

## O GNSS na Monitorização de Deslocamentos de Grandes Barragens de Betão Portuguesas

José Nuno LIMA<sup>1\*</sup> e João CASACA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa

(jnplima@lnec.pt; jmmcasaca@gmail.com)

**Palavras-chave:** Elipses de Credibilidade, Filtros, GNSS e Monitorização de Barragens

**Resumo:** A observação permanente de bases GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de precisão foi introduzida recentemente em Portugal, na monitorização de deslocamentos horizontais de grandes barragens de betão. Os resultados dos sistemas instalados em quatro grandes barragens, apresentados nesta comunicação, mostram a grande eficácia da aplicação do GNSS à monitorização de deslocamentos em grandes barragens de betão.

A comunicação descreve duas estratégias para reduzir o ruído das observações e melhorar a qualidade dos resultados. A primeira estratégia, baseada num procedimento Bayesiano, permite identificar e eliminar erros grosseiros que afetam cerca de 5% das medições horárias. A segunda estratégia, baseada em filtros numéricos, permite suavizar as observações e atingir incertezas de medição milimétricas.

Finalmente, são apresentados os benefícios da utilização destes métodos e o seu impacto no potencial do GNSS na monitorização de deslocamentos de grandes barragens de betão em tempo quase-real.

## 1. Introdução

O ano de 2016 foi um marco na monitorização geodésica de barragens em Portugal. De facto, foi implementado em quatro grandes barragens de betão portuguesas um programa de monitorização contínua com GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Esta comunicação apresenta o sistema de monitorização GNSS de cada uma destas quatro barragens, os respetivos fluxos de observação e de processamento e os resultados conseguidos.

Depois de demorados testes com longas séries temporais GNSS numa base curta materializada no Campus do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) conseguiu-se mostrar experimentalmente que aumentando a duração da sessão de observação diminui-se o nível de incerteza na medição de deslocamentos com o GNSS. Por exemplo, o nível de incerteza obtido em sessões de 1 hora e de 24 horas de duração é de 2 mm e 0,4 mm respetivamente.

A aplicação do GNSS na monitorização das deformações das barragens de betão pressupõe a observação contínua e o consequente processamento automático. Como os deslocamentos das barragens de betão são, em geral, da ordem de vários milímetros com taxas de vários milímetros por ano é necessário recorrer a um posicionamento relativo de elevada precisão para medir tais deslocamentos. Para isso, as antenas GNSS deverão ser instaladas em locais com céu aberto donde se recomenda que as antenas dos pontos objeto sejam instaladas no coroamento das barragens. Igualmente se recomenda que as antenas dos pontos de referência sejam instaladas em locais próximos da barragem, em zonas estáveis dos maciços rochosos e fora da zona de influência da barragem.

A duração mínima da sessão de observação deverá ser de 1 hora com a aplicação de filtros do tipo *passa baixo*, para redução do ruído, como as médias móveis, conforme se apresentará na secção 3 desta comunicação.

## 2. Sistemas de monitorização de barragens com o GNSS

Nesta secção apresentam-se resumidamente os sistemas de monitorização GNSS instalados em quatro grandes barragens portuguesas.

### 2.1 Barragem do Baixo Sabor

A barragem do Baixo Sabor está localizada no nordeste de Portugal, na parte jusante do rio Sabor, afluente da margem direita do Rio Douro. Esta barragem de dupla curvatura, com uma altura máxima acima da fundação de 123 m, tem um desenvolvimento em planta de 505 m de comprimento. Nesta barragem foram instaladas quatro estações GNSS: três das quais foram instaladas no coroamento da barragem, nos blocos 10-11, 16-17 e 23-24 (Figura 1) e a quarta instalada na margem direita, para funcionar como estação de referência.



**Figura 1** – Localização das estações GNSS na barragem do Baixo Sabor: FP2M, FP3M e FP4M no coroamento da barragem

A estação GNSS de referência (REFM) da barragem foi instalada na margem direita, no topo dum pilar com 4 m de altura de betão armado. O recetor GNSS desta estação foi instalado no interior de um armário técnico na base deste pilar.

### 2.2 Barragem do Cabril

A barragem do Cabril está localizada na região centro de Portugal, no rio Zêzere, que pertence à bacia do Rio Tejo. Esta barragem de dupla curvatura com 132 m de altura tem um desenvolvimento em planta de 290 m de comprimento. Nesta barragem foram instaladas duas estações GNSS: a primeira foi instalada no coroamento da barragem, no bloco K-L, e a segunda instalada na margem esquerda, para funcionar como estação de referência (Figura 2).

A antena da estação GNSS de referência está instalada na margem esquerda, no topo dum poste elétrico duma antiga linha de média tensão, truncado para ficar com cerca de 6 m de altura. O recetor GNSS desta estação está instalado num armário técnico, no interior do abrigo de um pilar geodésico, próximo do poste da antiga linha de média tensão.



**Figura 2** – Localização das estações GNSS na barragem do Cabril: Estação de referência, na margem esquerda, e estação objeto no coroamento da barragem

### 2.3 Barragem do Feiticeiro

A barragem do Feiticeiro está localizada na região do nordeste de Portugal, próxima da foz do rio Sabor, afluente da margem direita do rio Douro. Esta barragem é uma estrutura de gravidade de betão, com uma altura máxima acima da fundação de 45 m e um coroamento com desenvolvimento retilíneo em planta com 315 m de comprimento.

Para o sistema de monitorização com GNSS da barragem foram instaladas quatro estações GNSS: três localizadas no coroamento da barragem, nos blocos 06-07, 11-12 e 16-17, e a quarta localizada na margem direita, para servir como estação de referência (Figura 3).

A antena da estação GNSS de referência foi instalada na margem direita, no topo dum pilar com 3 m de altura com sólidas fundações e proteção térmica. O recetor GNSS da estação de referência foi acondicionado no interior dum armário técnico, na base do pilar.



**Figura 3** – Localização das estações GNSS na barragem do Feiticeiro: FP1J, FP2J e FP3J, no coroamento da barragem, e REFJ, como estação de referência, na margem direita

### 2.4 Barragem de Foz Tua

A barragem de Foz Tua está localizada na região norte de Portugal, no rio Tua, importante afluente da margem direita do rio Douro. Esta barragem é de dupla curvatura, com uma altura máxima acima da fundação de 108 m e um coroamento com desenvolvimento em planta com 275 m de comprimento.

O sistema de monitorização GNSS da barragem consiste de duas estações GNSS permanentes: a primeira localizada no coroamento da barragem, no bloco E2E1, e a segunda localizada na margem direita a servir como estação de referência (Figura 4).

A antena da estação GNSS de referência foi instalada na margem direita, no topo de um pilar com 2 m de altura com boas fundações e isolamento térmico. O recetor GNSS desta estação foi acondicionado no interior de um armário técnico junto ao pilar.



**Figura 4** – Localização das estações GNSS na barragem de Foz Tua: a estação objeto, no coroamento da barragem, e a estação de referência, na margem direita

### 3. As médias móveis como filtro linear

Considere-se a combinação linear dos termos de uma série temporal  $x_0, x_1, \dots, x_n$ :

$$y_k = \sum_{j=-q}^r w_j x_{k+j} \quad (k = q + 1, \dots, n - r) \quad (1)$$

onde os coeficientes  $w_j$  são os pesos e são em número  $m (= q+r+1)$ . Diz-se que esta combinação linear é de *ordem m*. Se  $q = r$  e  $w_j = w_{-j}$  o filtro é *simétrico*. Se a soma dos pesos é igual a 1, o filtro é designado por *média móvel pesada*. Se os pesos são todos iguais e a soma deles for igual a 1, o filtro é designado por *média móvel simples* (Haykin, 2002).

A aplicação de um filtro a uma série temporal  $x_0, x_1, \dots, x_n$ , designada por série temporal de entrada, vai originar uma nova série temporal  $y_0, y_1, \dots, y_n$ , designada por série temporal de saída. As características espectrais da série temporal de saída relacionam-se com as características espectrais da série temporal de entrada através da *função de transferência* do filtro. A função transferência é uma função complexa com argumentos do domínio da frequência. O módulo da função transferência é designado por *ganho* do filtro (Priestley, 1981).

Se o ganho do filtro, para uma determinada frequência angular  $\omega$ , for maior do que 1 o filtro amplia a série temporal de entrada na frequência  $\omega$ . Por outro lado, se o ganho do filtro, para a frequência angular  $\omega$ , é menor do que 1 o filtro reduz a série temporal de entrada nessa frequência.

Além disso, a variação na amplitude do filtro pode também introduzir um desfaseamento (atraso) na série temporal de saída em função da frequência. Se bem que os filtros simétricos não introduzam desfaseamentos significativos, os filtros assimétricos, pelo contrário, podem introduzir desfaseamentos consideráveis.

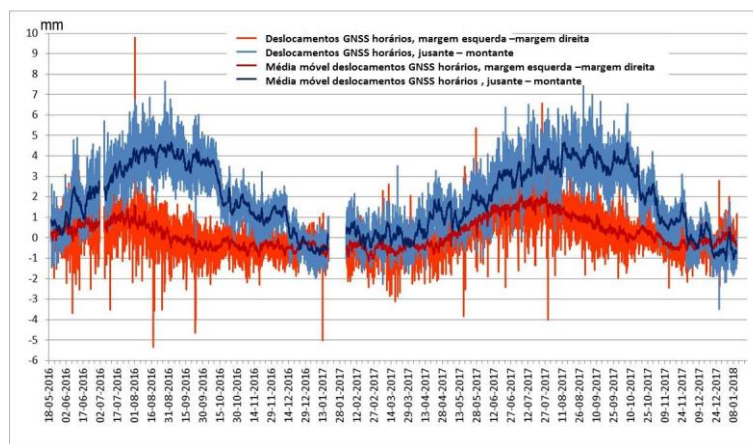
### 4. Análise dos deslocamentos horizontais observados com o GNSS

A incerteza estimada para as soluções horárias das componentes horizontais é cerca de 5 vezes maior do que a incerteza estimada para as soluções diárias das componentes horizontais. Contudo, a série temporal das soluções horárias têm uma maior resolução temporal do que a das soluções diárias. A aplicação das médias móveis simétricas à série temporal das soluções horárias permite reduzir significativamente a incerteza sem prejuízo da resolução temporal. As médias móveis funcionam como filtros do tipo passa baixo e são muito fáceis de serem implementadas nas séries temporais.

A Figura 5 mostra os resultados da aplicação das médias móveis simétricas de ordem 25 às séries temporais dos deslocamentos horários observados, nas componentes horizontais, na estação FP2J da barragem do Feiticeiro. A linha laranja representa os deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias), no sentido margem direita para a margem esquerda. A linha azul clara representa os deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias), no sentido jusante – montante. A linha vermelha representa as médias móveis de ordem 25 dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias), no sentido margem direita – margem esquerda. A linha azul escura representa as médias móveis de ordem 25 dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias), no sentido jusante – montante. Como se pode ver na Figura 5, a suavização das soluções horárias obtidas pela aplicação das médias móveis permite diminuir a incerteza sem perda da resolução temporal.

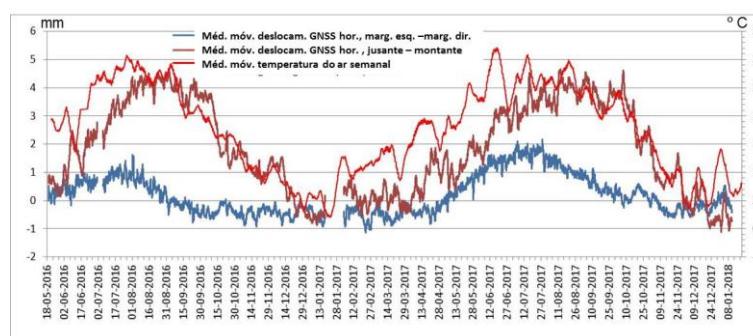
A maior porção dos deslocamentos observados (Figura 6) é devida à variação térmica anual (até 7 mm) na direção jusante – montante. A Figura 6 mostra também a correlação entre os deslocamentos observados no sentido jusante – montante e a temperatura média semanal do ar. A escala das ordenadas mostra haver uma correspondência de 1 mm por cada 5° C. O desfasamento temporal entre os deslocamentos observados no sentido jusante – montante e a temperatura média semanal do ar, da ordem dos 15 dias, pode ser explicada pela inércia térmica da barragem.

Para a comparação entre os deslocamentos observados pelo GNSS em FP2J e os deslocamentos observados pela base do coordenómetro do fio de prumo em FP2 deve-se ter em conta a distância entre os dois instrumentos (cerca de 10 m). Contudo, é possível comparar as tendências dos deslocamentos medidos na direção jusante – montante pelas duas técnicas referidas (Figura 7). As tendências mostram que ambas se deslocam para montante, simultaneamente, nos períodos mais quentes e, apesar das diferenças de cota entre os dois instrumentos serem cerca de 7 m, os deslocamentos medidos pelas duas técnicas apresentam amplitudes muito semelhantes. Ambos recuperam para jusante, simultaneamente, nos períodos mais frios.



**Figura 5** – Resultados da aplicação das médias móveis de ordem 25 às séries temporais dos deslocamentos observados pelo GNSS, nas componentes horizontais, na estação FP2J da barragem do Feiticeiro

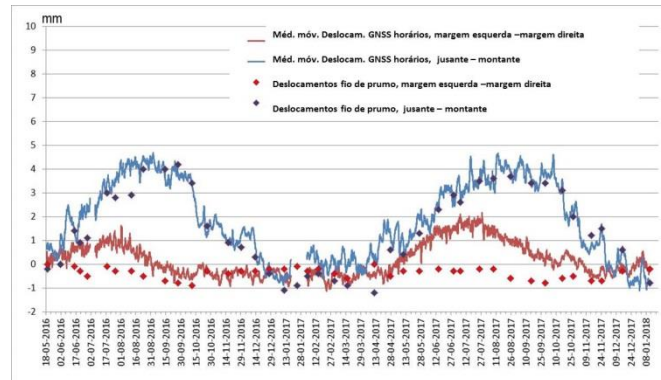
Na barragem do Baixo Sabor a comparação dos deslocamentos observados pelo GNSS em FP3M com os deslocamentos observados na base do coordenómetro do fio de prumo FP3 mostra que há uma boa concordância (Figura 8). A maior parcela do deslocamento observado, na direção radial, é devida à variação térmica anual conforme se pode ver na Figura 9.



**Figura 6** – A correlação entre a temperatura e os deslocamentos observados pelo GNSS, nas componentes horizontais, na estação FP2J da barragem do Feiticeiro. A linha azul representa as médias móveis dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) no sentido margem direita – margem esquerda; a linha castanha representa as médias móveis dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) no sentido jusante – montante; a linha vermelha representa a média móvel semanal da temperatura do ar

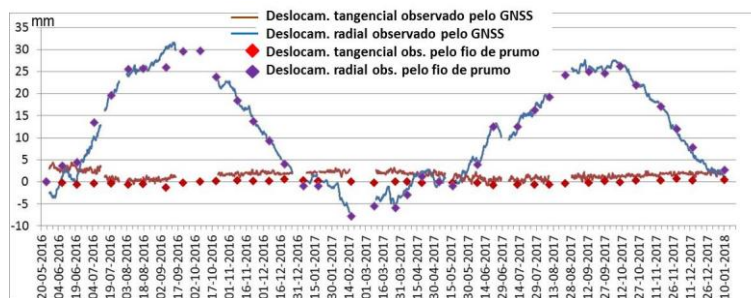
Na barragem do Cabril não há fios de prumo instalados na consola central, apenas foram instalados em blocos mais próximos dos encontros. A validação dos deslocamentos observados pelo GNSS na consola central foi conseguida através de um modelo numérico 3D com elementos finitos, validado previamente com os deslocamentos observados pelos fios de prumo instalados em blocos mais próximos dos encontros (Morais *et al.*, 2018). Na Figura 10 é possível ver a correlação entre os deslocamentos observados pelo GNSS, no sentido radial, e a média móvel semanal da temperatura do ar. A escala das

ordenadas mostra haver uma correspondência de 1 mm por cada 1° C. O desfasamento temporal entre os deslocamentos radiais e a média móvel semanal da temperatura do ar, da ordem dos 15 dias, pode ser explicada pela inércia térmica da barragem.

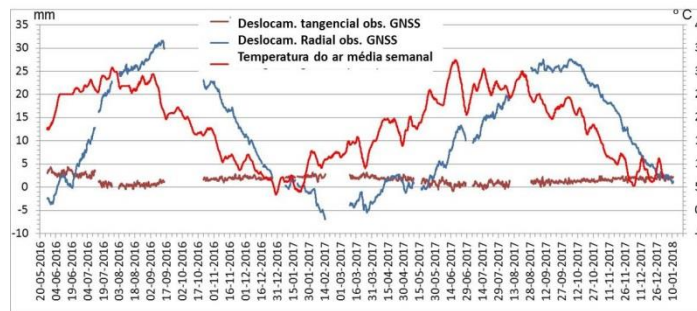


**Figura 7** – A comparação entre os deslocamentos observados pelo fio de prumo, na base de coordenómetro de FP2, e os deslocamentos observados pelo GNSS, nas componentes horizontais, na estação FP2J da barragem do Feiticeiro. A linha castanha representa as médias móveis dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) no sentido margem direita – margem esquerda; a linha azul representa as médias móveis dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) no sentido jusante – montante; os losangos vermelhos representam os deslocamentos observados pelo fio de prumo, no sentido margem esquerda – margem direita; os losangos azuis representam os deslocamentos observados pelo fio de prumo, no sentido jusante – montante

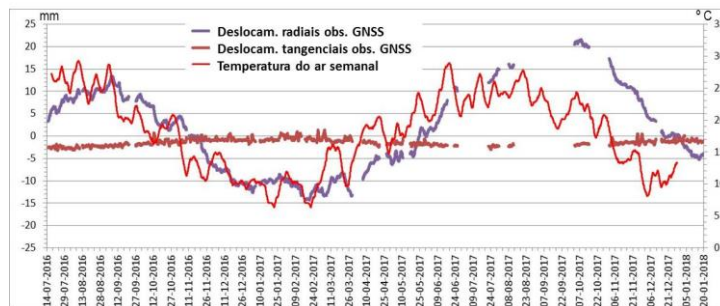
Durante o primeiro enchimento da barragem de Foz Tua foi possível monitorizar os deslocamentos desta barragem com as observações GNSS diárias. Os deslocamentos observados pelo GNSS (a antena estava instalada no bloco E1E2, à cota 176,8 m) foram comparados com os deslocamentos observados pelo fio de prumo mais próximo (FP3-17, a base de coordenómetro está instalada no bloco E1D1, à cota 167 m). Conforme se pode verificar na Figura 11, os resultados da comparação mostram uma boa concordância entre as duas técnicas.



**Figura 8** – A comparação entre os deslocamentos observados pelo fio de prumo, na base de coordenómetro de FP3, e os deslocamentos observados pelo GNSS, nas componentes horizontais, na estação FP3M da barragem do Baixo Sabor. A linha castanha representa as médias móveis dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) no sentido tangencial; a linha azul representa as médias móveis dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) no radial; os losangos vermelhos representam os deslocamentos observados pelo fio de prumo, no sentido tangencial; os losangos azuis representam os deslocamentos observados pelo fio de prumo, no sentido radial



**Figura 9** – A correlação entre a temperatura do ar (média semanal) e os deslocamentos observados pelo GNSS, nas componentes horizontais, na estação FP3M da barragem do Baixo Sabor. A linha castanha representa as médias móveis dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) no sentido tangencial; a linha azul representa as médias móveis dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) no radial; a linha vermelha representa a média móvel semanal da temperatura do ar



**Figura 10** – A correlação entre a temperatura do ar (média semanal) e os deslocamentos observados pelo GNSS, nas componentes horizontais, na estação da consola central da barragem do Cabril. A linha castanha representa as médias móveis dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) no sentido tangencial; a linha azul representa as médias móveis dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) no radial; a linha vermelha representa a média móvel semanal da temperatura do ar



**Figura 11** – A comparação entre os deslocamentos observados pelo fio de prumo e os deslocamentos observados pelo GNSS, nas componentes horizontais, na estação da consola central da barragem de Foz Tua. A linha vermelha representa as médias móveis dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) no sentido tangencial; a linha azul escura representa as médias móveis dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) no radial; a linha castanha representa os deslocamentos observados pelo fio de prumo, no sentido tangencial; a linha azul clara representa os deslocamentos observados pelo fio de prumo, no sentido radial

A partir das soluções GNSS horárias observadas em cada ponto objeto, nas componentes radial e tangencial, subtraíram-se as respetivas médias móveis de ordem 25 tendo-se obtido as dispersões das soluções horárias sem os respetivos deslocamentos nesses mesmos pontos. O raio do círculo que circunscreve 95% da dispersão dessas soluções é uma estimativa da incerteza dos deslocamentos observados em cada ponto objeto. Para se obter a estimativa da incerteza da média móvel de ordem 25 das soluções horárias basta dividir a incerteza das soluções horárias pela raiz da ordem (ou seja, 5), pela aplicação da lei da propagação das variâncias.

A antena GNSS da estação de referência na barragem do Cabril está instalada no topo de um poste de uma linha desativada de média tensão, que deverá ser afetada por inclinações sub-diárias térmicas, induzidas pela expansão térmica da face exposta à radiação solar, que são visíveis na série temporal das observações GNSS horárias.

O Quadro 1 mostra a incerteza estimada dos deslocamentos medidos com o GNSS em cada ponto objeto, das quatro grandes barragens, para as soluções horárias e diárias. A distância à estação de referência entende-se por comprimento da base definida pela estação de referência e o ponto objeto no centro do coroamento da barragem.

Foi desenvolvido um procedimento bayesiano para análise preditiva dos deslocamentos medidos por GNSS. Este procedimento é baseado nas elipses preditivas posteriores que assumem haver uma estabilidade temporal no ponto objeto num determinado período de tempo. Estas elipses são calculadas com um conjunto inicial de observações. Este procedimento foi aplicado na barragem do Feiticeiro para deteção de erros (Lima e Casaca, 2017).

**Quadro 1** – Estimativa das incertezas dos deslocamentos medidos pelo GNSS

Barragem	Distância à estação de referência	Incerteza das soluções horárias	Incerteza das soluções diárias
Baixo Sabor	645 m	4 mm	0,8 mm
Cabril	240 m	6 mm	0,6 mm
Feiticeiro	360 m	2 mm	0,4 mm
Foz Tua	242 m	-	0,4 mm

## 5. Conclusões

Os resultados da monitorização dos deslocamentos em barragens com o GNSS mostram que é possível atingir um elevado nível de precisão (submilimétrica) e elevado nível de concordância com os deslocamentos medidos pelos fios de prumo. O GNSS com *software* especializado para processamento contínuo das observações é uma forte alternativa aos sistemas de monitorização convencionais. Além disso, o equipamento GNSS é robusto sem necessidade de manutenção e de calibração. O GNSS está especialmente vocacionado para monitorização automática, ao contrário dos sistemas de monitorização convencionais que requerem recalibrações frequentes, pessoal especializado para a recolha de dados e de tempo para o processamento dos dados e dos resultados.

## Agradecimentos

Agradece-se ao Grupo EDP, proprietário das barragens do Baixo Sabor, Cabril, Feiticeiro e Foz Tua, pela permissão da apresentação dos resultados da monitorização.

## Referências Bibliográficas

- Haykin, S. (2002). Adaptive Filter Theory, Prentice Hall, New Jersey, EUA.
- Lima, J. N. e Casaca, J. (2017). A Bayesian procedure for analysis of short permanent GNSS baselines, INGENIO 7<sup>th</sup> International Conference on Engineering Surveying, Lisboa, 18-20 de outubro de 2017.
- Morais, R., Oliveira, S. e Lima, J. N. (2018). Use of GNSS for measuring displacements in Cabril arch dam. Comparison with plumb lines and geodetic measurements and with numerical models, submitted to DW2018: Third International Dam World Conference, Foz do Iguaçu, Brasil, setembro 2018.
- Priestley, M. B. (1981). Spectral Analysis and Time Series, Academic Press, Londres, Reino Unido.