Limites da precisão e da resolução temporal na observação de barragens com o GNSS: o caso da barragem do Baixo Sabor

José Nuno Lima[1]

RESUMO

O *Global Navigation Satellite System* (GNSS) tem sido amplamente utilizado, a nível mundial, na monitorização de estruturas de engenharia civil. No caso particular das barragens de betão, em que os seus deslocamentos observados são caraterizados por serem de pequena amplitude e de variação muito lenta, a solução GNSS de frequência diária tem sido mais do que suficiente para a monitorização deste tipo de estruturas. Sobretudo quando se compara com a frequência anual das soluções dadas pelos métodos geodésicos clássicos, ou quinzenal no caso das observações dos fios de prumo em modo manual.

A barragem do Baixo Sabor encontra-se bastante bem instrumentada, com a possibilidade de recolha automática de dados (RAD) nalguns instrumentos, noutros ainda com a observação manual. A análise mais detalhada das séries temporais das bases dos fios de prumo RAD, cuja frequência de amostragem é de seis valores por hora, permitiu detetar pequenas variações na componente radial com períodos diários. Estas pequenas variações, de período diário, também foram observadas nas séries temporais GNSS horárias, suavizadas com médias móveis de ordem seis. A concordância das séries temporais obtidas destes dois métodos de observação, completamente independentes, é assinalável, cujas divergências de maior amplitude são em média da ordem de 1 a 2 mm. E estas verificam-se nos picos das séries temporais, ou seja, quando a barragem se encontra ou mais para montante ou mais para jusante. Podendo ser justificadas em parte pelas diferenças de cotas entre as antenas GNSS e as bases dos fios de prumo mais próximas do coroamento.

A precisão submilimétrica e a elevada resolução temporal (soluções sub-horárias) destes dois sistemas de observação já será relevante para o acompanhamento atual do comportamento estrutural das barragens?

Palavras-chave: Monitorização; GNSS; Barragens; Séries Temporais; Baixo Sabor

1. INTRODUÇÃO

A primeira tentativa que se conhece de utilização do GNSS para monitorizar barragens de betão data de 1989 [1], mas a primeira a ser monitorizada com sucesso foi a barragem de Pacoima (Califórnia, EUA). De facto, em 1998 Hudnut e Behr [2] publicam um artigo sobre a monitorização desta barragem com o GPS em contínuo onde mostram que este tipo de observação mede os deslocamentos desta barragem com bastante rigor entre 1995 e 1998. Numa tese de mestrado defendida no Massachusetts Institute of Technology (MIT) em 2002, Piboon [3] conclui que o GPS pode ser utilizado para detetar deslocamentos de pequena amplitude, como aqueles que são devidos ao efeito térmico. Chegando

[1] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, jnplima@lnec.pt

mesmo a quantificar que a variação de 1º C pode causar um deslocamento de 1 mm no centro do coroamento, na direção radial, na barragem de Pacoima.
Após esta primeira experiência bem-sucedida, muitas barragens foram monitorizadas também com GNSS, por vezes, recorrendo a sistemas automáticos de monitorização [4 – 11]. Duma maneira geral, os deslocamentos estimados a partir das medições são utilizados para desenvolver ou validar modelos estruturais das barragens monitorizadas. Já não sendo tão frequente, contudo, a comparação direta dos resultados obtidos com o GNSS com os deslocamentos observados por outros instrumentos, como, por exemplo, fios de prumo [4] e [12]. Desde 2016 que se monitorizam barragens de betão em Portugal com sucesso utilizando o GNSS em contínuo [12].
Neste trabalho, são efetuadas análises com o objetivo de avaliar a precisão da posição que pode ser obtida com o GNSS. Isto é, comparam-se os deslocamentos observados pelo GNSS com os deslocamentos provenientes de fios de prumo colocados mais próximos dos instrumentos GNSS. Na Secção 2, a barragem do Baixo Sabor é descrita juntamente com o seu sistema de monitorização tradicional e com o seu sistema de monitorização com o GNSS. Na secção 3, é apresentada a definição de médias móveis que se aplicam como filtros do tipo *passa baixo* nas séries temporais. Na Secção 4, são apresentados e analisados os deslocamentos observados com o GNSS. Finalmente, na Secção 5 aplicou-se a análise espectral nas séries temporais observadas com o fio de prumo e com o GNSS para validar alguns resultados mostrados na secção anterior.

2. A BARRAGEM DO BAIXO SABOR E O SEU SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

Localizando-se no trecho inferior do rio Sabor, já perto da confluência com o rio Douro, a barragem do Baixo sabor é constituída por uma abóbada de dupla curvatura com uma altura máxima acima da fundação de 123 m, um coroamento de 6,00 m de espessura e 505 m de desenvolvimento, à cota de 236,00 m (Fig. 1). A barragem é fundada num maciço granítico de boa qualidade.

Figura 1. Barragem do Baixo Sabor (vista da margem direita)

O projeto desta barragem foi desenvolvido pela EDP Produção, tendo a sua construção decorrida entre 2009 e 2015 [13].

2.1 Sistemas de observação tradicional com recolha manual e automática

Na barragem do Baixo Sabor foi implementado um sistema de observação com recolha manual de dados e, em alguns dos dispositivos, com recolha automática [13]. Assim, foram instalados: 27 bases de leitura de deslocamentos horizontais em cinco fios de prumo (nos três fios de prumo centrais existe uma conjugação de um fio direito, entre a galeria superior e a galeria geral de drenagem, e de um fio invertido, entre esta galeria e um ponto profundo no maciço de fundação; os dois fios de prumo laterais são invertidos); 15 extensómetros de varas na fundação, a partir das galerias geral de drenagem (GGD) e de

drenagem de jusante (GDJ), 12 verticais, dois horizontais e um subvertical, sendo seis simples (uma vara), localizados nas encostas a cotas mais elevadas, e os restantes nove duplos, para medição de deslocamentos da fundação; 152 medidores de movimentos de junta de resistência elétrica, embebidos no betão, e 103 bases tridimensionais nas galerias, para medição de deslocamentos relativos entre blocos; 232 extensómetros de resistência elétrica do tipo Carlson, dispostos em 40 pontos de amostragem mais relevantes para tensões, segundo 17 secções, em oito grupos unidirecionais, 26 grupos planos e seis grupos tridimensionais, para medição de extensões no betão; 10 células tensométricas, dispostas em cinco secções junto de grupos de extensómetros, para medição direta de tensões nas zonas onde se prevê que sejam de maior magnitude (fecho dos arcos, rins e base da consola central); 52 termómetros de resistência elétrica, 26 dos quais junto aos paramentos de montante e de jusante, que em conjunto com os extensómetros e os medidores de movimentos de junta permitem a obtenção da temperatura em 252 pontos do corpo da barragem; seis células de pressão, para quantificação da pressão da água nos poros do betão; 42 piezómetros na fundação, de câmara manométrica única, para quantificação de subpressões; e 215 drenos na fundação (cinco por bloco, em média), a partir das GGD e GDJ, e 18 bicas totalizadoras, para coletar caudais drenados e infiltrados. A recolha automática de dados (RAD) cobre praticamente todas os tipos de aparelhos, correspondendo a 284 grandezas, 25% do total das grandezas medidas manualmente [13].

2.2 Sistema GNSS para monitorização contínua de deslocamentos

Para além do sistema de observação geodésica tradicional (para a medição de deslocamentos em pontos previamente selecionados no coroamento e nas galerias horizontais, através de poligonais e linhas de nivelamento, com a periodicidade anual) foi instalado um sistema GNSS para monitorização contínua de deslocamentos do coroamento da barragem.

Este sistema é constituído por quatro estações GNSS: três das quais foram instaladas no coroamento da barragem, nos blocos 10-11, 16-17 e 23-24 (Figura 2) e a quarta instalada na margem direita, para funcionar como estação de referência (REFM). A antena GNSS desta última estação foi montada no topo dum pilar com 4 m de altura de betão armado, ficando o seu recetor GNSS instalado no interior de um armário técnico na base deste pilar.

As três estações GNSS permanentes localizadas no coroamento da barragem são pontos objeto e foram designadas, no ambiente do *software* que processa as observações e faz a gestão da rede (Spider da Leica Geosystems), por: FP2M (localizada no bloco 10-11, por se encontrar mais próxima do fio de prumo FP2, a letra "M" provém de montante, para se distinguir do antigo nome da barragem de jusante), FP3M (localizada no bloco 16-17, próxima da vertical do fio de prumo FP3) e FP4M (localizada no bloco 23-24, por se encontrar mais próxima do fio de prumo FP4).

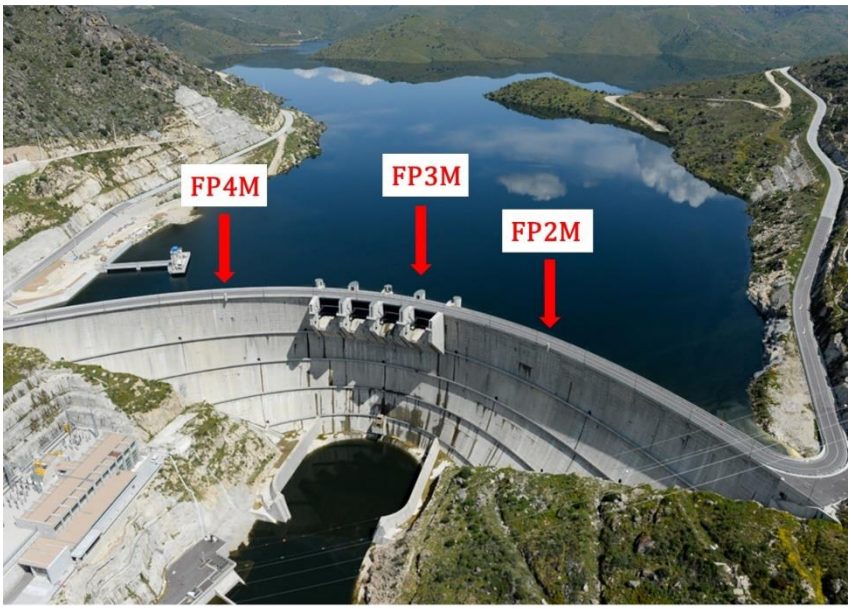

Figura 2. Localização das estações GNSS na Barragem do Baixo Sabor: FP2M, FP3M e FP4M no coroamento

3. AS MÉDIAS MÓVEIS COMO FILTRO LINEAR

Considere-se a Eq. (1) que exprime uma combinação linear dos termos de uma série temporal x_0, x_1, …, x_n:

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

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 [14].

A aplicação de um filtro a uma série temporal x_0, x_1, …, x_n, designada por série temporal de entrada, vai originar uma nova série temporal y_0, y_1, …, y_n, designada por série temporal de saída. As caraterísticas espectrais da série temporal de saída relacionam-se com as caraterísticas 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 [15].

Se o ganho do filtro, para uma determinada frequência angular ω, for maior do que 1 o filtro amplia a série temporal de entrada na frequência ω. Por outro lado, se o ganho do filtro, para a frequência angular ω, 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 desfasamento (atraso) na série temporal de saída em função da frequência. Se bem que os filtros simétricos não introduzam desfasamentos significativos, os filtros assimétricos, pelo contrário, podem introduzir desfasamentos consideráveis.

Na sequência de vários 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 [12].

Conclui-se que 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 apresentou na Eq. (1).

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 tem 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 implementar nas séries temporais.

A Figura 3 mostra os resultados da aplicação das médias móveis simétricas de ordem 25 às séries temporais dos deslocamentos horários observados, nas componentes horizontais, na estação FP3M da barragem do Baixo Sabor. Os pontos a verde-escuro representam os deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) na componente radial. Os pontos a vermelho representam os deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) na componente tangencial. Os pontos a azul representam as médias móveis de ordem 25 dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) na componente radial. Os pontos a laranja representam as médias móveis de ordem 25 dos deslocamentos observados pelo GNSS (soluções horárias) na componente tangencial. Como se pode ver na Figura 3, a suavização das soluções horárias obtidas pela aplicação das médias móveis permite diminuir a incerteza sem perda da resolução temporal. No entanto, aplicação das médias móveis não elimina só ruído, uma vez que se trata de um filtro do tipo *passa baixo*, pode eliminar, também, algum sinal. Neste caso concreto, elimina qualquer sinal que seja de período inferior ao período diário [16].

Há uma contribuição importante da variação térmica anual nos deslocamentos observados na direção radial, atingindo-se amplitudes de 44 mm (Figura 4). Além disso, conforme se pode ver também na Figura 4, existe uma forte correlação entre os deslocamentos observados no sentido radial e a temperatura média quinzenal do ar (representado por pontos a roxo). A escala das ordenadas mostra haver uma correspondência de 2 mm por cada 1º C. O desfasamento temporal entre os deslocamentos observados no sentido radial e a temperatura média quinzenal do ar, que pode chegar aos 30 dias, pode ser explicado pela inércia térmica da barragem. Aqui, neste caso, foi aplicada uma média móvel de ordem 6 às séries temporais horárias observadas com GNSS (FP3M MM6), nas componentes radial (a verde) e tangencial (a vermelho), para não se perderem todos os sinais subdiários. Estas séries temporais são comparadas, ainda na Figura 4, com as séries temporais observadas no fio de prumo mais próximo, FP3-12 RAD, nas componentes radial (a azul) e tangencial (a laranja). Na componente radial, as duas séries são quase coincidentes, divergem no máximo 2 a 3 mm. Estas divergências podem ser explicadas pelo facto de haver uma diferença de cotas de 6,60 m entre os dois tipos de instrumentos [17]. Na componente tangencial, as duas séries sobrepõem-se, mas verifica-se que há uma maior amplitude na série temporal GNSS que pode ser explicada em parte pelo seu ruído.

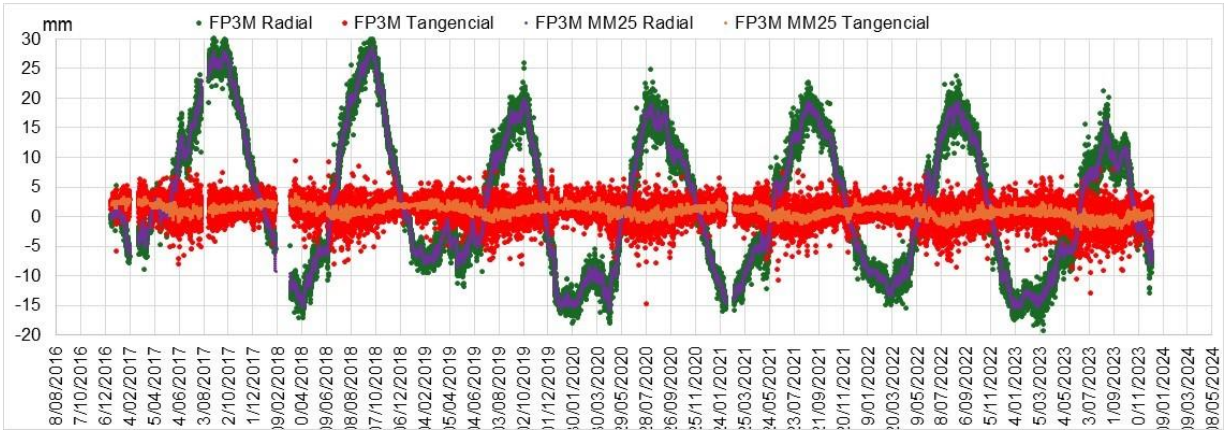

Figura 3. Resultado da aplicação das médias móveis de ordem 25 às séries temporais de deslocamento observados pelo GNSS, nas componentes horizontais, na estação GNSS FP3M na Barragem do Baixo Sabor

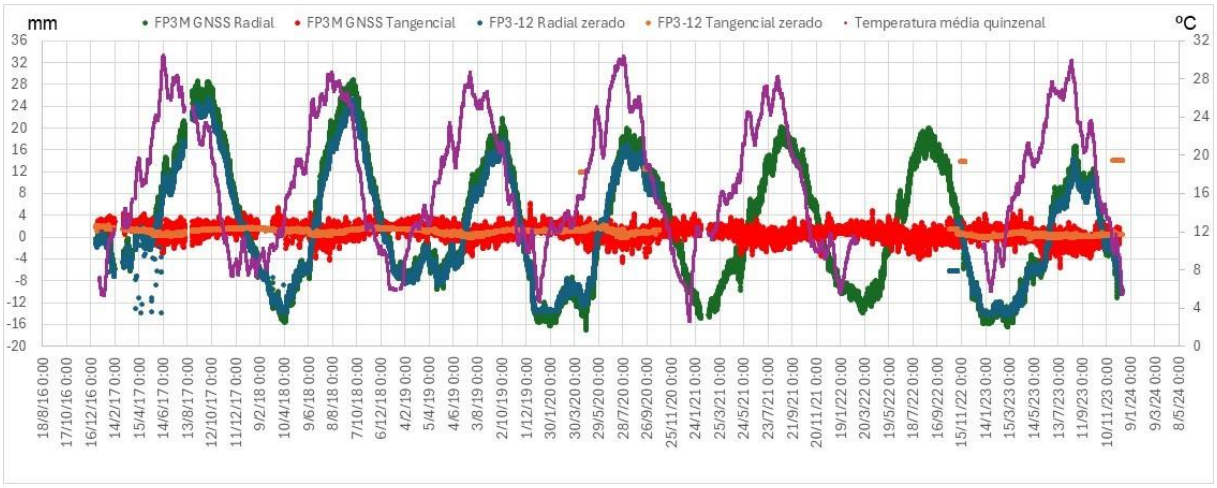

Figura 4. A correlação entre a temperatura e os deslocamentos observados pelo GNSS, nas componentes horizontais, na estação FP3M, e a comparação com os deslocamentos observados pelo fio de prumo mais próximo (FP3-12 RAD)

Também se analisa o efeito da variação da cota da albufeira, na Figura 5, com as mesmas séries temporais representadas na Figura 4, substituindo a variação da temperatura pela variação da cota da albufeira (a roxo). Embora não se vendo uma correlação tão evidente como no caso da temperatura, nota-se, por exemplo, que em 27 de fevereiro de 2019 a cota da albufeira é de 230,1 m, os valores dos deslocamentos radiais são da ordem de -8 mm, a 22 de março do mesmo ano a cota da albufeira baixa

para 228,4 m, os deslocamentos radiais passam para -2 mm, passados cerca de 30 dias a cota da albufeira volta ao patamar dos 230 m e os deslocamentos radiais voltam para os -8 mm. Outro exemplo, a 15 de março de 2020, a cota da albufeira está em 230 m, depois de ter baixado cerca de 3 m em cerca de 30 dias, e os deslocamentos radiais passam de -15 mm para -8 mm. Passados cerca de 30 dias recupera-se os valores da cota da albufeira e os respetivos deslocamentos radiais.

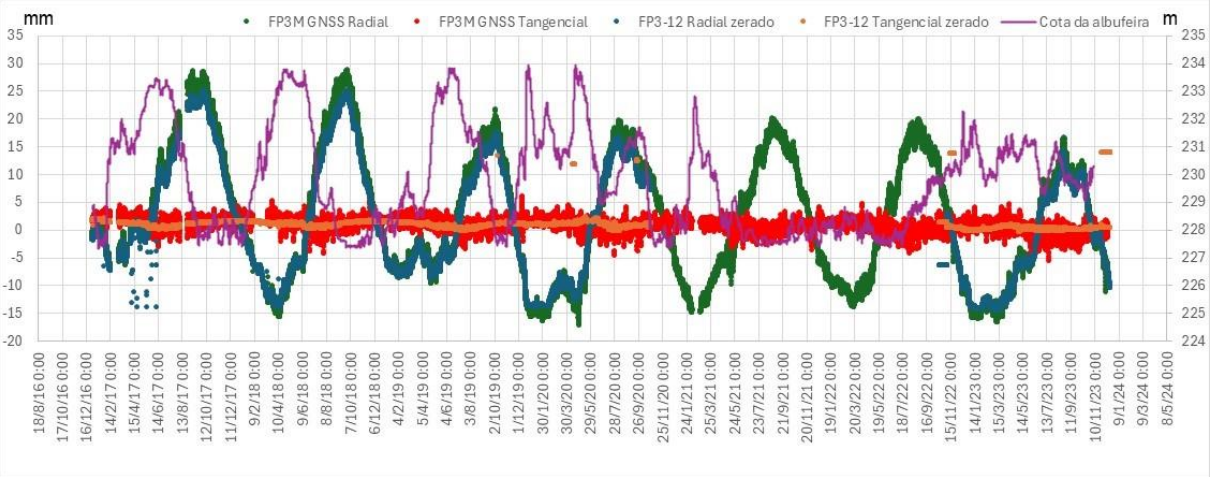

Figura 5. Variação da cota da albufeira e os deslocamentos observados pelo GNSS, nas componentes horizontais, na estação FP3M, e pelo fio de prumo mais próximo (FP3-12 RAD)

A Figura 6 é a ampliação da Figura 4, para o período de observação entre 12 de agosto de 2023 e 1 de outubro de 2023. Aqui nota-se claramente um sinal diário na série de deslocamentos radial observado pelo fio de prumo (FP3-12 RAD, a azul), sincronizado com a série das temperaturas horárias (a roxo) – em vez da série das temperaturas médias quinzenal –. A verde está representada a série de deslocamentos radiais observada pelo GNSS (a média móvel de ordem 6), que acompanha os deslocamentos observados pelo fio de prumo. Embora não sendo tão nítido, também é visível um sinal diário na série de deslocamentos observada pelo GNSS.

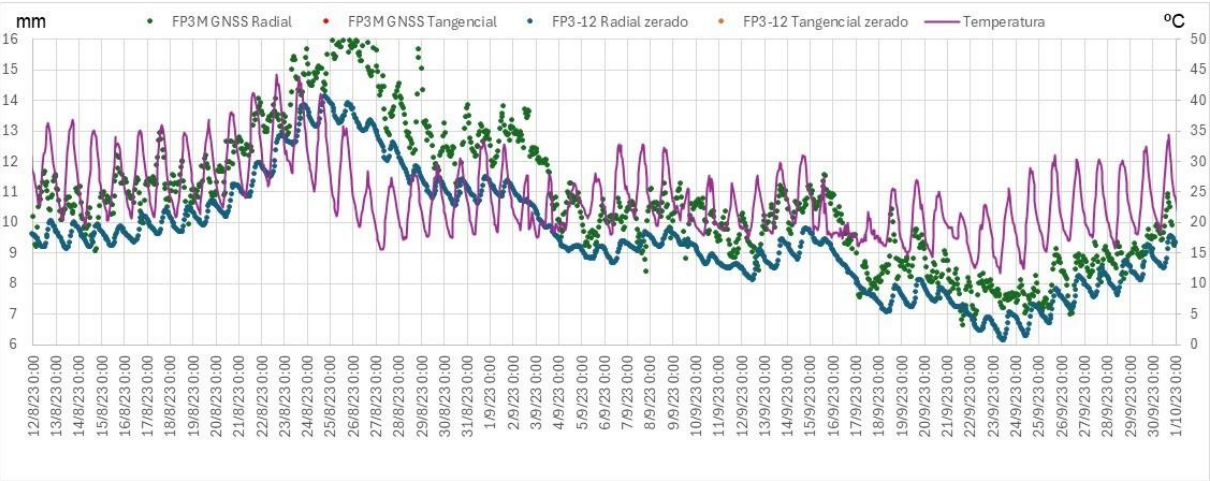

Figura 6. Ampliação da Figura 4 (período entre 12/08/2023 a 1/10/2023) com a série das temperaturas horárias (a roxo) e os deslocamentos observados pelo GNSS, na componente radial, na estação FP3M, e pelo fio de prumo mais próximo (FP3-12 RAD)

Fazendo outra ampliação da Figura 4, mas agora num período menos quente, com os deslocamentos da barragem mais para jusante, no período de 14 de janeiro de 2023 a 5 de março de 2023 (Figura 7). Aqui os deslocamentos radiais do fio de prumo praticamente não têm variação até ao início do mês de fevereiro, também não há um sinal diário claro na série das temperaturas horárias. O mesmo não se passa com a série de deslocamentos radiais observada pelo GNSS. A partir do segundo mês do ano,

verifica-se uma sobreposição muito grande entre as duas séries de deslocamentos, sendo também bem visível um sinal de período diário nas três séries representadas na Figura 7.

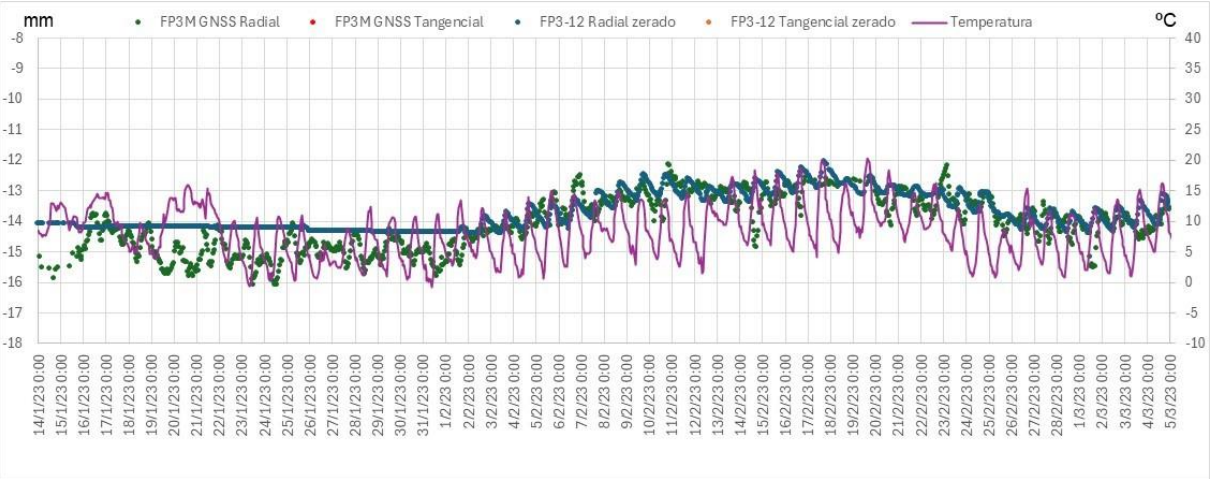

Figura 7. Ampliação da Figura 4 (período entre 14/01/2023 a 5/3/2023) com a série das temperaturas horárias (a roxo) e os deslocamentos observados pelo GNSS, na componente radial, na estação FP3M, e pelo fio de prumo mais próximo (FP3-12 RAD)

Por último, procura-se saber qual será a série temporal GNSS mais adequada para comparar os deslocamentos radiais com a série de fio de prumo FP3-12 RAD: se a horária ou a sua média móvel de ordem 6? A Figura 8 põe em confronto as duas séries GNSS, no gráfico de baixo, os pontos verdes representam a série horária original, no gráfico de cima, os pontos verdes representam a sua média móvel de ordem 6. Os pontos azuis representam os deslocamentos radiais do fio de prumo.

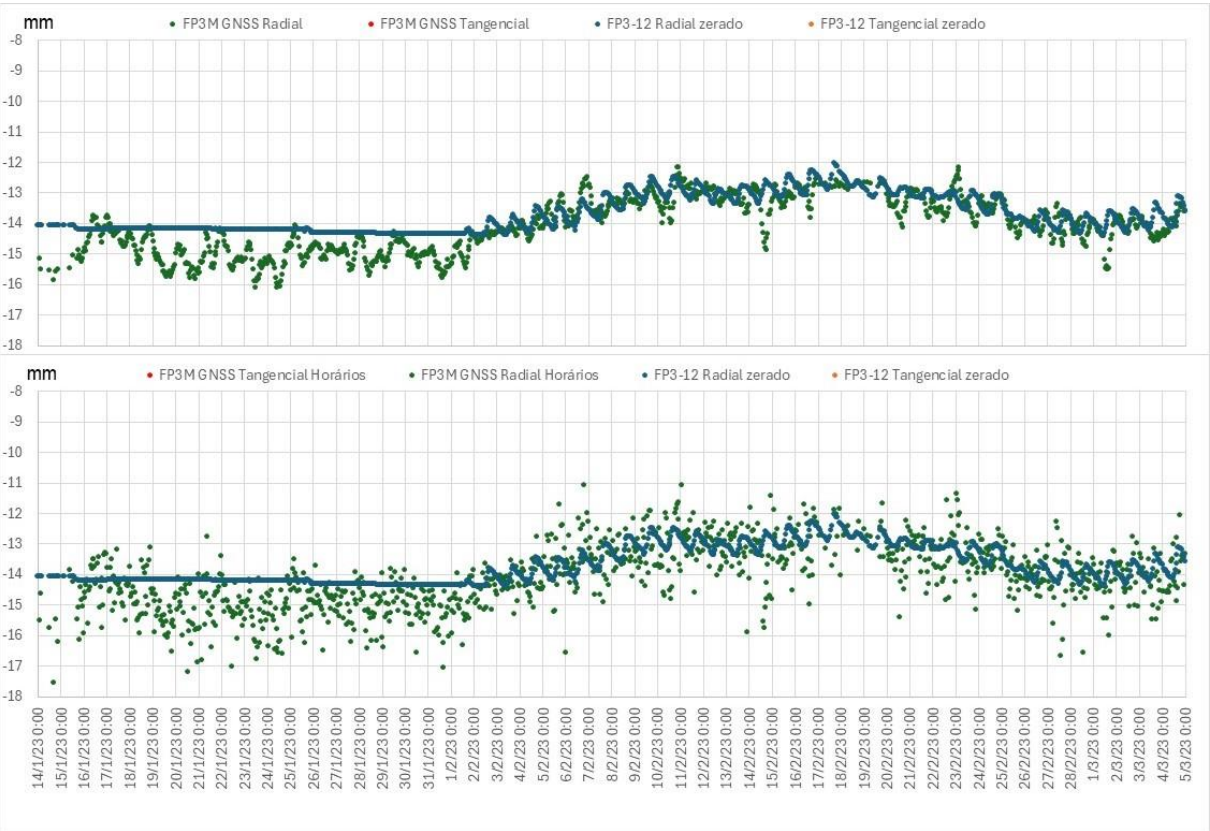

Figura 8. Ampliação da Figura 4 (período entre 14/01/2023 a 5/3/2023) com os deslocamentos observados pelo GNSS, na componente radial, na estação FP3M (a horária representada pelos pontos verdes no gráfico de baixo, e a sua média móvel de ordem 6, também representada pelos pontos verdes no gráfico de cima), e pelo fio de prumo mais próximo (FP3-12 RAD), representada pelos pontos azuis, valores horários em ambos os casos

Vê-se claramente que a média móvel de ordem 6 representa bem o sinal diário, o mesmo não será possível visualizar na série horária. De facto, esta última séria apresenta uma maior dispersão, com mais ruído e afasta-se mais da série de deslocamentos radiais medida no fio de prumo mais próximo.
Foram calculadas as diferenças entre as séries FP3M horárias e FP3-12 RAD e entre as séries FP3M MM6 e FP3-12, no período que diz respeito à Figura 8, ou seja, entre 14 de janeiro e 5 de março de 2023. Os valores das médias das diferenças são iguais (-0,4 mm), mas os valores dos desvios padrão já são 0,8 mm e 0,5 mm, respetivamente. Os valores máximos das diferenças são 2,7 mm e 1,2 mm, respetivamente. E os valores mínimos das diferenças são -4,5 mm e -1,9 mm, respetivamente.
A análise espectral pode validar alguns resultados obtidos neste estudo comparativo entre as séries temporais observadas pelo fio de prumo FP3-12 RAD e pelo GNSS FP3M horárias.

5. ANÁLISE ESPECTRAL DOS DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS OBSERVADOS

A análise espectral dos deslocamentos horizontais observados com GNSS e fio de prumo é feita com o *software* TSOFT [18]. Este *software* é um conjunto de programas que permite uma análise gráfica e interativa que foi desenvolvido, originalmente, para processar e analisar séries temporais de gravimetria e de marés terrestres. No entanto, está preparado para processar e analisar qualquer tipo de série temporal, seja com dados sísmicos ou de qualquer outra natureza com dados ambientais.
O TSOFT calcula o espectro das séries temporais e desenha os respetivos gráficos com as amplitudes na escala linear ou logarítmica e com as frequências expressas em Hertz ou em ciclos por dia (cpd). Este *software* utiliza as transformadas rápidas de Fourier (FFT) para calcular o espectro, a fase e a densidade da potência espectral das séries temporais, passando do domínio do tempo para o domínio da frequência.
A Figura 9 mostra a densidade da potência espectral obtida da série temporal dos deslocamentos medidos pelo fio de prumo, FP3-12, na componente radial calculada pelo TSOFT. Nesta figura, as abcissas estão expressas em ciclos por dia (cpd) e as ordenadas estão expressas em mm^2/cpd. A densidade da potência espectral evidencia um sinal com periodicidade anual (0.0029 cpd) e outro com periodicidade diária (1 cpd).

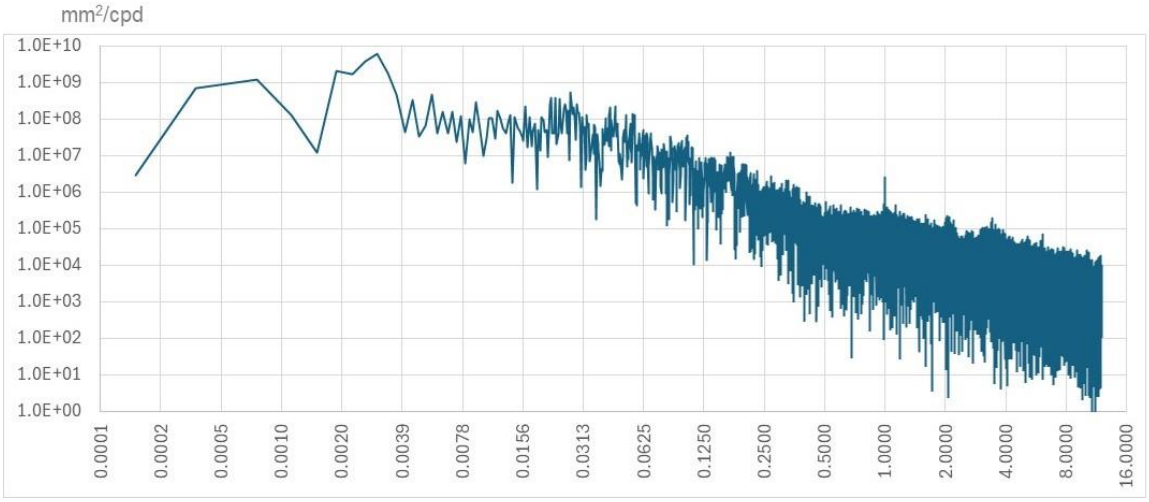

Figura 9. A densidade da potência espectral obtida dos deslocamentos observados pelo fio de prumo (FP3-12 RAD), na componente radial

O mesmo acontece com as séries de deslocamentos observados com o GNSS, conforme se pode ver no Quadro 1 onde se mostram os valores do espectro e da densidade da potência espectral nas frequências onde o sinal é mais significativo, nas três séries temporais de deslocamentos observados, na componente radial. As três séries temporais apresentam picos na frequência anual (na realidade corresponde ao período de 341,33 dias que, neste caso, é o período mais próximo do período anual que é 365,25), na frequência semestral (período de 182,04 dias, já bem mais próxima do período semi-anual que é 182,62 dias), na frequência 10 vezes por ano (período de 36,90 dias para o fio de prumo e período de 34,57 dias para o GNSS) e na frequência diária. Os valores espectrais também são da mesma ordem de grandeza para as frequências apresentadas no Quadro 1.

A análise espectral calculada permitir mostrar que os sinais mais importantes são detetados pelas séries temporais de observação realizadas com o fio de prumo (FP3-12 RAD) e com o GNSS (FP3M horárias e a média móvel de ordem 6), sendo as respetivas amplitudes (dadas pelo espectro) da mesma ordem de grandeza. Se para os sinais de período anual já não seria novidade, mas para o período diário confirma-se numericamente. Embora, não sendo bem visível graficamente para a série temporal FP3M horária, mas a suavização desta série temporal obtida pela aplicação da sua média móvel de ordem 6 o sinal diário torna-se bem visível (Figura 8). A sobreposição das séries temporais FP3-12 RAD e FP3M MM6 é muito significativa.

Quadro 1. Análise espectral das 3 séries temporais de observação de deslocamentos na componente radial

Série Temporal	*Ciclos por dia (cpd)*	*Período* [dia]	*Espectro* [mm]	*Densidade da Potência Espectral* [mm^2/cpd]
FP3-12 Fio de prumo	0,0029	341,33	6,51	6 025 677 950
	0,0055	182,04	1,79	471 391 710
	0,0271	36,90	1,90	536 163 990
	1,00	1,00	0,13	2 472 783,50
FP3M Horário GNSS	0,0029	341,33	7,84	12 449 919 000
	0,0055	182,04	2,12	908 718 010
	0,0289	34,57	1,12	254 023 130
	1,00	1,00	0,24	11 191 617
FP3M MM6 GNSS	0,0029	341,33	7,84	12 450 809 000
	0,0055	182,04	2,12	908 850 630
	0,0289	34,57	1,12	253 499 640
	1,00	1,00	0,37	27 226 208

CONCLUSÕES

Este estudo mostra que se consegue observar um sinal com periodicidade diário na componente radial na série de deslocamentos medidas com o fio de prumo FP3-12 RAD e na série de deslocamentos horárias medidas com o GNSS em FP3M. Também se aconselha a suavizar esta última série com uma média móvel de ordem 6. A concordância entre as séries temporais FP3-12 RAD e FP3M MM6 é notável tendo em conta que são métodos de observação completamente independentes, o desvio padrão das diferenças medidas nos dois primeiros meses de 2023 é de 0,5 mm.
A utilidade de se observar os deslocamentos duma grande barragem com uma frequência de amostragem tão elevada vai permitir melhorar os seus modelos do comportamento estrutural e possibilitar a instalação de um sistema de aviso da barragem a funcionar quase em tempo real.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Engie Douro e à Movhera, a primeira responsável pela exploração e a segunda a concessionária do Aproveitamento Hidroelétrico do Baixo Sabor, a permissão para a apresentação dos resultados da monitorização.

REFERÊNCIAS

[1] DeLoach, S, R (1989). Continuous Deformation monitoring with GPS. *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 115, N. 1, pp. 93-110. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(1989)115:1(93)

[2] Hudnut, K. W.; Behr, J. A. (1998). Continuous GPS monitoring of structural deformation at Pacoima Dam, California. *Seismological Research Letters*, Vol. 69, N. 4, pp. 299-308. https://doi.org/10.1785/gssrl.69.4.299

[3] Piboon, M. (2002). Analysis of Periodic Behavior of GPS Time Series at Pacoima Dam, California. *Master of Sciences in Geophysics at the Massachusetts Institute of Technology 2002*, https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/55067

[4] Rutledge, D.R.; Meyerholtz, S.Z.; Brown, N.; Baldwin, C. (2006). Dam stability: Assessing the performance of a GPS monitoring system. *GPS World*, 2006, Vol. 17, N. 10, pp. 26-33. https://gge.ext.unb.ca/Resources/gpsworld.october06.pdf

[5] Chrzanowski, A., Szostak-Chrzanowski, A. (2009). Deformation monitoring surveys-old problems and new solutions. *Reports on Geodesy*, 2009, N. 87, pp. 85-103. https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-PWAB-0003-0010

[6] Drummond, P. (2010). Combining CORS Networks, Automated Observations and Processing, for Network RTK Integrity Analysis and Deformation Monitoring. *Proceedings of the 15th FIG Congress Facing the Challenges*, Sydney, Australia, 11–16 April 2010.

[7] Van Cranenbroeck, J. (2011). State of the Art in Structural Geodetic Monitoring Solutions for Hydro Power Dams. *Proceedings of the FIG WorkingWeek*, Marrakech, Morocco, 18–22 May 2011.

[8] Kaftan, V.I., Ustinov, A.V. (2013). Use of global navigation satellite systems for monitoring deformations of water-development works. *Power Technol. Eng.* 2013, 47, 30–37.

[9] Dardanelli, G.; La Loggia, G.; Perfetti, N.; Capodici, F.; Puccio, L.; Maltese, A. (2014). Monitoring displacements of an earthen dam using GNSS and remote sensing. *SPIE Remote Sens.* 2014, 923928.

[10] Yavasoglu, H.H., Kalkan, Y., Tiryakioglu, I., Yigit, C.O., Özbey, V., Alkan, M.N., Bilgi, S., Alkan, R.M. (2018). Monitoring the deformation and strain analysis on the Ataturk Dam, Turkey. *Geomat. Nat. Hazards Risk* 2018, 9, 94–107.

[11] Pipitone, C., Maltese, A., Dardanelli, G., Lo Brutto, M., Loggia, G.L. (2018). Monitoring water surface and level of a reservoir using different remote sensing approaches and comparison with dam displacements evaluated via GNSS. *Remote Sens.* 2018, 10, 71.

[12] Lima, J.N. & Casaca, J. (2018). Monitoring dam displacements with GNSS: Strategy, Accuracy and Benefits. *Paper presented to DamWorld 2018*, Foz do Iguaçu, Brazil, September, 17-21, 2018.

[13] Cunha, J.G., Piteira Gomes, J., Moura, G. e Batista, A. L. (2018). A Monitorização estrutural das barragens do Baixo Sabor e do Feiticeiro. *Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL – BE2018*, LNEC, Lisboa, 7 a 9 de novembro de 2018.

[14] Haykin, S. (2002). Adpative Filter Theory. *Prentice Hall*, New Jersey, EUA.

[15] Priestley, M. B. (1981). Spectral Analysis and Time Series. *Academic Press*, Londres, Reino Unido.

[16] Lima, J. N. (2020). Using Spectral Analysis of Cabril Dam GNSS Monitoring System Time Series for Detecting Periodic Displacements. *Paper presented to DamWorld 2020*, LNEC, Lisboa, Portugal, September, 21-25, 2020.

[17] Lima, J. N. e Gomes, J. C. P. (2017). Barragem do Baixo Sabor. Resultados preliminares da monitorização de deslocamentos com o GNSS. *Relatório 92/2017 DBB/NGA.* LNEC, Lisboa, Portugal, março de 2017.

[18] Van Camp, M. & Vauterin, P. (2004). Tsoft: Graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides. *Computers & Geosciences*, Vol. 31, Issue 5, pages 631-640, 2004.