

CARATERIZAÇÃO DE DESLOCAMENTOS EM BARRAGENS DE BETÃO COM BASE EM TRANSFORMADAS WAVELETS

CHARACTERIZATION OF RADIAL DISPLACEMENTS IN CONCRETE DAMS BASED ON WAVELET TRANSFORMS

Juan Tomé Caires da Mata, jmata@Inec.pt

Departamento de Barragens de Betão, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

João Pedro de Oliveira Dias Prudente dos Santos, josantos@Inec.pt

Departamento de Estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil



RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma metodologia que tem como objetivo a caraterização do comportamento observado em barragens de betão com recurso a modelos de interpretação quantitativa (IQ) e de transformadas de *wavelet*. Os modelos IQ são amplamente utilizados na engenharia de barragens e a utilização mais popular destes permite a caraterização do efeito hidrostático, do efeito devido à onda térmica anual, e dos outros efeitos não reversíveis que são função do tempo de vida da obra. Nos modelos IQ existe sempre uma parcela, designada de resíduos, que contém a parte da observação que não é explicada pelo modelo. A proposta de valor que apresentamos consiste na quantificação e caraterização do efeito da variação da temperatura diária, caso exista, através da aplicação de transformadas *wavelet* aos resíduos do modelo IQ.

Palavras-chave: Monitorização da integridade estrutural / Transformadas *wavelet* / Barragens de betão

ABSTRACT

In the present work a methodology developed to characterize the behavior of concrete dams using quantitative interpretation and wavelet transforms is presented. Quantitative interpretation models are largely used in dam engineering, and their largest application

consists in characterizing the effects generated by the hydrostatic effects as well as by the annual thermal wave, and by non-reversible effects. From this type of models, a set of residuals is always obtained and consists of the information related to the effects not considered in each model. Herein, the methodology proposed consists in using wavelet transforms to quantify and characterize the effects generated by daily variations of temperature, whenever these are present in the residuals.

Key words: Structural health monitoring / Wavelet transforms / Concrete dams

1. INTRODUÇÃO

As grandes infraestruturas de engenharia civil, como são as pontes e as barragens de betão, têm um grande valor económico e estratégico para o país. No caso das barragens, importa referir que uma das diretrizes da política energética nacional e comunitária reside no aproveitamento dos recursos endógenos, nomeadamente através das energias renováveis e não poluentes. O valor deste tipo de obras e as potenciais consequências associadas a possíveis danos estruturais está na origem da grande importância que é dada ao controlo da segurança estrutural¹ nas suas três vertentes de atuação: i) observação do comportamento observado, ii) análise e interpretação deste e iii) tomada de decisões para evitar ou minimizar as consequências resultantes de um eventual acidente ou incidente.

A evolução e o desenvolvimento de sistemas de monitorização da integridade estrutural possibilitam o acompanhamento preciso (e em tempo útil) da resposta estrutural, devido às condições de carga a que está sujeita, e a deteção (localização e natureza) de danos na estrutura. Em diversas áreas da engenharia, incluindo a mecânica e a aeroespacial, tem havido uma intensa investigação no desenvolvimento de algoritmos de deteção de dano com base na alteração do comportamento dinâmico da estrutura. Neste âmbito, as transformadas *wavelet* têm vindo a ganhar relevância e têm demonstrado a sua utilidade em diversas aplicações de engenharia, sendo notória a capacidade de superar muitas das limitações existentes nas Transformadas de Fourier, já que permitem a obtenção de informação no domínio da frequência e do tempo.

¹ A segurança estrutural é entendida como a capacidade das obras em satisfazer as exigências de comportamento, evitando acidentes e incidentes ao longo da sua vida e é verificada para os principais cenários, correntes e de rotura, que possam vir a ocorrer ou cujo desenvolvimento se observe, durante o tempo de vida das obras, (Pedro 1987).

A análise do comportamento dinâmico é usualmente efetuada no domínio das altas frequências, havendo um reduzido número de referências de aplicação no domínio das baixas frequências, (Mata *et al.* 2013). O presente trabalho pretende ilustrar as potencialidades das transformadas *wavelet* na caracterização e na análise de deslocamentos observados no fio de prumo de uma barragem de betão, no domínio das baixas frequências.

Os cálculos e as figuras apresentadas neste trabalho foram obtidos com recurso ao software R project (R Development Core Team 2008), e à biblioteca WaveletComp, (Roesch e Schmidbauer 2014).

2. CONTROLO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE BETÃO

2.1. Introdução

As atividades de controlo de segurança de barragens de betão têm um carácter preventivo com o intuito de facilitar a tomada de decisões de forma atempada e evitar ou minimizar as consequências resultantes de um acidente ou incidente de uma barragem.

Uma vez que todas as obras em exploração devem verificar as exigências regulamentares de segurança, torna-se cada vez mais importante a utilização de rigorosas técnicas de observação e ainda o desenvolvimento de modelos de referência credíveis para a interpretação e a previsão do seu comportamento com o intuito de se tomarem, quando necessárias, decisões referentes às medidas a implementar, em termos de exploração, conservação, reabilitação ou demolição.

Para compreender o comportamento estrutural de uma barragem é necessário dispor de modelos que tenham em consideração os diferentes tipos de ações² que atuam na estrutura, tanto para condições de exploração normal da albufeira como para as situações excecionais.

A análise do comportamento estrutural deve ter em conta o tipo de obra, as ações a que está sujeita e ainda as propriedades dos materiais da própria obra e da envolvente em que está inserida. Por outro lado, as heterogeneidades da sua fundação e das zonas envolventes, assim como a suscetibilidade destas obras a diferentes tipos de ações (por

² Nas barragens de betão, as ações mais importantes são as gravíticas (pesos próprios) e também as que se relacionam com as variações do nível da água a montante e a jusante, e com as variações de temperatura do ar e da água, entre outras.

exemplo, diferentes condições ambientais e de exploração), leva a afirmar que a análise do comportamento deva ser efectuada obra a obra, tendo sempre em conta todas as variáveis intervenientes.

A diversidade de fatores envolventes e a complexidade do comportamento resultante podem, em parte, ser analisados pelos especialistas a partir de um adequado sistema de observação e da análise das respectivas grandezas observadas.

Uma vez instalado o sistema de observação adequado aos cenários mais prováveis de acidente e incidente para cada tipo de obra, assim como para a deteção das deteriorações mais comuns, é possível, graças à observação continuada de cada grandeza, identificar e acompanhar a evolução de possíveis cenários. A título exemplificativo e para barragens do tipo abóbada, apresenta-se a importância que algumas grandezas têm no diagnóstico e na tomada de decisão, (Ramos 2004):

- a perda de resistência mecânica da fundação, designadamente na zona dos rins, ou a cedência de apoio nestas zonas ou nos encontros, pode originar deslocamentos não elásticos no contato e manifestar-se também nos deslocamentos da superestrutura;
- a deterioração da cortina de impermeabilização, a erosão ou lixiviação de materiais de preenchimento das fraturas e a colmatação da drenagem têm reflexo nos caudais e subpressões, podendo também influenciar os deslocamentos, quer ao nível do contato, quer na superestrutura;
- a perda de continuidade estrutural, grave em barragens abóbada, manifesta-se nos deslocamentos relativos entre as superfícies das juntas de contração, tendo em princípio também influência nos deslocamentos da superestrutura;
- a degradação por reações químicas e a degradação das argamassas e caldas de ligação por lixiviação, ao diminuir a rigidez estrutural, pode, em casos de deterioração muito pronunciada, influenciar os deslocamentos da superestrutura. As reações de carácter expansivo podem ser particularmente gravosas em barragens abóbada, face à grande hiperestaticidade destas estruturas. Assim, no que respeita ao corpo das barragens, deve ser prevista a medição de deslocamentos horizontais, deslocamentos verticais e deslocamentos relativos entre as faces das juntas de contração;
- a medição dos deslocamentos horizontais e verticais deve ter em conta que nestas obras, mais uma vez face à exigência de continuidade estrutural, é de interesse a

obtenção das deformadas da estrutura, quer segundo os arcos, quer segundo as consolas. Por outro lado, a articulação entre medições de deslocamentos horizontais e relativos entre as faces das juntas de contração, deve agora tirar partido do comportamento tridimensional da estrutura;

Em termos de comportamento estrutural, a avaliação das condições de segurança é efectuada a partir da comparação das observações efectuadas com os valores correspondentes determinados com base em modelos de previsão desse comportamento, como é o caso dos modelos de IQ.

2.2. Interpretação do comportamento observado com base em modelos de interpretação quantitativa

Os modelos de interpretação quantitativa (IQ) utilizados na análise e interpretação do comportamento observado na estrutura baseiam-se na determinação dos parâmetros de um modelo de comportamento que, para cada efeito observado, relaciona as observações das solicitações predominantes – pressão hidrostática e variações de temperatura – com a grandeza observada (Gomes 1981; Leger e Leclerc 2007, Mata 2011; Mata *et al.* 2013).

Em geral, os modelos utilizados na previsão de uma determinada grandeza, para os diversos efeitos associados a uma dada época de observação i e num determinado ponto, estão relacionados por uma expressão do tipo

$$\delta(h, \theta, t) = \delta_h(h_i) + \delta_\theta(\theta_i) + \delta_t(t_i) + k + \varepsilon_i \quad (1)$$

em que

- $\delta(h, \theta, t)$ 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;
- $\delta_h(h_i)$, $\delta_\theta(\theta_i)$, $\delta_t(t_i)$ são, respectivamente, as parcelas daquela grandeza que correspondem ao efeito elástico do nível de água na albufeira, ao efeito elástico da temperatura e ao “efeito do tempo” na i ésima observação;
- k =constante corresponde à diferença entre valores observados e calculados no início do período de calibração;
- ε_i corresponde ao resíduo da i ésima observação, dado pela diferença entre o valor estimado e o valor observado.

A parcela da resposta estrutural correspondente ao efeito da pressão hidrostática, δ_h , é usualmente representada através de funções polinomiais que são função da altura de água acima da fundação, h , como se pode observar na Eq.2.

$$\delta_h(h) = \beta_1 \times h + \beta_2 \times h^2 + \beta_3 \times h^3 + \beta_4 \times h^4 \quad (2)$$

A parcela da resposta estrutural relativa ao efeito da variação térmica é proporcional à variação da temperatura ambiente, amortizada e desfasada em função da espessura da secção. A resposta térmica é considerada instantânea relativamente ao campo térmico da obra mas com um desfasamento de fase quando comparado com a temperatura do ar. Nos modelos de interpretação quantitativa usualmente utilizados, o efeito térmico, δ_θ , é representado com base em funções sinusoidais de período anual, tal como na Eq.3,

$$\delta_\theta(d) = \beta_5 \times \sin(d) + \beta_6 \times \cos(d) + \beta_7 \times \sin^2(d) \quad (3)$$

onde $d = 2\pi j/365$ e j representa o número de dias desde o início do ano (1 de janeiro) e a data da observação ($0 < j < 366$).

Em condições de exploração normal, em que são bem conhecidas as variações das solicitações principais, uma grande parte dos “efeitos do tempo” pode ser justificada pelo comportamento diferido do betão. A parcela do efeito do tempo, t , é usualmente representada por polinómios, por funções logarítmicas (quando se pretende representar o efeito da fluência) e por funções tipo sigmoide quando se pretende representar o efeito das reações expansivas no betão.

Os coeficientes β são obtidos através da aplicação do método dos mínimos quadrados durante um período de calibração previamente estabelecido, ou seja, aplica-se a expressão (1) a um grande número de observações (onde são também conhecidos os termos associados às ações), fazendo-se posteriormente uma minimização do somatório dos quadrados da diferença entre os valores previstos e os observados (Swiss Committee on Dams 2003).

3. CASO DE ESTUDO – BARRAGEM DO VAROSA

A barragem do Varosa está situada no rio Varosa (bacia hidrográfica do Douro), próximo da cidade de Lamego, no distrito e Viseu. A obra entrou em exploração em 1976. É uma barragem de dupla curvatura, com arcos de definição parabólica, uma altura máxima acima da fundação de cerca de 76 m e aproximadamente 213 m de desenvolvimento no coroamento, Fig.1. A obra está fundada em formações graníticas. A albufeira ocupa uma área inundada de 69,6 hectares e tem uma capacidade útil de armazenamento de $1937 \times 1000 \text{ m}^3$, para o NPA (Nível Pleno de Armazenamento). A área da bacia hidrográfica é de 305 km^2 . A barragem é constituída por 13 blocos, separados por juntas de contração

verticais e dispõe de um descarregador de superfície do tipo canal de encosta com a estrutura de entrada inserida no bloco 12, no encontro da margem direita, e com restituição de salto de ski. O descarregador de superfície é dotado de 3 vãos controlados por comportas segmento. A barragem dispõe ainda de uma descarga de fundo, inserida no bloco 6, constituída por uma conduta metálica de secção retangular, com capacidade máxima de descarga de $32,2 \text{ m}^3/\text{s}$, (EDP 2006; LNEC 2013).

Em linha com as melhores práticas, o sistema de observação da barragem do Varosa permite a observação das principais ações, a caracterização das propriedades reológicas, térmicas e hidráulicas dos materiais; e a caracterização da resposta estrutural.



Fig. 1 - Vista de jusante da barragem do Varosa

Para além da recolha manual de dados, é feita uma recolha automática de dados (RAD) num subconjunto seleccionado de dispositivos de observação, contemplando as grandezas relacionadas com as ações (nível da água da albufeira, temperatura do ar e subpressões na fundação) e com as respostas térmica, estrutural e hidráulica (deslocamentos de pontos da barragem e da fundação, movimentos de junta, temperaturas no betão e caudais). No caso de estudo é analisada a variação do deslocamento horizontal (na direcção radial), medida na base FP1-264m, Fig. 2.

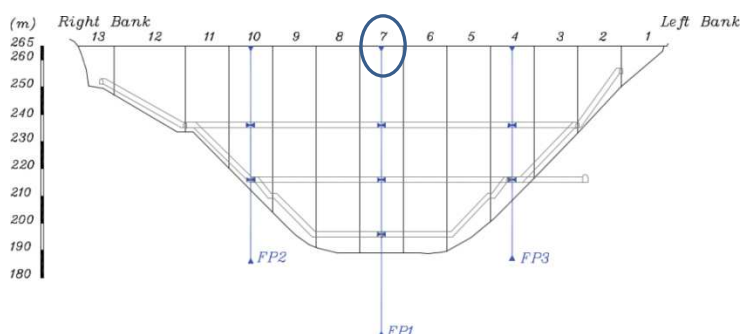


Fig. 2 - Localização da base de coordenómetro FP1-264m do fio de prumo FP1

Os dados analisados compreendem o período entre novembro de 2012 e abril de 2015, resultando em mais de 16900 observações por variável. As evoluções do nível de água na albufeira, da temperatura do ar e do deslocamento horizontal na direção radial, na base FP1-264m, são apresentadas na Fig.3. Os espaços “vazios” do gráfico são consequência de falhas no funcionamento do *datalogger*.

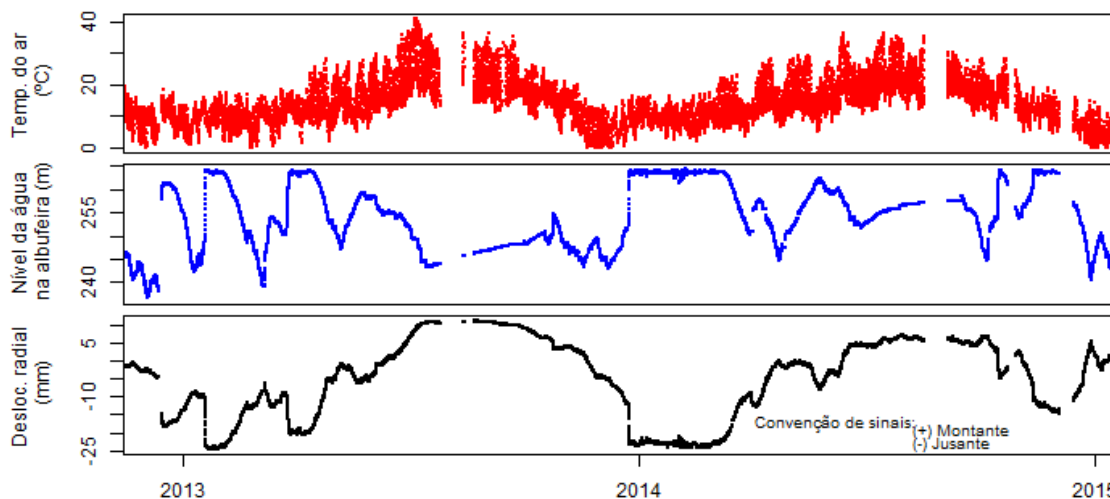


Fig. 3 - Evolução do deslocamento radial no FP1-264m, do nível de água na albufeira e da temperatura do ar ao longo do tempo

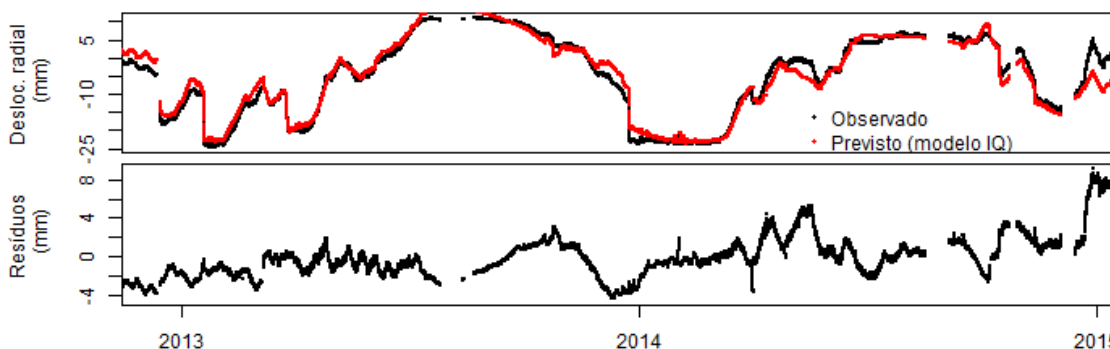


Fig. 4 - Deslocamento radial no FP1-264m ao longo do tempo: valores observados, valores previstos e resíduos

O modelo de IQ com melhor desempenho para a previsão dos deslocamentos radiais medidos no FP1-264m, $y_{QI, FP1-264m}$ é obtido através da soma do termo referente ao efeito da pressão hidrostática, $\beta_4 \times h^4$ (onde h é a altura de água da albufeira e pode variar entre 0 e 71 m) e os termos relativos ao efeito da temperatura, $\beta_5 \times \sin(d) + \beta_6 \times \cos(d)$, para representar o efeito da onda térmica anual. O efeito do tempo não mostrou ser importante durante o período de tempo analisado pelo que não foi considerado no modelo de IQ. Os

coeficientes da regressão obtidos são: $\beta_4 = -3,8188 \times 10^{-7}$, $\beta_5 = -3,0163$, $\beta_6 = -4,5356$, e $k = -0,5940$; tendo-se obtido o modelo de IQ apresentado através da Eq.4,

$$y^{QI, FP1-264m} = \beta_4 \times h^4 + \beta_5 \times \sin(d) + \beta_6 \times \cos(d) + k \quad (4)$$

Os resíduos foram obtidos através da diferença entre os valores observados e os valores obtidos a partir do modelo de IQ. Os resíduos, apresentados na Fig. 4, contêm informação que não é possível explicar através do modelo de IQ.

4. METODOLOGIA

A metodologia proposta para explicar a resposta estrutural (que no caso em estudo consiste na variação diária dos deslocamentos horizontais) resultante da variação diária da temperatura tem como base a aplicação de transformadas *wavelet*. O objetivo é extrair informação contida nos resíduos obtidos a partir dos modelos IQ, nos quais o efeito térmico é geralmente representado por uma onda térmica anual, e que não consideram o efeito da onda térmica diária. O método proposto consiste: i) na análise dos valores observados com uma periodicidade horária (só possível com a utilização de sistemas de recolha automática de dados) e ii) na análise dos resíduos resultantes do modelo de IQ com base em transformadas *wavelet*, com o objetivo de avaliar se existe um padrão de comportamento na barragem que possa ser explicado pela variação diária da temperatura.

A transformada *wavelet* consiste na expansão de um sinal em uma série de pequenas ondas (*wavelets*) e são usualmente utilizadas na identificação de periodicidades dominantes em séries temporais não estacionárias que contêm energia em gamas de frequências distintas, (Daubechies 1990). Através da decomposição das variações da série temporal numa série de pequenas ondas locais, tanto a frequência como a amplitude das variações podem ser analisadas (Barford *et al.* 1992; Farge 1992; Torrence e Gilbert 1998).

A transformada *wavelet* contínua de uma série temporal $x(t)$ é usualmente descrita como apresentado na Eq.4,

$$W_x(\tau, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi_{\tau, s}^*(t) dt \quad (4)$$

onde * representa o conjugado complexo. Assim, a transformada *wavelet* decompõe uma série temporal $x(t)$ em termos de certas funções de base (*wavelets*), $\Psi_{\tau, s}(t)$ de modo análogo à utilização de senos e co-senos na análise de Fourier. Estas funções de base são derivadas de uma *mother wavelet* $\Psi(t)$, Eq. 5,

$$\Psi_{\tau, s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (5)$$

Neste trabalho foi utilizada a *wavelet* de Morlet, que consiste numa onda plana representada por um função Gaussiana, porque proporciona um bom equilíbrio entre o tempo e localização de frequência (Grinsted e Jevrejeva 2004).

5. RESULTADOS OBTIDOS

Os resíduos analisados continham diversos intervalos sem dados, Fig. 4. De forma a poder efetuar a aplicação das transformadas wavelet, nos casos em que os intervalos sem dados eram pequenos (inferior a 4 horas) os dados foram reconstruídos por interpolação linear de forma a obter um padrão de comportamento mais completo, sem pôr em causa a fidelidade do padrão do comportamento observado. No entanto, nos casos em que os intervalos sem dados eram grandes, a reconstrução da série por interpolação de valores não foi efetuada porque poria em causa o padrão de comportamento real.

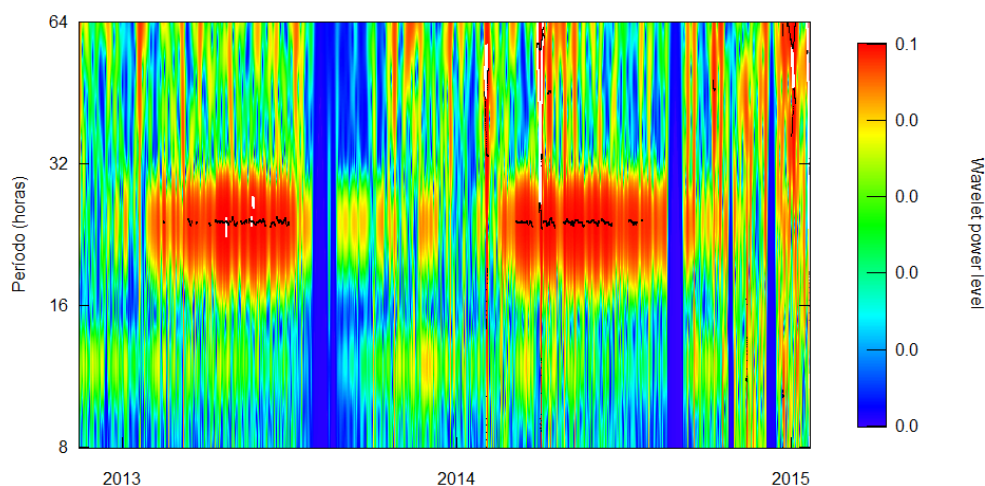


Fig. 5 - Espectro de potência dos resíduos

Os resíduos aparentam ser aleatórios pelo que se pressupõe que não exista nenhum efeito não considerado, Fig.4. Na Fig.5 é apresentado o espectro de potência, com remoção da tendência, para o período analisado. Uma onda bem definida com período igual a 24 h pode ser observada apenas em épocas quentes e não nas épocas frias. As bandas azuis com alinhamento vertical representam os períodos sem observações.

Após serem ampliadas duas partes distintas do espectro, nomeadamente nos períodos compreendidos entre 27-12-2013 e 03-01-2014 (Fig. 6(a)) e entre 24-06-2014 e 01-07-2014 (Fig.6(b)), verifica-se o efeito de uma variação diária na Fig. 6(b), nada se observando na Fig.6(a). Os resultados obtidos nas figuras 6(a) e 6(b) são consistentes com o padrão observado, sendo possível a reconstrução da série temporal nos períodos de época quente.

Uma explicação possível para este fenómeno, que apenas passou a ser possível caracterizar a partir da exploração de sistemas de recolha automática de dados, está relacionada com o facto das juntas de contração estarem mais fechadas nas épocas quentes. Este facto promove que a continuidade estrutural seja mais forte, resultando que a o efeito da variação diária da temperatura tenha maior influência na resposta estrutural do que nas épocas frias. Os valores esperados para os deslocamentos radiais, devidos à variação diária de temperatura, são de pequena magnitude dada a grande inércia térmica da obra.

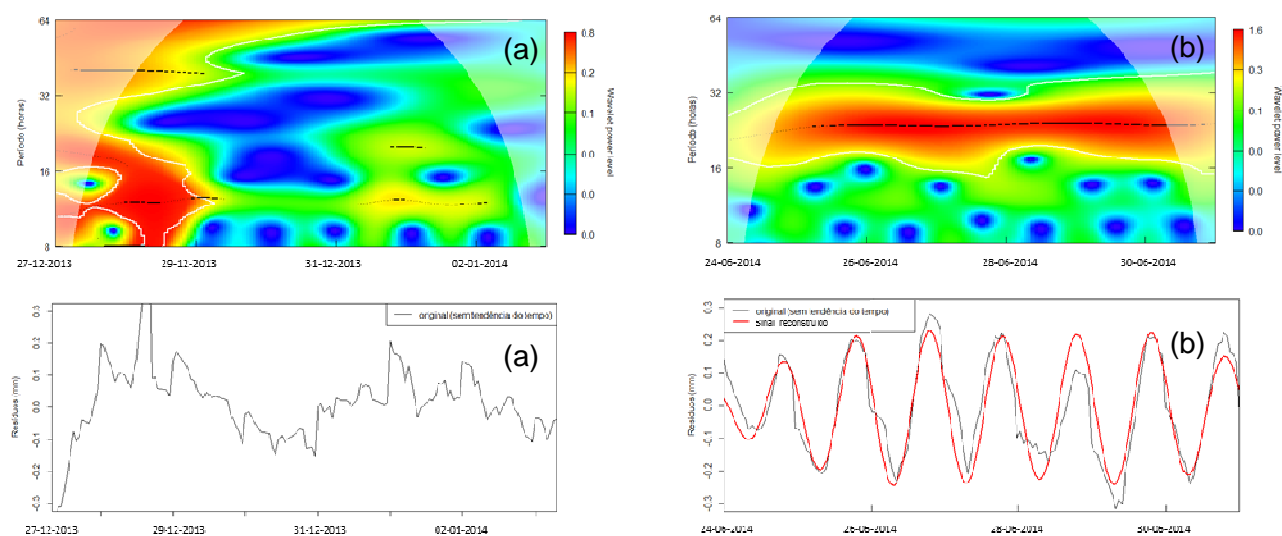


Fig. 6 - Espectro de potência dos resíduos nos períodos compreendidos entre 27-12-2013 até 03-01-2014 (a), e 24-06-2014 e 01-07-2014 (b)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo apresentou-se uma metodologia proposta para a análise do efeito da variação diária da temperatura na resposta da estrutural de uma barragem de betão. O método consiste na análise dos resíduos, resultantes dos modelos de interpretação quantitativa usualmente utilizados no controlo de segurança de barragens de betão, através a aplicação de transformadas de *wavelet*. A criação de valor da metodologia proposta reside no facto que a aplicação de transformadas permite extrair informação que não seria possível obter com os modelos de interpretação quantitativa.

As barragens de betão com comportamento normal apresentam, para a maior parte das grandezas utilizadas no controlo de segurança, uma relação linear entre a resposta estrutural e as principais ações. No entanto, o comportamento observado pode apresentar não linearidades no caso de aparecimento de dano na estrutura. Nestes casos, a evolução do dano e o comportamento da obra podem ser fortemente dependentes do tempo, pelo que o conteúdo no domínio da frequência pode alterar-se ao longo do tempo. Nesta medida, a

metodologia proposta poderá ser utilizada para avaliar o comportamento e a segurança estrutural de forma continuada.

Como desenvolvimentos futuros propõe-se a aplicação da metodologia apresentada em obras onde o efeito da variação da temperatura diária na resposta estrutural é maior, nomeadamente em barragens abóbada de casca delgada.

7. AGRADECIMENTOS

Agradece-se à EDP (Energias de Portugal), a autorização concedida para a publicação dos elementos referentes à barragem do Varosa.

8. REFERÊNCIAS

- Barford, L., Fazzio, R., Smith, D. 1992. An Introduction to Wavelets. Instruments and Photonics Laboratory. HPL-92-124.
- Daubechies. 1990. The wavelet transform time-frequency localization and signal analysis. IEEE Trans. Inform. Theory, 36, 961–1004.
- EDP. 2006. Estudos de segurança de barragens. Barragem do Varosa. Relatório quinquenal de comportamento estrutural (2000-2004). Porto.
- Farge, M. 1992. Wavelet transforms and their applications to turbulence. Annu. Rev. Fluid Mech., 24, 395–457.
- Gomes, A. 1981. Automatização das actividades de observação de barragens e análise quantitativa de resultados. Tese de especialista. LNEC. Lisboa.
- Grinsted, A., Moore, J., Jevrejeva, S. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series, Nonlin. Processes Geophys., 11, 561–566, doi:10.5194/npg-11-561-2004.
- Mata, J. 2011. Interpretation of concrete dam behaviour with artificial neural network and multiple linear regression models. Engineering Structures. Elsevier, 33(3):903-910.
- Mata, J., Tavares de Castro, A., Sá da Costa, J. 2013. Time-frequency analysis for concrete dam safety control: Correlation between the daily variation of structural response and air temperature. Engineering Structures. Elsevier, 48:8.
- Leger, P. e Leclerc, M. 2007. Hydrostatic, temperature, time displacement model for concrete dams. Journal of Engineering Mechanics, 133(3):267-277.
- LNEC. 2013. Barragem do Varosa. Inspeção à estrutura e ao sistema de observação efetuada em março de 2013. Nota Técnica 41/2013 LNEC, Lisboa.
- Pedro, J. 1987. A engenharia de barragens de betão em Portugal. Estruturas mais importantes e alguns estudos. Conferência Ibero-Americana sobre aproveitamentos hidráulicos. LNEC. Lisboa.
- R Development Core Team. 2008. “R: a language and environment for statistical computing R foundation for statistical computing”. Viena, Áustria. ISBN 3-900051-07-0, <<http://www.R-project.org>>.
- Ramos, J. 2004. Observação do comportamento estrutural de barragens de betão. Aspectos práticos. LNEC. Lisboa.
- Roesch, A. e Schmidbauer, H. 2014. WaveletComp: Computational Wavelet Analysis. R package version 1.0.
- Swiss Committee on Dams. 2003. Methods of analysis for the prediction and the verification of dam behaviour. 21st Congress of the International Commission on Large Dams. Montreal, Suíça.
- Torrence, C. e Gilbert, P. 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. American Meteorological Society.