

## **A QUALIDADE DAS MEDIÇÕES DE DESLOCAMENTO RADIAL E TANGENCIAL PELO MÉTODO DO FIO-DE-PRUMO NO CONTROLO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DE BARRAGENS DE BETÃO**

L. Lages Martins, J. Mata, A. Silva Ribeiro

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

### **RESUMO**

A presente comunicação descreve a avaliação da qualidade das medições de deslocamento radial e tangencial em barragens de betão, obtidas pelo método do fio-de-prumo com recurso ao coordenómetro óptico como instrumento de medição, constituindo um elemento relevante na comparação com resultados provenientes de outros métodos e instrumentos de medição de natureza distinta utilizados no controlo da segurança estrutural.

A avaliação efectuada é suportada na determinação das incertezas de medição das mensurandas de interesse tendo em conta as fontes de incerteza que caracterizam as grandezas de entrada dos modelos matemáticos aplicáveis. A natureza linear destes modelos permite que o método GUM [1] constitua uma solução adequada para o cálculo da propagação das incertezas de medição. No processo de caracterização probabilística das grandezas de entrada destaca-se a quantificação das componentes de incerteza de repetibilidade e reprodutibilidade pelo método estatístico de análise de variâncias (ANOVA) [2].

### **1. Introdução**

A ocorrência de eventuais acidentes numa barragem de betão apresenta um elevado risco tendo em conta, sobretudo, as consequências humanas, materiais e ambientais que daí podem resultar. Deste modo, a segurança constitui uma preocupação permanente das entidades e organizações envolvidas em todas as fases da vida de uma barragem (projecto, construção, primeiro enchimento, exploração, abandono e demolição). Actualmente, é possível assistir a um crescente aumento do nível de exigência associado à segurança de barragens, em muitos casos, resultante da necessidade de extensão da vida útil destas infra-estruturas.

O controlo de segurança desempenha um papel fundamental neste contexto, tendo por objectivo a detecção atempada de eventuais processos de deterioração de modo a permitir a adopção de medidas correctivas e preventivas eficazes. Em Portugal, este processo possui um enquadramento legislativo definido pelo Regulamento de Segurança de Barragens [3], o qual estabelece a obrigatoriedade de definição de um Plano de Observação para todas as barragens existentes a nível nacional independentemente da fase de vida em que se encontram.

Considerando apenas a vertente de controlo de segurança estrutural, este documento define os aspectos essenciais das actividades de observação a efectuar numa obra, em particular, a definição do Sistema de Observação que assegure a medição das grandezas físicas representativas das acções, propriedades e respostas estruturais que caracterizam e influenciam o comportamento real da obra durante as fases de construção, primeiro enchimento ou exploração. O conhecimento experimental adquirido é essencial à detecção e acompanhamento de eventuais anomalias, permitindo julgamentos fundamentados sobre a segurança estrutural da obra, justificando e suportando o processo de tomada de decisões nesse contexto. Salienta-se, também, a relevância deste conhecimento no âmbito do desenvolvimento e validação de modelos de simulação (de natureza física ou computacional) do comportamento da obra, os quais constituem elementos centrais para estudos de cenários de risco.

A presente comunicação tem por objectivo avaliar a qualidade das medições de deslocamento radial e tangencial em barragens de betão, obtidas aplicando o método do fio-de-prumo e recorrendo ao coordenómetro óptico como instrumento de medição. A quantificação destas grandezas suporta a análise da resposta estrutural global ou localizada da obra (deformadas), conduzindo a uma melhoria do conhecimento do seu comportamento real e contribuindo, desta forma, para a garantia de segurança da infra-estrutura monitorizada.

## 2. Medição de deslocamento radial e tangencial pelo método do fio-de-prumo

As actividades de observação numa barragem de betão podem abranger a medição de múltiplas grandezas, nomeadamente, deslocamentos, movimentos relativos entre faces de juntas de contracção, caudais volumétricos, sub-pressões, extensões, tensões, nível da albufeira, temperatura, entre outras. No que respeita à medição de deslocamentos é possível destacar duas áreas: a medição de deslocamentos horizontais, por exemplo, com recurso ao método do fio-de-prumo ou métodos geodésicos de posição; e a medição de deslocamentos verticais mediante técnicas de nivelamento ou a utilização de extensómetros de fundação.

O presente documento incide sobre a medição de deslocamentos horizontais (nas direcções tangencial e radial) através do método do fio-de-prumo. Este método é suportado na materialização de uma linha vertical através de um fio de aço que atravessa o corpo da obra. A fixação de uma das extremidades do fio define uma das duas variantes possíveis para este método – fio-de-prumo direito ou fio-de-prumo invertido – conforme ilustrado na Figura 1.

Na primeira variante (fio-de-prumo direito), uma das extremidades do fio é fixada num ponto da obra com cota elevada enquanto que, na extremidade oposta, encontra-se um peso de, aproximadamente, 600 N, donde resulta o tensionamento do fio. Neste caso, os deslocamentos obtidos nos vários pontos de acesso ao fio-de-prumo (por exemplo, em galerias ou plataformas) são definidos relativamente ao ponto de fixação a cota elevada.



**Figura 1** – Método do fio-de-prumo direito e invertido (respectivamente à direita e à esquerda na Figura).

Na variante fio-de-prumo invertido, uma das extremidades do fio é fixada num ponto profundo da fundação da obra, estando sujeito a uma solicitação de tracção por acção da impulsão da água contida num reservatório que contém, no seu interior, um flutuador conectado ao fio-de-prumo. Caso o ponto de fixação na fundação da obra seja considerado fixo, o deslocamento medido pode ser assumido como absoluto.



**Figura 3** – Base do coordenómetro e cilindro.

Em ambas as variantes do método de medição, a concretização das medições das grandezas de entrada é efectuada com recurso a um instrumento de medição designado por coordenómetro óptico (*vide* Figura 2), composto por duas escalas graduadas analógicas (uma na direcção radial e outra na direcção tangencial) com o respectivo nónio associado.

No local da observação em obra é necessário assegurar a existência dos seguintes elementos apoiados em vigas individuais de elevada rigidez: base dedicada que garanta a fixação do coordenómetro óptico; e cilindro ou cone que materializem um ponto fixo da obra

relativamente à base do coordenómetro óptico concretizando-se, por esta via, a correcção necessária à utilização de coordenómetros distintos em diferentes campanhas de medição. Este último elemento contém marcações verticais que auxiliam o seu alinhamento tangencial ou radial com a mira óptica do coordenómetro.

O método e o instrumento de medição descritos anteriormente permitem acompanhar o deslocamento relativo entre o fio-de-prumo e o cilindro/cone durante toda a fase de observação da obra, desde a época inicial,  $i$ , até à época de interesse,  $n$ , determinando-se, quer o deslocamento radial,  $\Delta LR_n$ , quer o deslocamento tangencial,  $\Delta LT_n$ , mediante as expressões

$$\Delta LR_n = F_R [(LRF_n - LRF_i) - (LRC_n - LRC_i)], \quad (1)$$

$$\Delta LT_n = F_T [(LTF_n - LTF_i) - (LTC_n - LTC_i)], \quad (2)$$

onde:  $LRF_n$  e  $LRF_i$  correspondem às leituras radiais ao fio-de-prumo;  $LRC_n$  e  $LRC_i$  são leituras radiais ao cone ou cilindro;  $LTF_n$  e  $LTF_i$  representam as leituras tangenciais ao fio-de-prumo;  $LTC_n$  e  $LTC_i$  dizem respeito às leituras tangenciais ao cone ou cilindro. Conforme ilustrado na Figura 4, os factores de convenção associados ao deslocamento radial,  $F_R$ , ou tangencial,  $F_T$ , podem assumir valores unitários positivos ou negativos, consoante a posição da base de suporte do coordenómetro na zona de observação.

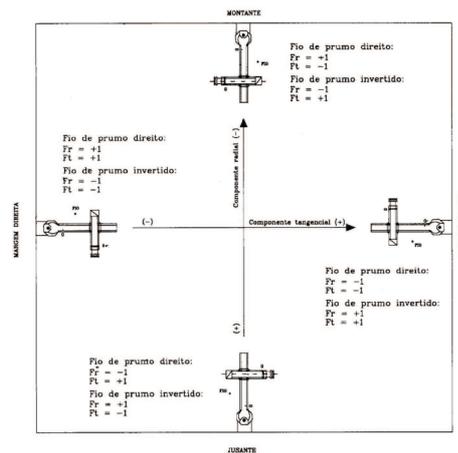


Figura 4 – Convenção de sinais das componentes radial e tangencial de deslocamento consoante posição da base de suporte do coordenómetro.

### 3. Caracterização probabilística das grandezas de entrada

A primeira fase do estudo visou promover a caracterização probabilística das grandezas de entrada mediante a identificação e quantificação dos limites de variação das componentes de incerteza, tendo em conta a especificidade do método (fio-de-prumo) e do instrumento de medição (coordenómetro óptico) adoptados. A concretização desta fase decorreu em duas etapas distintas.

A primeira etapa da primeira fase consistiu na determinação das componentes de incerteza de repetibilidade e reprodutibilidade segundo uma perspectiva frequencista (descrita no GUM [1] como incerteza do tipo A) e adoptando o método estatístico de análise das variâncias (ANOVA) [2]. A motivação para o estudo experimental destas componentes de incerteza decorre da influência dos operadores no processo de medição, nomeadamente, pela sua intervenção nas operações de montagem, focagem e alinhamento óptico entre o coordenómetro e o fio-de-prumo ou cilindro/cone e, ainda, por efectuarem as leituras das escalas analógicas incorporadas no referido instrumento de medição. Com efeito, estas medições são efectuadas em locais distintos, podendo ser obtidas por

diferentes equipas técnicas, constituindo fontes de incerteza particularmente relevantes para o processo.

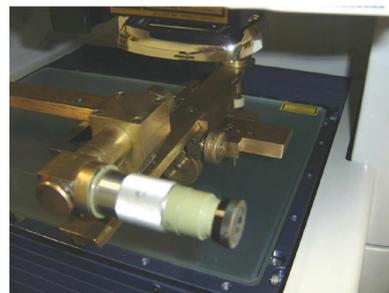
A amostra experimental foi constituída por medições das grandezas de entrada em dez locais de interesse distintos na barragem do Alto Lindoso com uma equipa de três técnicos de experimentação, efectuando cada um deles a repetição do processo de medição de forma independente. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 1.

**Quadro 1** – Resultados de repetibilidade e reprodutibilidade obtidos pelo método ANOVA.

Grandeza de entrada	LRF	LRC	LTF	LTC
Repetibilidade	0,006 1 mm	0,004 3 mm	0,005 2 mm	0,005 6 mm
Reprodutibilidade	0,005 3 mm	0,003 8 mm	0,003 3 mm	0,006 1 mm

Na segunda etapa da primeira fase estabeleceu-se a parametrização de funções densidade de probabilidade associadas às componentes de incerteza decorrentes do conhecimento prévio do método e do instrumento de medição. Esta parametrização seguiu a abordagem de inspiração bayesiana descrita no GUM [1] como incerteza do tipo B, tendo em consideração a experiência acumulada na realização de campanhas de observação do LNEC e de informação bibliográfica disponível.

Uma das componentes de incerteza identificadas refere-se à calibração do coordenómetro óptico que assegura a rastreabilidade das medições dimensionais ao Sistema Internacional de Unidades (SI) e que permite conhecer o seu nível de exactidão instrumental. Neste estudo foi considerada a incerteza de medição no ensaio de calibração efectuado pelo Laboratório Central de Apoio Metrológico do LNEC (LNEC/LCAM). Este laboratório do LNEC promoveu o estudo e desenvolvimento de método de ensaio dedicado ao instrumento de medição em análise, no qual se recorre a uma máquina de medição óptica com processamento digital de imagem (*vide* Figura 5) como padrão de referência dimensional.



**Figura 5** – Observação da escala graduada do coordenómetro em máquina de

Salienta-se que a avaliação da incerteza de medição associada à calibração não contempla a componente de incerteza atribuída à divisão das escalas graduadas que compõem o instrumento de medição, motivo que justifica a sua inclusão no balanço de incertezas tipo B pretendido na presente secção. Neste sentido, foi considerada a adopção de uma função densidade de probabilidade uniforme centrada num valor nulo e com limites de variação iguais  $\pm 0,005$  mm.

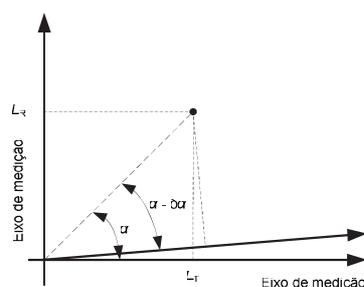
A utilização do coordenómetro óptico nas medições dimensionais nas direcções radial e tangencial pressupõe o cumprimento de uma condição de ortogonalidade entre eixos de medição. Atendendo à natureza mecânica do referido instrumento de medição cuja resolução pode atingir 0,01 mm, a existência de folgas entre os elementos que asseguram a conexão entre ambos os eixos e o conseqüente desvio de ortogonalidade, traduzido geometricamente nos respectivos desvios lineares

nas direcções radial e tangencial, constituem aspectos relevantes para a avaliação da incerteza de medição intrínseca ao coordenómetro óptico.

Neste âmbito, foi promovido o estudo e desenvolvimento de ensaio metrológico dedicado visando caracterizar o coordenómetro óptico no que respeita a um eventual afastamento da condição ideal de ortogonalidade entre eixos de medição. A concretização experimental desta tarefa foi efectuada no LNEC/LCAM e suportada no recurso a máquina de medição óptica com processamento digital de imagem. No conjunto de ensaios promovidos, o desvio máximo de ortogonalidade,  $\delta\alpha$ , encontrado correspondeu a 0,1º. A geometria do problema em análise, ilustrada na Figura 6, permite definir a expressão

$$\delta L = \sqrt{L_T^2 + L_R^2} [\cos \alpha - \cos(\alpha - \delta\alpha)] \quad (3)$$

que converte o referido desvio no respectivo desvio linear,  $\delta L$ .



**Figura 6** – Representação gráfica do desvio de ortogonalidade entre eixos de medição.

O conhecimento desta relação funcional e do desvio máximo de ortogonalidade permitiu quantificar, com base na amostra experimental de medições (utilizadas anteriormente na determinação das incertezas de medição tipo A), os limites de variação associados a esta componente de incerteza. Com efeito, foi considerada uma função densidade de probabilidade uniforme centrada em 0,009 mm, definindo uma probabilidade de ocorrência idêntica no intervalo compreendido entre 0 mm e 0,018 mm.

Tratando-se de uma medição de natureza dimensional, é justificável considerar a influência de fenómeno de dilatação/contracção térmica nos elementos intervenientes nesse processo experimental. No que respeita ao momento da medição *in situ*, o procedimento de ensaio adoptado pelas equipas de observação do LNEC inclui a estabilização térmica do coordenómetro óptico previamente à concretização da medição o que, acrescido da boa estabilidade térmica do meio (em regra, os locais de medição no interior de uma barragem de betão estão protegidos de deslocações de ar, para além da elevada inércia térmica que caracteriza este tipo de obras) reduz significativamente a influência da temperatura.

Contudo, numa perspectiva de longo prazo, equivalente ao período de tempo compreendido entre campanhas de observação, é razoável considerar que a temperatura do meio no local da medição apresente um efeito sazonal decorrente da realização, por exemplo, de uma campanha na época de Inverno e de outra campanha na época de Verão. De acordo com o conhecimento experimental acumulado, a variação sazonal de temperatura num dado local de medição pode atingir uma amplitude máxima próxima dos 10 °C. Este facto, acrescido da possível diferença de comprimento

existente entre as vigas de suporte do coordenómetro e do cilindro/cone, obriga a considerar uma componente de incerteza decorrente do fenómeno de dilatação/contracção térmica diferencial.

Neste âmbito, foi considerada uma diferença máxima de comprimento entre vigas igual a 100 mm e um coeficiente de dilatação térmica linear correspondente a  $14 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , valor convencional para o aço tendo em conta uma temperatura de 20  $^\circ\text{C}$ . Os cálculos efectuados revelaram um desvio máximo de comprimento por dilatação térmica diferencial igual a 0,014 mm que suportou a adopção de uma função de densidade de probabilidade uniforme centrada em 0,007 mm, compreendida entre 0 mm (diferença de comprimento entre vigas nula) e 0,014 mm (desvio máximo).

Por último, foi igualmente identificada como fonte de incerteza, a espessura da marcação da mira óptica que constitui o coordenómetro óptico em resultado da sua influência no alinhamento com o fio-de-prumo ou cilindro/cone. A sua quantificação foi suportada numa estimativa da espessura de marcação igual a 0,010 mm, considerando uma função densidade de probabilidade triangular centrada em zero e com limites de variação de  $\pm 0,005$  mm.

O Quadro 2 resume o conjunto de componentes de incertezas de medição tipo B anteriormente mencionadas.

**Quadro 2** – Tabela de incertezas de medição tipo B.

Fonte de incerteza	Limites de variação	Função densidade de probabilidade	Incerteza de medição padrão	Graus de liberdade
Calibração do coordenómetro óptico	$\pm 0,0009$ mm	Gaussiana	0,0009 mm	87
Divisão do coordenómetro óptico	$\pm 0,005$ mm	Uniforme	0,0029 mm	50
Ortogonalidade entre eixos de medição	0 mm e 0,018 mm	Uniforme	0,0052 mm	50
Dilatação térmica diferencial entre vigas de suporte	0 mm e 0,014 mm	Uniforme	0,0041 mm	50
Espessura da marcação da mira óptica	$\pm 0,005$ mm	Triangular	0,0020 mm	50

#### 4. Propagação de incertezas de medição

A segunda fase do estudo consistiu no cálculo das incertezas de medição usando o método GUM [1], suportada na caracterização probabilística exposta na secção anterior. Atendendo à linearidade dos modelos matemáticos envolvidos (*vide* expressões 1 e 2), este método revela-se adequado para a estimativa das incertezas de medição associadas ao deslocamento radial e tangencial.

Note-se que, a caracterização probabilística efectuada na secção anterior refere-se, apenas, às grandezas de entrada de natureza dimensional considerando-se as seguintes simplificações:

1. os factores de convenção de deslocamento radial e tangencial não correspondem a mensurandas, definindo apenas o sentido positivo ou negativo de deslocamento convencional (*vide* Figura 4), pelo que não apresentam contribuições para a incerteza de medição, isto é,

$$u(F_T) = u(F_R) = 0; \quad (3)$$

2. as grandezas de entrada de natureza dimensional possuem incertezas de medição idênticas,  $u(L)$ , independentemente de se tratarem de leituras ao fio ou cone/cilindro, realizadas na direcção radial ou tangencial em épocas distintas em virtude de partilharem o mesmo processo de medição dimensional (método e instrumento de medição), justificando uma caracterização metrológica idêntica que, deste modo, se traduz em

$$u(LRF_n) = u(LRF_i) = u(LTF_n) = u(LTF_i) = u(LRC_n) = u(LRC_i) = u(LTC_n) = u(LTC_i) = u(L) \quad (4)$$

3. em resultado das duas simplificações anteriores, as incertezas de medição das grandezas de saída,  $u(\Delta L)$ , serão, igualmente, idênticas, ou seja,

$$u(\Delta LR_n) = u(\Delta LT_n) = u(\Delta L). \quad (5)$$

Tendo em conta o conjunto de simplificações acima exposto e o seu reflexo nas respectivas relações funcionais (1) e (2), a aplicação da Lei de Propagação de Incertezas descrita no GUM [1] permite afirmar que a variância da grandeza de saída deslocamento (radial ou tangencial),  $u^2(\Delta L)$ , seja dada por

$$u^2(\Delta L) = 4 \cdot u^2(L) \cdot (1-r), \quad (6)$$

onde  $r$  corresponde ao coeficiente de correlação entre as grandezas dimensionais ao fio e ao cilindro/cone numa dada época em resultado da utilização do mesmo coordenómetro óptico na concretização das referidas medições, pressupondo que

$$r(LRF_n, LRC_n) = r(LRF_i, LRC_i) = r(LTF_n, LTC_n) = r(LTF_i, LTC_i) = r. \quad (7)$$

Considerando a amostra experimental de medições referida anteriormente, efectuou-se o cálculo dos coeficientes de correlação expostos em (7) visando a obtenção de uma estimativa representativa do efeito de correlação. Os resultados obtidos revelaram uma dispersão de valores no intervalo compreendido entre -1 e 1, condicionada pela reduzida dimensão das sub-amostras analisadas (igual a três). Considera-se razoável proceder à majoração da incerteza de medição mediante a adopção de coeficiente de correlação unitário negativo. Deste modo, a incerteza de medição da grandeza de saída deslocamento (radial ou tangencial) corresponde a

$$u(\Delta L) = 2\sqrt{2} \cdot u(L). \quad (8)$$

O conhecimento desta expressão permite concretizar o balanço de incertezas de medição suportado na caracterização probabilística que consta na secção anterior. Note-se que, face às simplificações introduzidas nesta secção, as componentes de repetibilidade e reprodutibilidade do processo de medição foram majoradas com base nos valores declarados no Quadro 1.

O valor de incerteza de medição obtido pela expressão (8) diz respeito a um intervalo de confiança de 68 % pelo que, a sua expansão para um intervalo de confiança mais elevado (95 %, por exemplo), implica a sua multiplicação por um factor de expansão dependente do número de graus de liberdade efectivos da grandeza de saída. A obtenção deste factor resultou da aplicação da fórmula de Welch-Satterthwaite [4, 5]. O conjunto de resultados obtidos são apresentados no Quadro 3.

**Quadro 3** – Balanço de incertezas de medição da grandeza deslocamento (radial ou tangencial).

Componente de incerteza	Fonte de incerteza	Tipo de incerteza	Função densidade de probabilidade	Incerteza de medição padrão	Graus de liberdade
$\delta L_{\text{repet}}$	Repetibilidade	A	Gaussiana	0,006 1 mm	89
$\delta L_{\text{repro}}$	Reprodutibilidade	A	Gaussiana	0,006 1 mm	89
$\delta L_{\text{cal}}$	Calibração do coordenómetro óptico	B	Gaussiana	0,000 9 mm	87
$\delta L_{\text{div}}$	Divisão do coordenómetro óptico	B	Uniforme	0,002 9 mm	50
$\delta L_{\text{ortog}}$	Ortogonalidade entre eixos de medição	B	Uniforme	0,005 2 mm	50
$\delta L_{\text{temp}}$	Dilatação térmica diferencial entre vigas de suporte	B	Uniforme	0,004 1 mm	50
$\delta L_{\text{espes}}$	Espessura da marcação da mira óptica	B	Triangular	0,002 0 mm	50
Incerteza de medição combinada: $u(\Delta L) = 0,032$ mm					
Graus de liberdade efectivos: $v_{\text{ef}} = 324$					
Factor de expansão: $k = 2,00$					
Incerteza de medição expandida (95 %): $U_{95\%}(\Delta L) = 0,064$ mm					

## 5. Conclusões

O estudo descrito na presente comunicação permitiu determinar o nível de exactidão inerente à medição de deslocamento radial e tangencial em barragens de betão, pelo método do fio-de-prumo e recorrendo ao coordenómetro óptico como instrumento de medição. Na concretização deste objectivo foi efectuado o devido enquadramento no actual contexto metrológico dedicado à avaliação da qualidade das medições mediante determinação de incerteza de medição seguindo-se, em particular, as indicações expressas no GUM [1].

Considerando a caracterização probabilística das grandezas de entrada, bem como, o conjunto de simplificações e hipóteses adoptadas na aplicação da Lei de Propagação de Incertezas, foi possível concluir que a incerteza de medição expandida (para um intervalo de confiança de 95 %) das grandezas deslocamento radial e tangencial corresponde 0,064 mm. O nível de exactidão determinado, que caracteriza a qualidade inerente ao processo de medição, constitui um elemento relevante na comparação com resultados provenientes de outros métodos e instrumentos de medição de natureza distinta utilizados no controlo da segurança estrutural de barragens de betão.

A análise do balanço de incertezas efectuado revelou que a repetibilidade, reprodutibilidade e ortogonalidade entre eixos de medição do coordenómetro constituem as componentes de incerteza com contribuição mais significativa para a incerteza de medição combinada atribuída às grandezas de saída deslocamento radial e tangencial.

O trabalho realizado motivou o estudo e desenvolvimento de processos experimentais dedicados à calibração e ensaio metrológico de coordenómetros ópticos no LNEC/LCAM pretendendo-se, no futuro, promover o seu aprofundamento e consolidação.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM), 1<sup>st</sup> edition. Genève: International Organization for Standardization (ISO), 1995.
- [2] Montgomery, D.C., Introduction to statistical quality control, 3<sup>rd</sup> edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [3] Regulamento de Segurança de Barragens (RSB) – Decreto-Lei n.º 344/2007, de 15 de Outubro de 2007.
- [4] Satterthwaite, F. E., (1946) *Biometrics Bull.* **2** (6), 110-114.
- [5] Welch, B. L., (1947) *Biometrika.* **34**, 28-35.