

Estudos de repetibilidade e reprodutibilidade na análise do sistema de observação da barragem do Alto Lindoso



Juan Mata*

Bolseiro de Pós-Doutoramento,
Engenheiro Civil no
Departamento de Barragens de Betão
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa
jmata@lnec.pt



António Tavares de Castro

Investigador Principal, Chefe do Núcleo de
Observação do Departamento de
Barragens de Betão
Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa
tcastro@lnec.pt

SUMÁRIO

O sistema de observação de uma barragem de betão inclui o conjunto de dispositivos instalados para medição das grandezas selecionadas para o controlo de segurança da obra. Ao resultado da medição de uma grandeza, produto final de todo um processo experimental e analítico para a obtenção de um valor atribuível a essa grandeza, está sempre associado um grau de incerteza dependente de diversos fatores (instrumentos, operadores, meio ambiente, etc.). Neste trabalho apresenta-se uma metodologia que visa obter uma indicação acerca da qualidade dos resultados fornecidos por um sistema de observação, tendo-se adotado como exemplo a medição de deslocamentos radiais em bases de fios de prumo da barragem do Alto Lindoso.

Palavras-chave: Barragens de betão, monitorização, incerteza de medição, repetibilidade, reprodutibilidade.

1. INTRODUÇÃO

A tomada de decisões no controlo de segurança de barragens de betão é efetuada com base na análise de dados (Fig. 1), que correspondem, normalmente, a resultados de medições com instrumentos integrantes do sistema de observação e de inspeções visuais.

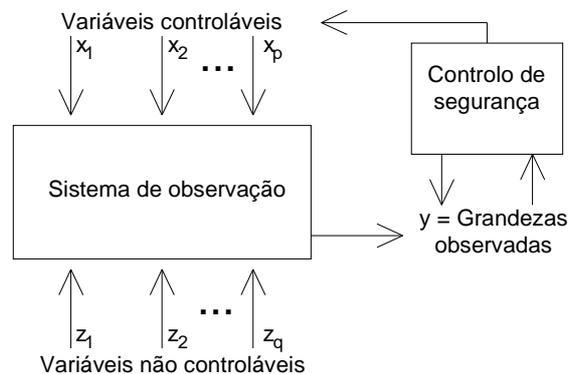


Figura 1. Interação das variáveis num processo de controlo de segurança de uma barragem.

As Normas de Observação e Inspeção de Barragens (NOIB) [1] definem o sistema de observação como “o conjunto de dispositivos instalados para medição das grandezas selecionadas para o controlo de segurança da obra, relativas às ações, às propriedades dos materiais e às respostas das estruturas e suas fundações”.

O resultado da medição de uma grandeza resulta de todo um processo experimental para a obtenção de um valor razoavelmente atribuível a uma grandeza [2]. O resultado da medição de uma grandeza (mensurada) é geralmente expresso como um único valor a que está associado algum grau de incerteza, que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos à mensurada em função de diversos fatores (instrumentos, operadores, meio ambiente, etc.). O estudo da evolução dos efeitos destes fatores ao longo do tempo permite avaliar a confiança (ou a incerteza) nas medições efetuadas. Quanto mais próximas forem as medições dos valores reais, maior a qualidade dessas medições [3] e mais confiança se poderá ter no sistema de medição, na avaliação do comportamento das obras através da comparação entre os resultados da observação e os resultados de modelos e nas tomadas de decisão seguintes.

Neste sentido, neste trabalho apresenta-se um estudo sobre a qualidade dos dados de um sistema de observação, tendo-se adotado como caso de estudo a medição de deslocamentos radiais, por meio de fio de prumo, na barragem do Alto Lindoso. Os resultados deste trabalho poderão, também, ser relevantes para o estabelecimento de comparações entre os dados obtidos pelas medições manuais e pelos sistemas de recolha automática de dados instalados nas mesmas obras, permitindo o controlo de qualidade periódica dos sistemas de medição.

2. A ANÁLISE DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

2.1 Introdução

A análise de um sistema de medição baseia-se no estudo estatístico das medições efetuadas com esse sistema [3].

Qualquer processo que envolva a medição de uma determinada grandeza tem associadas variações diversas, umas relacionadas com variações da própria grandeza e outras resultantes de erros e de incertezas no sistema de medição. Estas variações podem ser caracterizadas por parâmetros estatísticos, não negativos, que quantificam a dispersão dos valores da grandeza, como por exemplo, variâncias ou desvios-padrão. Assim, em regra considera-se que parte da variação total na medição é resultante da variação na grandeza e que outra parte é resultante do erro de medição ou da incerteza do sistema de medição. Matematicamente este facto pode ser expresso através da equação (1),

$$\sigma_{\text{Total}}^2 = \sigma_{\text{Grandeza}}^2 + \sigma_{\text{Sistema de medição}}^2 \quad (1)$$

em que σ_{Total}^2 é a variação total observada, $\sigma_{\text{Grandeza}}^2$ é a parcela associada à grandeza medida e $\sigma_{\text{Sistema de medição}}^2$ é a parcela devida ao sistema de medição.

Por sua vez, a parcela de variação (ou incerteza) devida ao sistema de medição pode ser separada em duas componentes de variância, designadas por *repetibilidade* e a *reprodutibilidade* (R&R).

A *repetibilidade* dos resultados de uma medição, que pode ser representada por uma variância, caracteriza a dispersão entre os resultados de medições sucessivas, da mesma mensurada, efetuadas nas mesmas condições de medição. Como condições de medições iguais entende-se mesmo procedimento de medição, mesmo operador, mesmo instrumento de medição usado nas mesmas condições, mesmo local e repetição num curto intervalo de tempo (Fig. 2).

A *reprodutibilidade*, também representada por uma variância, é definida como a dispersão dos valores médios das medições da mesma mensurada efetuada por diferentes operadores, nas mesmas condições (Fig. 2).

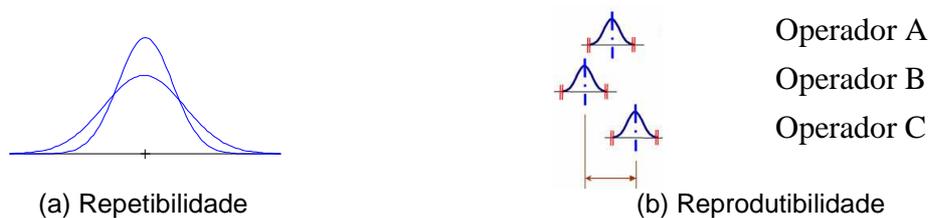


Figura 2. Esquemas de repetibilidade (a) e reprodutibilidade (b) em sistemas de medição.

Assim, a componente da variação devida ao sistema de medição pode ser obtida pela soma de duas parcelas que comportam os efeitos da repetibilidade e reprodutibilidade [4], tal como indicado na equação (2) (Fig. 3).

$$\sigma_{\text{Sistema de medição}}^2 = \sigma_{\text{R\&R}}^2 = \sigma_{\text{Repetibilidade}}^2 + \sigma_{\text{Reprodutibilidade}}^2 \quad (2)$$

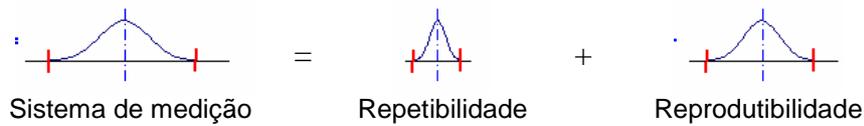


Figura 3. Componentes da variação devido ao sistema de medição.

Quanto menores as variações $\sigma^2_{\text{Repetibilidade}}$ e $\sigma^2_{\text{Reprodutibilidade}}$, maiores serão a repetibilidade e a reprodutibilidade dos resultados das medições, respetivamente.

Uma análise mais detalhada das componentes de variância existentes nos processos de medição pode ser efetuada através do método ANOVA apresentado na secção seguinte.

2.2 Método ANOVA para o estudo de repetibilidade e reprodutibilidade

Nas aplicações gerais, o método de análise de variância (ANOVA) baseia-se na separação da variância total de uma determinada resposta (variável dependente) em duas partes: a primeira devida ao modelo de regressão e a segunda devida aos resíduos (erros) [5]. Se forem efetuadas replicações de determinadas experiências, a ANOVA também permite decompor a variação dos resíduos numa parte relacionada com o erro do modelo e outra parte relacionada com o erro de replicação.

A avaliação de sistemas de medição, com base no método ANOVA, resulta na análise de medições realizadas nas mesmas condições, com exceção de dois fatores, cujos efeitos são considerados aleatórios – o Operador e a Grandeza [4,5]. Por Operador entende-se o indivíduo que realiza a medição e por Grandeza o objeto da medição. No caso da observação de barragens o Operador é o observador e a Grandeza é a grandeza medida pelo dispositivo de observação.

Neste tipo de estudos a $k^{\text{ésima}}$ medição (designada por y_{ijk}) realizada pelo Operador O_j à Grandeza P_i é descrita como a soma das seguintes termos, considerados aleatórios e independentes, equação (3):

$$y_{ijk} = x + P_i + O_j + PO_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

A variação atribuída a cada efeito aleatório é quantificada pela respetiva variância. As componentes de variância são designadas por σ_p^2 , σ_o^2 , σ_{po}^2 e σ_e^2 , que quantificam as variações devidas ao fator Grandeza, ao fator Operador, ao efeito da interação entre os fatores Grandeza e Operador, e à variável residual, respetivamente. Isto é,

- x – média das medições (média populacional);
- $P_i \sim N(0, \sigma_p)$ – efeito aleatório devido ao $i^{\text{ésimo}}$ nível do fator Grandeza;

$O_i \sim N(0, \sigma_O)$ – efeito aleatório devido ao $j^{\text{ésimo}}$ nível do fator Operador;

$PO_{ij} \sim N(0, \sigma_{PO})$ – efeito aleatório devido à interação entre os fatores Grandeza e Operador;

$\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma_E)$ – componente aleatória devida às repetições das medições, ou seja, a variável residual.

A variância total, σ_{Total}^2 , é dada pela equação (4):

$$\sigma_{\text{Total}}^2 = \sigma_P^2 = \sigma_O^2 + \sigma_{PO}^2 + \sigma_E^2 \quad (4)$$

Nos estudos de R&R a variância devida ao fator Grandeza, $\sigma_{\text{Grandeza}}^2$, é dada por σ_P^2 ; a variância devida à repetibilidade, $\sigma_{\text{Repetibilidade}}^2$, é dada por σ_E^2 , enquanto que a variância devida à reprodutibilidade, $\sigma_{\text{Reprodutibilidade}}^2$, é obtida pela soma de σ_O^2 e σ_{PO}^2 , equações (5) a (7) respetivamente.

$$\sigma_{\text{Grandeza}}^2 = \sigma_P^2 \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{Repetibilidade}}^2 = \sigma_E^2 \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{Reprodutibilidade}}^2 = \sigma_O^2 + \sigma_{PO}^2 \quad (7)$$

No estudo R&R proposto, as componentes $\sigma_{\text{Repetibilidade}}^2$ e $\sigma_{\text{Reprodutibilidade}}^2$ são as mais importantes, na medida em que permitem caracterizar a incerteza no sistema de medição. Do ponto de vista da análise do sistema de medição, a componente $\sigma_{\text{Grandeza}}^2$ fornece informação pouco importante, uma vez que engloba toda a informação relativa a grandezas do mesmo tipo mas medidas em locais diferentes.

Nos parágrafos seguintes explica-se o processo de cálculo para a obtenção das estimativas das componentes de variância referidas anteriormente.

Considere-se que p grandezas em locais distintos são objeto de n medições por o operadores, isto é, que cada um dos o operadores realiza n medições em cada um das p grandezas, e represente-se por y_{ijk} cada uma dessas medições, respeitando os índices i , j e k às grandezas, aos operadores e às medições de cada operador, respetivamente.

Em primeiro lugar, constrói-se uma matriz com os dados, tal como representado no Quadro 1.

Quadro 1. Matriz para o estudo R&R.

		Fator Operador			
		1	2	...	<i>o</i>
Fator Grandeza	1	$y_{111}, y_{112}, \dots, y_{11n}$	$y_{121}, y_{122}, \dots, y_{12n}$...	$y_{1o1}, y_{1o2}, \dots, y_{1on}$
	2	$y_{211}, y_{212}, \dots, y_{21n}$	$y_{221}, y_{222}, \dots, y_{22n}$...	$y_{2o1}, y_{2o2}, \dots, y_{2on}$

	<i>p</i>	$y_{p11}, y_{p12}, \dots, y_{p1n}$	$y_{p21}, y_{p22}, \dots, y_{p2n}$...	$y_{po1}, y_{po2}, \dots, y_{pon}$

Se se considerar:

- $y_{i..} = \sum_{j=1}^o \sum_{k=1}^n y_{ijk}$ – soma total das observações referentes à Grandeza *i*;
- $y_{.j.} = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^n y_{ijk}$ – soma total das observações efetuadas pelo Operador *j*;
- $y_{ij.} = \sum_{k=1}^n y_{ijk}$ – soma das observações na *ij*^{ésima} célula do Quadro 1, correspondente à soma das *n* observações efetuadas pelo Operador *j* à Grandeza *i*.
- $y_{...} = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o \sum_{k=1}^n y_{ijk}$ – soma total de todas as observações;
- $\bar{y}_{i..} = \frac{y_{i..}}{on}$ – média de todas as observações efetuadas à Grandeza *i*;
- $\bar{y}_{.j.} = \frac{y_{.j.}}{pn}$ – média de todas as observações efetuadas pelo Operador *j*;
- $\bar{y}_{ij.} = \frac{y_{ij.}}{n}$ – média das observações na *ij*^{ésima} célula do Quadro 1, correspondente à média de todas as observações efetuadas pelo Operador *j* à Grandeza *i*;
- $\bar{y}_{...} = \frac{y_{...}}{pon}$ – a média de todas as observações,

então o total da soma dos quadrados, SQ_{Total} , dado pelo método ANOVA, é obtido através da equação (8):

$$\begin{aligned}
 SQ_{Total} &= \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 = on \sum_{i=1}^p (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + \\
 &+ pn \sum_{j=1}^o (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 + n \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o \sum_{k=1}^n (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

O SQ_{Total} pode ser simbolicamente expresso através das componentes: SQ_P , SQ_O , SQ_{PO} e SQ_E , equação (9).

$$SQ_{Total} = SQ_P + SQ_O + SQ_{PO} + SQ_E
 \tag{9}$$

onde

$$SQ_P = on \sum_{i=1}^p (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 \quad - \text{ é a soma dos quadrados devido ao fator Grandeza;}$$

$$SQ_O = pn \sum_{j=1}^o (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 \quad - \text{ é a soma dos quadrados devido ao fator Operador;}$$

$$SQ_{PO} = n \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 \quad - \text{ é a soma dos quadrados devido à interação entre os fatores Grandeza e Operador;}$$

$$SQ_E = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^o \sum_{k=1}^n (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2 \quad - \text{ é a soma dos quadrados devido à variação residual.}$$

Os correspondentes graus de liberdade da decomposição são apresentados na equação (10):

$$pon - 1 = (p - 1) + (o - 1) + (p - 1)(o - 1) + po(n - 1) \quad (10)$$

Uma vez calculados os termos apresentados nas equações (8) e (9) interessa testar, através da ANOVA, as seguintes hipóteses acerca do efeito do fator Grandeza, do fator Operador e da interação entre eles:

$$H_0 : \sigma^2_{P_1} = \sigma^2_{P_2} = \dots = \sigma^2_{P_p} = 0 \quad \text{vs} \quad H_1 : \text{Pelo menos um } \sigma^2_{P_i} > 0$$

$$H_0 : \sigma^2_{O_1} = \sigma^2_{O_2} = \dots = \sigma^2_{O_o} = 0 \quad \text{vs} \quad H_1 : \text{Pelo menos um } \sigma^2_{O_j} > 0$$

$$H_0 : \sigma^2_{PO_{ij}} = 0 \quad \text{vs} \quad H_1 : \text{Pelo menos um } \sigma^2_{PO_{ij}} > 0$$

Se no último teste apresentado a hipótese nula for verdadeira, os efeitos devido à interação dos fatores Grandeza e Operador são considerados nulos.

Para testar que não existe efeito do fator Grandeza, efeito do fator Operador ou efeito da interação entre os fatores Grandeza e Operador, calcula-se a correspondente estatística de teste apresentada na coluna F_0 do Quadro 2. Cada um destes quocientes segue uma distribuição F , com um número de graus de liberdade igual ao número de graus de liberdade do numerador e do denominador, quando a hipótese nula (não existir efeito de grupo) é verdadeira.

A hipótese nula pode ser rejeitada se o valor de F obtido exceder o valor tabelado para um nível de significância¹ especificado, ou em alternativa, se o $p\text{-value}$ ² for menor do que um nível de significância especificado [6]. Por exemplo, no caso do teste relativo ao efeito da

¹ O nível de significância representa a probabilidade de se incorrer no erro de rejeitar H_0 quando esta hipótese é de facto verdadeira.

² O $p\text{-value}$ constitui uma medida do grau com que os dados amostrais contradizem a H_0 . Quanto menor for o $p\text{-value}$ maior será o grau com que a H_0 é contradita.

interação entre os fatores, se F_0 for superior a $F_{\alpha;(p-1)(o-1);po(n-1)}$ ³, a hipótese nula será rejeitada, concluindo-se que a interação entre os dois fatores é significativa.

Quadro 2. Matriz para o estudo R&R.

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Desvios Quadráticos Médios	F_0
Grandeza	SQ_P	$p - 1$	$MQ_P = \frac{SQ_P}{p - 1}$	$F_0 = \frac{MQ_P}{MQ_{PO}}$
Operador	SQ_O	$o - 1$	$MQ_O = \frac{SQ_O}{o - 1}$	$F_0 = \frac{MQ_O}{MQ_{PO}}$
Interação	SQ_{PO}	$(p - 1)(o - 1)$	$MQ_{PO} = \frac{SQ_{PO}}{(p - 1)(o - 1)}$	$F_0 = \frac{MQ_{PO}}{MQ_E}$
Erro	SQ_E	$po(n - 1)$	$MQ_E = \frac{SQ_E}{po(n - 1)}$	
Total	SQ_{Total}	$pon - 1$		

MQ_P , MQ_{PO} , MQ_O , MQ_E são os desvios quadráticos médios devidos ao fator Grandeza, à interação Grandeza-Operador, ao fator Operador e ao erro aleatório, respetivamente.

Salienta-se que, quando existe interação entre dois fatores, o efeito de um deles depende do outro. Na presença de uma interação significativa, o efeito isolado de cada um dos fatores pode ser mascarado pela interação e, conseqüentemente, os testes à significância da influência de cada um dos fatores podem ficar desprovidos de sentido. Por esta razão, deve-se fazer em primeiro lugar o teste relativo à interação, isto é, deve-se começar por testar a hipótese nula de que não existe interação entre os dois fatores. Assim, a primeira hipótese H_0 a testar é a que se refere à interação entre os fatores Grandeza e Operador. A sua rejeição significa que os fatores são não-aditivos, isto é, que os dois fatores interagem. Nesta situação tem pouco interesse testar as hipóteses H_0 referentes aos efeitos principais Grandeza e Operador considerados isoladamente.

As componentes de variância podem ser estimadas [5] através das equações (11) a (15):

$$\hat{\sigma}_P^2 = \frac{MQ_P - MQ_{PO}}{on} \tag{11}$$

$$\hat{\sigma}_O^2 = \frac{MQ_O - MQ_{PO}}{pn} \tag{12}$$

³ $F_{\alpha;(p-1)(o-1);po(n-1)}$ é uma distribuição Fisher-Snedcor com $(p - 1)(o - 1)$ e $po(n - 1)$ graus de liberdade para um nível de significância igual a α .

$$\hat{\sigma}_{PO}^2 = \frac{MQ_{PO} - MQ_E}{n} \quad (13)$$

$$\hat{\sigma}_{\text{Repetibilidade}}^2 = MQ_E \quad (14)$$

$$\hat{\sigma}_{\text{Reprodutibilidade}}^2 = \hat{\sigma}_O^2 + \hat{\sigma}_{PO}^2 \quad (15)$$

Se se considerar que não existe interação entre os dois fatores, o modelo apresentado na equação (3) pode ser ajustado, como indicado na equação (16), sendo o termo da interação omitido,

$$y_{ijk} = x + P_i + O_j + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (16)$$

e as estatísticas de teste obtidas por $F_0 = \frac{MQ_P}{MQ_E}$ e $F_0 = \frac{MQ_O}{MQ_E}$. Neste caso, as componentes de variância são definidas pelas equações (17) e (18).

$$\hat{\sigma}_P^2 = \frac{MQ_P - MQ_E}{on} \quad (17)$$

$$\hat{\sigma}_O^2 = \frac{MQ_O - MQ_E}{pn} \quad (18)$$

3. CASO DE ESTUDO

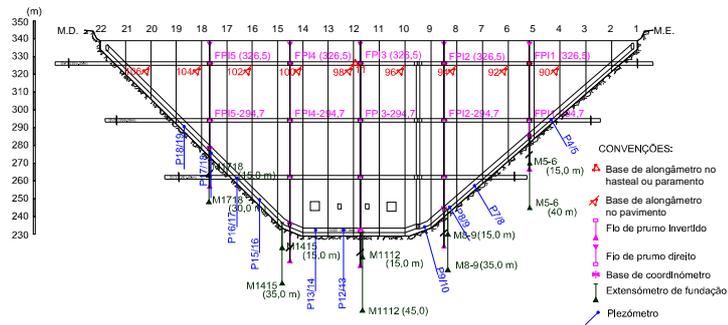
A barragem do Alto Lindoso está localizada no distrito de Viana do Castelo e tem como linha de água principal o rio Lima, na bacia hidrográfica do Lima (Fig. 4). É uma barragem abóbada em betão, de dupla curvatura, com arcos de diretriz parabólica, que descarrega os impulsos diretamente sobre a fundação, sem recurso a encontros artificiais ou soco, dada a forma do vale e as boas características da rocha de fundação [7].

A barragem tem uma altura máxima acima da fundação de 110 m e o seu coroamento, à cota 339 m, tem um comprimento total de 297 m. A espessura dos blocos varia entre 4 m, no coroamento, e 21 m na base. A cota do nível de pleno armazenamento (NPA) é 338 m e a cota do nível mínimo de exploração (NmE) é 280 m. A barragem cria uma albufeira com um volume útil de $350 \times 10^6 \text{ m}^3$, para a água á cota do NPA, e está equipada com duas descargas de fundo e um descarregador de cheias na margem direita com capacidades de vazão de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ e $2760 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

Para além da galeria geral de drenagem (GGD) que acompanha toda a inserção da abóbada na fundação, a barragem tem três galerias de visita horizontais (GV1, GV2 e GV3), às cotas 325 m, 293 m, e 261 m, respetivamente.



(a) Vista aérea



(b) Localização dos fios de prumo

Figura 4. Barragem do Alto Lindoso.

O sistema de observação da barragem inclui um conjunto de dispositivos para a medição de grandezas seleccionadas para o controlo de segurança da obra, relativas às ações, às propriedades dos materiais e às respostas das estruturas e das suas fundações.

A medição de deslocamentos, horizontais e verticais, é feita recorrendo a um sistema integrado que inclui fios de prumo, extensómetros de fundação e observação geodésica.

Os fios de prumo são usualmente instalados em furos que atravessam o corpo da obra e materializam uma vertical, através de um fio de aço de alta resistência, suspenso a partir de um ponto a cota elevada da estrutura (fio de prumo direito), ou fixado num ponto profundo da fundação (fio de prumo invertido). No primeiro caso, o fio, tensionado por ação de um peso de cerca de 600 N, permite obter nos pontos onde é acessível (galerias, plataformas, etc.) os deslocamentos relativos desses pontos em relação ao ponto de amarração. No segundo caso, o fio, tensionado por ação da impulsão da água contida num reservatório sobre um flutuador nela mergulhado, permite obter nos pontos onde é acessível os deslocamentos relativos desses pontos em relação ao ponto profundo da fundação. Neste último caso, se ponto de fixação for suficientemente profundo, pode ser considerado fixo, pelo que se pode afirmar que se obtêm deslocamentos absolutos.

Nos pontos de medição situados na estrutura são fixadas barras metálicas muito rígidas, de modo a poder estacionar sobre elas um dispositivo de medida amovível – coordenómetro ótico – que permite obter as coordenadas retangulares do fio no plano de medida (Fig. 5).



(a) Fio de prumo



(b) Base de coordenómetro



(c) Coordenómetro ótico

Figura 5. Método do fio de prumo.

3.1 Procedimento experimental

No estudo R&R efetuado consideraram-se os efeitos correspondentes ao fator Grandeza com $p=10$, os efeitos correspondentes ao fator Operador com $o=3$, o efeito da interação entre os fatores Grandeza e Operador, e a variação residual. A metodologia utilizada para cada tipo de instrumento, teve por base as seguintes etapas:

1. Escolha de uma amostra de 10 grandezas do mesmo tipo em locais distintos da barragem, representativa do sistema de observação (Fig. 4) [7]. Teoricamente os locais de medida não deveriam ser identificáveis pelos observadores. No entanto, como os locais são pontos fixos da barragem tal não foi possível.
2. Utilização de uma equipa de operadores constituída por três operadores, designados por A, B e C, considerados representativos da equipa de observadores do dono de obra.
3. Medição e registo, pelo operador A, das leituras radiais ao fio nos 10 locais (da grandeza 1 à grandeza 10). Repetição do processo com os operadores B e C sem que tenham conhecimento das leituras dos outros operadores.
4. Repetição do ciclo anterior usando uma ordem de medição inversa da efetuada no passo 3.
5. Repetição do passo 3.

No Quadro 3 apresentam-se, para cada tipo de instrumento, as medições efetuadas pelos 3 observadores na leitura radial ao fio nos 10 locais escolhidos (FPI1-326,5; FPI2-326,5; FPI3-326,5; FPI4-326,5; FPI5-326,5; FPI1-294,7; FPI2-294,7; FPI3-294,7; FPI4-294,7 e FPI5-294,7).

3.2 Medição de deslocamentos radiais medidos pelo método do fio de prumo

As diferenças entre as leituras observadas na época n e as observadas na época inicial i são obtidas através da equação (19).

$$\Delta LR_n = F_R [(LRF_n - LRF_i) - (LRC_n - LRC_i)] \quad (19)$$

onde,

ΔLR_n – é a diferença entre leituras na direção radial;

LRF_n, LRF_i – é a leitura radial ao fio na época n e na época inicial;

LRC_n, LRC_i – é a leitura radial ao cone na época n e na época inicial;

F_R – é o fator de convenção para os deslocamento radial. Valor que varia em função da posição da base de coordenómetro, e pode assumir os valores +1 ou -1.

O coordenómetro ótico utilizado nas medições está graduado em milímetros (mm) e a resolução é de 0,01 mm.

3.2.1 Leitura radial ao fio

No Quadro 3 são apresentados os valores das medições da leitura radial ao fio e na Fig. 6 estão representadas as amplitudes por operador das medições em cada local e as diferenças em relação à média global por operador e por série de medição. Verifica-se, através do Quadro 4, que a interação entre os fatores é significativa, rejeitando-se a hipótese nula de independência dos fatores Grandeza e Operador. Os resultados do estudo R&R estão no Quadro 5 e os pressupostos do modelo podem ser verificados na Fig. 7.

Quadro 3. Estudo R&R para a leitura radial ao fio.

Local	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operador A	5,87	2,01	1,44	3,88	2,81	7,92	7,85	7,98	10,50	2,85
	5,87	2,01	1,44	3,90	2,80	7,92	7,85	7,97	10,51	2,84
	5,86	2,01	1,45	3,90	2,80	7,93	7,86	7,97	10,51	2,84
Operador B	5,86	2,00	1,43	3,88	2,80	7,93	7,85	7,97	10,51	2,83
	5,86	2,00	1,43	3,88	2,80	7,93	7,85	7,96	10,51	2,84
	5,86	2,00	1,44	3,88	2,80	7,93	7,85	7,96	10,51	2,84
Operador C	5,88	2,00	1,44	3,87	2,81	7,92	7,84	7,96	10,51	2,85
	5,87	2,02	1,43	3,87	2,81	7,93	7,96	7,96	10,50	2,83
	5,88	2,01	1,44	3,87	2,82	7,94	7,86	7,96	10,51	2,85

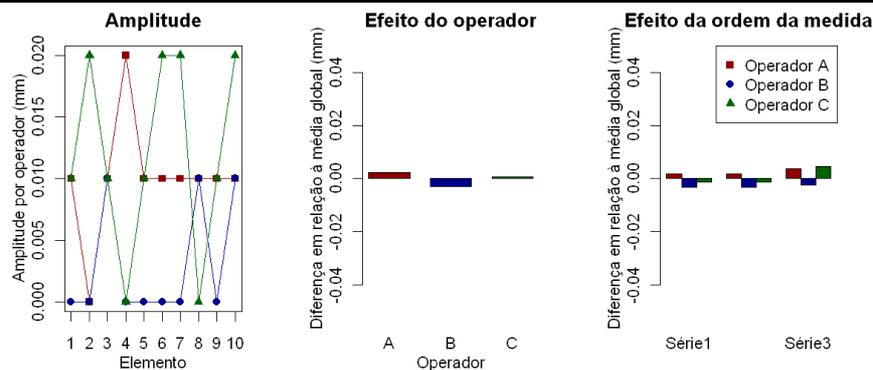


Figura 6. Variações nas medições das componentes radiais ao fio.

Quadro 4. ANOVA para o estudo R&R da leitura radial ao fio.

Fonte de variação	<i>SQ</i>	gl	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>	<i>F_{crit}</i>
Grandeza	792,1002	9	88,01113	2400304	$3,3 \times 10^{-163}$	2,040098
Operador	0,000447	2	0,000223	6,090909	0,003906	3,150411
Interação Grandeza-Operador	0,001953	18	0,000109	2,959596	0,000849	1,778446
Repetibilidade	0,0022	60	$3,67 \times 10^{-5}$			
Varição Total	792,1048	89				

Quadro 5. Resultados do estudo R&R para a componente radial ao fio.

Fonte de variação	$\hat{\sigma}^2$	$\hat{\sigma}$
R&R	0,000064	0,0080
Repetibilidade	0,000037	0,0061
Reprodutibilidade	0,000028	0,0053
Operador	0,000004	0,0020
Interação Grandeza-Operador	0,000024	0,0049
Grandeza	9,779002	3,1271
Variação Total	9,779067	3,1271

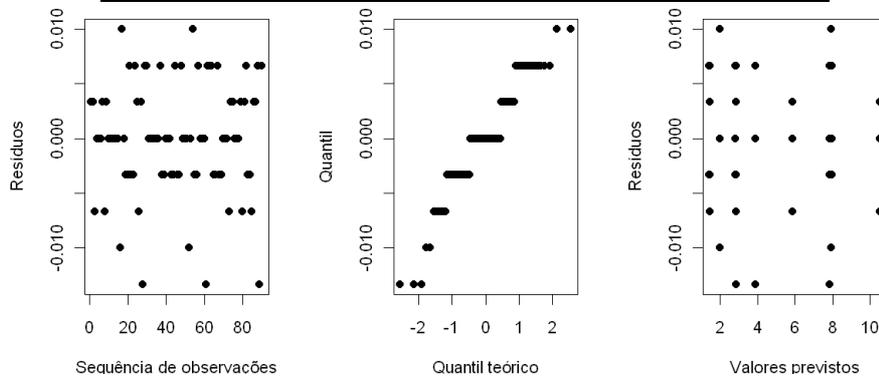


Figura 7. Análise dos pressupostos do modelo para as leituras radiais ao fio.

3.2.2 Leituras radial ao cone

No Quadro 6 são apresentados os valores das componentes radiais ao cone e verifica-se, através da análise ANOVA apresentada no Quadro 7, que para a hipótese nula de independência dos fatores Grandeza e Operador o valor de *p-value* é inferior ao nível de significância de 0,05, pelo que, a hipótese nula de independência dos fatores Grandeza e Operador é rejeitada.

Quadro 6. Estudo R&R para a leitura radial ao cone.

Local	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operador A	1,66	1,83	1,49	0,86	0,72	4,16	3,10	7,27	3,97	0,69
	1,65	1,82	1,48	0,85	0,72	4,16	3,10	7,27	3,97	0,69
	1,65	1,82	1,48	0,86	0,71	4,16	3,10	7,27	3,96	0,69
Operador B	1,65	1,82	1,48	0,85	0,72	4,16	3,10	7,27	3,97	0,69
	1,66	1,82	1,48	0,84	0,71	4,17	3,10	7,27	3,97	0,69
	1,65	1,82	1,48	0,85	0,71	4,16	3,10	7,27	3,97	0,69
Operador C	1,66	1,83	1,48	0,86	0,70	4,17	3,10	7,27	3,96	0,69
	1,67	1,82	1,47	0,86	0,70	4,16	3,10	7,27	3,97	0,69
	1,67	1,82	1,48	0,85	0,70	4,17	3,10	7,28	3,97	0,69

Quadro 7. ANOVA para o estudo R&R da leitura radial ao cone.

Fonte de variação	<i>SQ</i>	gl	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>p-value</i>	<i>F_{crit}</i>
Grandeza	354,5476	9	39,39418	2085574	2,3x10 ⁻¹⁶¹	2,040098
Operador	3,56x10 ⁻⁵	2	1,78x10 ⁻⁵	0,941176	0,395852	3,150411
Interação Grandeza-Operador	0,001187	18	6,59x10 ⁻⁵	3,490196	0,000139	1,778446
Repetibilidade	0,001133	60	1,89x10 ⁻⁵			
Variação Total	354,55	89				

No Quadro 8 são apresentados os estimadores das componentes de variância determinados através das equações (11) a (15). Na Fig. 8 estão representadas as amplitudes por operador das medições em cada local e as diferenças em relação à média global por operador e por série de medição da componente radial ao cone. Pela análise da Fig. 9, consideram-se válidos os pressupostos do modelo.

3.2.3 Deslocamento radial

Tirando partido da regra de propagação do erro e com base na equação (19) a componente de variância total para o estudo R&R para a medição do deslocamento radial em fios de prumo, é dada pela equação (20). Os intervalos de confiança são apresentados no Quadro 9.

$$\hat{\sigma}_{R\&R, Desloc. Radial}^2 = 2(\hat{\sigma}_{R\&R, RF}^2 + \hat{\sigma}_{R\&R, RC}^2) \quad (20)$$

Quadro 8. Resultados do estudo R&R para a componente radial ao cone.

Fonte de variação	$\hat{\sigma}^2$	$\hat{\sigma}$
R&R	0,000033	0,0057
Repetibilidade	0,000019	0,0043
Reprodutibilidade	0,000014	0,0038
Operador	0,000000	0,0000
Interação Grandeza-Operador	0,000016	0,0040
Grandeza	4,377124	2,0922
Variação Total	4,377157	2,0922

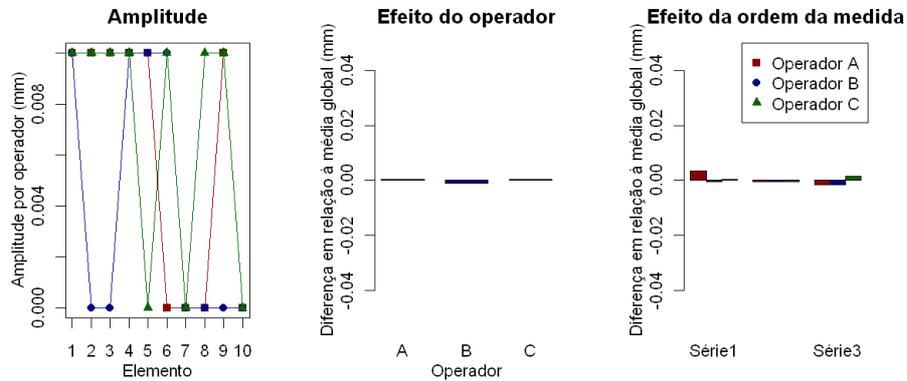


Figura 8. Variações nas medições das componentes radiais ao cone.

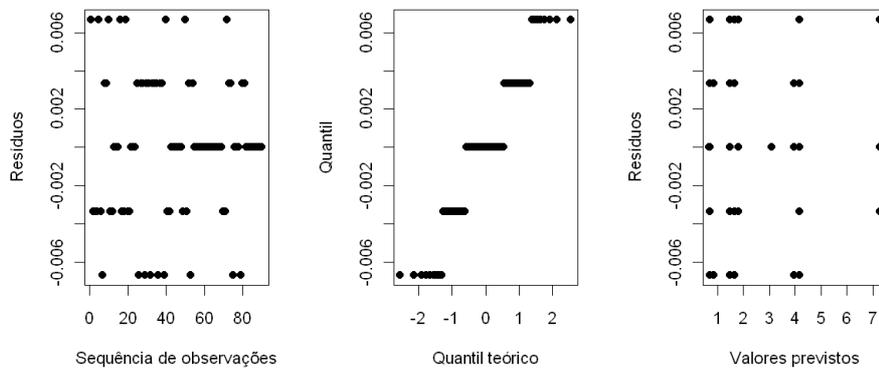


Figura 9. Análise dos pressupostos do modelo para as leituras radiais ao cone.

Quadro 9. Resultados do estudo R&R para os deslocamentos radiais.

Intervalo de confiança	$\hat{\sigma}_{R\&R}$	$2\hat{\sigma}_{R\&R}$	$3\hat{\sigma}_{R\&R}$
	68,26%	95,44%	99,74%
Varição do deslocamento radial (mm) devido ao sistema de medição	0,014	0,029	0,042

4. CONCLUSÕES

No processo de controlo de segurança de barragens é indispensável que os sistemas de medição sejam mantidos em boas condições de operação, através de verificações programadas aos equipamentos, métodos e operadores envolvidos. A metodologia apresentada neste trabalho permite determinar os fatores que, no sistema de medição, são responsáveis pelas principais variações.

No caso de estudo considerado o sistema de medição é adequado e satisfaz os requisitos necessários para as atividades de controlo de segurança da obra.

Os resultados deste estudo são o reflexo da adequabilidade e qualidade dos operadores, métodos e procedimentos de medição adotados pelo dono de obra em causa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa EDP-Energias de Portugal, que forneceu e autorizou a utilização dos dados utilizados nos procedimentos estatísticos abordados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] NOIB – Normas de observação e inspeção de barragens. Portaria n.º 847/93 de 10 de Setembro, 1993.
- [2] IPQ – Vocabulário Internacional de Metrologia – Guia ISO/IEC 99. Instituto Português da Qualidade. 3ª Edição. ISBN: 972-763-00-6. Ministério da Economia e Inovação, 2008.
- [3] Montgomery, D. C. – Introduction to statistical quality control. 3ª edição. ISBN: 0-471-30353-4. John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [4] Pereira, Z. L.; Requeijo, J. G. – Planeamento e controlo estatístico de processos. ISBN: 978-989-8022-65-3. FCT - Fundação da Faculdade de Ciências de Lisboa e Tecnologia da Universidade de Lisboa e Prefácio - Edição de livros e revistas, Lda, 2008.
- [5] Kazerouni, A. M. – “Design and analysis of Gauge R&R studies: Making decisions based on ANOVA method”. Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology. Volume 52. ISSN: 2070-3724, 2009.
- [6] Montgomery, D. C.; Runger, G. C. – “Applied Statistics and Probability for Engineers”. ISBN: 0-471-54041-2. John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [7] Leitão, N. A. S. – “Barragem do Alto Lindoso. Relatório de análise de comportamento”. Relatório 266/2009, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2009.