

## MEDIÇÃO DE INCLINAÇÕES NUMA BARRAGEM DE BETÃO: RESULTADOS DE UM ENSAIO



Maria João Henriques

Investigador Principal  
LNEC  
Lisboa  
mjoao@lnec.pt



José Nuno Lima

Investigador Auxiliar  
LNEC  
Lisboa  
jnplima@lnec.pt



Sérgio Oliveira

Investigador Auxiliar  
LNEC  
Lisboa  
soliveira@lnec.pt

### SUMÁRIO

Foi efectuada uma experiência de medição da variação de inclinação da galeria superior na zona da consola central da barragem do Cabril. Foi utilizado um clinómetro de alta sensibilidade que integra um sensor de inclinação baseado num sistema optoelectrónico. Este instrumento ficou instalado no piso da galeria durante um período de dois dias, tendo sido registadas medições com uma frequência de amostragem de 1Hz. Durante o mesmo período foram registadas temperaturas do ar por um termómetro colocado junto ao paramento, num dos passadiços existentes do lado de jusante da barragem. Na presente comunicação são apresentados os resultados obtidos na perspectiva de averiguar a fiabilidade do instrumento para detectar as pequenas variações de inclinação, tendo-se detectado variações devidas à onda térmica diária e à cota de água da albufeira.

**Palavras-chave:** clinómetro, inclinação, onda térmica, barragem.

### 1. INTRODUÇÃO

Em Julho de 2008 decorreu, na barragem do Cabril, a primeira fase de um conjunto de testes destinados a verificar a capacidade de resposta de equipamentos de observação geodésica (taqueómetros e equipamento GNSS) e de software para a monitorização em contínuo de deslocamentos

desta barragem [1]. A disponibilização de um clinómetro por parte de um fabricante de equipamento geodésico fez com que o âmbito do teste fosse alargado e se tivesse realizado a medição de inclinações de modo a verificar a resposta do equipamento relativamente ao comportamento da estrutura ao longo do período de teste. Na presente comunicação, que se restringe à apresentação dos resultados do clinómetro, é efectuada a descrição do teste realizado e apresentados os resultados obtidos.

## 2. DESCRIÇÃO DO CLINÓMETRO

O clinómetro de alta sensibilidade (ver incerteza de medição no Quadro 1, [2]) utilizado nos testes foi o *Nivel 210*, um modelo biaxial, fabricado pela Leica Geosystems. O sistema de medição, que está integrado nos clinómetros *Nivel*, encontra-se também em teodolitos e taqueómetros do mesmo fabricante, integrado nos compensadores da inclinação do eixo principal. É basicamente composto por uma fonte luminosa, um sistema óptico (que compreende prisma, lente e superfícies reflectoras), um depósito de óleo e um sensor (Fig. 1, [3]).

Quadro 1. Incerteza de medição dos clinómetros *Nivel*

Gama de medição (",segundos sexagésimais)	Incerteza (")
[ -310, 310 ]	1
[ -520, -310 [ ] 310, 520 ]	3
[ -610, -520 [ ] 520,610 ]	10

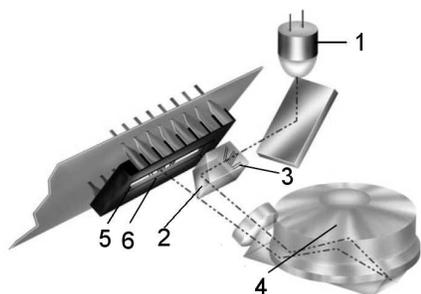


Figura 1 – Esquema do compensador.

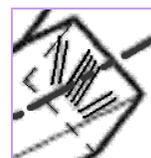


Figura 2 – Pormenor do prisma.

De acordo com [3]<sup>1</sup>, a forma de medir a inclinação é a seguinte (ver Fig. 1): um raio de luz, emitido por uma fonte de LED (1), é reflectido na direcção de um prisma (2). Este tem impresso, numa das faces, um padrão formado por vários segmentos de recta (3, ver pormenor na Fig. 2). A luz é refractada na direcção de um depósito (4) que contém óleo de silicone, um óleo que é térmica e quimicamente estável, muito pouco tóxico, e que transmite eficientemente luz na banda do visível. A superfície deste, como a de qualquer líquido em equilíbrio, está horizontal. Um espelho situado na base do líquido e a superfície do óleo fazem com que a luz seja reflectida duas vezes na superfície do óleo sendo, por fim, projectada na direcção de um vector de sensores acoplados (5) que convertem a luz em energia

<sup>1</sup> O sistema de medição de inclinação do Nivel 210 é igual à do taqueómetro TS30, pelo que se consultou documentação e se apresentam esquemas relativos ao compensador deste último instrumento

através da transformação de fótons em carga eléctrica (CCD array – *charged coupled device array*). Um sistema de leitura, associado a células fotoeléctricas, determina a posição das imagens dos traços (6) pela detecção das células não iluminadas.

Para determinar a inclinação é necessário que o sistema de reconhecimento de imagens determine a posição dos traços a qual é comparada com uma posição considerada de referência. Esta posição de referência traduz-se por valores que indicam a posição dos segmentos quando o clinómetro está horizontal. A inclinação é medida segundo duas componentes ortogonais. Uma destas componentes é determinada a partir do afastamento da zona central do padrão em relação ao valor de referência (componente L – Fig. 3); a componente ortogonal à anterior é determinada a partir do afastamento entre as linhas inclinadas (componente T – Fig. 3). Um único sensor mede, em simultâneo, as duas componentes da inclinação. Na Fig. 3, o esquema superior representa a posição de referência dos segmentos, enquanto o esquema inferior representa a posição destes quando o clinómetro não está horizontal; a barra horizontal representa o vector de sensores CCD; os círculos menores representam os pontos de intersecção entre os segmentos e o vector CCD; os círculos maiores, o centro de cada um dos três conjuntos de segmentos.

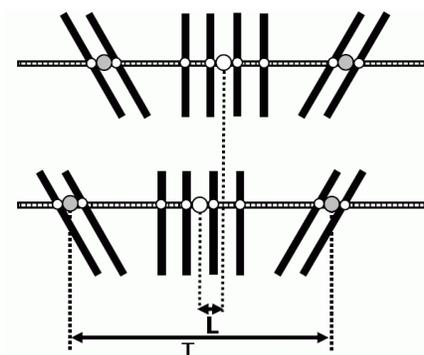


Figura 3 – Medição das duas componentes, L e T, da inclinação.

### 3. ENSAIO: LOCAL DE REALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO

O ensaio de medição da inclinação decorreu na galeria superior da barragem do Cabril, uma barragem de betão do tipo abóbada, situada no rio Zêzere. O clinómetro Leica *Nivel 210* foi colocado sobre uma base dotada de parafusos nivelantes instalada num pequeno pilar situado no centro da galeria (Fig. 4), ou seja, na consola central.



Figura 4 – Instalação do clinómetro: programação do computador.

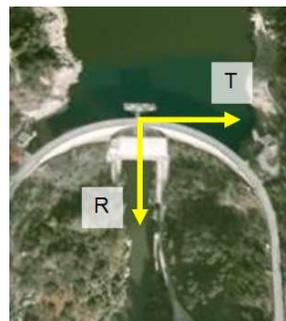


Figura 5 – Orientação do referencial “Radial-Tangencial”.

A consola central da barragem tem 132 m de altura, variando a espessura de um máximo de 20.2 m na base, junto ao soco, até 4.5 m um pouco abaixo do coroamento, sendo que, no topo, alarga até uma espessura de 8.3 m, na cota máxima (Fig. 6). O alargamento no topo surgiu em virtude da necessidade de construção de uma estrada que ligasse as povoações de Pedrógão Grande e Pedrógão Pequeno. O projecto inicial desta barragem não contemplava o actual coroamento [4], tendo havido a necessidade de alterar o projecto inicial já na fase de construção, quando já não era possível modificar a forma e dimensões ao nível médio e inferior da estrutura. Devido à maior espessura, o coroamento é mais rígido, o que originou o aparecimento de fissuração horizontal nos arcos superiores do paramento de jusante, situação esta detectada logo no início da exploração e que se manteve, mesmo depois de importantes obras de reabilitação realizadas na década de 1980.

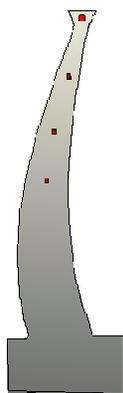


Figura 6 – Corte pela consola central.



Figura 7 – Vista da zona superior da barragem.

O registo dos dados do clinómetro foi efectuado num computador portátil, através da aplicação Leica GNSS QC, tendo-se registado as duas componentes da inclinação e a temperatura com uma frequência de amostragem de 1 Hz, durante de cerca de dois dias (entre 2 e 4 de Julho de 2008). O clinómetro ficou orientado de forma que os eixos ficassem coincidentes com as direcções radial e tangencial naquele ponto (Fig. 5). Também durante o referido período estava instalado, no passadiço superior de jusante, um termo-hidro-barómetro digital Comet D4130 tendo as medições sido registadas automaticamente com uma periodicidade de 10 minutos. Durante os dois dias em que se realizaram os testes, um dos grupos de produção de energia eléctrica funcionou durante quatro períodos.

#### 4. RESULTADOS

Os valores registados – componentes de inclinação, temperaturas no interior da galeria e no exterior, cota de água na albufeira e caudal médio turbinado – apresentam-se nas figuras 8 e 9. Na Fig. 8 apresentam-se as variações das duas componentes da inclinação (radial e tangencial) e, ainda, a temperatura no interior da galeria. No gráfico, variações positivas da inclinação correspondem, na direcção radial, a uma subida no lado de montante, enquanto na direcção tangencial traduzem uma subida da margem esquerda. Na Fig. 9 apresentam-se os valores da temperatura exterior, medida no passadiço, da cota de água e do caudal

turbinado. Em ambas as figuras indica-se ainda, em fundo sombreado, os períodos em que o grupo esteve a funcionar, e os instantes de nascimento e de ocaso do Sol, utilizando para tal os símbolos \* e ☾, respectivamente.

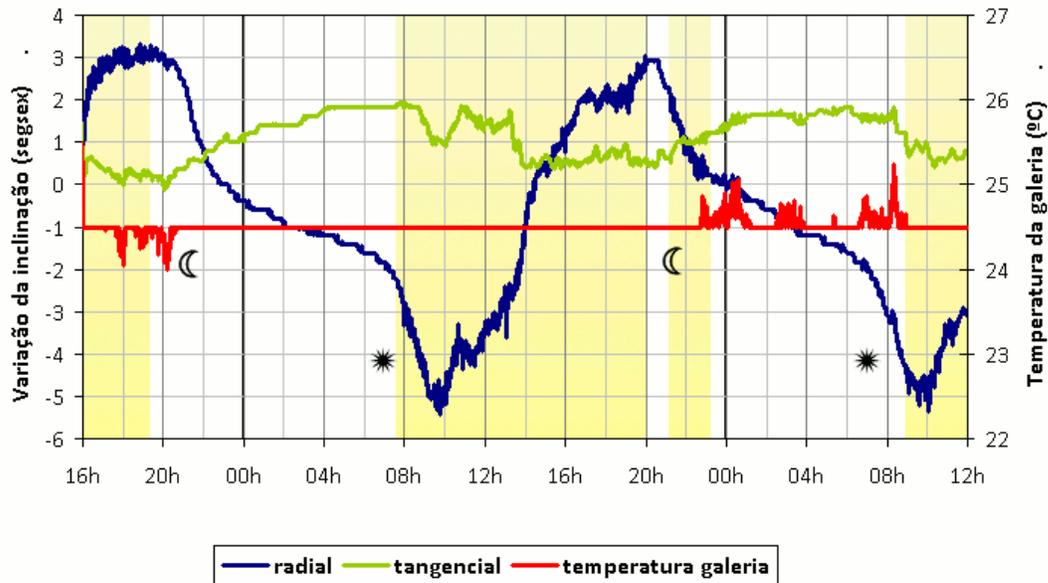


Figura 8 –Grandezas medidas pelo clinómetro.

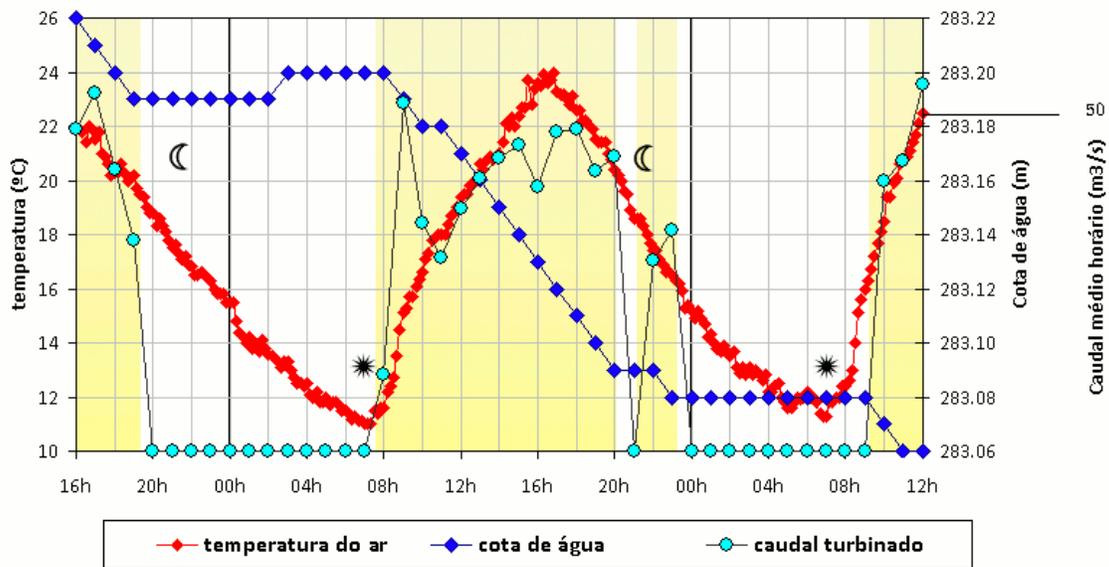


Figura 9 – Evolução das principais solicitações: temperatura do ar, cota de água na albufeira e caudal turbinado.

Pode-se constatar, através da análise sumária dos gráficos, uma forte correlação entre a variação de temperatura exterior e a variação de inclinação na direcção radial e, também, o efeito do grupo gerador de energia eléctrica, pois verifica-se uma maior dispersão dos valores da inclinação quando o grupo está em funcionamento.

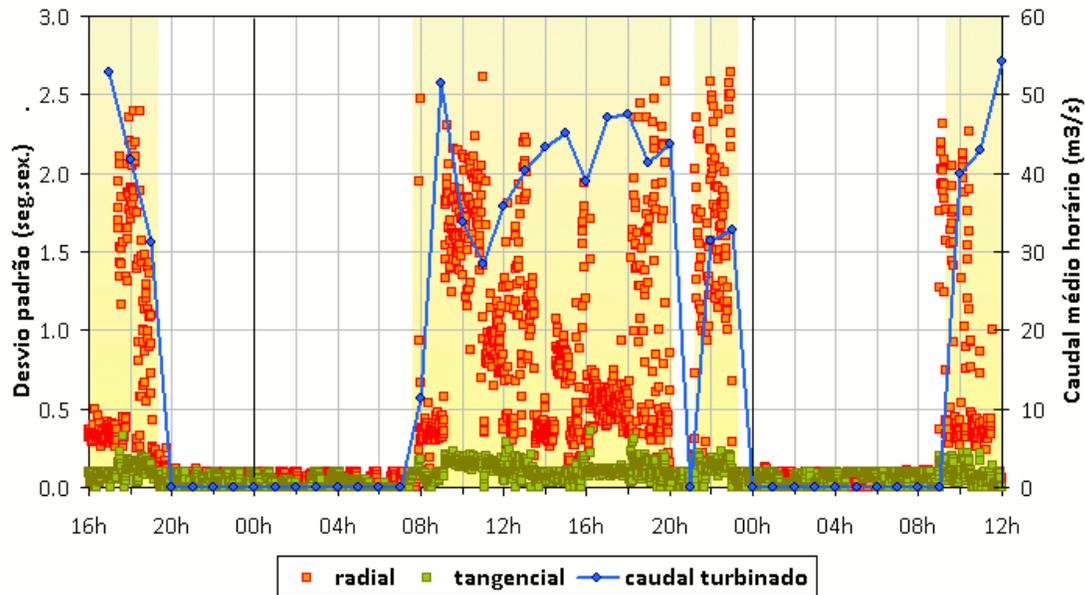


Figura 10 – Desvio padrão das inclinações medidas nas direcções radial e tangencial.

Foi ainda efectuada uma análise da dispersão dos valores registados, análise que incidiu sobre o desvio padrão de conjuntos de 60 registos, ou seja, sobre cada minuto de dados registados pelo clinómetro. Ao longo dos períodos de exploração ocorreram mudanças na operação do grupo gerador, ditadas por necessidades de produção de energia eléctrica variáveis. O gráfico contendo os valores dos desvios padrão apresenta-se na Fig. 10. Neste verifica-se que, nos períodos em que houve maior produção, há menor dispersão dos valores, o que indicia que a estrutura tinha menores vibrações.

## 5. COMPORTAMENTO DA ESTRUTURA

O comportamento diário da barragem, ao longo dos dois dias, foi muito semelhante, sendo especialmente notória a influência das variações diárias da temperatura exterior. O processamento conjunto da temperatura diária e da variação da inclinação na direcção radial permitiu verificar, por análise de um diagrama de correlação cruzado, a ocorrência de um desfasamento temporal de cerca de 3h 40min.

Na análise apresentada nesta comunicação foram analisadas separadamente as componentes radial e tangencial da inclinação. Para modelar as variações das referidas componentes foram considerados dois modelos de regressão (Eq. (1)) que englobam um termo que traduz uma variação linear com a cota de água, dois termos que traduzem uma variação harmónica temporal de período 24 horas e ainda dois termos que representam uma variação idêntica mas com período de 12 horas. Estes dois períodos foram identificados como relevantes através de uma análise de Fourier aplicada ao registo de dados durante um dia.

O modelo de regressão adoptado tem a seguinte expressão genérica

$$d(h,t) = ah + b_1 \cos \frac{2\pi t}{24} + b_2 \sin \frac{2\pi t}{24} + b_3 \cos \frac{2\pi t}{12} + b_4 \cos \frac{2\pi t}{12} + c \quad (1)$$

representando  $h$  a cota de água da albufeira e  $t$  a hora do dia. Os coeficientes  $a$ ,  $b_1$ , ...,  $b_4$  e  $c$  foram estimados por resolução de um sistema de 264 equações, sendo que cada equação corresponde aos valores registados a cada 10 minutos. Como os valores de inclinação foram registados com uma frequência de 1 Hz, para cada equação utilizaram-se médias de 10 minutos de registos.

## 5.1 Componente Radial

A análise dos dados registados permitiu constatar que as variações de inclinação da estrutura são essencialmente influenciadas pela variação da temperatura diária, verificando-se uma elevada correlação entre estas duas grandezas (coeficiente de correlação igual a -0.94). Para o período em análise a correlação com a cota de água é muito reduzida (coeficiente de correlação igual a -0.11) certamente porque nesse período a variação da cota de água é insignificante. Na Fig. 11 apresenta-se o gráfico da curva de regressão juntamente com os dados da variação da inclinação e da temperatura exterior.

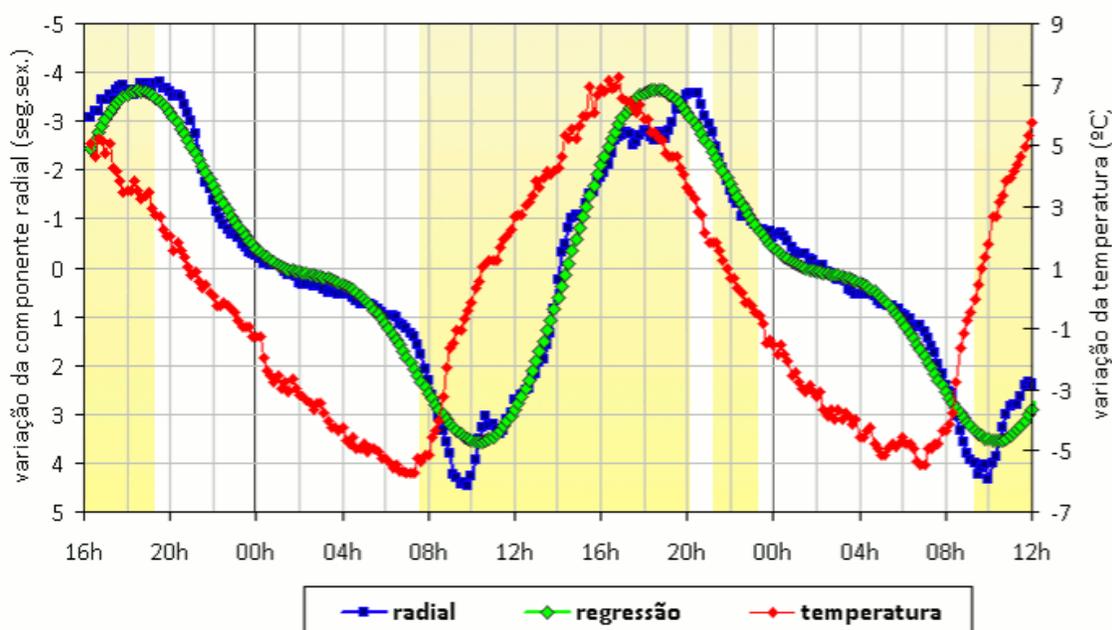


Figura 11 – Variação da componente radial e curva de regressão.

## 5.2 Componente Tangencial

Ao contrário da componente radial, a componente tangencial apresenta uma correlação mais evidente com a variação da cota de água do que com a temperatura exterior (coeficiente de correlação igual a -0.70 e -0.50, respectivamente). Na Fig. 12 apresenta-se o gráfico da curva de regressão juntamente com os dados da variação da inclinação, da temperatura exterior e da cota de água.

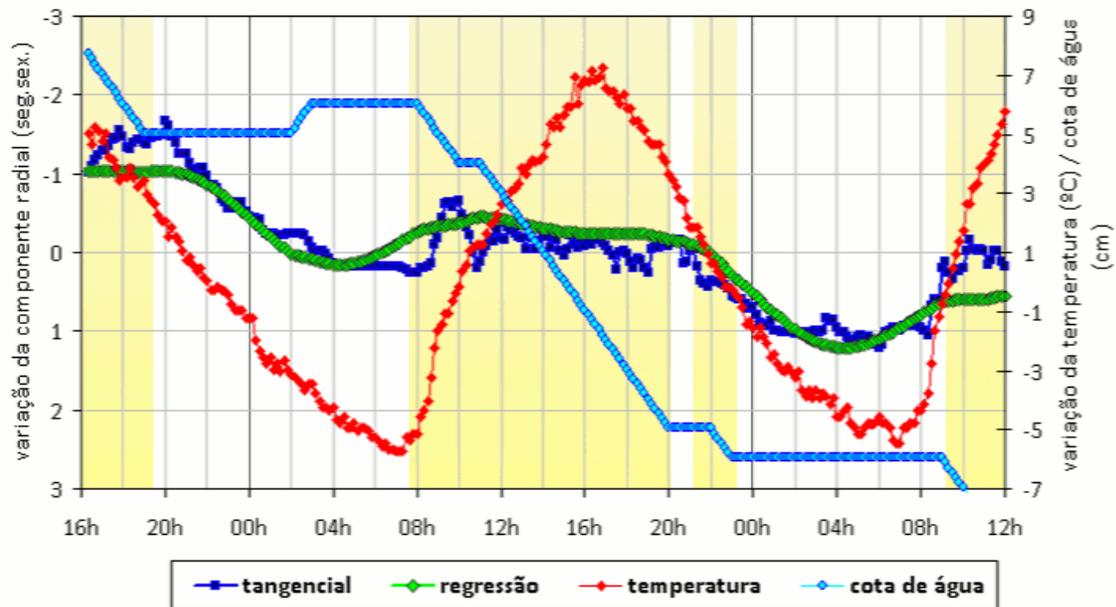


Figura 12 – Variação da componente tangencial e curva de regressão.

A variação da inclinação tangencial tem, nestes dois dias, uma componente de carácter progressivo, que traduz uma correlação com o decréscimo da cota de água.

## 6. CONCLUSÕES

O clinómetro Leica *Nivel 210* permitiu detectar a influência da temperatura e da cota de água no comportamento da barragem do Cabril. Foi ainda capaz de registar a vibração da estrutura induzida pelo funcionamento do grupo gerador de energia eléctrica. Detectou-se, no entanto, que existem, localmente, algumas variações das componentes da inclinação, de pequena amplitude, que não são explicadas pelos modelos de regressão utilizados.

Futuramente seria desejável poder instalar este equipamento durante um período de tempo mais alargado, se possível durante vários anos, de modo a detectar a influência de outras grandezas no comportamento, nomeadamente variações da temperatura anual, variações significativas da cota de água e eventuais efeitos do tempo a longo prazo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Leica Geosystems Portugal a cedência do equipamento instalado na barragem do Cabril (clinómetro *Nivel 210* e computador para registo de dados) assim como do software GNSS QC.

## REFERÊNCIAS

- [1] Henriques, M.J. et al. – Experiência de Monitorização em Modo Contínuo da Barragem do Cabril, em *Actas da 6ª Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia*. Ed. Colégio Nacional de Engenharia Geográfica da Ordem dos Engenheiros, Lidel, 2010.
- [2] Leica Geosystems – *Leica Nivel 210 / 220*. Leica Geosystems AG, 2005, 2p.

- [3] Leica Geosystems – *TS30 White Paper*. Leica Geosystems AG, 2009, 12p.
- [4] Mora Ramos, J. – *Deterioração e Reabilitação de Barragens de Betão. Aspectos Estruturais*, 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia e 2º Congresso de Engenharia de Moçambique, 2008.