

# MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE BARRAGENS POR MEIO DE AGRUPAMENTO DE INSTRUMENTOS – APLICAÇÃO EM ITAIPU

Method of performance evaluation of dams by instrument clustering – Application to Itaipu

Rodrigo César Pierozan\*

Sidnei Helder Cardoso Teixeira\*\*

Andrea Sell Dyminski\*\*\*

Celso Romanel\*\*\*\*

**RESUMO** – O sistema de instrumentação de uma barragem deve ser capaz de detectar variações nas leituras ao longo do ciclo de vida da mesma como resultado do envelhecimento e das alterações ambientais. O estudo de como ocorre a interação entre as leituras dos diferentes instrumentos e como as variáveis ambientais interferem nas mesmas pode ser de grande utilidade para compreensão dos mecanismos que regem o comportamento de uma barragem. O presente trabalho apresenta um método de avaliação do desempenho de barragens por meio de agrupamento de instrumentos de comportamento similar, utilizando como ferramenta de análise correlações estatísticas lineares e não-lineares entre leituras de instrumentos de auscultação. Através do estudo proposto, é possível a identificação de instrumentos defeituosos e de comportamentos anômalos em barragens, além do fornecimento de indícios dos mecanismos geotécnicos que resultam na similaridade entre os mesmos. Como forma de validação e exemplificação do método proposto, são utilizados dados de piezometria da barragem de Itaipu Binacional.

**SYNOPSIS** – A proper dam instrumentation system should be able to detect variations in readings over its life cycle as a result of aging and environmental changes. The study about how the interaction between readings from different instruments occurs and how environmental variables affect them can be very useful to understand the mechanisms that affect the behaviour of a dam. This paper presents a method for evaluating dam performance by means of clustering instruments with similar behaviour, using linear and non-linear statistical correlations as an analysis tool for auscultation instruments. Through the proposed study, it is possible to detect malfunctioning instruments and anomalous dam behaviour, besides collecting evidence about the geotechnical mechanisms that result in similarity between both situations. In order to exemplify and validate the proposed method, piezometric data from the Itaipu Binational dam have been studied.

**PALAVRAS CHAVE** – Segurança de barragens, instrumentação, agrupamento de instrumentos.

---

\* Mestrando, Universidade Federal do Paraná – UFPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil. E-mail: rodrigopierozan@hotmail.com

\*\* Professor Doutor, Universidade Federal do Paraná – UFPR, Departamento de Construção Civil. E-mail: s.helder@uol.com.br

\*\*\* Professora Doutora, Universidade Federal do Paraná – UFPR, Departamento de Construção Civil. E-mail: asdymi@gmail.com

\*\*\*\* Professor Doutor, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil. E-mail: romanel@puc-rio.br

## 1 – INTRODUÇÃO

Ao longo da história, a população humana foi afetada por várias rupturas de barragens, como por exemplo as barragens de St. Francis e Teton (Graham, 1999). Até mesmo na atualidade, esse tipo de desastre é passível de ocorrência, como documentado em barragens britânicas (Charles *et al.*, 2011), barragens de rejeito européias (Rico *et al.*, 2008), barragens chinesas (He *et al.*, 2008) e barragens americanas (Dam Safety, 2013). No Brasil, a situação não é diferente, e muitos incidentes envolvendo barragens ocorreram nos últimos anos, como por exemplo em Camará (2004), Campos Novos (2006) e Algodões (2008). Situações como as citadas tornam pública a necessidade de estudos envolvendo a segurança de barragens.

A garantia das condições de segurança de uma barragem é resultante de uma série de fatores, entre os quais podem ser citados aspectos estruturais, geotécnicos, hidráulicos, operacionais e ambientais, visando a estabelecer conhecimento contínuo e adequado das mesmas (CBDB, 2001). Dessa forma, são necessárias reavaliações regulares do estado de uma barragem e de todas as demais estruturas e instalações.

Podem ser citadas como formas de reavaliação do estado de barragens as inspeções visuais e o acompanhamento das leituras do sistema de instrumentação. Instrumentação pode ser definida como a aquisição, apresentação e avaliação de informação oriunda de dispositivos de medida instalados em barragens ou próximos às mesmas (Department of Natural Resources and Mines, 2002). O sistema de monitoramento permite aos engenheiros validar as hipóteses e métodos de cálculo desenvolvidos durante o projeto e avaliar como a barragem, estruturas auxiliares e sua fundação se comportam ao longo do ciclo de vida.

A seleção de um determinado instrumento deve ser feita de modo a auxiliar na obtenção de uma resposta específica, ou seja, caso não haja questionamento então não há necessidade de instrumentação (Dunnicliff, 1993). Existem muitos parâmetros que podem ser analisados ao longo do tempo para assegurar as condições de segurança de uma barragem, entre os quais podem ser citadas as poropressões e subpressões, vazões de percolação, recalques e deslocamentos horizontais. Os parâmetros citados podem ser quantificados através de diferentes tipos de instrumentos, como piezômetros, medidores de vazão, extensômetros, inclinômetros e pêndulos.

O estudo de como ocorre a interação entre as leituras dos diferentes instrumentos e como as variáveis ambientais interferem nas mesmas pode ser de grande utilidade para a compreensão dos mecanismos que regem o comportamento de uma barragem, além de contribuir no processo de tomada de decisões com base na instrumentação. Uma discussão interessante sobre avaliação de risco e tomada de decisões em segurança de barragens é apresentada em Bowles (2004).

O monitoramento de barragens através de instrumentação gera um grande conjunto de dados composto de leituras periódicas realizadas ao longo do tempo. É essencial que os dados de instrumentação sejam processados, analisados e avaliados por especialistas da área, como forma de garantir os requisitos de segurança de uma determinada barragem. Durante essa tarefa, é importante identificar a informação realmente relevante para entender e solucionar determinados problemas, isolando os dados não representativos. Entretanto, os responsáveis pela análise dos dados nem sempre podem gastar semanas para extrair todo o conhecimento. Devido a esse fato, muitos conjuntos de dados acabam não recebendo um tratamento adequado (Tan *et al.*, 2005).

Como forma de lidar com essa questão, é possível a utilização de técnicas estatísticas como ferramenta de análise dos dados de instrumentação. Alguns trabalhos interessantes vêm sendo realizados nos últimos anos envolvendo o estudo de séries temporais e segurança de barragens, entre os quais podem ser citados os estudos de Papadrakakis *et al.* (2006), Mata (2010) e Chonghui *et al.* (2012).

Neste contexto também se encontra o trabalho de Buzzi (2007), o qual propõe um método de análise de séries temporais através de correlações estatísticas lineares, como ferramenta de estudo

das interações existentes entre diferentes instrumentos de monitoração geotécnico-estrutural instalados em barragens. O método proposto por Buzzi (2007) possibilita a identificação de anomalias em leituras de instrumentação, subsidiando a detecção de instrumentos defeituosos, leituras problemáticas ou alterações no comportamento da barragem.

Complementando os estudos citados, no presente trabalho os autores propõem um método de avaliação de desempenho de barragens por meio do agrupamento de instrumentos de comportamento similar. Como ferramenta de análise dos dados, são utilizadas correlações estatísticas lineares e não-lineares entre leituras de instrumentos de auscultação. Este método pode ser usado de modo complementar às técnicas clássicas de análise do comportamento de barragens com base em instrumentação.

O agrupamento dos instrumentos em famílias de comportamento correlato fornece indícios dos mecanismos que resultam na similaridade entre os mesmos, principalmente no que se refere às características do subsolo e à eficiência do tratamento de fundação. Além disso, através do estudo das correlações estatísticas ao longo do tempo é possível a detecção de comportamentos anômalos e de instrumentos defeituosos, além da geração de critérios de alerta.

Como forma de validação e exemplificação do método proposto, são utilizados dados de piezometria da barragem de Itaipu Binacional. O desempenho da barragem em questão é avaliado com base no agrupamento de piezômetros de comportamento correlato. Convém ressaltar que o método em questão também pode ser aplicado sobre outros instrumentos, como, por exemplo: bases de alongâmetro, pêndulos, tensômetros, extensômetros e medidores de juntas.

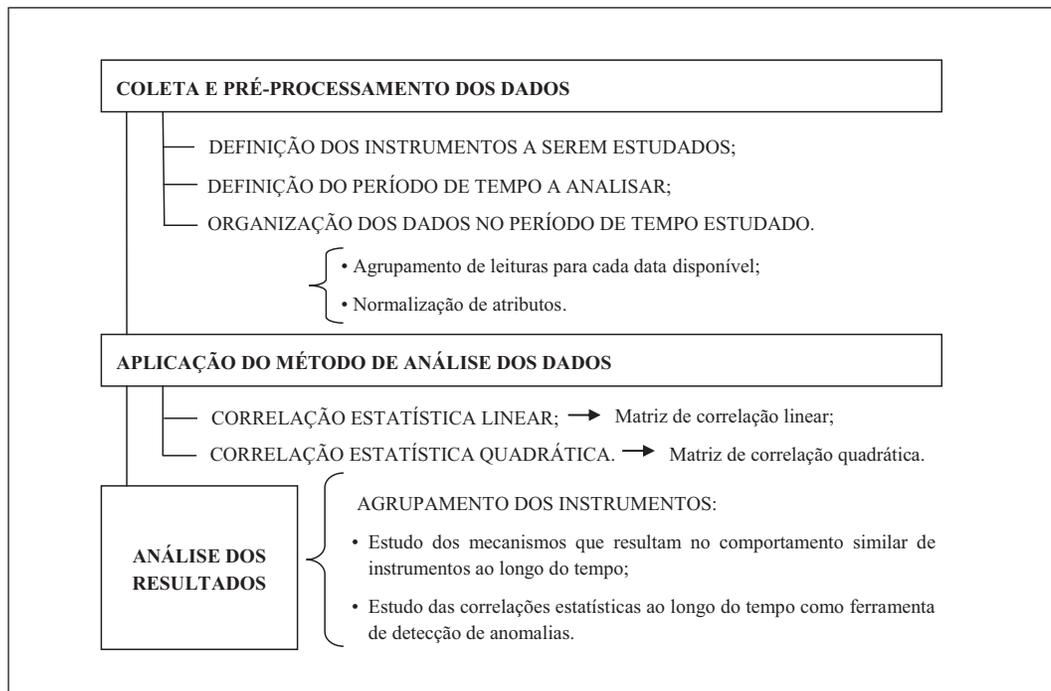
## **2 – MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO**

O método de análise dos dados consiste em seguir uma sequência de etapas, cada qual com sua finalidade, conforme apresentado no Quadro 1. Primeiramente, é realizada a coleta e pré-processamento dos dados, na qual os mesmos são organizados e define-se o período de análise. Como continuidade, são aplicados os métodos de análise, os quais consistem basicamente em correlações estatísticas lineares e não-lineares e validação das mesmas através de testes de hipóteses. Através dos dados de correlações estatísticas, os instrumentos são agrupados em famílias de comportamento similar, fornecendo indícios acerca do comportamento da barragem. As principais características de cada uma das etapas são descritas na sequência.

### **2.1 – Coleta e pré-processamento dos dados**

O sistema de monitoramento de uma barragem é composto por uma série de instrumentos, cada qual responsável pela determinação de um parâmetro específico. Dessa forma, as leituras realizadas para cada um dos instrumentos individualmente resultam em séries temporais de dados, as quais necessitam ser analisadas adequadamente para aferição do comportamento da barragem. Para aplicação do método aqui apresentado, torna-se necessária a definição dos instrumentos de interesse do estudo e do período de tempo de análise.

**Quadro 1** – Estratégia de pesquisa.



### 2.1.1 – *Agrupamento de leituras para cada data disponível*

Devido às características próprias de cada barragem e aos procedimentos de monitoramento das mesmas, nem sempre as datas das leituras de diferentes instrumentos são coincidentes entre si. Por exemplo, pode ser necessário o estudo de dois instrumentos genéricos A e B, sendo que o instrumento A possui frequência de leituras semanal, enquanto que o instrumento B possui frequência de leitura quinzenal ou mensal. Dessa forma, torna-se necessário definir um procedimento de agrupamento das leituras com o mínimo possível de perda de informação, anteriormente ao cálculo das correlações estatísticas.

Um primeiro método possível de agrupamento de dados pode ser encontrado em Buzzi (2007), o qual é capaz de agrupar as leituras pertencentes a uma mesma data, desde que todos os instrumentos possuam leitura na data em questão. Anteriormente à aplicação deste método, aconselha-se verificar se a perda de informação durante o agrupamento é significativa ou não.

Além do método exposto, é possível a geração de leituras artificiais para as lacunas existentes nas séries temporais, com o intuito de aproveitar ao máximo os dados reais de campo, com o mínimo possível de perda de informações. Dessa forma, torna-se necessário o cálculo de dados artificiais através de algum procedimento matemático, entre os quais pode ser citada a interpolação polinomial. Outros procedimentos, não abordados neste texto, também podem ser adotados com o intuito de diminuir a perda de informação decorrente do agrupamento.

### 2.1.2 – *Normalização de atributos*

Os parâmetros medidos através do sistema de monitoramento de uma barragem possuem como característica a oscilação ao longo do tempo, cuja amplitude da variação está associada à

resposta devida. Para se analisar e comparar as leituras de diferentes instrumentos, faz-se necessária a adoção de uma técnica de normalização, sendo esta uma forma de transformação dos valores absolutos de amplitude em valores relativos, referentes a um valor de amplitude caracterizado como 100%, conforme expõe a Equação 1. Considerações adicionais a respeito da normalização de atributos podem ser consultadas em Tan *et al.* (2005).

$$L_n = \frac{L_t - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}} \quad (1)$$

$L_n$  – valor normalizado;

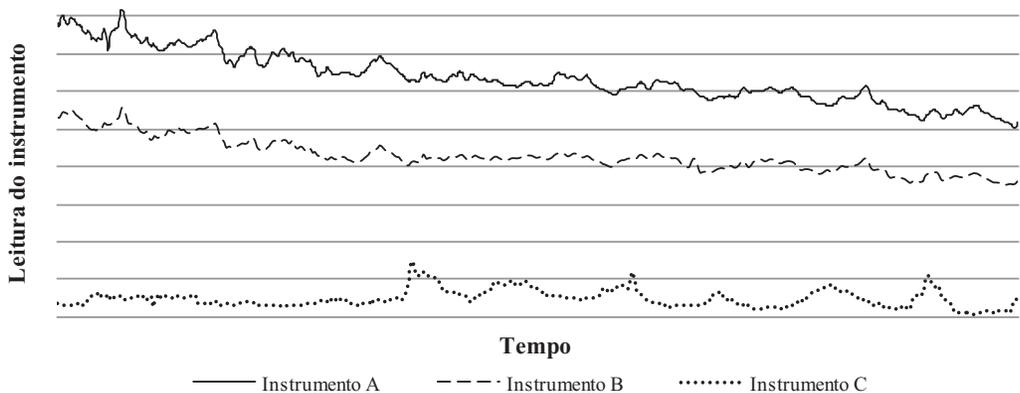
$L_t$  – leitura do instrumento no tempo  $t$ ;

$L_{\min}$  – valor mínimo de leitura compreendida no intervalo de tempo estudado;

$L_{\max}$  – valor máximo de leitura compreendida no intervalo de tempo estudado.

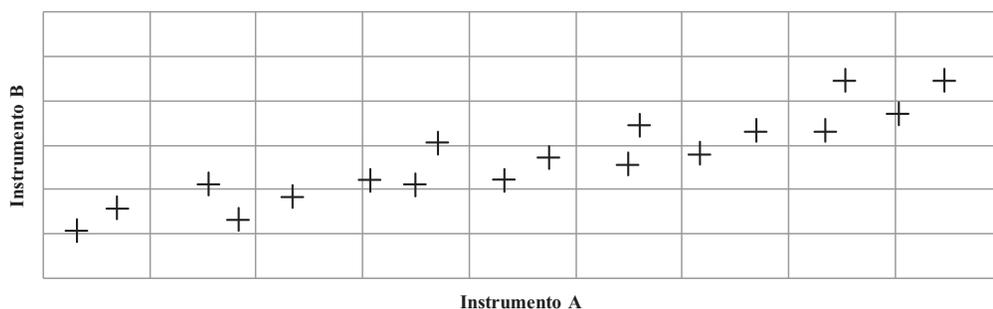
## 2.2 – Aplicação do método de análise dos dados

Neste trabalho correlações estatísticas lineares e não-lineares são utilizadas como ferramentas para agrupamento de instrumentos de comportamento similar. Como forma de exemplificar o exposto, a Figura 1 apresenta a evolução das leituras de 3 instrumentos genéricos, denominados A, B e C. Através da figura, pode-se perceber que os instrumentos A e B possuem algum tipo de semelhança na evolução das leituras ao longo do tempo. Por outro lado, o instrumento C aparentemente não está oscilando da mesma forma que os instrumentos A e B.



**Fig. 1** – Leituras de instrumentos genéricos A, B e C ao longo do tempo.

Uma outra maneira de avaliar graficamente se há algum tipo de tendência de comportamento entre as leituras de 2 instrumentos é através da construção de um diagrama de dispersão, o qual representa os “N” pares de leituras agrupadas de uma série temporal. Como exemplo, a Figura 2 apresenta o diagrama de dispersão das leituras dos instrumentos genéricos A e B, sendo que cada ponto do diagrama representa um par de leituras agrupadas em uma determinada data. Neste exemplo, os pontos do diagrama podem ser adequadamente ajustados por uma reta, devido à tendência de crescimento linear entre as leituras. Entretanto, a mesma nuvem de dados do diagrama de dispersão também pode ser ajustada por equações não-lineares, como é o caso do ajuste de equações do 2º grau, resultando, por vezes, em menores desvios.



**Fig. 2** – Diagrama de dispersão das leituras dos instrumentos A e B.

Dessa forma, torna-se necessário adotar um tipo de equação com a finalidade de se ajustar ao conjunto de leituras agrupadas dos instrumentos. Entre os tipos de equação empregados, podem ser citadas as equações polinomiais (Equação 2). Salienta-se que para o ajuste é necessário definir um instrumento como variável dependente  $Y$ , o qual assumirá novos valores estimados através da equação ajustada, mantendo-se os valores da variável independente  $X$ .

$$Y_{\text{estimado}} = a_0 + a_1 * X + a_2 * X^2 + \dots + a_n * X^n \quad (2)$$

$Y_{\text{estimado}}$  – valor assumido pela variável dependente através da equação ajustada;

$X$  – valor da variável independente;

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  – constantes do polinômio ajustado aos dados;

$n$  – grau do polinômio ajustado.

A definição da equação a ser ajustada ao conjunto de dados depende dos objetivos do estudo, pois equações não-lineares polinomiais podem se ajustar melhor aos mesmos, fornecendo coeficientes de correlação mais elevados. Entretanto, deve-se verificar a necessidade de utilização de polinômios de maior grau, pois os mesmos aumentam a complexidade do estudo e não necessariamente fornecem dados significativamente melhores. Sugere-se que seja determinada a significância da diferença entre os coeficientes de correlação obtidos através de equações de maior e menor grau, conforme procedimento exposto em Spiegel e Stephens (2011).

A semelhança de comportamento entre instrumentos distintos pode ser quantificada através do cálculo do coeficiente de correlação estatística,  $R$ , entre os mesmos, considerando-se as leituras compreendidas em um intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) pré-determinado, através da Equação 3. O coeficiente calculado pode variar entre -1 e +1, ou seja, -100% ou +100% de semelhança de comportamento, sendo que o sinal indica a tendência de crescimento ou decrescimento das leituras.

$$R = \pm \sqrt{\frac{\sum (Y_{\text{estimado}} - Y_{\text{médio}})^2}{\sum (Y - Y_{\text{médio}})^2}} \quad (3)$$

$R$  – coeficiente de correlação estatística (linear ou não-linear);

$Y_{\text{estimado}}$  – valor assumido pela variável dependente através da equação ajustada;

$Y$  – valor da leitura do instrumento representado pela variável  $Y$  para cada uma das datas;

$Y_{\text{médio}}$  – média das leituras da variável dependente  $Y$ .

No caso do ajuste de equações não-lineares, o valor do coeficiente de correlação calculado entre dois instrumentos irá variar conforme as variáveis dependente e independente adotadas. Por exemplo, considerando-se os instrumentos genéricos citados anteriormente, caso o instrumento A seja adotado como variável independente e o instrumento B seja adotado como variável dependente, o coeficiente de correlação calculado será distinto do coeficiente obtido caso A seja a variável dependente e B a variável independente.

Os coeficientes calculados através da Equação 3 podem ser agrupados em níveis de variação, os quais estão atrelados a determinada força da correlação entre as variáveis estudadas. Neste trabalho, sugere-se que a classificação dos coeficientes de correlação seja feita conforme o Quadro 2, o qual pressupõe valores em módulo, ou seja, a tabela é válida tanto para coeficientes de correlação positivos quanto negativos.

**Quadro 2** – Força dos coeficientes de correlação, adaptado de Salking (2011).

<b>Coefficiente de correlação</b>	<b>Força da correlação</b>
$0,00 < R \leq 0,20$	Muito fraca ou ausência de correlação
$0,20 < R \leq 0,40$	Fraca
$0,40 < R \leq 0,60$	Moderada
$0,60 < R \leq 0,80$	Forte
$0,80 < R \leq 1,00$	Muito forte

Os coeficientes de correlação entre os instrumentos podem ser sintetizados no formato de uma matriz, a qual é denominada matriz de correlação. O Quadro 3 apresenta um exemplo de matriz de correlação linear, calculada para os instrumentos genéricos A, B e C, na qual são apresentados os coeficientes de correlação,  $R$ , entre os mesmos. Por exemplo, os instrumentos A e B possuem coeficiente de correlação linear igual a 0,9 entre si, ou seja, a similaridade entre as leituras dos mesmos é de 90%. Já o instrumento C possui baixos coeficientes de correlação com A e B, iguais a, respectivamente, 0,15 e 0,12. Pode-se também observar que a matriz de correlação linear é simétrica em relação à diagonal principal, o que não ocorre nos casos onde é calculada a correlação não-linear.

**Quadro 3** – Matriz de correlação linear calculada para os instrumentos genéricos A, B e C.

	<b>Instrumento A</b>	<b>Instrumento B</b>	<b>Instrumento C</b>
<b>Instrumento A</b>	100%	90%	15%
<b>Instrumento B</b>	90%	100%	12%
<b>Instrumento C</b>	15%	12%	100%

Como o cálculo da correlação estatística entre duas variáveis aleatórias envolve uma amostra e não a população toda, sempre haverá uma incerteza acerca do coeficiente de correlação obtido. Os  $N$  pares de valores  $(X, Y)$  de duas variáveis, as quais representam as leituras de dois instrumentos, podem ser pensados como amostras de uma população total desconhecida na qual os pares de valores observados são possíveis. Dessa forma, deve-se avaliar se o coeficiente de correlação da amostra,  $R$ , é representativo da população, através da aplicação de testes de significância.

No teste de significância, a hipótese nula ( $H_0: \rho = 0$ ) afirma que o coeficiente de correlação da população não difere significativamente de zero, enquanto a hipótese alternativa ( $H_1: \rho \neq 0$ ) afirma que o coeficiente de correlação da população é diferente de zero. Através desta suposição, a Equação 4 é empregada no cálculo do valor assumido pela distribuição estatística *t* de *Student*.

$$t = \frac{R * \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-R^2}} \quad (4)$$

R – coeficiente de correlação estatística (linear ou não-linear);

t – valor assumido pela distribuição *t* de *Student*;

N – número de datas nas quais houve agrupamento de leituras dos instrumentos.

Através do valor assumido pela distribuição *t* de *Student* (Equação 4) e do número de graus de liberdade (N-2), determina-se o nível de significância observado no teste, denominado P-valor. O P-valor é então comparado com o nível de significância adotado no teste (parâmetro  $\alpha$ ). Caso o P-valor seja menor que  $\alpha$ ,  $H_0$  é rejeitada e portanto há evidências estatísticas de que haja correlação entre as variáveis estudadas.

Quanto à adoção de um nível de significância (parâmetro  $\alpha$ ), Cohen (1992) afirma que convencionalmente adota-se o mesmo igual a 5%, podendo-se restringir seu valor em situações nas quais seja necessário minimizar os riscos. Por exemplo, adotando-se o nível de significância ( $\alpha$ ) igual a 5%, caso P-valor seja inferior a 0,05 a hipótese nula ( $H_0$ ) é rejeitada e a hipótese alternativa ( $H_1$ ) é aceita, indicando que o coeficiente de correlação R difere significativamente de zero.

### 2.3 – Análise dos resultados

A avaliação do desempenho das barragens aqui proposta pressupõe o agrupamento dos instrumentos de comportamento similar, baseando-se nos resultados obtidos no cálculo de correlação. Dessa forma, torna-se necessário adotar um valor mínimo de coeficiente aceitável para que um determinado instrumento venha a fazer parte de uma determinada família, podendo este ser referente à correlação linear ou não-linear. Sugere-se adotar coeficiente de correlação superior a 50% no agrupamento dos instrumentos (correlação moderada, conforme Quadro 2). Classificações mais restritivas podem ser adotadas para avaliação dos coeficientes de correlação, caso haja interesse em limitar o número de instrumentos em estudo.

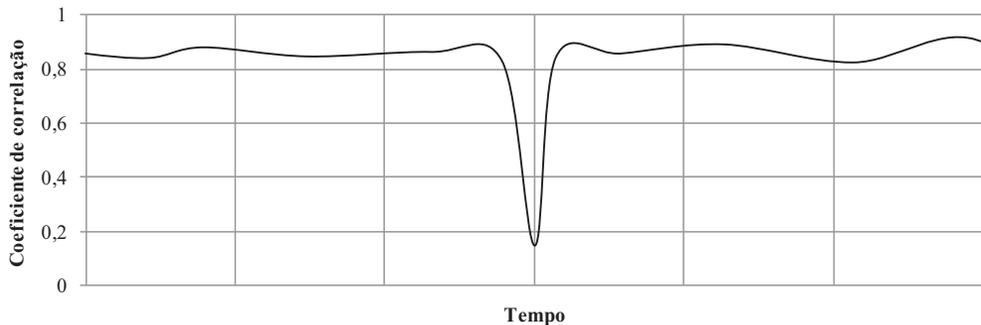
Através do agrupamento, formam-se grupos de instrumentos cujo comportamento é similar ao longo do período de tempo estudado ( $\Delta t$ ), fornecendo indícios acerca do desempenho da barragem. Através dos resultados é possível estudar os mecanismos que resultam nas elevadas correlações entre determinados instrumentos, através da análise das características do subsolo e da eficiência do tratamento de fundação, por exemplo. Além disso, os resultados podem ser utilizados com o intuito de detectar anomalias em instrumentos e na recuperação de leituras faltantes ou problemáticas, caso haja dúvidas quanto ao valor obtido em campo, bem como para identificar mudanças no comportamento da barragem, conforme exposto na sequência. Esses procedimentos de cálculo podem ser automatizados por meio de programação de computador.

#### 2.3.1 – Detecção de anomalias em instrumentos

O estudo das correlações estatísticas pode ser utilizado como forma de detecção de anomalias em instrumentos. Para tanto, podem ser calculados os coeficientes de correlação considerando-se

períodos de tempo ( $\Delta t$ ) inferiores ao período de tempo total disponível, sendo assim possível avaliar como as mesmas se comportam ao longo do ciclo de vida da barragem.

Como exemplo, a Figura 3 apresenta a evolução da correlação estatística entre 2 instrumentos genéricos, considerando-se intervalos de tempo inferiores ao período total de leituras disponíveis. Os coeficientes de correlação apresentados vêm oscilando em torno de 85%, entretanto os mesmos diminuem bruscamente para aproximadamente 20% na metade do período de tempo representado, indicando a ocorrência de alguma anomalia nas leituras próxima a data em questão. A recuperação da correlação mostra que o motivo causador do problema foi solucionado.



**Fig. 3** – Evolução da correlação estatística entre 2 instrumentos genéricos (caso 1).

### **2.3.2 – Identificação de mudanças no comportamento da barragem**

O cálculo de coeficientes de correlação, considerando-se períodos de tempo ( $\Delta t$ ) inferiores ao período de tempo total disponível, além de evidenciar possíveis anomalias em instrumentos, conforme exposto acima, também pode servir como indicativo de mudanças no comportamento da barragem ao longo do ciclo de vida.

Como exemplo, a Figura 4 apresenta um caso de evolução da correlação estatística entre 2 instrumentos genéricos, considerando-se intervalos de tempo inferiores ao período total de leituras disponíveis. Neste caso, pode-se verificar uma tendência de diminuição dos coeficientes de correlação ao longo do tempo, independentemente das variações sazonais. Inicialmente, os coeficientes de correlação estão em torno de 85%, entretanto a redução dos mesmos ao longo do tempo resulta em coeficientes em torno de 50% no final do período, podendo indicar que o comportamento da barragem sofreu alterações ao longo do intervalo de tempo em estudo.

### **2.3.3 – Recuperação de leituras faltantes ou problemáticas**

No caso da ocorrência de leituras faltantes ou problemáticas em algum dos instrumentos, é possível determinar as mesmas através de regressão estatística, tomando como base outros instrumentos pertencentes à mesma família de comportamento. Para tanto regressão múltipla pode ser utilizada como forma de obter as leituras citadas no instrumento de interesse, a partir das leituras existentes dos outros instrumentos pertencentes à família, os quais adquirem a função de estimadores ou variáveis independentes.

O objetivo das variáveis independentes adicionais é melhorar a capacidade de predição, reduzindo os resíduos estocásticos, aumentando assim a força dos testes de significância. Como exemplo, a Equação 5 apresenta uma equação linear ajustada a um instrumento genérico  $X$  através de regressão múltipla. Para cada data de interesse, calcula-se a leitura correspondente ao instrumento  $X$  através das leituras obtidas para os outros  $N$  instrumentos.

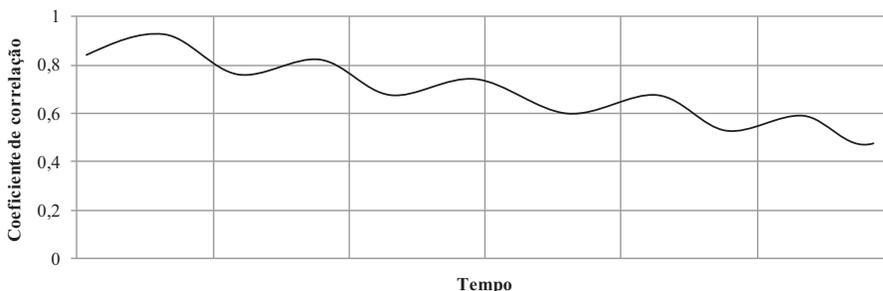


Fig. 4 – Evolução da correlação estatística entre 2 instrumentos genéricos (caso 2).

$$L_X = a_0 + a_1 * L_1 + a_2 * L_2 + \dots + a_N * L_N \quad (5)$$

$L_x$  – leitura calculada para o instrumento X, admitido como variável dependente;

$L_1, L_2, \dots, L_N$  – valores assumidos pelas variáveis independentes, em uma determinada data;

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_N$  – constantes do polinômio ajustado aos dados.

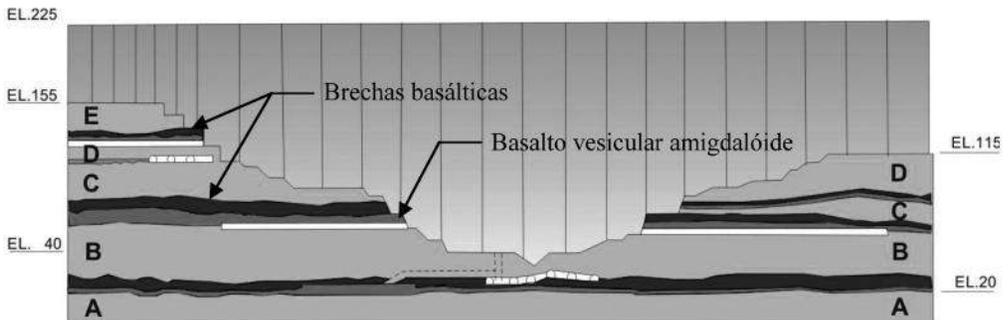
### 3 – APLICAÇÃO DO MÉTODO À BARRAGEM DE ITAIPU BINACIONAL

A barragem de Itaipu Binacional está localizada no Rio Paraná, na divisa entre Brasil e Paraguai, sendo considerada uma das maiores usinas hidrelétricas do mundo, especialmente considerando-se o aspecto de geração de energia. A estrutura de barramento possui a finalidade de represar a água e manter o desnível de 120 m, permitindo assim a operação das turbinas. A barragem é constituída por vários trechos constituídos por diferentes materiais, podendo ser considerada uma sequência de barragens menores, conforme apresentado na Figura 5.



Fig. 5 – Complexo de barragens de Itaipu Binacional, adaptado de Itaipu (2013).

As fundações da barragem estão assentadas sobre maciço rochoso basáltico da Bacia do Alto Paraná, pertencentes à formação Serra Geral. Os basaltos são rochas de origem vulcânica, formados por lavas básicas, as quais são mais fluidas, permitindo que o derrame se espalhe por longas distâncias em camadas aproximadamente horizontais. Entre essas camadas, podem ocorrer brechas basálticas, as quais são camadas de menor resistência e maior deformabilidade que o basalto, constituindo assim caminhos preferenciais de percolação (Silveira, 2003). A Figura 6 mostra um esquema da implantação da barragem principal sobre o perfil estratigráfico do maciço rochoso de fundação, salientando os derrames mais superficiais (A, B, C, D e E), além das brechas basálticas e do basalto vesicular amigdalóide entre os mesmos.



**Fig. 6** – Perfil estratigráfico das fundações de Itaipu Binacional, adaptado de Itaipu (2013).

De acordo com Itaipu (2013), 2.400 instrumentos constituem o sistema de monitoramento da barragem, estando 1358 instalados no concreto, 881 nas fundações e 161 ao longo da barragem, com a finalidade de medição de deslocamentos por métodos geodésicos. Devido às grandes dimensões da obra e à presença das discontinuidades descritas, desde o início do projeto e da construção da barragem houve grande preocupação para que fosse assegurada a estanqueidade da fundação, visando a segurança da barragem. Por esse motivo, o fluxo através da barragem e do maciço de fundação tem sido constantemente monitorado através de instrumentação e de inspeções visuais. Entre os instrumentos com essa finalidade, podem ser citados os piezômetros e os medidores de vazão.

Além das medidas de vazão e de poropressão, outros parâmetros vêm sendo monitorados ao longo do tempo, como por exemplo os deslocamentos horizontais e verticais, movimentação de juntas e tensões. Entre os instrumentos, podem ser citados os pêndulos diretos, as bases de alongômetro, os deformímetros, os tensômetros e os medidores de junta. Os instrumentos vêm sendo acompanhados desde 1982, compreendendo um grande banco de dados.

### 3.1 – Coleta e pré-processamento dos dados

Devido às grandes dimensões da barragem, foi necessário escolher uma região de interesse para o estudo. Dessa forma, a barragem de concreto principal de Itaipu, denominada Trecho F, foi selecionada para análise (Figura 5, trecho 5). O Trecho F é considerado uma das áreas de maior responsabilidade, pois está locado imediatamente a montante da casa de força, além de estar sujeito às maiores solicitações de carga hidráulica. A Figura 7 apresenta uma fotografia da região da casa de força, Prédio dos Pesquisadores, dutos de tomada d'água e Trecho F ao fundo.

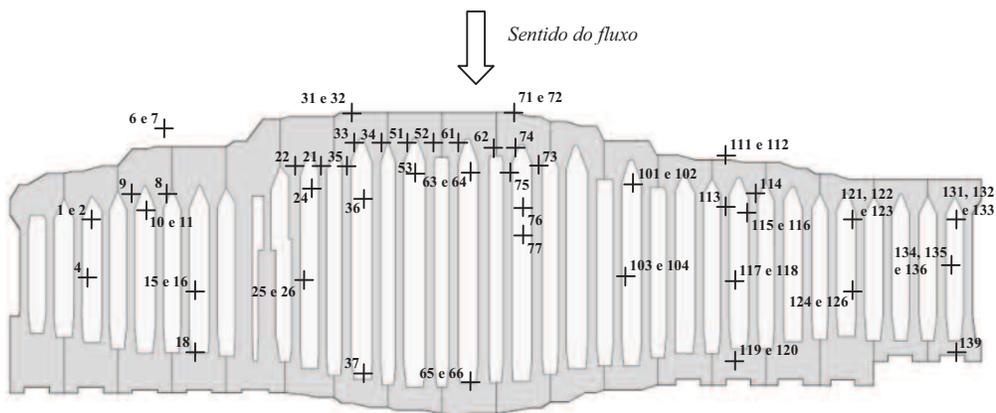


**Fig. 7** – Fotografia da região da casa de força e barragem principal de Itaipu.

Para aplicação do método, primeiramente foi necessário definir os instrumentos que seriam estudados. Devido às condições geológico-geotécnicas do maciço de fundação, onde é verificada maior permeabilidade em determinadas camadas, considerou-se que os dados de piezometria seriam de grande relevância para elaboração deste trabalho. Salienta-se que o método aqui apresentado pode ser utilizado também para outros tipos de instrumentos.

Os piezômetros são utilizados com a finalidade de determinar a poropressão nos maciços de fundação e a subpressão nos encontros com as estruturas de concreto, os quais agem em sentido contrário ao do peso próprio da estrutura, responsável pelo equilíbrio em barragens de gravidade. Por esse motivo, esses esforços podem levar a deslocamentos desestabilizantes, como escorregamentos, tombamentos ou flutuação (Silveira, 2003).

O estudo utiliza os dados de 66 piezômetros locados no Trecho F de Itaipu Binacional, cuja locação em planta está apresentada na Figura 8. Os mesmos estão instalados em diferentes profundidades, com a finalidade de acompanhar as pressões neutras nas diferentes camadas que compõem a fundação da barragem. Detalhes acerca do tratamento de fundação através de cortina de injeção e do sistema de drenagem da área em questão podem ser consultados em Andraos *et al.* (2008), os quais apresentam um mapeamento geoestatístico relacionado aos dados de piezometria.



**Fig. 8** – Locação dos piezômetros do Trecho F da barragem de Itaipu Binacional.

### 3.1.1 – Organização dos dados no período de tempo estudado

Os dados piezométricos estavam organizados em arquivos eletrônicos contendo o código do instrumento, dada e hora da leitura, leitura realizada em campo e carga hidráulica total. Dessa forma, foi necessária uma preparação dos dados anteriormente à análise.

O período de aquisição das leituras iniciou-se em Fevereiro/1981 e os dados disponíveis finalizam em Fevereiro/2006. Apesar de estarem disponíveis dados desde o enchimento, foram analisadas apenas as leituras compreendidas entre 1996 e 2006 ( $\Delta t=10$  anos), como forma de eliminar a influência de fatores que não estão mais afetando o comportamento da barragem, conforme recomendação da equipe de Engenharia Civil da Itaipu. Entre os mesmos, pode ser citada a influência do enchimento do reservatório nas leituras piezométricas.

#### 3.1.1.1 – Agrupamento de leituras para cada data disponível

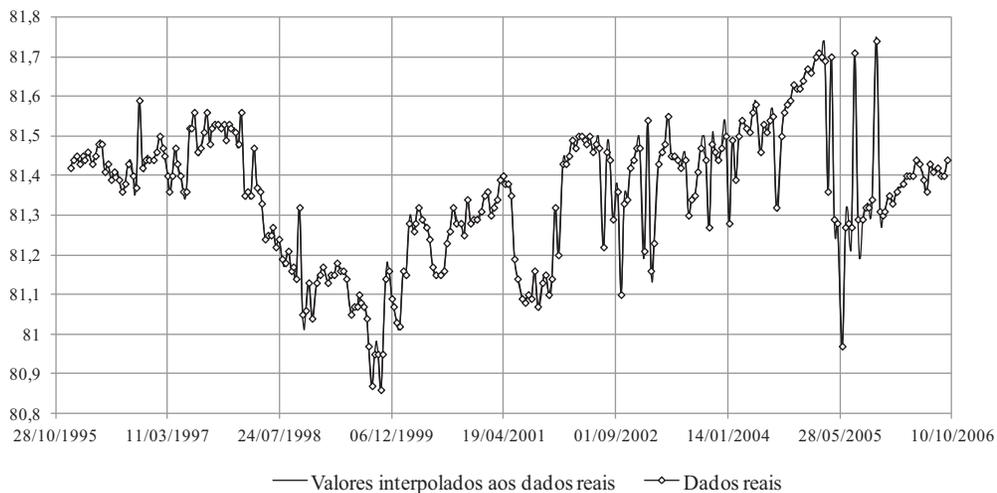
Em função das grandes dimensões desta barragem, a equipe responsável pelas leituras dos instrumentos em campo está organizada em grupos de técnicos, sendo cada um dos quais responsável por um determinado tipo de instrumento e um trecho específico da barragem. Dessa forma, nem sempre é possível realizar as leituras de todos em uma mesma data.

O intervalo de tempo entre as leituras dos piezômetros não é constante. Durante o enchimento e a operação inicial da barragem, todos piezômetros eram monitorados com maior frequência para entendimento do comportamento inicial da barragem. Após esse período, a frequência entre as leituras diminuiu para os instrumentos que estavam apresentando comportamento constante e dentro de limites aceitáveis. Atualmente, os piezômetros do Trecho F de Itaipu possuem frequência de leitura semanal ou quinzenal. O número total de leituras por instrumento, relativas ao período compreendido entre 1996 e 2006, varia entre 269 e 552, como resultado das diferentes frequências de leitura.

Como consequência do exposto, em um grande número de casos não houve coincidência de datas das leituras dos piezômetros, sendo então necessário definir um procedimento de agrupamento das leituras para, posteriormente, proceder ao cálculo das correlações estatísticas. O estabelecimento de mecanismos para agrupamento de leituras parte do princípio de que o método deve se adequar aos dados, e não o contrário.

Para este trabalho o agrupamento de leituras foi feito baseando-se na obtenção de leituras faltantes através de interpolação. Isso significa que, quando da ocorrência de uma determinada data de interesse sem leitura de poropressão, foi possível obter a mesma através de interpolação. O *software* MatLab foi utilizado como ferramenta de interpolação, sendo todos os dados ajustados através de *spline* cúbica. Dessa forma, os dados reais foram complementados com dados artificiais nas datas onde essa informação não estava disponível. A interpolação através de *spline* cúbica se mostrou adequada para descrever o comportamento das leituras piezométricas, as quais são caracterizadas pela oscilação ao longo do tempo, apresentando picos que poderiam ser ocultados caso os dados fossem interpolados através de equações lineares.

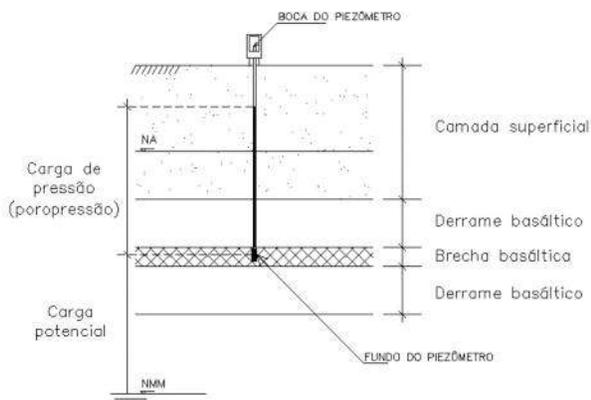
Para aplicação do método de agrupamento proposto, foi necessário pré-determinar um grupo de datas para as quais seriam calculados dados artificiais, caso não houvesse dados de leituras de campo. Dessa forma, foi estabelecido um grupo de 879 datas para obtenção das leituras de poropressão. Este número compreende as leituras reais (que variam entre 269 e 552 leituras por piezômetro) e demais datas escolhidas para interpolação. Como forma de possibilitar a análise qualitativa do ajuste, a Figura 9 apresenta os dados reais de carga hidráulica do piezômetro PS-F-001 ao longo do tempo, além dos dados artificiais interpolados aos mesmos.



**Fig. 9** – Carga hidráulica total real e artificial (piezômetro PS-F-001).

### 3.1.1.2 – Normalização de atributos

Os níveis piezométricos contidos nos arquivos texto inicialmente se referiam ao nível médio dos mares (NMM), ou seja, o valor de poropressão apresentado nas planilhas consistia na carga hidráulica total, sendo a mesma definida como a soma da carga potencial (de altitude) e da carga de pressão d'água no ponto de leitura (fundo do piezômetro). Como a carga de pressão é o valor de interesse na análise de segurança de barragens, foi descontado da carga hidráulica total o valor referente à carga potencial (elevação do fundo do piezômetro). A Figura 10 exemplifica o exposto, salientando também características presentes nas fundações de Itaipu.



**Fig. 10** – Perfil esquemático das leituras piezométricas nas fundações de Itaipu.

Para comparação dos dados de poropressão dos diferentes piezômetros foi necessário harmonizar as leituras dos mesmos, como forma de salientar apenas a variação da poropressão ao longo do tempo, minimizando-se a importância da amplitude da variação. Dessa forma, utilizou-se a normalização de atributos para cada um dos piezômetros individualmente, conforme exposto no ponto 2.1.2. Como resultado, para cada um dos instrumentos, todas as leituras de poropressão/subpressão passaram a variar de 0 (menor leitura) a 1 (maior leitura).

### 3.1.2 – Aplicação do método de análise dos dados

Primeiramente, para adequada aplicação do método de análise dos dados, foi necessário definir qual o procedimento de cálculo das correlações estatísticas a ser adotado. A análise dos diagramas de dispersão entre os piezômetros mostrou que polinômios do 1° ou 2° grau poderiam se ajustar adequadamente aos dados. Por esse motivo, utilizou-se correlações lineares e quadráticas como forma de estudar a semelhança entre os instrumentos.

Foi necessário estabelecer um procedimento computacional através do *software* MatLab para cálculo das correlações estatísticas e verificação da representatividade das mesmas. Dessa forma, foi obtida uma matriz na qual são apresentados os coeficientes de correlação linear e outra matriz na qual são apresentados os coeficientes de correlação quadrática. Cada uma das matrizes citadas possui 66 linhas e 66 colunas, cada uma das quais representado um dos instrumentos em estudo, resultando em 4356 coeficientes de correlação por matriz.

### 3.1.3 – Análise dos resultados

Os resultados mostraram que os coeficientes obtidos através de correlação quadrática diferem significativamente daqueles obtidos através de correlação linear, sendo, dessa forma, capazes de descrever mais adequadamente o comportamento dos piezômetros, reduzindo os desvios entre os valores estimados e os valores reais. Por esse motivo, o agrupamento dos instrumentos foi feito com base nos dados obtidos através da correlação quadrática.

Visando o agrupamento dos instrumentos adotou-se um coeficiente de correlação mínimo igual a 50% para que um piezômetro venha a pertencer a uma determinada família de instrumentos com leituras correlacionáveis. Após a definição das famílias de comportamento correlato, foram investigados os principais fatores que resultaram na similaridade entre os instrumentos, fornecendo assim indícios acerca do desempenho da barragem. Os mecanismos estudados englobam aspectos relativos às características do subsolo e à eficiência do tratamento de fundação.

Dessa forma, foram formadas 8 famílias de comportamento similar, conforme apresentado no Quadro 4, o qual também resume os principais fatores que levaram à similaridade entre os instrumentos. Os instrumentos PS-F-007, PS-F-062, PS-F-103, PS-F-114, PS-F-124 e PS-F-126 não puderam ser integrados em nenhuma das famílias formadas, indicando que possuem comportamento independente dos demais.

Através da análise das características das famílias formadas, é possível perceber que há uma relação entre as características geológicas da fundação e o agrupamento dos piezômetros, mesmo que tais características não tenham sido consideradas anteriormente à divisão dos grupos. Também constituem fatores associados ao agrupamento dos piezômetros a localização dos mesmos em relação à cortina de drenagem e à cortina de injeção.

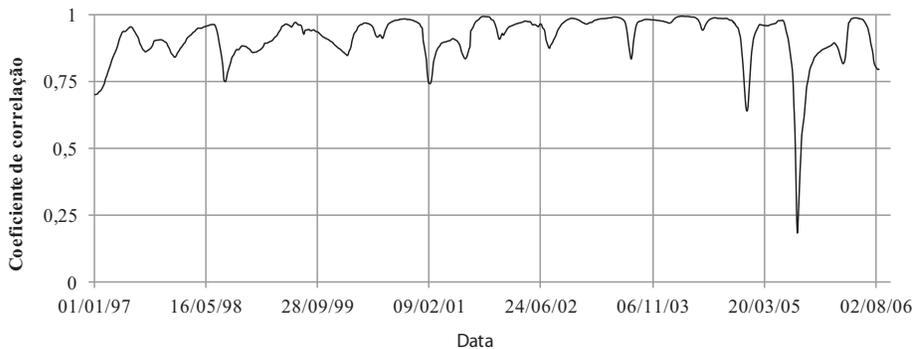
**Quadro 4** – Grupos ou famílias de piezômetros formados com base na correlação quadrática.

Grupo	Instrumentos			Características
1	PS-F-004 PS-F-036 PS-F-077 PS-F-118	PS-F-024 PS-F-037 PS-F-116 PS-F-119	PS-F-026 PS-F-076 PS-F-117 PS-F-120	Relacionamento com o contato entre os derrames A e B e brecha basáltica pertencente ao derrame B. Locados a jusante da cortina de injeção, com exceção dos piezômetros PS-F-076 e PS-F-116.
2	PS-F-025	PS-F-066	PS-F-139	Locados a jusante da cortina de drenagem, estando relacionados a junta basáltica do derrame B e ao contato entre os derrames A e B.
3	PS-F-015	PS-F-018	PS-F-132	Os piezômetros PS-F-015 e PS-F-018 estão localizados na mesma feição geológica e a jusante da cortina de drenagem. O piezômetro PS-F-132, apesar de estar instalado em outra feição geológica e a montante da cortina de drenagem, apresentou comportamento similar ao dos outros instrumentos.
4	PS-F-001 PS-F-016 PS-F-104	PS-F-002 PS-F-065 PS-F-131	PS-F-011 PS-F-102	Locados entre a linha de drenos e a cortina de injeção, com exceção dos piezômetros PS-F-016, PS-F-102 e PS-F-104. Relacionados principalmente a brecha e descontinuidades presentes no derrame B, além de outras feições.
5	PS-F-010	PS-F-064	PS-F-133	Os piezômetros pertencentes a esse grupo possuem a característica de estarem locados entre a cortina de injeção e a cortina de drenagem, estando relacionados à brecha basáltica do derrame B e ao contato entre os derrames A e B.
6	PS-F-031 PS-F-134	PS-F-052	PS-F-115	Os instrumentos pertencentes a esse grupo estão localizados entre a linha de drenos e a cortina de injeção, com exceção do piezômetro PS-F-134. Relacionados a diferentes feições geológicas.
7	PS-F-006 PS-F-072 PS-F-111 PS-F-122 PS-F-136	PS-F-032 PS-F-075 PS-F-112 PS-F-123	PS-F-035 PS-F-101 PS-F-121 PS-F-135	Piezômetros locados a montante da cortina de injeção ou entre a linha de drenos e cortina de injeção, com exceção dos piezômetros PS-F-035 e PS-F-036. Relacionamento com várias feições do solo.
8	PS-F-008 PS-F-022 PS-F-051 PS-F-063 PS-F-074	PS-F-009 PS-F-033 PS-F-053 PS-F-071 PS-F-113	PS-F-021 PS-F-034 PS-F-061 PS-F-073	Piezômetros relacionados ao contato das estruturas de concreto com a rocha de fundação, com exceção dos piezômetros PS-F-053, PS-F-063 e PS-F-071, estando locados na região de montante da barragem.

### 3.1.3.1 – Detecção de anomalias em instrumentos

Os coeficientes de correlação utilizados no agrupamento dos instrumentos, foram calculados para o período de tempo compreendido entre 1996 e 2006 ( $\Delta t=10$  anos), ou seja, foi definido um único coeficiente de correlação para cada dupla de piezômetros considerando o período citado. Entretanto, a consideração de períodos de tempo menores no cálculo da correlação pode ser utilizada para detecção de comportamentos anômalos dos instrumentos.

Como exemplificação, este tópico aborda o estudo das correlações lineares entre os piezômetros PS-F-008 e PS-F-113, cujo coeficiente é de 82% para  $\Delta t = 10$  anos. Conforme apresentado na Figura 11, foi feito o estudo da evolução dos coeficientes de correlação linear ao longo do período entre 1996 e 2006, considerando-se no cálculo intervalos de tempo menores ( $\Delta t = 1$  ano).



**Fig. 11** – Evolução da correlação linear entre os piezômetros PS-F-008 e PS-F-113.

Através da análise da Figura 11, é possível verificar que os coeficientes de correlação calculados para o intervalo de tempo pré-determinado ( $\Delta t = 1$  ano) não são constantes, apresentando pequenas variações. Entretanto, entre os anos de 2005 e 2006 ocorre uma diminuição abrupta dos coeficientes de correlação. Dessa forma, a análise da evolução das correlações foi capaz de detectar um comportamento inesperado, podendo ser um indício de mau funcionamento do instrumento ou comportamento anômalo na barragem.

De acordo com os dados obtidos em campo, em junho/2005 foi feita a preparação para automação do piezômetro PS-F-113, a qual resultou em um alívio de pressão devido ao mau funcionamento do medidor instalado. Por esse motivo, o medidor foi substituído em agosto/2005, voltando o piezômetro a apresentar comportamento normal. Dessa forma, o comportamento inesperado entre as correlações dos instrumentos PS-F-008 e PS-F-113 observado entre 2005 e 2006 pode ser explicado pela instalação do medidor defeituoso.

Neste caso específico a mudança nos valores de coeficiente de correlação pode ser justificada pela substituição do instrumento de medição, sem maiores consequências para a segurança da barragem. No entanto, caso uma eventual mudança de comportamento das leituras do piezômetro estivesse ocorrendo devido a outros mecanismos, essa mudança também seria identificada de modo análogo.

### 3.1.3.2 – Estimativa de leituras

Como forma de verificar a eficiência dos resultados obtidos, podem ser utilizada regressão estatística com o objetivo de estimar as leituras de um determinado piezômetro, a partir das leituras de outros instrumentos pertencentes ao mesmo grupo de comportamento. O procedimento descrito tem a finalidade de verificar se haveria perda significativa de dados caso fosse diminuída a frequência de leituras do instrumento selecionado, mantendo-se a frequência de leituras dos outros instrumentos. Procedimento similar ao descrito também pode ser utilizado na obtenção de dados artificiais que substituam leituras faltantes ou problemáticas.

Como exemplificação, são utilizados os dados da Família 7, selecionando-se os piezômetros PS-F-035, PS-F-075 e PS-F-122 como instrumentos de interesse devido aos altos coeficientes de

correlação quadrática apresentados entre os mesmos. O piezômetro PS-F-075 é adotado como variável dependente, ou seja, as leituras do mesmo são calculadas em função das leituras das variáveis independentes PS-F-035 e PS-F-122. A Equação 6, obtida através de regressão linear múltipla, tem a finalidade de descrever o comportamento das leituras do piezômetro em questão ao longo do período compreendido entre 1996 e 2006. O parâmetro  $R$  obtido indica que o modelo ajustado explica 98,1% da variabilidade do piezômetro PS-F-075.

$$L_{PS-F-075} = 4,13742 + 0,59763 \times L_{PS-F-035} + 0,06877 \times L_{PS-F-122} \quad (6)$$

$L_{PS-F-075}$  – leitura calculada do piezômetro PS-F-075 em uma data  $t$ ;

$L_{PS-F-035}$  – leitura do piezômetro PS-F-035 em uma data  $t$ ;

$L_{PS-F-122}$  – leitura do piezômetro PS-F-122 em uma data  $t$ .

A Figura 12 mostra a comparação entre os dados reais e os dados ajustados ao piezômetro PS-F-075, no período de tempo compreendido entre 1996 e 2006. É possível perceber que a regressão estatística foi capaz de estimar leituras intermediárias do piezômetro escolhido, indicando que, caso houvesse interesse, a frequência de leituras do mesmo poderia ser diminuída sem perda considerável de informação.

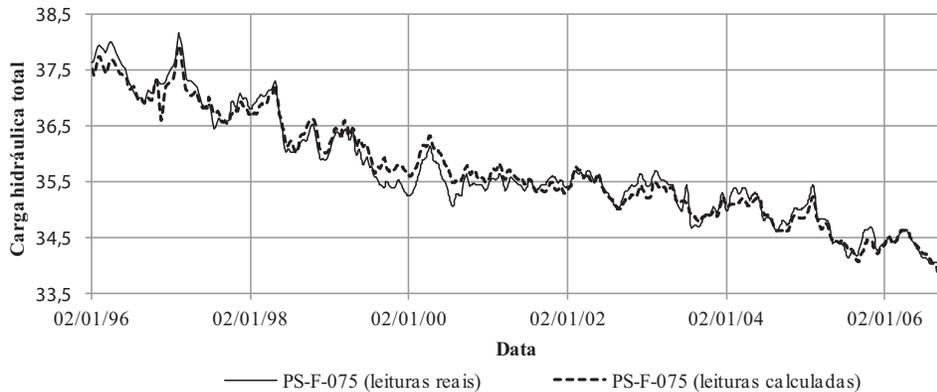


Fig. 12 – Comparação entre os dados reais e as leituras calculadas do piezômetro PS-F-075.

#### 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento de barragens ao longo do ciclo de vida é de fundamental importância para a segurança das mesmas, uma vez que falhas ou imperfeições podem resultar em consequências desastrosas. Dessa forma, o presente trabalho apresenta um método de avaliação de desempenho de barragens por meio de agrupamento de instrumentos de comportamento similar, utilizando técnicas estatísticas como ferramenta de análise dos dados. Como forma de exemplificação, o método proposto é aplicado sobre dados de instrumentação da barragem de Itaipu Binacional, permitindo validar o método.

A análise estatística dos dados envolveu o cálculo de correlações entre os piezômetros pertencentes ao Trecho F da barragem principal de Itaipu, com a finalidade de avaliar a similaridade entre as leituras dos mesmos no período de tempo considerado. Como resultado, foi possível

organizar os instrumentos em famílias de comportamento correlato, as quais forneceram indícios dos mecanismos que influenciam nas leituras obtidas em campo, principalmente no que se refere às características do subsolo e à localização dos mesmos em relação ao tratamento de fundação.

O método proposto foi capaz de avaliar o desempenho dos instrumentos instalados no corpo da barragem, através da detecção de comportamentos anômalos e de defeitos em instrumentos, podendo servir como ferramenta para geração de critérios de alerta. Além disso, o método se mostra capaz de estimar leituras intermediárias para instrumentos que pertençam a mesma família de comportamento, podendo ser utilizado para recuperação de leituras falhas ou verificação de leituras problemáticas.

Para trabalhos futuros, sugere-se que o método exposto seja aplicado em diferentes instrumentos de monitoramento de barragens, buscando explicar os mecanismos que resultaram no comportamento similar ou heterogêneo entre os mesmos. No caso específico dos piezômetros, uma contribuição interessante seria a determinação das redes de fluxo dos maciços de fundação através de elementos finitos, com a finalidade de comparação com os resultados de agrupamento e leituras de campo.

## 5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe de engenharia da Itaipu Binacional por fornecer os dados aqui utilizados.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andraos, N.C.; Sanchez, P.F.; Dyminski, A.S.; Ribeiro Jr., P.J.; Osako, C.I. (2008). *Mapeamento geostatístico de subpressões no maciço de fundação da barragem de Itaipu*. XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG (RJ), Búzios.
- Bowles, D.S. (2004). *ALARP evaluation: using cost effectiveness and disproportionality to justify risk reduction*. ANCOLD Bulletin, vol. 127, pp. 73-88.
- Buzzi, M.F. (2007). *Avaliação das correlações de séries temporais de leituras de instrumentos de monitoração geotécnico-estrutural e variáveis ambientais em barragens – Estudo de caso de Itaipu*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná (BR), Curitiba.
- Charles, J.A.; Tedd, P.; Warren, A. (2011). *Evidence Report – Lessons from historical dam incidents*. Environment Agency (UK), Bristol.
- Chonghui, F.; Xiang, H.; Yahui, D.; Boqing, F. (2012). *Analysis of dam-break case of concrete arch dam and forecast of failure scope based on point safety factor*. Procedia Engineering, vol. 28, pp. 617-625.
- Cohen, J. (1992). *Statistical Power Analysis*. Current Directions in Psychological Science, vol. 1, no 3, pp. 98-101.
- Comitê Brasileiro de Barragens (2001). *Guia Básico de Segurança de Barragens*. Comissão Regional de Segurança de Barragens (BR), São Paulo.
- Dam Safety (2013). *Association of State Dam Safety Officials*. <http://www.damsafety.org/>
- Department of Natural Resources and Mines (2002). *Queensland Dam Safety Management Guidelines*. Queensland Government (AU), Brisbane.

- Dunnicliff, J. (1993). *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*. 2ª edição. John Wiley & Sons (US), New York.
- Graham, W.J. (1999). *A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure*. Bureau of Reclamation, United States Department of Interior (US), Denver.
- He, X.Y.; Wang, Z.Y.; Huang, J.C. (2008). *Temporal and spatial distribution of dam failure events in China*. International Journal of Sediment Research, vol. 23, pp. 398-405.
- Itaipu (2013). Itaipu Binacional. <http://www.itaipu.gov.br/>
- Mata, J. (2010). *Interpretation of concrete dam behaviour with artificial neural network and multiple linear regression models*. Engineering Structures, vol. 33, pp. 903-910.
- Papadrakakis, M.; Papadopoulos, V.; Lagaros, N.D.; Oliver, J.; Huespe, A.E., Sánchez, P. (2006). *Vulnerability analysis of large concrete dams using the continuum strong discontinuity approach and neural networks*. Structural Safety, vol. 30, pp. 217-235.
- Rico, M.; Benito, G.; Salgueiro, A.R.; Díez-Herrero, A.; Pereira, H.G. (2008). *Reported tailing dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context*. Journal of Hazardous Materials, vol. 152, pp. 846-852.
- Salking, N.J. (2011). *Statistics for people who (think they) hate statistics*. 4ª edição. SAGE Publications Inc (US), Thousand Oaks.
- Silveira, J.F.A. (2003). *Instrumentação e Comportamento de Fundações de Barragens de Concreto*. Oficina de Textos (BR), São Paulo.
- Spiegel, M.R.; Stephens, L.J. (2011). *Statistics*. 4ª edição. The McGraw-Hill Companies Inc (US), New York.
- Tan, P.N.; Steinbach, M.; Kumar, V. (2005). *Introduction to Data Mining*. 1ª edição. Addison-Wesley Longman Publishing Co. (US), Boston.