadas por uma galeria geral de drenagem.



Figura 30 - Barragem do Baixo Sabor, em fase de construção, adaptado de (FCM, Consult. 12/06/2025).

A albufeira possui uma capacidade total de armazenamento de cerca de 1095 hm^3 , inundando uma área aproximada de 2819 ha para o NPA (Nível Pleno de Armazenamento). A sua capacidade útil, ou seja, o volume efetivamente disponível para armazenamento de água é de cerca de 630 hm^3 .

A conceção e construção da barragem foram realizadas no âmbito do Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH), refletindo uma aposta estratégica em infraestruturas sustentáveis e de grande impacto energético. A qualidade técnica foi reconhecida com a atribuição de prémios pela Secil à equipa de projeto em 2014 (Secil, 2014).

4.2.2 GRANDEZAS ANALISADAS E SISTEMA DE OBSERVAÇÃO

Ao longo das últimas décadas, os sistemas de observação em barragens têm incorporado progressivamente soluções tecnológicas que complementam e potenciam a atuação humana, desde a realização de inspeções técnicas presenciais, até aos processos de receção, armazenamento e tratamento de dados obtidos.

No caso da barragem do Baixo Sabor, foi implementado um sistema de observação abrangente, concebido de acordo com as suas dimensões e com a classe de risco associada à infraestrutura. Este sistema visa garantir o cumprimento rigoroso dos requisitos estabelecidos pelo Regulamento de Segurança de Barragens (RSB). As grandezas observadas são:

- Nível de albufeira;
- Temperatura do ar;
- Humidade do ar;
- Temperatura do betão;
- Deslocamentos;
- Acelerações;
- Movimentos das juntas e fissuras;
- Caudais drenados e infiltrados;
- Subpressões;
- Tensões e extensões.

Tal como foi anteriormente mencionado, o sistema de observação da barragem do Baixo Sabor, contém sistemas de recolha automática de dados (RAD) e sistemas de recolha manual de dados (RMD), abrangendo todas as grandezas físicas relevantes para o comportamento estrutural e hidráulico ao longo do tempo.

A monitorização dos deslocamentos horizontais é realizada com base em diferentes tecnologias. Por um lado, recorre-se à geodesia clássica, com 35 vértices distribuídos em poligonais instaladas ao longo de diversas zonas da estrutura. Por outro lado, utilizam-se três antenas GNSS instaladas no coroamento, complementadas por uma antena de referência, que permitem a recolha contínua de dados de alta precisão. Complementarmente, existem 5 fios de prumo e 27 bases de coordenómetros, das quais 20 estão associados a fios de prumo direitos, e 7 estão associados a fios de prumo invertidos. Entre os métodos utilizados, os fios de prumo associados a bases de coordenómetros são, em geral, os que oferecem maior precisão e fiabilidade na medição de deslocamentos horizontais, desde que adequadamente mantidos e protegidos de interferências térmicas e mecânicas. No entanto, os sistemas GNSS têm a vantagem de fornecer dados em tempo real, permitindo um acompanhamento contínuo do comportamento estrutural.

No que se refere aos deslocamentos verticais, estes são acompanhados por 32 vértices de nivelamento geométrico de precisão, bem como por 24 extensómetros de varas na fundação.

Os movimentos relativos das juntas de contração são monitorizados por meio de 152 medidores de movimento de juntas de resistência elétrica, distribuídos em várias zonas da estrutura e 10 sensores acústicos. A estes dispositivos somam-se 103 bases tridimensionais que fornecem medições de deslocamentos relativos em pontos selecionados, nomeadamente nas galerias de visita e na galeria de drenagem.

O estado de deformação do betão é avaliado por um conjunto alargado de extensómetros de resistência elétrica, totalizando 232 sensores organizados em grupos, além de 12 extensómetros acústicos instalados em varões de reforço. As tensões internas são monitorizadas com o apoio de 10 tensómetros de resistência elétrica (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2017).

A temperatura do interior da estrutura é medida por 52 termómetros de resistência elétrica, dos quais 26 se encontram nas proximidades das superfícies dos paramentos a montante e a jusante. Para além destes, outros sensores, permitem inferir a temperatura em diferentes zonas, totalizando cerca de 480 pontos de medição. A temperatura da fundação é monitorizada com recurso a sondas térmicas, sendo 13 com leitura manual e 17 integradas no sistema de recolha automática.

O controlo da subpressão na fundação da barragem, é realizado por 52 piezómetros. O regime de drenagem é avaliado através de drenos e bicas totalizadoras, posicionados na fundação e em pontos estratégicos, e outras zonas equipadas com bicas de leitura, num total aproximado de 235 dispositivos.

A caracterização da deformabilidade no betão é assegurada por três conjuntos de células de fluência, cada um composto por extensómetros de resistência elétrica. Estes dispositivos permitem a determinação de parâmetros mecânicos relevantes, como o módulo de elasticidade e os fenómenos de fluência ao longo do tempo.

Por fim, o sistema de monitorização dinâmica, inclui dois subconjuntos de acelerómetros, sendo um deles dedicado à caracterização de ações sísmicas (composto por 12 acelerómetros triaxiais, estando 6 localizados na barragem e 6 em pontos exteriores), e o outro por 20 acelerómetros dedicados à aquisição contínua de dados, distribuídos radialmente ao longo das galerias superiores, como se pode verificar na Figura 31. Adicionalmente podem também ser visualizadas as galerias no alçado.

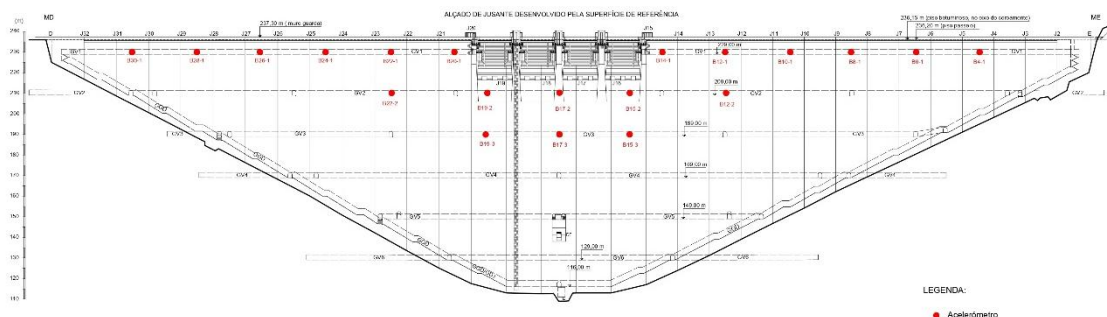


Figura 31 – Alçado planificado com a localização dos acelerómetros, dedicados à monitorização contínua.

A Tabela 2 e a Tabela 3, apresentam, em síntese, os sistemas de recolha manual de dados e o sistema de recolha automática de dados.

Tabela 2 - Síntese do sistema de observação com recolha manual de dados (RMD) (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2017).

Grandezas	Método / Instrumento	Número total de dispositivos de observação
Níveis da água	Escala de níveis	2
Subpressões	Piezómetros	42 na fundação + 10 na GV3 (juntas de betonagem a montante)
Temperatura no betão	Termómetros de resistência elétrica	52
Extensões no betão	Extensómetros de resistência elétrica	232 (em grupos)
Extensões nos varões de reforço das juntas de betonagem às cotas 185m e 186m, nos 5 blocos centrais, a montante	Extensómetros acústicos	12
Tensões no betão	Tensómetros de resistência elétrica	10
Pressão de água nos poros do betão	Medidores de pressão	6
Deformabilidade do betão	Células de fluência	3 conjuntos com um total de 24 extensómetros de resistência elétrica
Deslocamentos horizontais	Fios de prumo	27
	Geodesia – Poligonais	35
Deslocamentos verticais	Geodesia – Nivelamento	120
Deslocamentos da fundação	Extensómetros de varas	24
Temperatura da fundação	Sondas térmicas	13 em extensómetros de varas
Movimentos de juntas	Bases tridimensionais	103
	Medidores de movimentos de junta	152
Movimentos de abertura/fecho das juntas de betonagem do paramento de montante às cotas 185 m e 186 m	Medidores de movimentos de junta acústicos	10
Caudais drenados e infiltrados	Drenos e bicas totalizadoras	215 na fundação + 1 na GV4 das juntas de betonagem a montante + 1 infiltração com leitura +18 bicas

Tabela 3 - Síntese do sistema de observação com recolha automática de dados (RAD), (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2017).

Grandezas	Método / Instrumento	Número de dispositivos de observação
Temperatura e humidade relativa do ar	Estação meteorológica na margem direita, a jusante	1
Níveis da água	Escala de níveis (montante e jusante), limnímetros	2+2
Subpressões	Piezómetros	25
Temperatura do betão	Termómetros de resistência elétrica	30
Extensões no betão	Extensómetros Carlson	84
Tensões no betão	Tensómetros de resistência elétrica	8
Deslocamentos horizontais	Telecoordinómetros	9
Deslocamentos horizontais e verticais	GNSS	3 antenas +1 referencial
Deslocamentos da fundação	Extensómetros de fundação	12
Temperaturas da fundação	Sondas térmicas	6
Movimentos de juntas	Controladores de juntas tridimensionais	24
Caudais drenados e infiltrados	Caudalímetros em bicas totalizadoras 6	
Acelerações	Acelerómetros (sistema de observação sísmica)	6 na barragem + 6 exteriores
Acelerações	Acelerómetros (sistema de monitorização dinâmica em contínuo)	20

4.3 INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL COM RECURSO A MÉTODOS QUANTITATIVOS TRADICIONAIS

Dando continuidade ao que foi abordado no Capítulo 3, destaca-se a aplicação recorrente dos métodos quantitativos tradicionais (ou clássicos) no acompanhamento do comportamento estrutural de barragens. Estas metodologias, com base estatística e conceptual relativamente simples, continuam a desempenhar um papel relevante na monitorização e interpretação de dados obtidos por instrumentação.

No âmbito desta monitorização, uma das variáveis mais analisadas é o deslocamento horizontal da estrutura. Este pode ser decomposto em duas componentes fundamentais, consoante a sua orientação relativamente à geometria da barragem, denominadas por componente radial e componente tangencial, conforma representado na Figura 32.

A Figura 32 ilustra graficamente esta decomposição vetorial dos deslocamentos horizontais, adotando uma convenção de sinais segundo a qual os deslocamentos radiais positivos ocorrem no sentido jusante-montante. Esta convenção é essencial para uma análise coerente dos dados ao longo do tempo.

A componente radial, designada por $(\overrightarrow{DHR_k})$, corresponde ao movimento ortogonal à superfície da barragem, enquanto a componente tangencial, $(\overrightarrow{DHT_k})$, descreve o movimento ao longo da linha do paramento. Os deslocamentos radiais são os que usualmente apresentam maiores variações e constituem o objeto de análise neste trabalho.

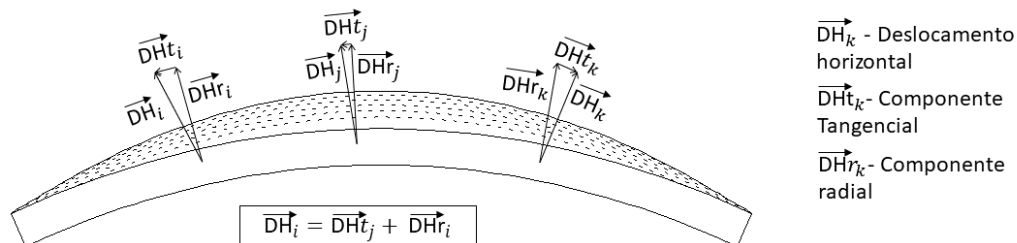


Figura 32 - Componentes do deslocamento horizontal, retirado de (Silva, J.A., 2022).

A Figura 33, apresenta o alçado planificado com a localização dos fios de prumo, sendo que a base sobre a qual incidiu o estudo, a FP3-233m, está indicada a vermelho.

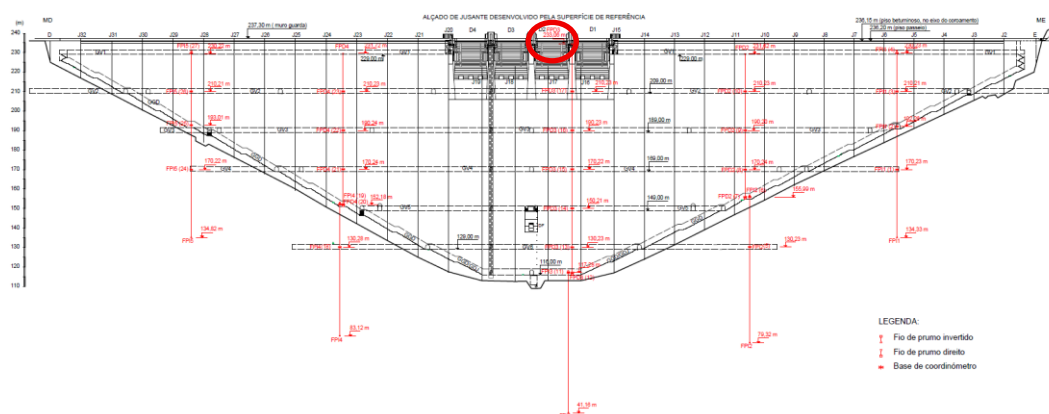


Figura 33 – Alçado planificado com a localização dos fios de prumo.

Procedeu-se à implementação de um modelo de interpretação baseado na metodologia HST, recorrendo à aplicação do método de Regressão Linear Múltipla. Numa análise prévia, os modelos HST foram desenvolvidos para os deslocamentos radiais registados nas diferentes bases, considerando o intervalo de tempo temporal compreendido entre 2015 e 2018. A aplicação da metodologia proposta foi concretizada para os deslocamentos radiais medidos na base de fio de prumo FP3-233m.

A Figura 34 ilustra a evolução do nível da água da albufeira. O primeiro enchimento da albufeira decorreu entre o final de fevereiro de 2014 e o final de abril de 2016, tendo o nível da água mantendo-se em valores significativamente baixos até ao final de 2015. Em janeiro de 2016 observa-se uma subida acentuada do nível da água, sendo que a partir desse ponto, os níveis mantêm-se relativamente elevados, com oscilações entre 104 e 110 metros, o que caracteriza a transição para o regime operacional normal da barragem.

A Figura 35 exibe a variação da temperatura do ar medida ao longo do tempo, entre o final de 2015 e o final de 2018. A série temporal revela um comportamento cíclico claro, com oscilações sazonais bem definidas que se repetem anualmente.

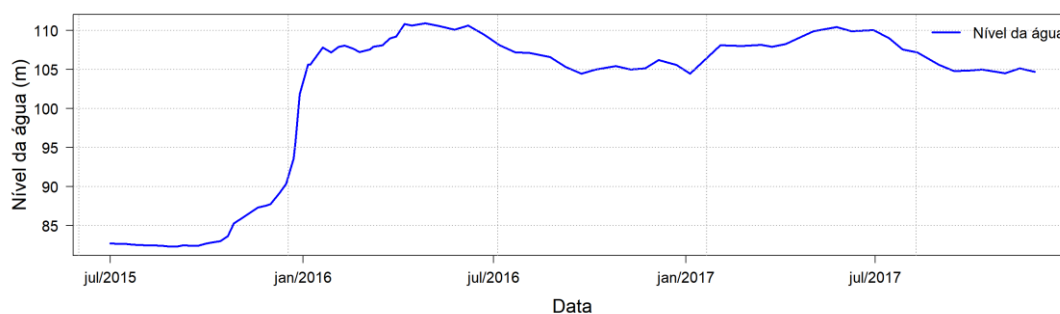


Figura 34 - Variação do nível da água da albufeira.

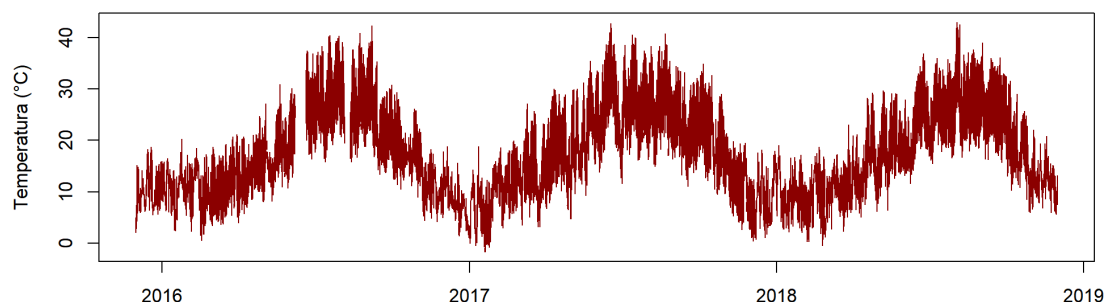


Figura 35 - Variação da temperatura da barragem entre dezembro de 2015 e dezembro de 2018.

A temperatura tende a aumentar de forma acentuada a partir da primavera, atingindo os valores máximos durante os meses de verão. Em contraste os valores mínimos são registados no inverno, o que é compatível com o regime climático em Portugal. Ao longo dos três anos observados, verifica-se uma consistência nos padrões sazonais, embora existam algumas variações na amplitude térmica entre os anos.

As funções usualmente utilizadas para representar os diferentes efeitos considerados no modelo basearam-se nas formulações previamente descritas. Para maior clareza e sistematização, a Tabela 4 sintetiza as funções matemáticas candidatas aplicadas no modelo de interpretação quantitativa HST.

Tabela 4 – Termos usualmente utilizados na Interpretação Quantitativa com abordagem HST, adaptado de (Silva, J.A., 2022).

Efeito	Função	Tipo de função
Nível da água	$U_h(h) = a_1 * h^4$	Polinomial
Térmico	$U_s(s)^{anual} = b_1 * \cos(s) + b_2 * \sin(s)$	Periódica (sinusoidal de período anual)
Tempo	$U_t(t) = c_1 * \ln\left(1 + \frac{t}{a}\right)$	Logarítmica

Para a estimativa dos coeficientes associados aos termos do modelo, foi utilizada uma regressão linear implementada por meio da função *lm* da linguagem R, implementada no ambiente de desenvolvimento integrado *Rstudio*. Este procedimento baseia-se no método dos mínimos quadrados ordinários, permitindo o ajuste do modelo estatístico aos dados observados.

Conforme referido, a análise abrangeu uma análise prévia com os resultados de todas as bases de coordenómetros com cotas entre 117 m e 233 m, sendo que os resultados apresentados se referem especificamente à cota de 233 m. Assim, serão apresentados os resultados da aplicação do modelo HST, para os resultados do fio de prumo direito 3, FPD3-233m, visível na Figura 33.

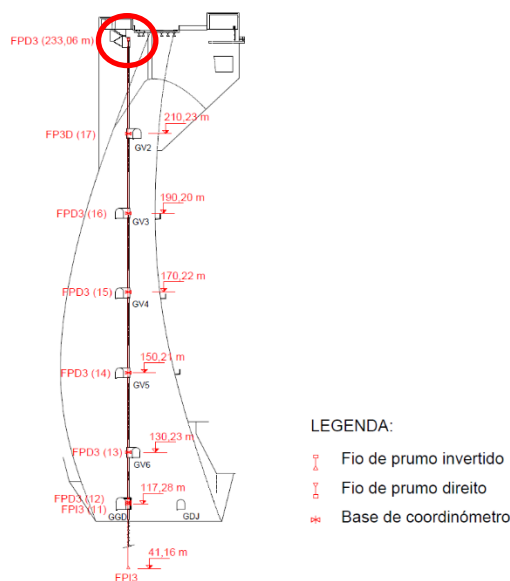


Figura 36 - Corte da barragem pelo eixo do FP3.

Para uma análise abrangente, serão analisados os efeitos associados à variação do nível da água, à variação térmica, complementados pela análise dos resíduos do modelo. O efeito do tempo, dada a sua pequena expressão no período analisado, não foi considerado no modelo HST.

A Figura 37 apresenta a comparação entre os deslocamentos radiais observados no ponto FP3-233m, e os valores ajustados pelo modelo HST no período compreendido entre 2015 e 2018.

Observa-se que o modelo reproduz adequadamente os principais padrões de deslocamento ao longo do tempo, incluindo a acentuada fase de movimentos para jusante, verificada entre 2015 e o início de 2016, resultante do enchimento da albufeira. Verifica-se também a oscilação cíclica visível entre 2016 e 2018, compatível com a influência de fatores sazonais, tanto de ordem térmica como de reserva hídrica.

De forma geral, o bom alinhamento entre os dados, associados a um elevado coeficiente de determinação ($R^2=0,946$), sugere que o modelo HST é adequado para representar o comportamento da barragem.

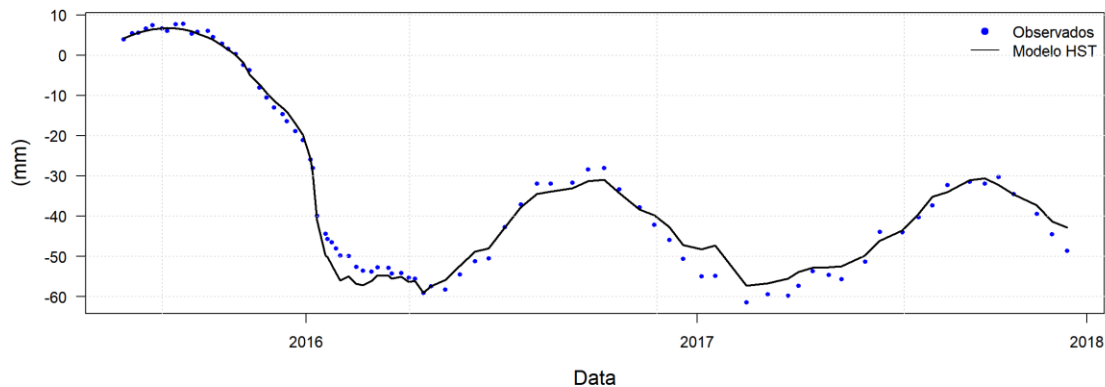


Figura 37 – Resultados da interpretação quantitativa, modelo HST e série temporal dos deslocamentos radiais observados no FP3-233 m.

A Figura 38 apresenta o gráfico que descreve a relação entre a altura da água no reservatório (eixo das abcissas) e o deslocamento radial (eixo das ordenadas), este último expresso em milímetros. Trata-se de uma análise específica do efeito hidrostático sobre o comportamento estrutural, isolado de outras influências. A linha representa a curva ajustada por regressão, obtida a partir de um modelo polinomial de quarto grau, cujo termo dominante é proporcional a h^4 , sendo h a altura da água em metros, tal como mencionado anteriormente. O coeficiente associado a esse termo é $-4.7550e-07$ e indica que aumentos sucessivos no nível da água tendem a provocar deslocamentos radiais negativos, sugerindo um movimento estrutural no sentido de jusante. Este comportamento é consistente com o aumento da pressão hidrostática exercida sobre a estrutura.

Por sua vez, a Figura 39 apresenta a componente térmica anual, em que o eixo horizontal representa o dia do ano, permitindo observar a variação cíclica ao longo dos doze meses, enquanto o eixo vertical indica o deslocamento relativo atribuído exclusivamente ao efeito térmico.

Este comportamento é modelado pela função harmónica presente na Tabela 4, em que b_1 e b_2 são coeficientes determinados por regressão linear. Esta formulação permite representar de forma simplificada a variação periódica dos deslocamentos estruturais induzidos por efeitos térmicos sazonais. A combinação das funções cosseno e seno permite ajustar adequadamente o padrão cíclico dos deslocamentos resultantes da dilatação e da contração da estrutura ao longo do ano, em resposta às oscilações de temperatura.

A curva obtida apresenta uma forma sinusoidal típica, de fórmula representada por $-6.8159 * \cos(s) - 8.0239 * \sin(s)$ refletindo a influência das variações periódicas de temperatura. Observa-se que os deslocamentos atingem valores máximos positivos (sentido de montante) durante os meses do verão (agosto e setembro), resultante da dilatação térmica da estrutura. Por outro lado, os valores mínimos ocorrem no inverno (fevereiro e março), refletindo a contração dos materiais em resposta da diminuição da temperatura.

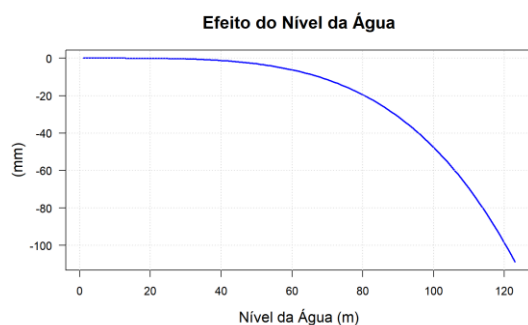


Figura 38 - Efeito do nível nos deslocamentos radiais medidos na base do FP3-233m.

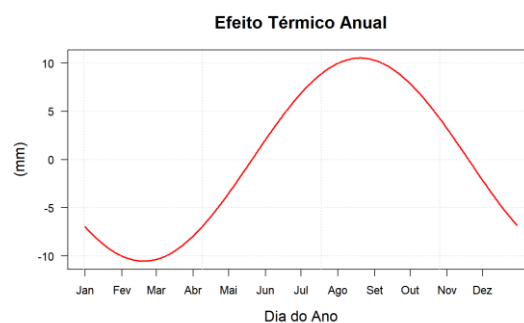


Figura 39 - Efeito Térmico nos deslocamentos radiais medidos na base do FP3-233m.

Na Figura 40 apresenta-se a evolução dos resíduos ao longo do tempo, onde se pode observar que os resíduos oscilam maioritariamente entre -6 mm e +6 mm, mas estão maioritariamente próximos de 0 mm, o que é um bom indicador da sua capacidade de captura da tendência média dos deslocamentos. Contudo, a distribuição dos resíduos ao longo do tempo revela uma maior concentração de valores extremos no início de 2016, bem como no início de 2017.

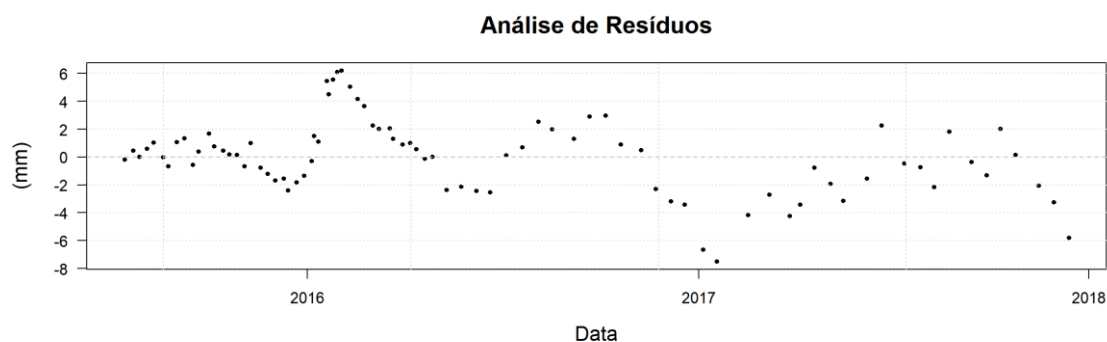


Figura 40 – Evolução dos resíduos entre os deslocamentos radiais observados na base FP3-233m e os previstos com o modelo HST.

Na Figura 41, ilustram-se todas as componentes atrás mencionadas de forma integrada numa única figura.

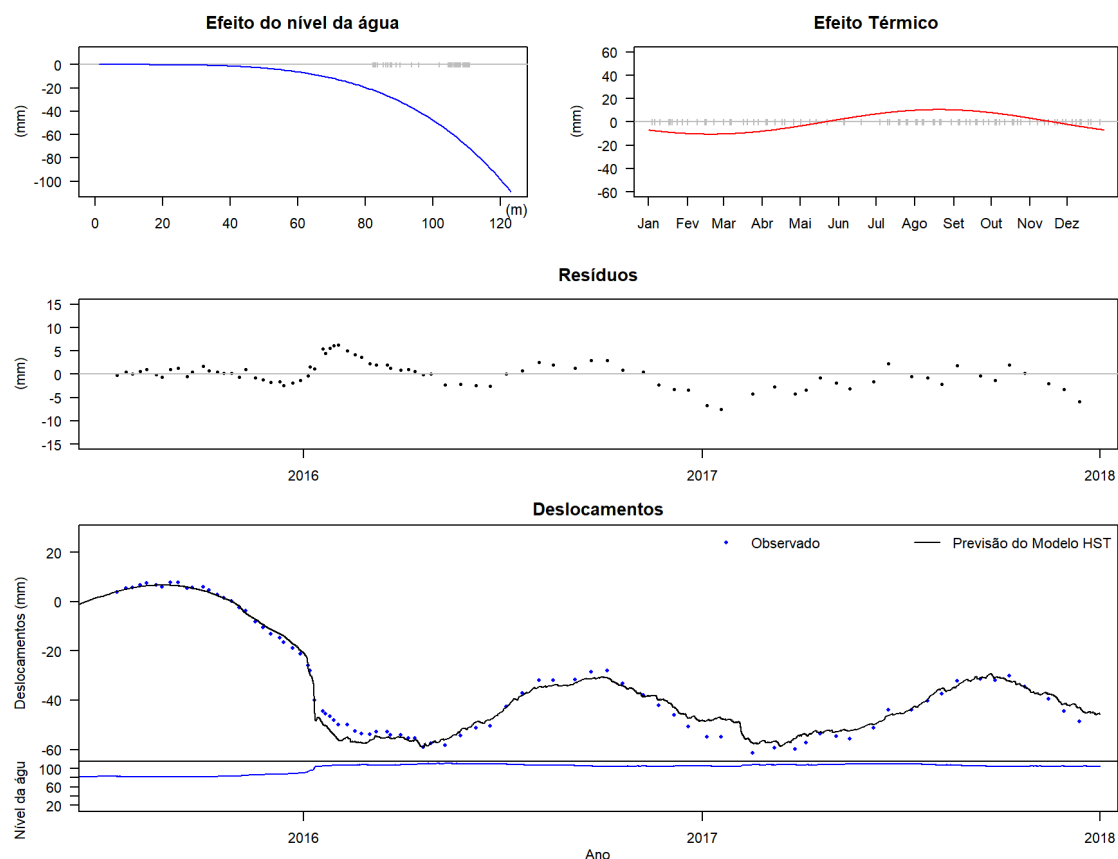


Figura 41 – Resultados do modelo HST para a previsão dos deslocamentos radiais observados no FP3-233m.

Como referido, os deslocamentos tangenciais apresentam uma magnitude consideravelmente reduzida neste ponto de monitorização. Por este motivo, a sua análise exaustiva não constitui o foco principal do presente estudo. Contudo, com o intuito de ilustrar e reforçar esta afirmação, apresenta-se a Figura 42, onde se encontram representados os deslocamentos tangenciais registados no ponto FP3 – 233 m.

A Figura 42, correspondente ao deslocamento tangencial apresenta amplitudes reduzidas ao longo do período analisado, com variações na ordem de aproximadamente ± 1 mm. Observa-se um padrão sazonal cíclico bem ajustado pelo modelo HST, refletindo a influência do efeito térmico, o qual é particularmente evidente no gráfico superior direito, com amplitudes anuais de cerca de $\pm 0,6$ mm.

O efeito da pressão hidrostática por sua vez, é mais reduzido neste caso, conforme indicado pelo gráfico superior esquerdo, sugerindo que o movimento tangencial da barragem é pouco sensível às variações do nível da albufeira.

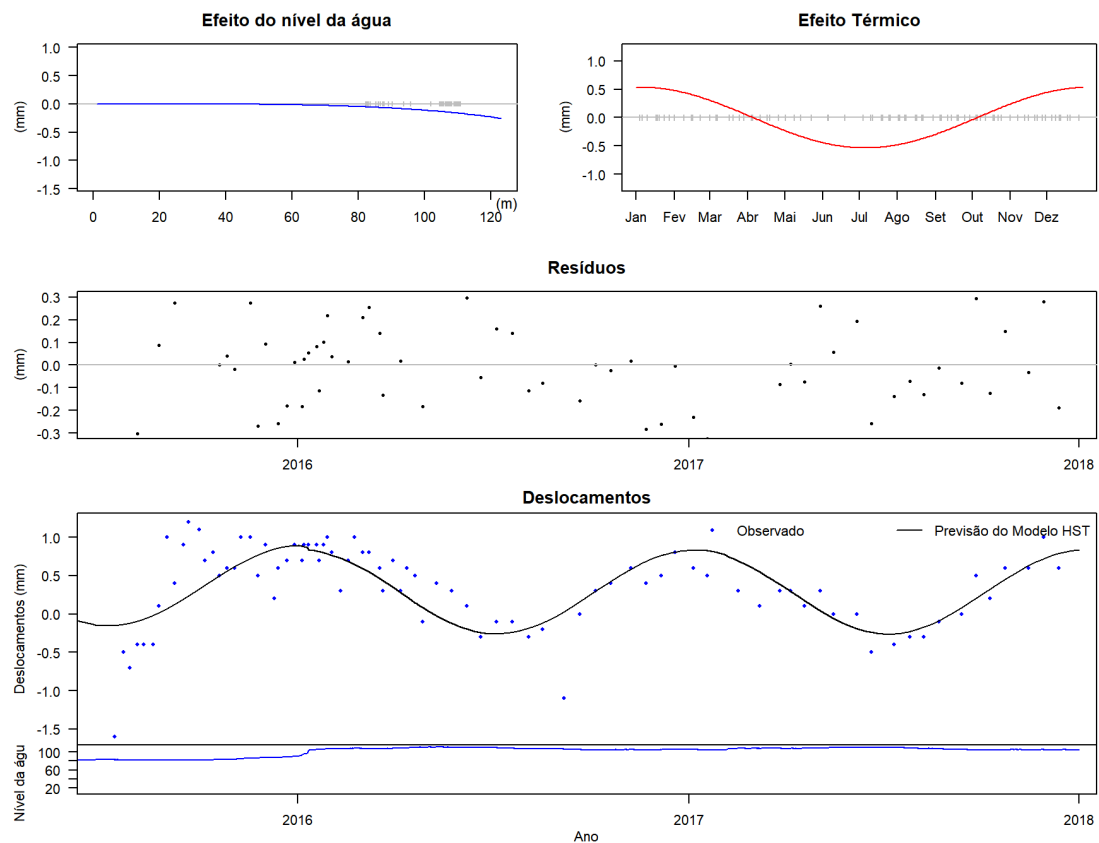


Figura 42 - Resultados do modelo HST para a previsão dos deslocamentos tangenciais observados no FP3-233m.

4.4 INTERPRETAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL COM RECURSO AO MODELO HT_{FREQT}

Para a análise do modelo HT_{FREQT} , foi necessário proceder a um novo tratamento dos dados, centrado na seleção exclusiva de registos completos. Esta abordagem implicou considerar apenas observações em que, para uma determinada hora, estavam disponíveis todos os valores das variáveis envolvidas na modelação. Esta filtragem visou garantir a consistência e a comparabilidade entre as variáveis, assegurando que o modelo fosse estimado com base em informação inteiramente observada, sem recurso a aproximações que pudessem introduzir valores não desejados.

4.4.1 APRESENTAÇÃO E COMPARAÇÃO DO MODELO HT_{FREQT} COM OS MODELOS TRADICIONAIS

Com base nos fundamentos teóricos previamente apresentados, o modelo HT_{FREQT} surge como uma extensão metodológica ao modelo conceptual HST, tradicionalmente utilizado na análise do comportamento estrutural de barragens, e os modelos HTT, recorrem às medições da temperatura para representar o efeito térmico. Esta nova abordagem parte do pressuposto de que os efeitos térmicos que influenciam a estrutura podem ser inferidos de forma indireta, através da análise das frequências de vibração, em substituição, ou complemento, à utilização de medições da

temperatura do ar ou do betão da barragem. Esta perspetiva é particularmente relevante em contextos em que os registos térmicos se revelam incompletos.

Neste caso de estudo, foram considerados cinco primeiros modos de vibração, correspondentes a diferentes configurações modais da estrutura. A análise simultânea destes modos permite uma caracterização precisa do comportamento dinâmico da barragem, possibilitando a identificação de padrões diferenciados de resposta estrutural perante variações térmicas e outras ações externas. Esta abordagem contribui para uma modelação mais robusta e representativa do sistema analisado.

Para tal, como anteriormente, recorreu-se ao *software Rstudio* para a realização dos modelos de interpretação quantitativa HST para a previsão das frequências naturais (um modelo HST para cada frequência natural). Inicialmente isolou-se a componente do efeito térmico e os resíduos, removendo os efeitos do nível da albufeira (o efeito do tempo também não foi considerado na análise das frequências naturais). Esta componente é posteriormente suavizada através de técnicas de regressão local, utilizando a função *loess* (*Locally Estimated Scatterplot Smoothing*), que permite captar padrões ao longo do tempo sem impor uma estrutura paramétrica rígida. O resultado é uma estimativa contínua da influência térmica implícita nas frequências de vibração da estrutura.

A Figura 43 e a Figura 44 apresentam a evolução da componente térmica das frequências naturais do primeiro e do segundo modos, respetivamente, após a remoção de efeitos não térmicos e aplicação de suavização loess (com $\text{span}=0,75$ e $\text{span}=0,35$), como mencionado anteriormente. No caso do primeiro modo, verifica-se que a tendência sazonal é pouco acentuada e uma maior dispersão nos dados. No caso do segundo modo, a variação é mais regular, com um padrão cíclico um pouco mais claro ao longo do tempo, evidenciando uma componente térmica mais marcada.

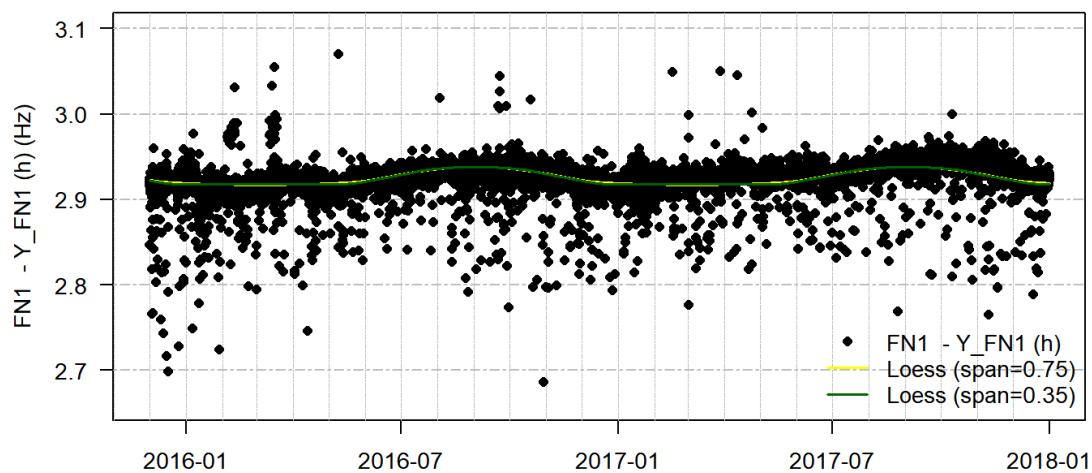


Figura 43 - Evolução da componente térmica da frequência (modo 1), isolada por remoção de efeitos não térmicos e suavização *loess*.

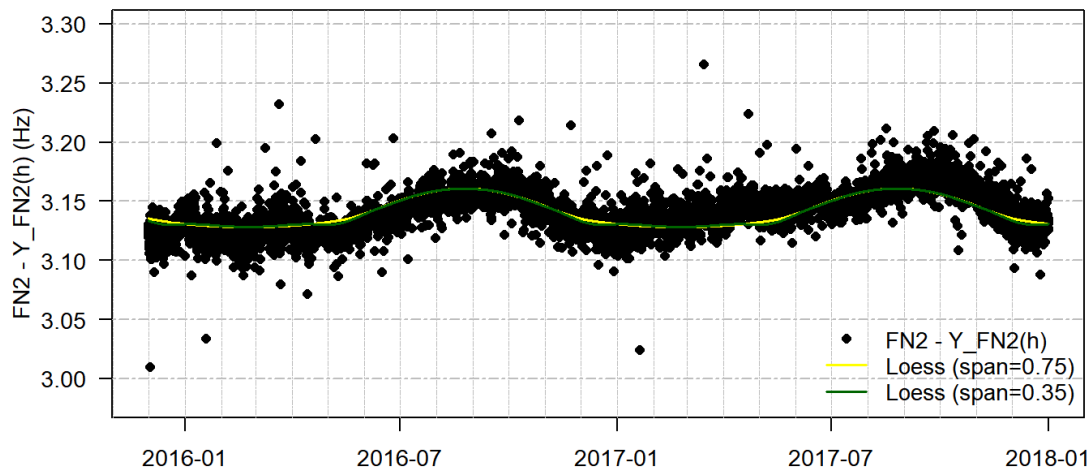


Figura 44 - Evolução da componente térmica da frequência (modo 2), isolada por remoção de efeitos não térmicos e suavização *loess*.

A Figura 45 e a Figura 46 representam, respetivamente, o terceiro e o quarto modos. Nestes modos observa-se uma tendência de aumento da variabilidade das frequências naturais com o aumento da ordem modal, como seria de esperar. A técnica de suavização *loess* aparenta continuar a revelar-se eficaz na identificação das tendências térmicas.

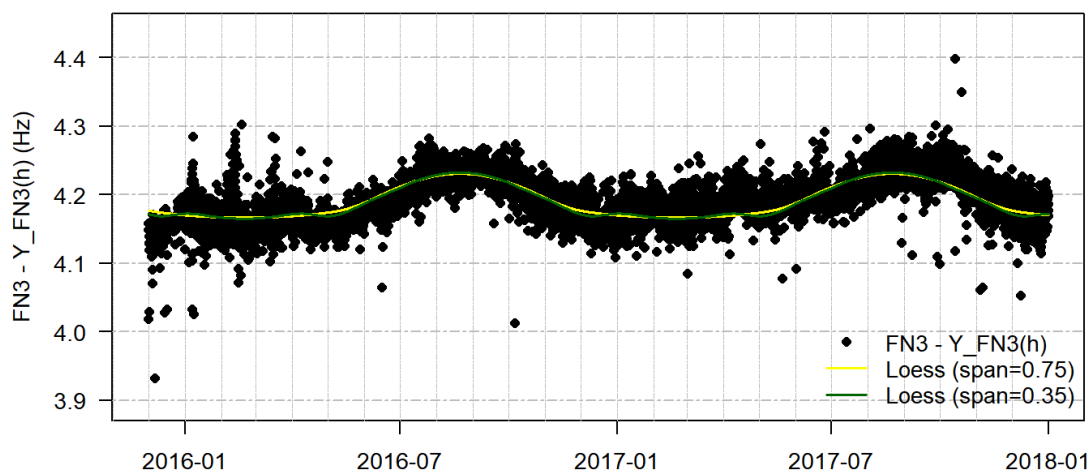


Figura 45 - Evolução da componente térmica da frequência (modo 3), isolada por remoção de efeitos não térmicos e suavização *loess*.

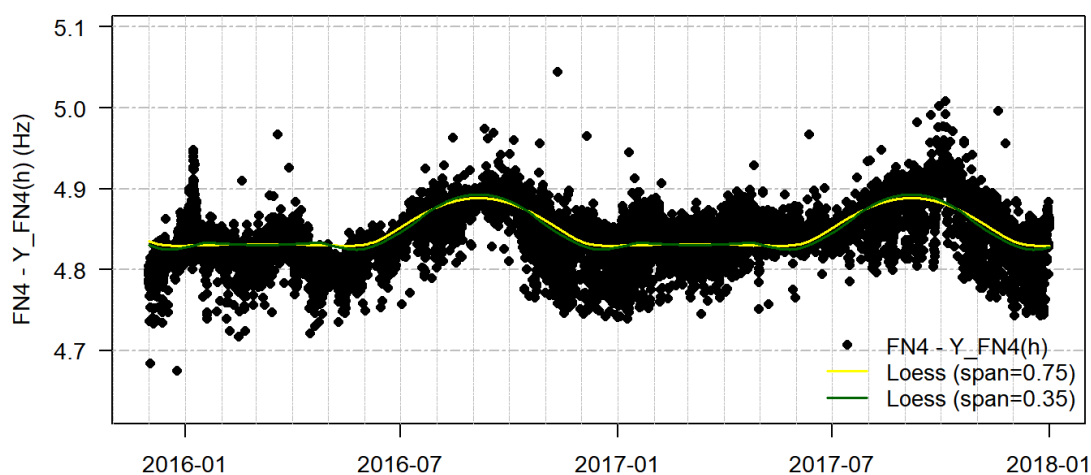


Figura 46 - Evolução da componente térmica da frequência (modo 4), isolada por remoção de efeitos não térmicos e suavização *loess*.

A variação sazonal torna-se cada vez mais evidente e pronunciada, principalmente no quinto modo de vibração, cujos resultados são apresentados na Figura 47. Neste modo, as curvas de suavização captam de forma clara um padrão cíclico anual, refletindo uma variação sistemática da frequência ao longo do tempo. Esta variação poderá estar relacionada com uma maior sensibilidade às variações térmicas.

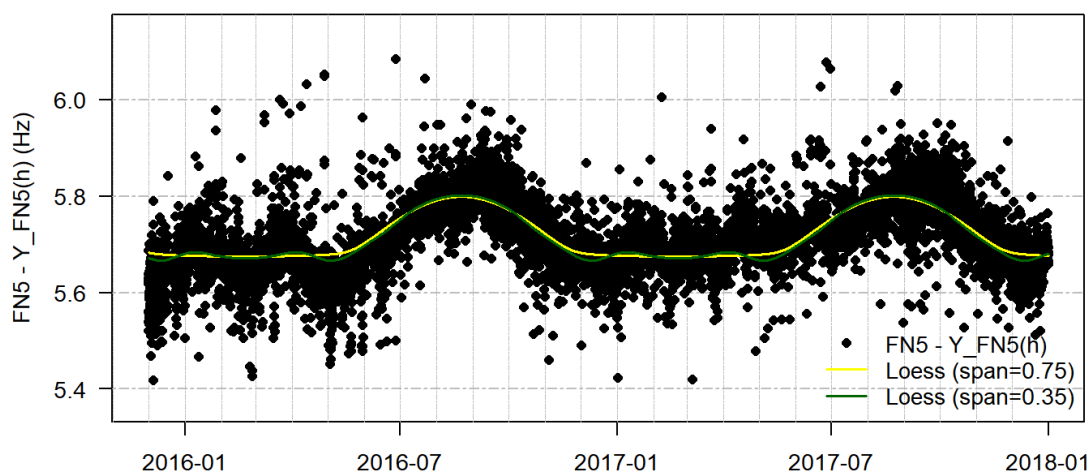


Figura 47 - Evolução da componente térmica da frequência (modo 5), isolada por remoção de efeitos não térmicos e suavização *loess*.

Apesar da dispersão dos dados, a consistência do padrão observado ao longo dos dois anos sugere que estas flutuações são recorrentes e não associadas a alterações estruturais inesperadas.

Posteriormente, foi desenvolvido um novo modelo de regressão linear múltipla HT_{FreqT} , recorrendo à função *lm*. Neste modelo, a variável dependente considerada é o deslocamento radial, sendo as variáveis independentes o nível da água e as componentes do efeito térmico dos primeiros cinco modos de vibração identificados.

O objetivo desta modelação foi, como já mencionado, avaliar se a incorporação direta das frequências naturais, enquanto variáveis explicativas, permite captar de forma mais eficaz o comportamento estrutural observado, nomeadamente no que respeita à resposta dos deslocamentos.

A análise dos resultados obtidos no modelo HT_{FreqT} com os resultados do modelo HST das frequências naturais permite estabelecer uma comparação da informação derivada com os modelos tradicionais e avaliar se esta abordagem traduz uma melhoria em termos de capacidade de previsão, robustez estatística ou relevância física das variáveis.

O resumo comparativo dos dois modelos pode ser visualizado na Tabela 5.

Tabela 5 - Resumo comparativo dos dois modelos lineares ajustados com os indicadores estatísticos mais relevantes.

Indicador	Modelo HT_{FreqT}	Modelo HST
Variável dependente	Deslocamento radial	
Variável independente	H^4 , FREQ1, FREQ2, FREQ3, FREQ4, FREQ5	H^4 , SEND, COSD
R^2	0.9603	0.9462
R^2 ajustado	0.9547	0.9427
Desvio padrão dos resíduos (mm)	2.704	3.044

Após a realização da análise estatística dos modelos, segue-se agora a apresentação dos gráficos associados, com o objetivo de contemplar e aprofundar a interpretação dos resultados obtidos.

A Figura 48 apresenta a relação entre a altura de água da albufeira (H), medido em metros, e o deslocamento previsto pelos dois modelos. A análise evidencia que os modelos HST e HT_{FreqT} produzem resultados bastante semelhantes, seguindo um padrão muito próximo ao longo de grande parte da faixa de variação de nível, com uma leve distinção quando o nível da albufeira apresenta valores superiores a 100 metros. Esta semelhança sugere que, nas condições analisadas, os efeitos no nível incorporados no modelo HT_{FreqT} não introduzem variações significativas em relação às previsões do modelo HST.

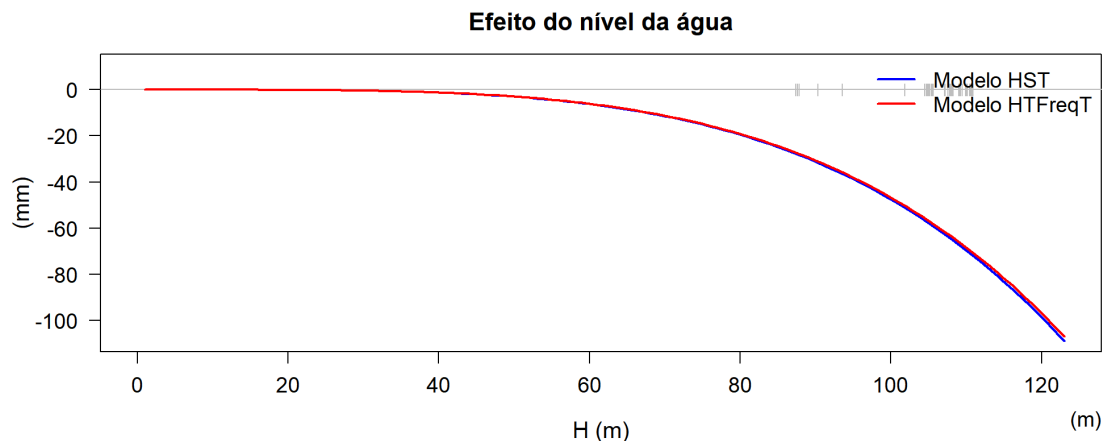


Figura 48 - Comparação do efeito no nível da água dos modelos HST e HT_{FreqT} nos deslocamentos radiais observados no FP3-233m.

O gráfico da Figura 49 apresenta a evolução do efeito térmico ao longo do tempo, comparando as previsões dos dois modelos entre janeiro de 2016 e janeiro de 2018.

Observa-se que ambos os modelos seguem um comportamento sazonal bem definido, com padrões cíclicos anuais caracterizados por máximos no verão e mínimos no inverno, o que é consistente com a resposta térmica típica a variações sazonais de temperatura.

É também possível observar que ambos os modelos apresentam amplitudes bastante semelhantes ao longo do tempo, sendo a principal diferença a simetria da resposta, onde o modelo HST revela uma curva aproximadamente simétrica, contrariamente ao modelo HT_{FreqT}, que apresenta assimetrias mais acentuadas.

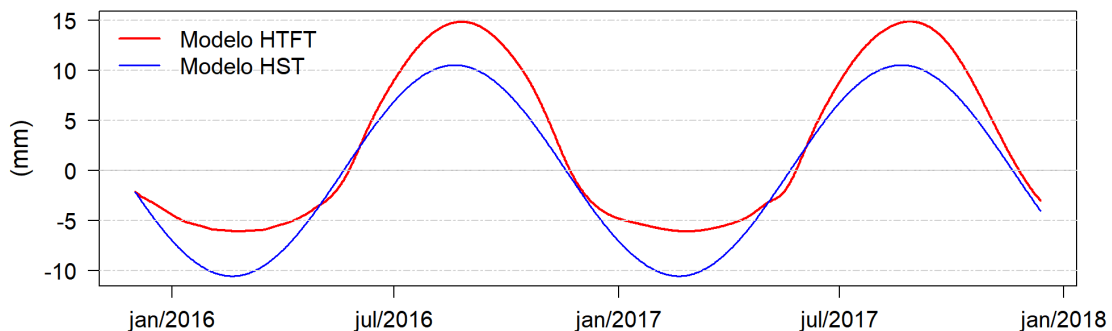


Figura 49 - Comparação do efeito térmico dos modelos HST e HT_{FreqT}.

O gráfico da Figura 50 apresenta a evolução temporal dos deslocamentos radiais medidos, em comparação com as estimativas dos dois modelos. De forma geral ambos os modelos conseguem captar de forma satisfatória a variação global dos deslocamentos ao longo do período analisado. No entanto o modelo HT_{FreqT}, evidencia um desempenho ligeiramente superior. Este comportamento é particularmente visível nos picos e vales das curvas, como por exemplo no verão de 2016 e no final de 2017, onde a linha azul, que representa o modelo HT_{FreqT}, se aproxima mais dos valores observados do que a linha vermelha.

A capacidade do modelo $HT_{Freq}T$ para se ajustar melhor às flutuações mais rápidas, sugere que a introdução das frequências naturais contribui positivamente para a explicação da variabilidade observada.

Verifica-se, no entanto, que no período compreendido entre dezembro de 2016 e abril de 2017, os modelos não foram capazes de reproduzir adequadamente os deslocamentos observados, apresentando desvios significativos. Apesar da análise exaustiva dos dados de entrada e das variáveis intervenientes, não foi possível identificar uma causa clara que justificasse esta discrepância. Este facto evidencia uma limitação inerente à modelação empírica, refletindo a complexidade do comportamento estrutural e a possibilidade da existência de fatores não modelados ou não observáveis com os dados disponíveis.

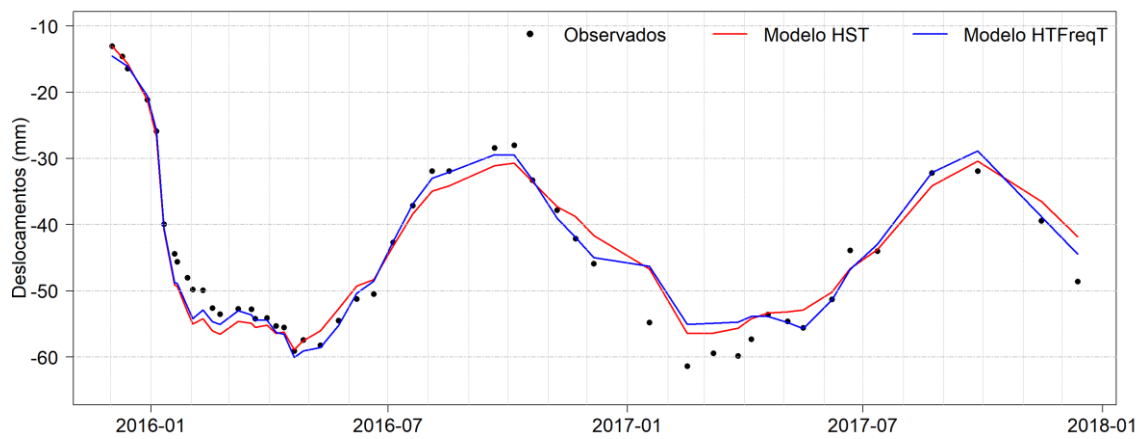


Figura 50 - Comparação dos deslocamentos observados com os valores estimados pelos modelos $HT_{Freq}T$ e HST.

A Figura 51 apresenta o gráfico que compara os deslocamentos observados na barragem com os valores previstos pelos modelos HST e $HT_{Freq}T$, utilizando uma linha tracejada a 45° que representa a relação ideal onde previsões e medições coincidiriam perfeitamente. O modelo HST mostra uma dispersão mais acentuada em relação à linha ideal.

Em contraste, o modelo $HT_{Freq}T$ apresenta uma concordância ligeiramente melhor com os dados observados, mantendo-se consistentemente mais próximo da linha de referência. Isto indica que a sua abordagem mais abrangente, que incorpora efeitos térmicos das frequências naturais, consegue prever com maior precisão o comportamento observado no FP3-233m.

Estes resultados sugerem que, embora o modelo HST seja satisfatório para análises expeditas, o modelo $HT_{Freq}T$ pode proporcionar vantagens em termos de precisão, o que é visível e quantificável através da maior proximidade dos pontos azuis em relação à linha de referência, em comparação com os pontos vermelhos.

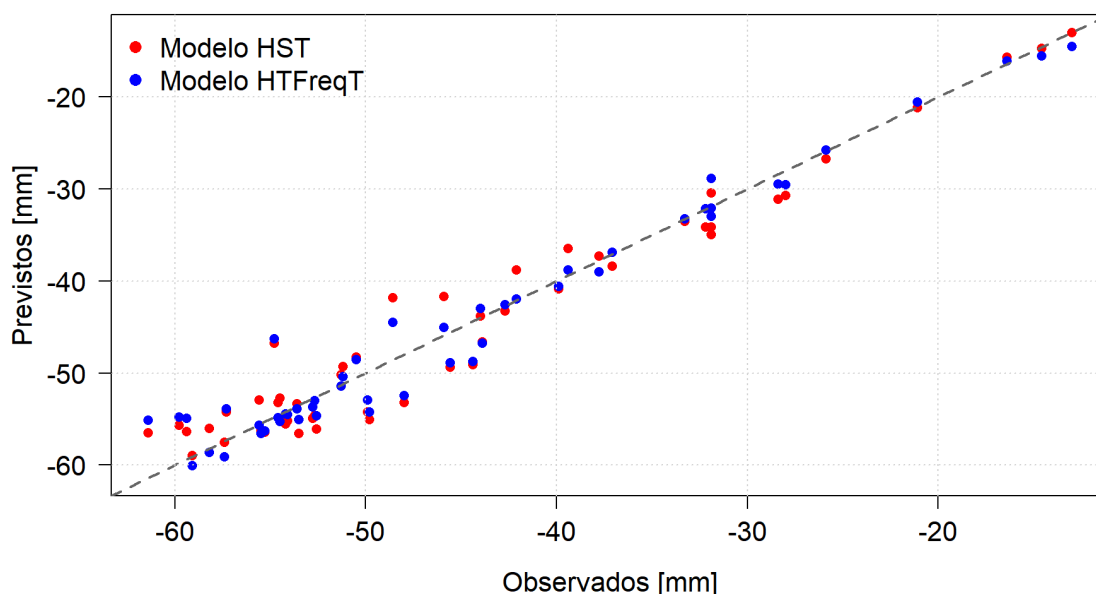


Figura 51 – Comparação entre valores dos deslocamentos observados e previstos.

Na Figura 52 podemos observar a evolução temporal dos resíduos para os modelos HST e HT_{FreqT} . Esta análise permite comparar o desempenho de ambos os modelos em diferentes momentos.

O modelo HT_{FreqT} mostra maior número de resíduos de menor magnitude quando comparado com o modelo HST. Esta diferença é muito acentuada nos meses finais de 2016 e iniciais de 2017, onde os resíduos atingem os valores máximos.

O modelo HT_{FreqT} demonstra superioridade consistente no seu desempenho ao longo do período analisado, reforçando a sua adequação para monitorização mais precisa.

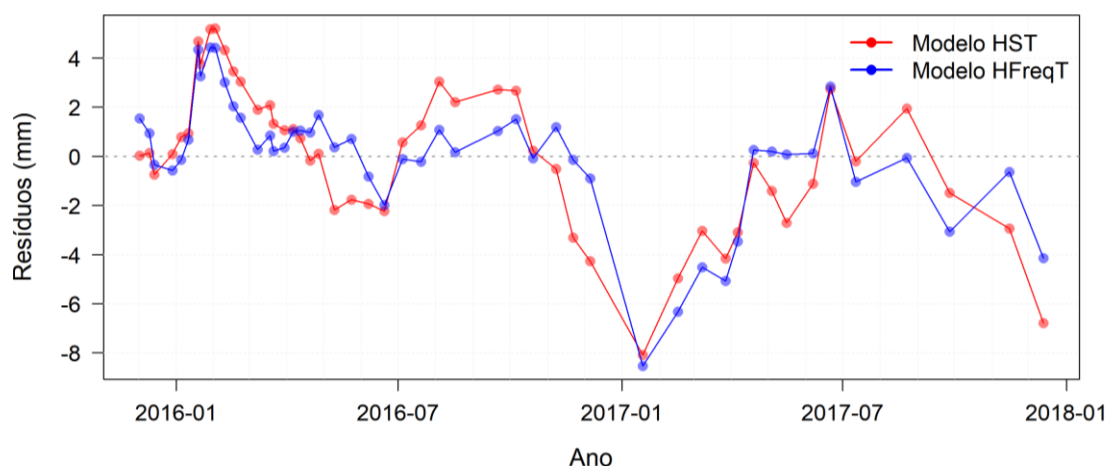


Figura 52 - Comparação dos resíduos dos modelos HT_{FreqT} e HST.

A Figura 53 apresenta a consolidação gráfica dos resultados, permitindo uma apreciação global do desempenho dos modelos considerados. Verifica-se uma boa concordância entre os valores observados e os valores previstos por ambos os modelos, com erros residuais geralmente reduzidos e sem padrões sistemáticos evidentes.

Apesar da semelhança global entre os modelos, o HT_{FreqT} demonstrou um desempenho ligeiramente superior, nomeadamente na capacidade de ajustar variações sazonais e captar com maior precisão os efeitos térmicos.

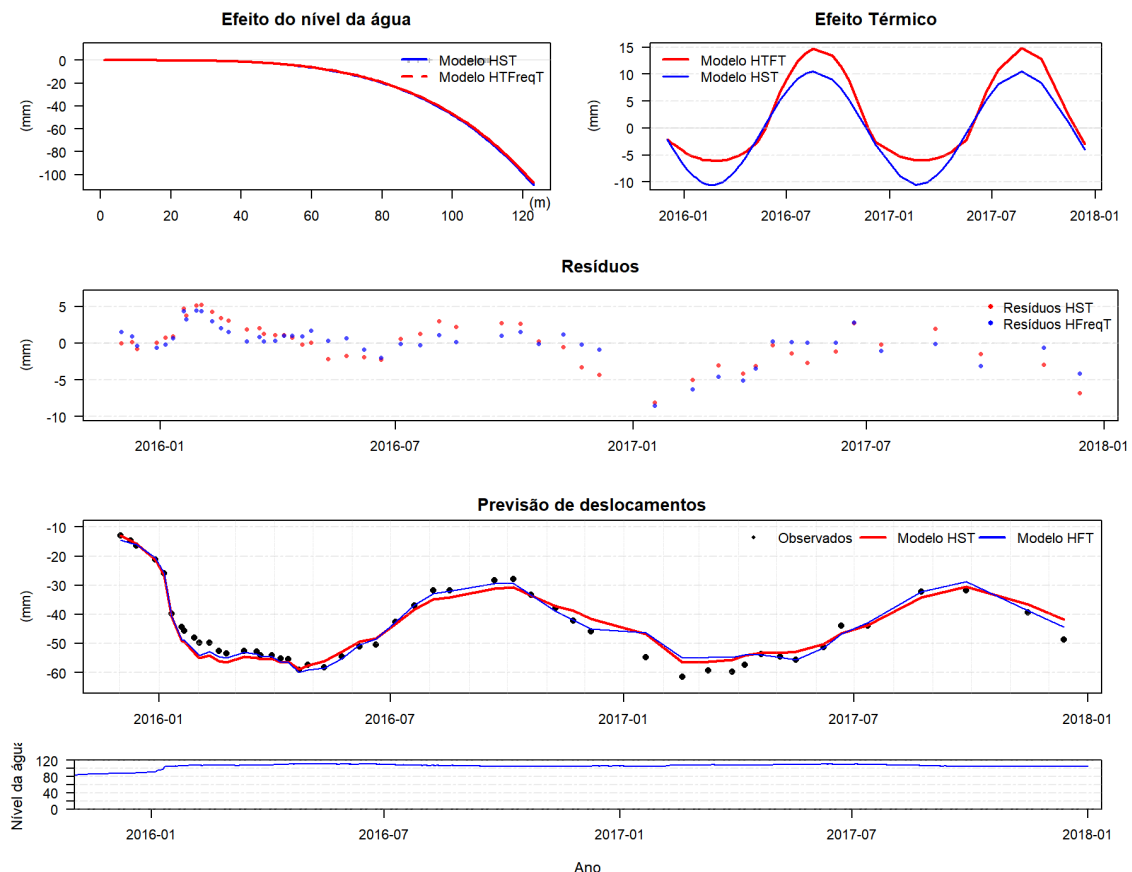


Figura 53 - Representação consolidada dos resultados dos modelos HT_{FreqT} e HST.

4.4.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO HT_{FreqT} COM RECURSO AO CRITÉRIO DE INFORMAÇÃO AIC

Dando continuidade à análise do modelo HT_{FreqT} , procede-se nesta secção à apresentação de uma versão otimizada do mesmo, resultante da aplicação da função *step*, previamente descrita no capítulo 3. Esta abordagem visa reduzir a complexidade computacional do modelo original, recorrendo à seleção automática de variáveis explicativas com base em critérios estatísticos, nomeadamente o Critério de Informação de Akaike (AIC).

A aplicação desta função permite identificar um subconjunto de frequências naturais que contribuem de forma mais significativa para a explicação da variável dependente, promovendo um equilíbrio entre qualidade de ajuste e a redução de complexidade do modelo. Ao remover variáveis redundantes ou de fraca relevância estatística, obtém-se um modelo mais leve, mantendo-se, no entanto, a sua robustez preditiva.

Este modelo otimizado poderá revelar-se particularmente vantajoso em contextos onde a disponibilidade de dados é limitada ou sujeita a ruído, permitindo uma representação eficiente do comportamento estrutural com base num conjunto reduzido de *inputs*.

Aquando da aplicação da função *step*, foi utilizado o argumento *direction* = “both”, para que o algoritmo use seleção bidirecional, ou seja, combine eliminação regressiva com seleção progressiva, sendo o método mais flexível, uma vez que a cada iteração, este algoritmo pode adicionar ou remover variáveis.

A Tabela 6 apresenta a comparação entre o modelo tradicional HST, o modelo HT_{Freq}T, e a sua versão otimizada pela função *step*. Todos estes modelos têm como variável dependente o deslocamento radial, mas diferem nas variáveis explicativas utilizadas.

Como já mencionado anteriormente, observamos um melhor desempenho do modelo HT_{Freq}T comparativamente ao modelo HST. Por sua vez a versão otimizada, apesar de utilizar um subconjunto reduzido de variáveis explicativas (H4 e apenas a FREQ2) mantém um desempenho estatístico muito próximo do modelo HT_{Freq}T completo. Com um R² de 0.9598, e o menor erro padrão residual entre os três modelos, esta versão revela-se particularmente eficiente e de baixa complexidade, particularmente adequada para contextos onde a quantidade de dados disponíveis é limitada.

Tabela 6 - Resumo comparativo dos modelos HST e HT_{Freq}T, com o modelo HT_{Freq}T otimizado.

Indicador	Modelo HST	Modelo HT _{Freq} T	Modelo HT _{Freq} T otimizado
Variável dependente	Deslocamento radial		
Variável independente	H ⁴ , SEND, COSD	H ⁴ , FREQ1, FREQ2, FREQ3, FREQ4, FREQ5	H ⁴ , FREQ2
R ²	0.9462	0.9603	0.9598
R ² ajustado	0.9427	0.9547	0.9581
Desvio padrão dos resíduos (mm)	3.044	2.704	2.601

A análise das Figura 54 e Figura 55, que representam, respetivamente, os deslocamentos estimados pelos três modelos e os resíduos que lhes estão associados, permitindo uma avaliação visual clara do desempenho de cada abordagem. Observa-se que o modelo otimizado, mesmo considerando apenas uma das cinco frequências disponíveis, apresenta um desempenho superior ao modelo tradicional HST, evidenciando uma melhor aproximação aos dados observados e menores amplitudes residuais. Além disso, constata-se que o modelo construído com base na seleção automática de variáveis apresenta um comportamento praticamente sobreponível ao modelo que incorpora todas as frequências, sugerindo que a abordagem consegue reter a informação mais relevante sem a perda significativa de qualidade de ajustamento.

A seleção automática de variáveis demonstrou assim ser uma estratégia eficaz para melhorar a generalização do modelo, reduzindo o risco de sobreajuste associado a modelos excessivamente complexos.

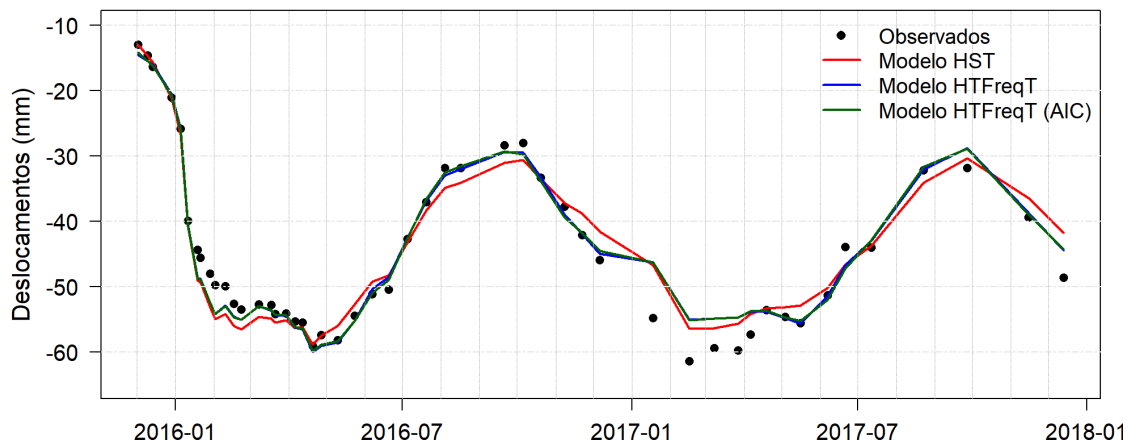


Figura 54 - Comparação dos deslocamentos observados com os valores estimados pelos modelos HTFreqT, HTFreqT (AIC) e HST.

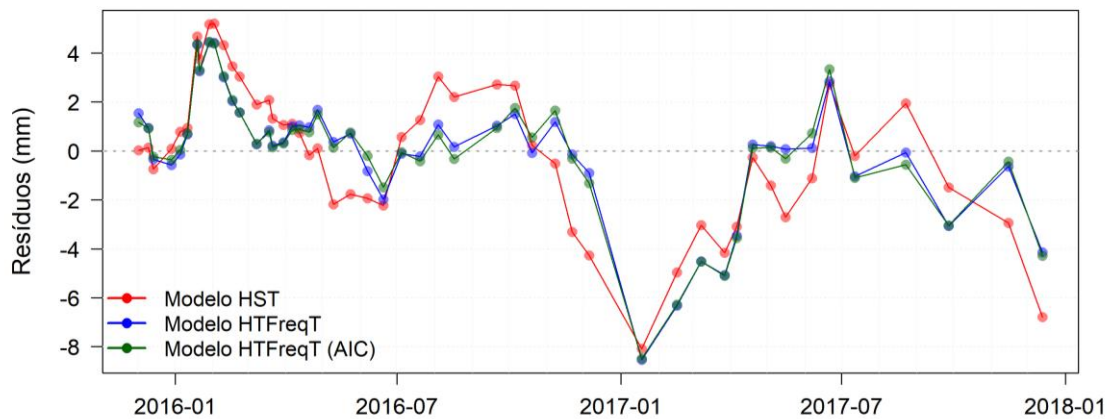


Figura 55 - Comparação dos resíduos dos modelos HTFreqT, HTFreqT (AIC) e HST.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A comparação entre os resultados dos modelos desenvolvidos permitiu evidenciar o bom desempenho do modelo HT_{Freq}T. Os resultados obtidos mostram que o modelo HT_{Freq}T apresenta um desempenho superior ao do modelo HST, permitindo uma interpretação fiável dos deslocamentos com base nas variáveis extraídas da resposta dinâmica da estrutura.

Complementarmente, a aplicação do processo de seleção automática de variáveis ao modelo HT_{Freq}T permitiu desenvolver uma versão otimizada, mais simples, com recurso a menos variáveis explicativas. Esta versão, apesar da sua estrutura reduzida, manteve um desempenho praticamente equivalente ao do modelo original, evidenciando a viabilidade de abordagens mais simples, sem comprometer a qualidade das previsões. Trata-se assim de uma abordagem promissora para contextos em que a simplicidade do modelo ou a limitação de dados são fatores determinantes.

5

CONCLUSÕES

5.1 TRABALHO REALIZADO

O trabalho realizado ao longo desta dissertação insere-se numa linha de continuidade e aprofundamento das metodologias aplicadas à análise do comportamento estrutural de barragens de betão. A proposta central passou por dar um passo complementar nas abordagens convencionais, através da criação do modelo $HT_{Freq}T$, que incorpora as frequências naturais da estrutura, estimadas através da sua monitorização dinâmica, para a representação do efeito da temperatura, e de todas as ações não hidrostáticas, na resposta estrutural. Esta adição teve como objetivo melhorar a capacidade dos modelos em representar a influência do efeito térmico nos deslocamentos observados.

No capítulo 2, procurou-se contextualizar historicamente a evolução das barragens de betão, desde as necessidades fundamentais das civilizações antigas até aos desafios atuais associados à sua segurança. Foi feita uma caracterização detalhada do enquadramento geral da segurança de barragens, abordando as diferentes tipologias existentes, com ênfase nas barragens de betão, uma vez que são o tipo de barragens em estudo nesta dissertação. Foi também apresentada uma perspetiva sobre o estado atual das barragens em Portugal, contextualizando a importância das atividades de monitorização e controlo de segurança estrutural. Em seguida foram analisadas as principais ações que atuam sobre estas estruturas, e de que forma estas originam respostas estruturais que podem ser monitorizadas. A observação destas respostas foi também detalhada, evidenciando a necessidade de um sistema de observação robusto.

O capítulo 3 introduziu o recurso a modelos de *Machine Learning* na interpretação do comportamento estrutural observado. Após uma introdução geral à área, foi aprofundada a metodologia fundamental no contexto da dissertação, que é a Regressão Linear Múltipla. Foi também apresentado o enquadramento teórico do modelo HST, amplamente utilizado na engenharia de barragens, servindo de base comparativa para o novo modelo. Neste capítulo estabeleceu-se ainda a metodologia do trabalho, definindo as suas principais etapas, tal como a construção e validação dos modelos.

O capítulo 4 foi inteiramente dedicado ao caso de estudo, a barragem do Baixo Sabor, uma estrutura com 123 m de altura, equipada com um sistema de monitorização moderno e fiável. Inicialmente, foi feita uma caracterização da obra e do aproveitamento hidroelétrico em que se enquadra, seguida da descrição das grandezas analisadas e instrumentos de observação utilizados. Numa primeira fase, os dados de deslocamentos foram analisados com recurso a modelos tradicionais HST. Na segunda fase, foi desenvolvido o modelo $HT_{Freq}T$, cuja principal inovação consiste na utilização das frequências naturais da estrutura como variáveis explicativas. A comparação entre os dois modelos foi realizada com base em indicadores de desempenho, nomeadamente, o desvio padrão dos resíduos e o coeficiente de determinação. Por fim, foi dedicada uma secção à seleção de variáveis com base no critério de informação AIC, permitindo

otimizar a construção do modelo $HT_{Freq}T$, com recurso a um menor número de variáveis independentes. Esta análise mostrou que, mesmo com um número mais reduzido de variáveis, o modelo $HT_{Freq}T$ mantinha um ótimo desempenho, o que reforça a sua relevância e aplicabilidade.

Em síntese, o trabalho desenvolvido permitiu validar uma nova abordagem para os modelos de interpretação quantitativa no âmbito das atividades de controlo de segurança de barragens de betão, propondo um modelo mais sensível à variabilidade térmica, quando comparado com os modelos tradicionais HST. A aplicação do modelo $HT_{Freq}T$ à barragem do Baixo Sabor, demonstrou o seu potencial enquanto ferramenta de apoio à decisão, alinhando-se com as linhas de investigação mais recentes da FEUP e do LNEC.

5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A aplicação do modelo $HT_{Freq}T$ ao caso de estudo da barragem do Baixo Sabor permitiu explorar, de forma aprofundada, o contributo das frequências naturais da estrutura como variáveis explicativas na interpretação do comportamento estrutural observado. Ao longo da dissertação procurou-se não apenas comparar os resultados obtidos com o modelo HST, mas também compreender em que medida a introdução de variáveis, como as frequências naturais, podem representar uma mais-valia na modelação dos deslocamentos observados em fios de prumo.

De um modo geral, ambos os modelos revelaram um desempenho satisfatório na previsão de deslocamentos observados, conseguindo identificar e caracterizar o padrão que cada uma das principais solicitações tem no comportamento observado.

No entanto, o modelo $HT_{Freq}T$ destacou-se por apresentar uma melhor capacidade de representar o efeito da temperatura, especialmente nos períodos em que a evolução do efeito térmico não segue a forma de uma função sinusoidal. A sua maior sensibilidade à variabilidade térmica ficou patente na forma como conseguiu aproximar as variações observadas, proporcionando indicadores de desempenho melhores do que no modelo HST.

Adicionalmente ao inicialmente proposto, a seleção das variáveis independentes no modelo $HT_{Freq}T$ com base na seleção automática segundo o critério de *Akaike* (AIC), demonstrou que é possível reduzir a complexidade do modelo, através da redução do número de variáveis independentes, sem comprometer de forma relevante o seu desempenho. Esta versão simplificada, construída com um número reduzido de variáveis manteve um grau de precisão muito próximo do modelo completo (que considera os valores das frequências naturais dos cinco primeiros modos de vibração), demonstrando-se como uma alternativa eficaz.

No geral, os resultados obtidos validam a proposta metodológica desta dissertação. A incorporação das frequências nos modelos de previsão, revelou-se uma abordagem promissora, que acrescenta valor em termos de precisão sem comprometer a estabilidade do modelo. Para além disso, a possibilidade de poder ser implementado para a análise das medições medidas com o sistema RD (maior frequência de medição) reforça a importância da metodologia proposta.

5.3 PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No seguimento desta dissertação, o modelo $HT_{Freq}T$ abre caminho a diversas possibilidades de evolução. Assim apresentam-se seguidamente algumas propostas de desenvolvimento futuro que poderão contribuir para o amadurecimento e consolidação desta linha de investigação.

Um dos sentidos de evolução poderá estar relacionado com a análise de um período mais longo, abrangendo condições não observadas no passado, como cheias, secas ou variações térmicas atípicas. A análise dos eventos menos frequentes ou fora do padrão sazonal habitual permitirá uma caracterização mais completa do comportamento estrutural.

Adicionalmente, poderá ser estudada a introdução de variáveis operacionais complementares, como movimentos de abertura e fecho de juntas, que poderão ter influência direta na rigidez global da estrutura, e em consequência, nas suas frequências naturais. A possível integração destas novas variáveis, permitiria uma modelação mais completa, integrando um conjunto de grandezas caracterizadoras do comportamento estrutural da barragem.

No futuro, será importante proceder à comparação dos resultados obtidos com o modelo $HT_{Freq}T$ face aos gerados por modelos do tipo HTT , permitindo aferir o desempenho relativo de cada abordagem e avaliar a possibilidade de serem utilizados de forma complementar ou redundante em contextos de monitorização de segurança. Esta análise comparativa poderá contribuir para reforçar a robustez dos sistemas de apoio à decisão, especialmente em situações críticas. Para além disso, a metodologia proposta poderá ser explorada com recurso a outros algoritmos de aprendizagem automática, como redes neuronais artificiais ou modelos baseados em *random forest*, possibilitando uma avaliação abrangente da adequabilidade e desempenho de diferentes paradigmas de *machine learning* na modelação do comportamento dinâmico de estruturas hidráulicas.

Por fim, poderá ser importante considerar a integração do modelo $HT_{Freq}T$ em plataformas digitais de apoio à decisão, como sistemas de gestão de risco de barragens, que permitam visualizar em tempo real a evolução dos deslocamentos e as previsões baseadas nas condições atuais. Esta integração pode potenciar a utilização prática do modelo por entidades gestoras, contribuindo para uma abordagem mais preventiva e baseada em dados no controlo de segurança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Portuguesa do Ambiente - Barragens de Portugal. Agência Portuguesa do Ambiente, 2025. Consult. em 05/06/2025. Disponível em WWW: <<https://apambiente.pt/prevencao-e-gestao-de-riscos/barragens-de-portugal>>.
- Amusing Planet - Sadd el-Kafara: The Oldest Dam in the World. Consult. em 17 junho 2025. Disponível em WWW: <<https://www.amusingplanet.com/2023/11/sadd-el-kafara-oldest-dam-in-world.html>>.
- Andersen, Palle; Brincker, Rune; Ventura, Carlos; Cantieni, Reto - Modal estimation of civil structures subject to ambient and harmonic excitation. Society for Experimental Mechanics, 2008.
- Antunes, Manuel de Azevedo; Duarte, Lucinda Coutinho; Reino, João Pedro - Barragens de Portugal: de Vilarinho da Furna à Aldeia da Luz, com passagem pelo Douro Internacional. (2006).
- Barros, P.; Suarez, J. - Execução de trabalhos geotécnicos na construção do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor. FEUP, Porto: 2016.
- Bartholomew, Charles L; Haverland, Michael L - Concrete dam instrumentation manual. (1987).
- Braga, L - Extensões e tensões observadas em barragens de betão. Instituto Superior Técnico, (Tese de Mestrado), 2000.
- Burnham, Kenneth P - Model selection and multimodel inference. A practical information-theoretic approach. (1998).
- Cardoso, João Francisco Henriques de Sena - Modelação do comportamento observado em barragens de betão com base em técnicas de aprendizagem automática. Instituto Superior Técnico, (Tese de Mestrado) 2021.
- Casaca, João; Henriques, Maria João - The geodetic surveying methods in the monitoring of large dams in Portugal. 2002.
- Castro, AT - Métodos de retroanálise na interpretação do comportamento de barragens de betão. Instituto Superior Técnico. (Tese de doutoramento), 1998.
- Cavanaugh, Joseph E; Neath, Andrew A - The Akaike information criterion: Background, derivation, properties, application, interpretation, and refinements. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. Vol. 11. n.º 3 (2019). p. 1460.

- Chen, Sheng-Hong - Actions on hydraulic structures and their effect combinations. *Hydraulic Structures*. (2015). p. 139-194.
- Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens - Barragem do Feiticeiro. Consult. em 05 Junho 2025. Disponível em WWW: <<https://cnpqgb.apambiente.pt/content/feiticeiro>>.
- da Costa Mendes, José Miguel - Identificação de Novidades no Comportamento Observado em Barragens de Betão com Recurso a Modelos de Machine Learning. FEUP (Tese de Mestrado), 2023.
- da Mata, Juan Tomé Caires - Aplicação de redes neuronais ao controlo de segurança de barragens de betão. Instituto Superior Técnico. (Tese de Mestrado), 2007.
- de Oliveira, Sérgio Bruno Martins - Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo, formulações de dano. Universidade do Porto (Tese de Doutoramento), 2000. ISBN/ISSN: 9798383335239
- Duffaut, Pierre - The traps behind the failure of Malpasset arch dam, France, in 1959. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Vol. 5. n.º 5 (2013). p. 335-341.
- FCM - Barragem do Baixo Sabor. Consult. em 12 junho 2025. Disponível em WWW: <https://www.fcm.pt/projeto/49/barragem_baixo_sabormontante>.
- Gomes, Jorge P; Lemos, José V - Characterization of the dynamic behavior of a concrete arch dam by means of forced vibration tests and numerical models. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. Vol. 49. n.º 7 (2020). p. 679-694.
- Gomes, Jorge Pereira; Lemos, JV - Ensaio de vibração forçada para a caracterização do comportamento dinâmico de barragens de betão (10º Congresso Nacional de Mecânica Experimental). (2016).
- Goodfellow, Ian; Bengio, Yoshua; Courville, Aaron; Bengio, Yoshua - Deep learning. MIT press Cambridge, 2016. ISBN: 9780262035613
- Governo, Portugal. - Governo lança estratégia a 15 anos para garantir resiliência hídrica. (2025). Disponível em WWW: <<https://www.portugal.gov.pt/pt/gc24/comunicacao/noticia?i=governo-lanca-estrategia-a-15-anos-para-garantir-resiliencia-hidrica>>.
- International Hydropower Association - "Hydropower Status Report 2024". 2024. Consult. em 11 Julho 2025. Disponível em WWW: <<https://www.hydropower.org/status-report>>.
- Jackson, Donald C - Dams. Routledge, 2017. ISBN: 1315258595

Kabacoff, RI - R in action-Data analysis and graphics with R. 2nd. *Shelter Island, NY: Manning Publications*. (2011). p. 474.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Barragem do Baixo Sabor: caracterização do sistema de observação. 2017. Nota Técnica 72/2017 – DBB/NO

Léger, P - Compendium on structural behaviour, modelling, safety, and rehabilitation of concrete dams. *École Polytechnique, Montreal, Quebec, Canada*. (2016).

Leitão, Noemi Schclar; Castilho, Eloísa; Azevedo, Nuno Monteiro; Farinha, Maria Luísa Braga - Considerações sobre a utilização de modelos numéricos no controlo de segurança de barragens de betão. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. (2020).

Mendes, Emanuel Jesus Guerreiro - Observação e controlo da segurança estrutural de barragens de betão: utilização integrada de modelos numéricos e de modelos de separação de efeitos. ISEL (Tese de Mestrado), 2014.

Mendes, Paulo Jorge Henriques - Observação e análise do comportamento dinâmico de barragens de betão. Universidade do Porto (Tese de Doutoramento), 2010.

Ministério do Ambiente (Portugal) - Decreto-Lei n.º 344/2007, de 15 de outubro. 2007. Consult. em 15 de junho de 2025.

Moura, Graça Maria Gomes - Determinação de tensões a partir de extensões observadas em barragens de betão. FEUP (Tese de Mestrado), 2005. ISBN/ISSN: 9798382542935

Pereira, Sérgio; Magalhães, Filipe; Gomes, Jorge P; Cunha, Álvaro; Lemos, José V - Vibration-based damage detection of a concrete arch dam. *Engineering Structures*. Vol. 235. (2021). p. 112032.

Portela, E - Novas metodologias de apoio ao controlo de segurança de barragens de betão. Tese de Doutoramento, IST, 481p, 1999.

Portugal. Governo - Decreto-Lei n.º 344/2007, de 15 de outubro. Aprova o Regulamento de Segurança de Barragens. 2007. Consult. em 11 jul. 2025. Disponível em WWW: <<https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/344-2007-641445>>.

Rijo, Manuel - Estruturas Hidráulicas. Barragens. Universidade de Évora, 2007.

FEMA Dam Safety - An Owner's Guidance Manual. *United States Federal Emergency Management Agency, Denver*. (1987).

Secil - Prémio Secil de Engenharia Civil 2014, atribuído ao Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor. 2014. Consult. em 15 junho 2025. Disponível em WWW: <<https://www.ordemengenheiros.pt/pt/atualidade/noticias/premio-secil-engenharia-civil-2014/>>.

- Sejas, Andres Mauricio Guzman - Dynamic Behaviour of a Concrete Dam: Development of Statistical and Machine Learning Models for Interpretation of Monitoring Data. FEUP (Tese de Mestrado), 2024.
- Silva, José António - Desenvolvimento de Modelos (de Machine Learning) Baseados em Dados de Monitorização Contínua de Barragens de Betão para Interpretação do Comportamento Estrutural Observado. FEUP (Tese de Mestrado), 2022.
- U.S. Army Corps of Engineers - EM 1110-2-2201: Arch Dam Design. 1994. Consult. em 05/06/2025. Disponível em WWW: <https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/em_1110-2-2201.pdf>.
- Varlet, Henri - Barrages-réservoirs. Eyrolles, 1966.
- Ventura, CE; Horyna, T - Vibration tests of large dams-Literature review. *Earthquake Engineering Research Facility, Department of Civil Engineering. University of British Columbia, Vancouver, Canada*. (1996).
- von Hardenberg, Wilko - Expecting disaster: the 1963 landslide of the Vajont Dam. *Arcadia*. (2011).
- World Commission on Dams - Dams and development: A new framework for decision-making: The report of the world commission on dams. Earthscan, 2000. ISBN: 1853837989

