

DISCUSSÃO SOBRE VALORES DE CONTROLE PARA A INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS

Túlio Marcos de VASCONCELLOS Filho
Engenheiro Civil – Enemax Engenharia e Consultoria Ltda.

Marina Alves RACHID
Engenheiro Civil – Enemax Engenharia e Consultoria Ltda.

Marcela Nogueira Cesar MARTINS
Engenheira Civil – Walm BH Engenharia Ltda.

Eric Silveira NUNES
Graduando em engenharia civil – Enemax Engenharia e Consultoria Ltda.

Teresa Cristina FUSARO
Engenheira Civil MSc. – Fusaro Engenharia e Consultoria Ltda

RESUMO

O estabelecimento de “valores de controle” ou “valores limite” para a instrumentação de barragens tem como finalidade estipular faixas ou limites dentro dos quais as medidas são esperadas, de forma a permitir o diagnóstico precoce de tendências adversas que possam sugerir o desenvolvimento de um eventual modo de falha. Todavia, há divergência de padrões e critérios, e até mesmo desconhecimento, na definição destes valores. Neste contexto, o presente artigo descreve brevemente as metodologias determinísticas e estatísticas usualmente empregadas para esta finalidade e apresenta sugestão para a definição e nomenclatura de valores de controle para a instrumentação.

ABSTRACT

The purpose of establishing “action levels” or “threshold limits” for dam instrumentation is to define ranges or limits within which measurements are expected, to allow early diagnosis of adverse trends that may suggest the development of an eventual failure mode. However, there is lack of standards and criteria, and even lack of knowledge, in the definition of these values. In this context, this article briefly describes some of the deterministic and statistical methodologies usually used for this purpose and presents a suggestion for definition and nomenclature of instrumentation threshold values.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo principal da instrumentação de barragens é fornecer dados para avaliar se a estrutura está funcionando conforme esperado e fornecer avisos (alertas) de mudança de condições que possam indicar risco à segurança da barragem. Apesar de desvios entre o comportamento medido e o esperado poderem ser devidos a condições que não foram contabilizadas no comportamento esperado ou a dados ou observações que não representem adequadamente o comportamento da barragem, estes desvios podem indicar um comportamento anormal da barragem.

Daí a importância do estabelecimento de “valores-limite” ou “valores de controle”, para sinalizar medidas ou tendências adversas que possam indicar de forma preventiva que um modo de falha esteja em desenvolvimento. Somente o estabelecimento destas faixas e a automação da verificação imediata dos dados após a leitura permitem o diagnóstico precoce de anomalias no comportamento de uma barragem.

Segundo a ICOLD [1], desde a década de 80 há um crescente interesse da comunidade técnica no estabelecimento de valores limites para os dados de instrumentação de barragens. Como na época os métodos computacionais de dimensionamento ainda eram bastante limitados, na França, Japão e Suíça as previsões das leituras da instrumentação eram então feitas por meio de métodos estatísticos, sendo utilizadas regressões para se obter as leituras esperadas a partir do histórico de leituras coletadas por um determinado instrumento.

A Itália foi o país precursor na tentativa de prever leituras utilizando métodos determinísticos e de estabelecer “faixas de tolerância” ou espectros distintos de comportamento de uma estrutura (normal, alerta leve e alerta sério), dependendo do desvio entre os valores medidos e aqueles previstos. Na época, os limites das duas primeiras faixas eram fixados com base na série histórica de medidas (duas e três vezes o desvio padrão, respectivamente). Os limites da terceira faixa eram fixados pela projetista, com base em modelos matemáticos (muitas vezes “calibrados” com os dados da instrumentação) e coeficientes de segurança adotados.

Esta metodologia conjugada (limites determinísticos e estatísticos) disseminou-se principalmente a partir da década de 90. Os termos “valores-limite”, “níveis limite”, “faixas de tolerância” e, até mesmo, “carta de risco” difundiram-se no meio técnico brasileiro como valores que, se atingidos, sinalizariam condições de alerta para a instrumentação ou a barragem. No entanto, pode ser observada divergência de padrões e critérios, e até mesmo desconhecimento, na definição destes valores. Neste contexto, o presente trabalho descreve brevemente as metodologias determinísticas e estatísticas usualmente empregadas para esta finalidade e apresenta sugestão para a definição e nomenclatura de valores de controle para a instrumentação.

2. VALORES DE CONTROLE SEGUNDO A ICOLD

O Boletim 158 da ICOLD – International Commission on Large Dams [2] apresenta possibilidades para a definição de limites para medidas da instrumentação para sistemas automatizados, apoiados em modelos com base em dados históricos (modelos estatísticos), em uma formalização matemática lógica das leis que regem o funcionamento da barragem (modelos determinísticos) ou tomando estas considerações conjuntamente (modelos híbridos).

O estabelecimento de um modelo estatístico válido exige a existência de um número suficiente de observações, tomadas em uma gama suficientemente variada de "grandezas-causa" (diferentes níveis de montante, por exemplo). É, portanto, adequado para "controle" durante a fase de operação da barragem. Tem como vantagem ser de fácil desenvolvimento e não exigir conhecimento prévio da geometria da barragem, nem mesmo das propriedades dos materiais (como, por exemplo, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para o concreto e para a rocha, e propriedades geomecânicas dos solos e fundações).

Por outro lado, um bom modelo determinístico é o único que permite obter valores de referência indispensáveis para o controle de segurança durante o primeiro enchimento do reservatório, fase mais crítica da vida útil da barragem. No entanto, os modelos numéricos possuem limitações, bem como há incertezas e variabilidades nas propriedades dos materiais (concreto, solo, rocha) e, em especial, nas características das fundações. Além do mais, nenhum modelo é, de fato, puramente determinístico, pois os valores dos parâmetros dos materiais são fornecidos por análises estatísticas. Assim, segundo [1], só é possível, no início da vida útil da instalação, definir um valor de controle adequado dentro de um "intervalo de referência" mais amplo.

Com base em valores-limite previamente definidos, os sistemas automatizados podem enviar advertências (*warnings*), que devem ser consideradas como alertas antecipados emitidos quando é detectada uma alteração do comportamento habitual ou do comportamento esperado da barragem, e que devem ser interpretados pela equipe responsável pela segurança da barragem. Estas advertências podem ser:

- Alerta - os dados medidos estão fora da faixa esperada, levando em consideração as mudanças comuns devido a cargas cíclicas ou estacionárias.
- Alarme - o nível máximo previsto, pelo qual os coeficientes de segurança para a estrutura foram calculados, foi superado.

A ICOLD considera ainda que os valores-limite devem ser revistos periodicamente, visto que o comportamento das barragens não é constante com o tempo, de modo que, frequentemente, efeitos irreversíveis são refletidos em alterações da tendência temporal das medidas.

3. VALORES DE CONTROLE SEGUNDO ASCE E FERC

Para o ASCE [3], os valores-limite servem para sinalizar instrumentos com medidas ou tendências adversas e indicar um foco adicional a ser colocado nesses instrumentos. Para tal, propõe os seguintes níveis:

- Nível limite¹ (*Threshold limit*): valor proveniente de análises / projeto ou um valor estabelecido pelo histórico de medidas que, se excedido, necessita de maior investigação.
- Nível de ação (*Action level*): valor que aciona o aumento da frequência de monitoramento (inspeção visual e instrumentação) ou uma intervenção.

Os níveis Limite e de Ação podem ser baseados em estudos teóricos ou analíticos (por exemplo, leituras de pressão acima das quais as diretrizes de estabilidade não são mais atendidas). Em outros casos, eles podem precisar ser desenvolvidos com base no comportamento medido (por exemplo, infiltração de uma barragem de aterro). Algumas vezes podem ser usados para identificar leituras incomuns, leituras fora dos limites da faixa histórica do instrumento ou leituras que, no julgamento do engenheiro responsável, exigem avaliação. Limites de magnitude, taxa de mudança e de correlação entre instrumentos também podem ser estabelecidos se julgado pertinente.

Estes valores de controle podem ser empregados para auxiliar em tomadas de decisão quanto às ações necessárias no caso de serem excedidos, como a seguir.

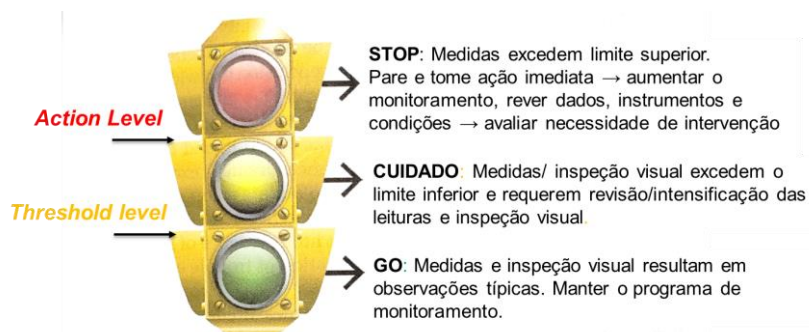


FIGURA 1 – Stop-Caution-Go (adaptado de ASCE [3]).

O FERC [4] também indica que os dados da instrumentação devam ser comparados com os níveis limite estabelecidos no programa de monitoramento, denominados "*Threshold Limits*". Segundo o FERC, os dados devem ser comparados com as premissas de projeto e, se houver dados disponíveis, com os casos de carregamentos excepcionais. Devem, também, serem avaliados quanto a tendências, como diminuir ou aumentar com o tempo ou profundidade, flutuação sazonal, variação direta com o nível do reservatório ou de jusante, variação direta com a temperatura ou uma combinação de tais tendências. A análise estatística dos dados pode ser útil na avaliação de tendências que são obscurecidas pela dispersão, sem, entretanto, substituir o julgamento baseado na experiência e no bom senso.

¹ Tradução livre dos autores.

Leituras que excedem os limites não significam necessariamente que uma ação drástica deve ser tomada, apenas que alguma ação deve ser tomada. O programa de monitoramento deve incluir ações a serem tomadas se um instrumento atingir seu limite. No entanto, as ações predeterminadas não substituem as respostas específicas da situação e devem ser usadas apenas como diretrizes.

4. VALORES DE CONTROLE SEGUNDO O US CORPS OF ENGINEERS

O Corps of Engineers [5] também indica a definição de valores limite (*“threshold values”*) para medidas da instrumentação, que devem ser utilizados como base para definição de alarmes e alertas para uma resposta ágil para avaliação e tratamentos de anomalias do barramento.

Os critérios para definição dos valores limites devem ser estabelecidos a partir da compreensão dos elementos de fundação, materiais e geometria do barramento, contatos com outras estruturas, variações sazonais do reservatório, precisão do equipamento e modos de falha em potencial, e devem ser bem documentados para auxílio em análises futuras do comportamento do instrumento. Podem ser definidos a partir de alterações de leitura entre campanhas e de mudanças de tendência no comportamento dos instrumentos ao longo de um número maior de campanhas.

Além destas definições e orientações, o Corps of Engineers [6] propõe a integração de métodos determinísticos e estatísticos, levando a três tipos distintos de valores de controle, denominados limites de projeto, limites de atenção e indicadores de desempenho.

Limites de projeto constituem valores que expressam limites aceitáveis para deslocamentos, pressões e vazões de percolação, para um determinado coeficiente de segurança. Estes são estabelecidos originalmente durante o projeto da barragem, usualmente através de modelos determinísticos e, posteriormente, são calibrados com base nas observações durante a vida útil da estrutura. Em síntese, constituem os critérios de segurança da barragem sob a visão da projetista.

Limites de atenção são valores de alerta, estabelecidos abaixo dos limites de projeto, para permitir reparos ou alteração nos procedimentos operacionais da barragem antes que uma situação de risco iminente à sua segurança se estabeleça. Definem, portanto, um limite acima (ou abaixo) da faixa de dados históricos e abaixo do fator de segurança de projeto.

Indicadores de desempenho são valores estatísticos que antecipam a faixa de medidas previstas para um dado parâmetro monitorado. São utilizados para chamar a atenção para dados que se desviam das tendências históricas e para prever valores futuros. Estes indicadores buscam a relação dos parâmetros monitorados com o tempo ou representam relações carregamento x resposta (FIGURA 2), tais como:

- cota piezométrica x nível do reservatório;

- vazão de percolação x nível do reservatório ou precipitação;
- concentração química x nível do reservatório;
- deslocamento x nível do reservatório ou taxa de deplecionamento do reservatório.



FIGURA 2 – Exemplo de Valores de Controle para a instrumentação (adaptado de USACE [6]).

5. VALORES DE CONTROLE NO BRASIL

No Brasil não há um consenso sobre valores de controle para a instrumentação, que são denominados níveis de alerta e atenção, níveis limite, valores limite, valores de referência e, até mesmo, carta de risco.

Conforme ANM [7], para barragens de mineração devem ser definidos níveis de controle da instrumentação, que definem os limites aceitáveis para os instrumentos instalados na estrutura como normal, alerta e emergência. Estes têm como objetivo auxiliar na avaliação de segurança da barragem e na tomada de decisão para ações preventivas e corretivas. A ANEEL [8] define valor de referência da instrumentação como o valor de controle que permite sua comparação com os valores medidos, de maneira a possibilitar a identificação de potenciais anomalias de comportamento.

Já a ELETROBRÁS [9] emprega os termos valores de controle ou valores de referência da instrumentação de forma intercambiável, e indica que devem ser definidos para permitir sua futura comparação com os valores medidos, visando facilitar a pronta detecção de eventuais anomalias de comportamento, e devem ser obtidos a partir de critérios de projeto, modelos matemáticos e modelos reduzidos. Aponta também a necessidade de revisão destes valores de controle após o período de enchimento e em intervalos regulares de tempo.

Como pode ser visto, há divergência na nomenclatura e não estão estabelecidos padrões ou critérios para a definição dos valores de controle. Há uma tendência de

serem denominados valores de controle determinísticos ou valores/níveis de atenção e alerta, quando os valores são oriundos de análises de estabilidade e associados a um determinado fator de segurança. No caso de barragens de terra, geralmente são obtidos elevando a linha freática gradualmente, reduzindo o fator de segurança até valores limite de estabilidade.

Como a elevação da linha freática nem sempre é capaz de reduzir os coeficientes de segurança para valores inferiores a $FS=1,50$, ou, muitas vezes levam a condições de operação indesejadas (tais como saturação do talude de jusante ou gradientes elevados no tapete drenante), alguns autores indicam condições de contorno adicionais a serem consideradas nos estudos empregando modelos numéricos.

Podem ser citados Velten *et al.* [10], que apresentam uma metodologia considerando a linha freática sem tocar o talude de jusante para a definição de níveis de segurança para piezômetros e medidores de nível d'água, e Ferreira [11], que utiliza como critério a condição de filtro trabalhando em carga com gradiente hidráulico de 5%, 15% e 20%, correspondendo respectivamente às condições de atenção, alerta e emergência.

Quando provêm de análises do comportamento da série histórica do instrumento ou associados a valores observados em barragens semelhantes têm sido chamados de valores de controle estatísticos ou valores/níveis de referência [12]. Estes valores geralmente são empregados na validação de leituras e para destacar alterações nas medidas dos instrumentos que necessitam de avaliação. Num primeiro momento, não devem ser interpretados como uma condição limite da estrutura, mas sim, como faixas de desempenho normal/adequado da série temporal do instrumento em questão.

O monitoramento de gradientes mínimos entre piezômetros também tem sido empregado por alguns projetistas, em especial para barragens de enrocamento com núcleo (nas quais dificilmente é possível reduzir o fator de segurança para um nível de alerta) e interfaces entre estruturas e terra e de concreto (onde o maior problema é erosão interna no contato). Esta metodologia tem algumas limitações e, neste caso, também devem ser limitados os gradientes elevados (para controlar o risco de erosão interna), bem como os níveis piezométricos, uma vez que se pode registrar um aumento das poropressões sem alterações significativas dos gradientes (FIGURA 3).

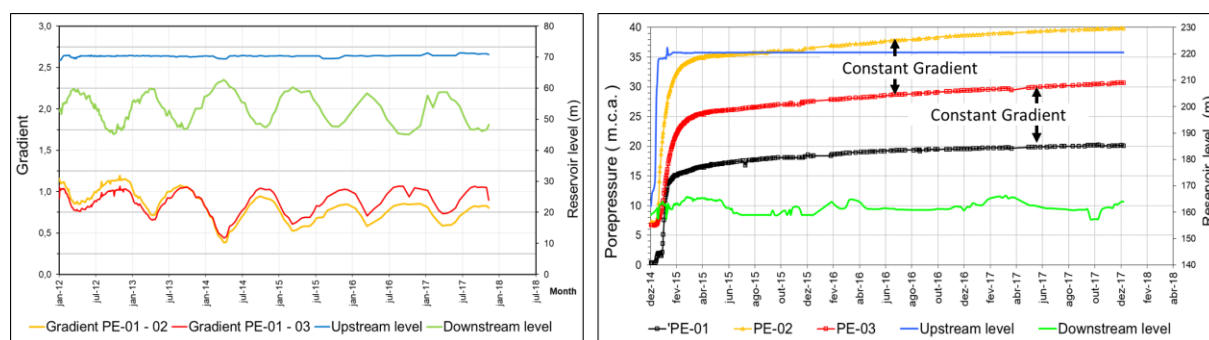


FIGURA 3 – Exemplo de (a) gradientes variando conforme variações de nível do reservatório e (b) poropressões crescentes com gradiente constante (adaptado de [13]).

Também tem sido empregada no Brasil a variação na velocidade de deslocamentos como valores de controle. Geralmente não têm sido estudadas correlações com níveis de montante ou jusante, temperatura, nem mesmo sazonalidade de medidas,

6. PROPOSTA DE ABORDAGEM PARA VALORES DE CONTROLE PARA A INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS

Os valores de controle para a instrumentação representam tipicamente valores que refletem as premissas de projeto ou que indiquem alteração no padrão histórico de medidas.

Podem ser obtidos por meio de modelos matemáticos, importantes na avaliação do estado de segurança de uma estrutura e no seu controle ao longo do tempo, pois explicitam a concepção, as premissas e os objetivos do projeto. No entanto, tais modelos possuem limitações (conhecimento limitado das propriedades tensão-deformação e de permeabilidade da barragem e dos materiais de fundação, por exemplo) e não conseguem prever alguns indicadores de segurança com precisão. Mesmo assim, têm enorme importância em especial na fase de enchimento do reservatório, quando ainda não se dispõe de um histórico de medidas que permita entender como a estrutura está respondendo aos carregamentos.

Quando os modelos matemáticos não conseguem refletir adequadamente as condições de projeto ou os valores obtidos numericamente para algumas grandezas monitoradas não são compatíveis com os valores observados em campo, podem ser empregados métodos estatísticos. Isto é comum de ser observado em vazões de percolação pela fundação e deformações, por exemplo.

Além disso, os métodos determinísticos geralmente levam a valores de controle fixos, ou seja, dissociados de variações sazonais dos carregamentos de reservatório, temperatura e pluviometria. Quando se deseja acompanhar as respostas aos carregamentos, também há necessidade de empregar modelos estatísticos.

Tendo em mente estes elementos, os valores de controle para a instrumentação podem ser classificados como apresentado na FIGURA 4 e descrito nos itens a seguir.

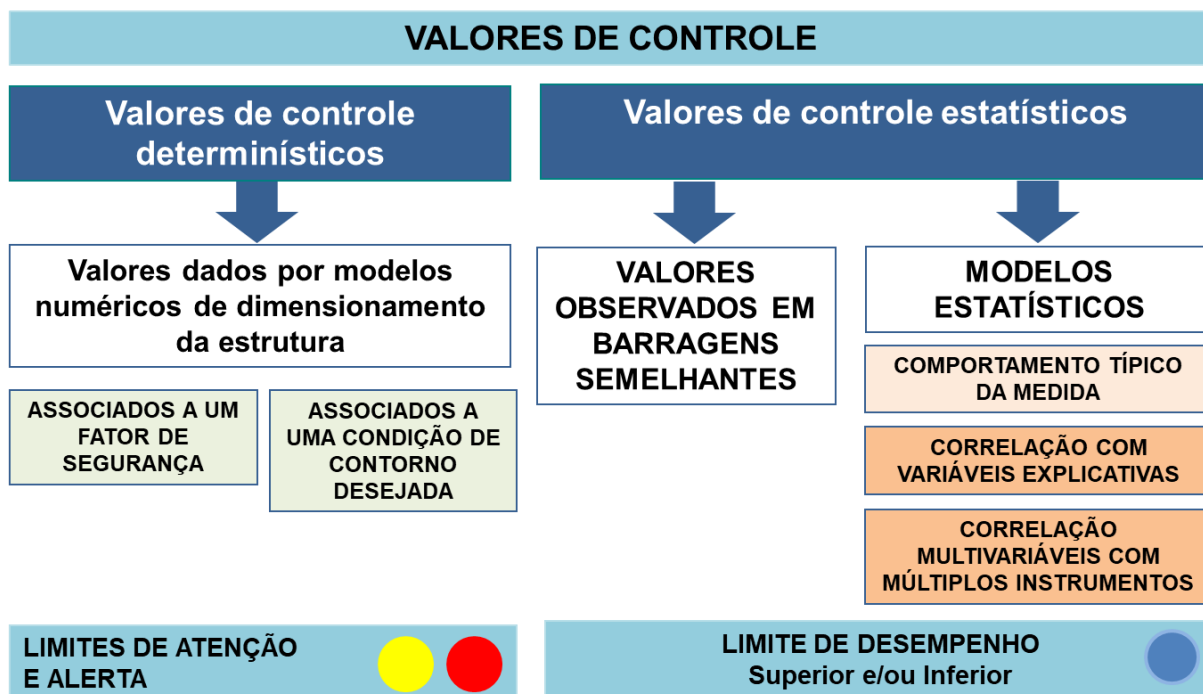


FIGURA 4 – Proposta de nomenclatura para valores de controle para instrumentação de barragens.

6.1 Valores de Controle Determinísticos

Os valores de controle determinísticos são calculados teoricamente por meio de modelos matemáticos, de forma que o comportamento confiável da barragem seria indicado pela concordância entre o valor da resposta física medida em campo (que caracterizaria o comportamento da barragem) e o valor previsto analiticamente para condições de carregamento correspondentes.

Neste caso, leituras dos instrumentos que resultam em valores abaixo dos valores de atenção, indicariam o comportamento normal das estruturas e de acordo com os critérios de projeto segundo os quais foram dimensionadas. Os valores de alerta indicariam os máximos valores aceitáveis para cada instrumento, acima dos quais seriam necessárias análises mais detalhadas ou ações corretivas, uma vez que as condições mínimas aceitáveis de segurança poderiam estar sendo comprometidas. Neste contexto, não foi adotado um limite de emergência, uma vez que o nível de alerta já indica a necessidade de intervenção na estrutura.

No caso de barragens de terra, os métodos determinísticos permitem bons resultados na obtenção de valores de controle para a posição da linha freática e poropressões. Também podem ser utilizados para obtenção de valores esperados de vazão e deformações. No entanto, nestas aplicações os modelos possuem limitações devido as complexidades e incertezas envolvidas, o que conduz a menor precisão dos resultados frente às medidas registradas durante a fase de operação.

Os valores de controle para a posição da linha freática e poropressões podem ser associados a análises de estabilidade que levam a fatores de segurança inferiores aos de projeto, usualmente sendo adotados $FS=1,5$ para limites de atenção e $FS=1,3$ a $1,2$ para limites de alerta. A redução do fator de segurança é feita mediante a elevação da freática no talude de jusante, obtida por meio de simulação da colmatagem gradual do tapete drenante (redução do coeficiente de permeabilidade).

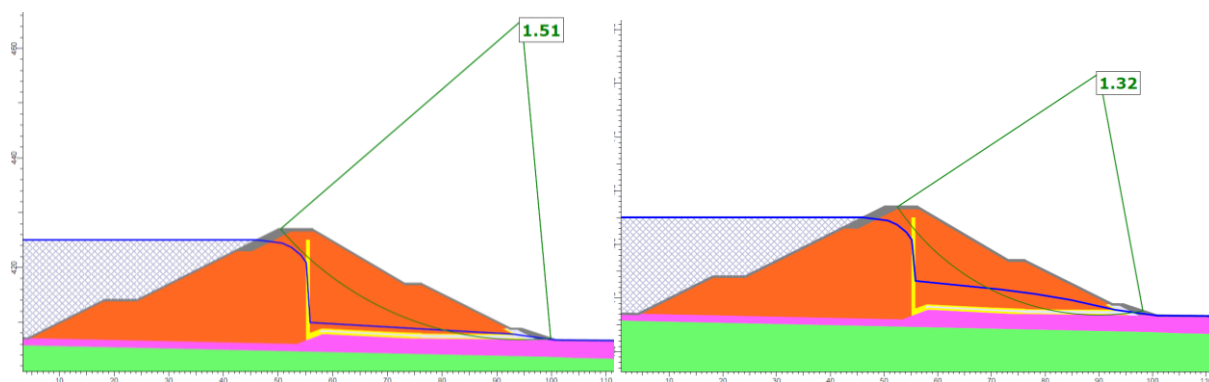


FIGURA 5 – Modelo ilustrativo simulando condição de atenção e alerta.

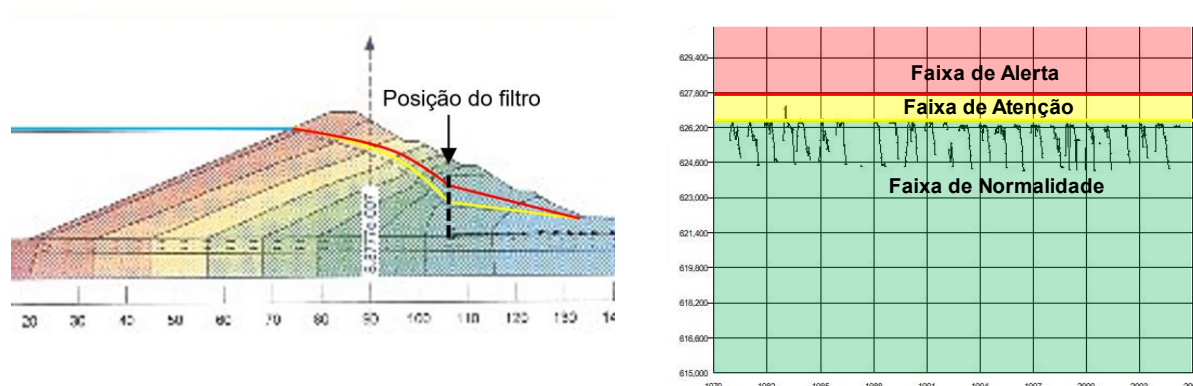


FIGURA 6 – Modelo ilustrativo simulando condição de atenção e alerta, definido faixas ou zonas de normalidade, atenção e alerta.

Entretanto, muitas vezes, não é possível reduzir o fator de segurança abaixo de 1,5 por meio da elevação da linha freática. Nesta situação, pode-se adotar outras condições de contorno indicativas do comportamento adequado da estrutura, como por exemplo a posição da linha freática em relação ao talude de jusante e drenos de pé, gradientes no maciço, fundação ou tapete drenante, tapete trabalhando em carga ou gradientes de saída dos fluxos de percolação.

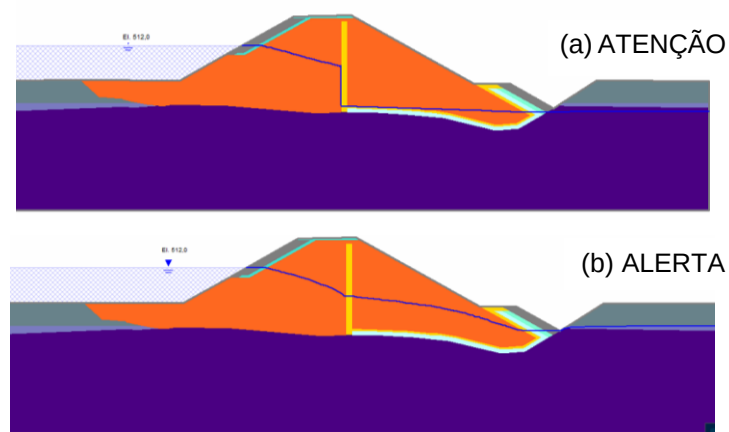


FIGURA 7 – Modelo ilustrativo simulando a aplicação de uma condição de contorno desejada (a) tapete trabalhando em carga, (b) posição da freática em relação ao dreno de pé, ambos os casos com $FS > 1,5$.

Cabe destacar que a modelagem numérica pode não ser simples e levar a resultados muito distantes das grandezas efetivamente medidas pela instrumentação, podendo requerer um empenho técnico significativo na calibração do modelo [12]. Podem ser necessárias sucessivas simulações das condições de fluxo até se obter a condição que melhor reproduz a linha freática observada no campo, testando, por exemplo, diferentes razões de permeabilidade vertical e horizontal (k_v/k_h) tanto para o maciço quanto para a fundação, ou mesmo reavaliando os demais parâmetros geotécnicos relevantes aos modelos estudados.

Ainda para piezometria, no caso de barragens de concreto, a consideração de valores de atenção associados à condição de carregamento normal (CCN) e valores de alerta associados à pior situação de carregamentos excepcionais ou limite geralmente levam aos valores de controle para a piezometria de fundação.

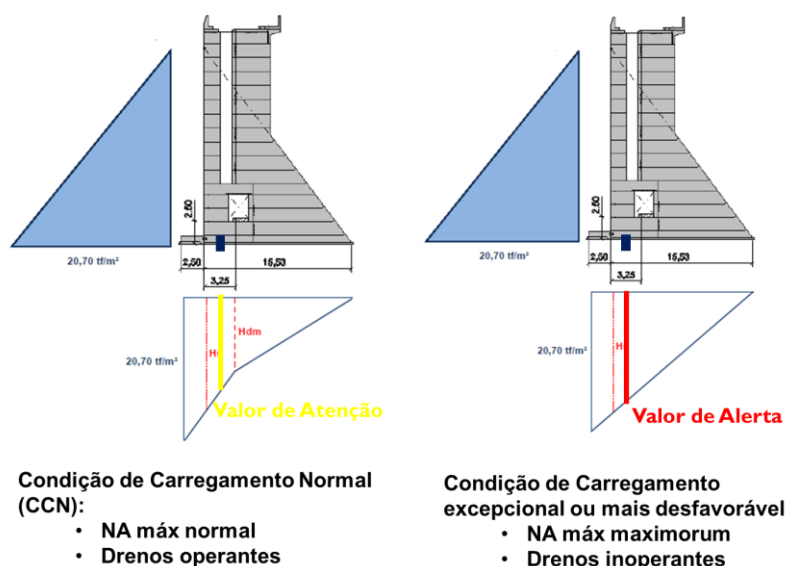


FIGURA 8 – Valores de controle determinísticos para piezômetros instalados na fundação de estruturas de concreto.

Ressalta-se que este método informa sobre o atendimento aos critérios de projeto e não o quanto a estrutura estaria próxima da falha por tombamento, escorregamento ou flutuação [14], pois os fatores de segurança obtidos para os critérios de projeto podem ser bastante elevados. Neste caso, o diagrama de subpressões poderia ser aumentado gradualmente até que os fatores de segurança fossem reduzidos aos mínimos de projeto.

É possível que a piezometria indique medidas acima dos diagramas teóricos de subpressão de projeto. Tais diagramas são válidos para maciços de fundação homogêneos e não levam em consideração a geometria de descontinuidades que possam afetar o comportamento hidrogeológico da fundação. Neste caso, podem ser utilizados os diagramas de subpressão reais medidos pela instrumentação, desde que respeitados os fatores de segurança mínimos admissíveis. Além disso, para essa situação, é indicada a realização de uma análise de sensibilidade dos parâmetros de cálculo (coeficiente de atrito e coesão do maciço de fundação) para se verificar o quão conservadores são os valores de controle assim estabelecidos.

Por outro lado, quando as pressões medidas são muito inferiores às dos diagramas teóricos de subpressão, uma possibilidade poderia ser “estressar” as condições de projeto (reduzindo a coesão e o ângulo de atrito na interface barragem/fundação, por exemplo), com consequente redução do fator de segurança até a instabilização da estrutura. Isso mostraria quais níveis piezométricos comprometeriam os níveis mínimos de estabilidade e poderiam levar à falha da barragem [14].

6.2 Valores de Controle Estatísticos

Nos casos em que não é possível modelar adequadamente a estrutura para obtenção dos valores de controle determinísticos ou que valores determinísticos não reflitam as condições de campo (tais como, variações expressivas dos níveis de montante e de jusante, contribuições de ombreira ou anisotropia dos materiais), podem ser estabelecidos valores de controle estatísticos.

Além disso, pode ser interessante capturar alterações no comportamento dos instrumentos em relação à série histórica ou à sazonalidade das medidas, o que sinalizaria alguma alteração no próprio instrumento ou na estrutura, sem necessariamente indicar comportamento indesejado em termos de fatores de segurança.

Os valores de controle estatísticos podem ser estabelecidos com base em informações de outras barragens ou de modelos estatísticos, conforme a seguir.

6.2.1 Valores observados em barragens semelhantes

Tais valores são obtidos a partir da bibliografia técnica disponível e da experiência acumulada em outras barragens semelhantes àquela sob análise. No Brasil, as

principais referências empregadas são as de João Francisco da Silveira [15] e [16] e têm sido muito empregados para medidas de vazões e deformações de barragens.

6.2.2 Valores obtidos por meio de modelos estatísticos

Os valores são obtidos a partir de modelos estatísticos que tomam como referência a série histórica de medidas e são empregadas com a finalidade de analisar preliminarmente os dados da instrumentação (análise de primeiro nível). Os principais métodos estatísticos empregados são diagramas de dispersão, regressão linear, regressão polinomial, decomposição em série de Fourier, séries temporais, médias móveis, modelos tipo máximo-mínimo em intervalos pré-fixados [17], existindo estudos recentes com redes neurais e inteligência artificial. Estas ferramentas permitem o desenvolvimento de modelos de correlação com variáveis explicativas, correlações com multivariáveis ou mesmo correlação entre múltiplos instrumentos.

Deve-se ter em mente que a análise estatística dos dados pressupõe a existência de uma série histórica de dados durante a fase de operação. Além disso, após os primeiros anos, ou mesmo as primeiras décadas após o enchimento do reservatório, pode ser interessante rever os estudos considerando apenas o comportamento mais recente dos dados. Isso apaga os efeitos da juventude (adaptações da barragem na sua fundação, dissipação de pressões construtivas etc.) e permite focar no comportamento da barragem na idade adulta.

Os valores de controle estatísticos obtidos a partir das metodologias descritas acima foram denominados “limites de desempenho”, pois não estão diretamente atrelados a condições de comportamento estrutural indesejadas.

A partir dessa metodologia, é possível estabelecer uma faixa dentro da qual as medidas são esperadas e obter alarmes sobre a alteração de comportamento de um instrumento.

Para instrumentos com medidas sem correlação nítida com uma grandeza-cause ou muito estáveis ao longo do tempo, é comum ser calculado o desvio padrão das medidas e estabelecidos limites de desempenho superiores e inferiores tomados como dois ou três desvios padrão. Cabe observar que este método poderá levar a “alarmes” relativamente frequentes. Desta forma, é interessante avaliar a possibilidade de se empregar estes valores acrescidos do valor da precisão do processo de leitura, ou mesmo tomar os valores máximos e mínimos da série histórica como referência. Estas considerações são válidas em especial para extensômetros de hastes e medidores triortogonais que possuam medidas muito estáveis.

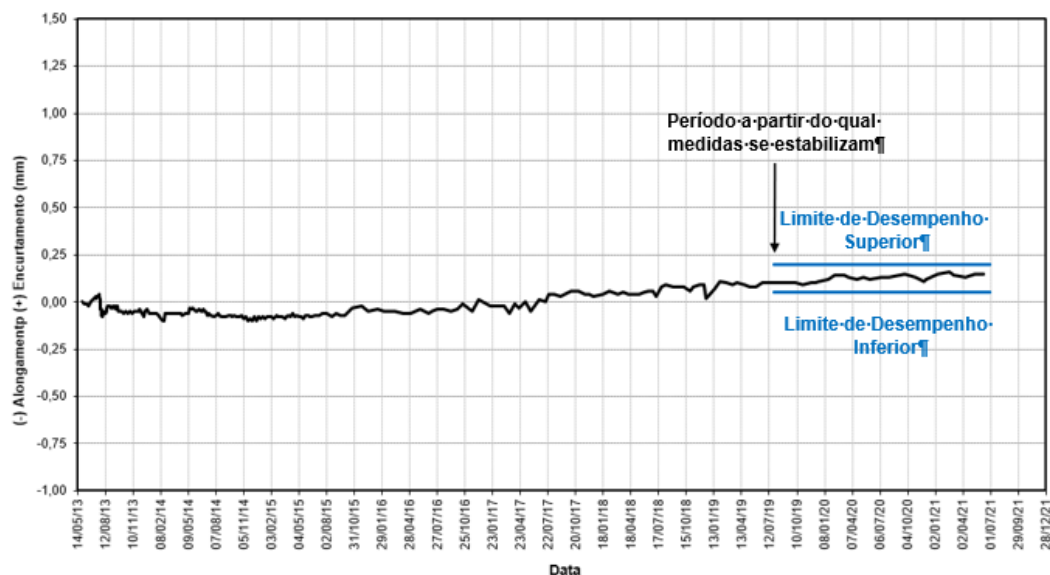


FIGURA 9 – Limites de desempenho superior e inferior para extensômetro de hastes definido após a estabilização das medidas.

Quando as medidas apresentam sazonalidade, podem ser estabelecidos valores de controle estatísticos correlacionando as grandezas-causa com as medidas dos instrumentos. Para as barragens de concreto, os principais fatores que influenciam as medidas são os níveis de montante, jusante, temperatura e idade. Já para as barragens de aterro, os níveis de montante e de jusante são os principais parâmetros explicativos que influenciam as medições.

É válido ressaltar que os estudos de correlação podem ser complexos, pois é comum ser observado um efeito retardado da variação das grandezas-causa nas medidas dos instrumentos.

Várias abordagens têm sido propostas para explicar esse efeito [18], sendo o mais comum empregar médias móveis ou gradientes de algumas variáveis explicativas no conjunto de preditores. Os gradientes podem ser usados para garantir a independência entre os preditores (as médias móveis são correlacionadas com as variáveis correspondentes originais). Os autores exemplificam com o modelo de Guedes e Coelho [1985, *apud* 18] para previsão de vazões pela fundação da barragem de Itaipu com a forma $a_1h_2^{6;11} + a_2t + a_3t^2 + a_4\log(1 + t)$, onde $h_2^{6;11}$ é o nível médio do reservatório entre 6 e 11 dias antes da medição.

O mesmo pode ser visto para os valores de controle para a piezometria da Barragem de Emborcação [12], como apresentado na TABELA 1, onde CM é o nível do reservatório e MM 30 é a média móvel de 30 dias deste nível.

Regressão Linear - Piezômetro Pneumático Hall					
Instrumento	Variável independente	nº dados	Equação	Resíduos Normais	R-square
EMBTPH206	MM 30	281	$PH206 = 249,650951 + 0,591958 * MM30$	sim	97%
EMBTPH207	MM 30	282	$PH207 = 158,733349 + 0,750003 * MM30$	sim	98%
EMBTPH208	MM 30	278	$PH208 = 263,733493 + 0,586542 * MM30$	não	96%
EMBTPH209	CM	42	$PH209 = 517,345972 + 0,192790 * CM$	sim	72%
EMBTPH210	CM	289	$PH210 = 279,348776 + 0,456265 * CM$	não	90%
EMBTPH211	CM	89	$PH211 = 206,346299 + 0,599611 * CM$	sim	99%

TABELA 1 – Equações de previsão de poropressões para a seção 2 da Barragem de Emborcação (adaptado de [12]).

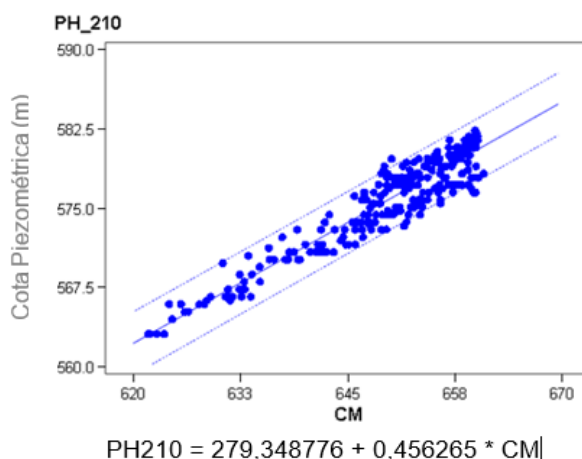


FIGURA 10 – Modelo de correlação do piezômetro EMBTPH210 com o reservatório.

Radzicki e Bonelli [19] propõem o emprego de uma função específica da estrutura (denominada “função resposta impulso”) para explicar o efeito retardado da variação das grandezas-cause nas medidas dos instrumentos. A vantagem dessa abordagem é que os coeficientes empregados, tempo característico e amortecimento, têm significado físico. O tempo característico fornece informações sobre o atraso com que a barragem reage a uma variação na variável de entrada (que integra informações relativas à zona situada entre o instrumento e o ponto de drenagem, em particular a difusividade, que quantifica a permeabilidade e a não saturação do meio), enquanto o amortecimento reflete a relação entre a amplitude da variação do nível do reservatório e a da poropressão no ponto considerado (considerando a eficiência dos dispositivos de drenagem ou vedação e a posição do instrumento em relação à face onde é aplicada a carga do reservatório).

Podem ainda ser citadas as correlações multivariáveis, aplicáveis quando é possível correlacionar as medidas da instrumentação com múltiplas grandezas-cause (níveis de montante, de jusante e temperatura, por exemplo). Por outro lado, algumas vezes não há correlação significativa das medidas de um instrumento com as grandezas-cause, mas as medidas apresentam certa sazonalidade. Neste caso, uma possibilidade mais simples seria utilizar os valores máximos e mínimos da série em períodos pré-fixados, por exemplo, máximos e mínimos mensais esperados.

Cabe destacar que limites de desempenho superiores àqueles de atenção ou alerta podem indicar que os modelos numéricos empregados foram pouco representativos e que necessitam de calibração, ou que a seção analisada está permanentemente em alerta e há necessidade de estudos adicionais ou ação para redução do risco.

6.3 Integração de Valores de Controle Determinísticos e Estatísticos

Conforme apresentado no item 4, há a possibilidade de integração dos valores de controle obtidos a partir dos métodos determinísticos e estatísticos. Nesse sentido, seriam definidas 4 zonas, a partir dos valores de controle de atenção, alerta e de desempenho estabelecidos para determinado instrumento.

Nesse contexto, o limite de desempenho tem como principal finalidade a obtenção de alarmes para identificar algum desvio da medida registrada, mas que não implica em uma situação limite de operação. Tal abordagem se mostra útil na análise preliminar dos dados, em especial nas situações em que a aquisição de dados da instrumentação é feita de forma automatizada. Os valores de controle assim estabelecidos definem zonas de normalidade, de controle ampliado, atenção e alerta, como sugerido a seguir:

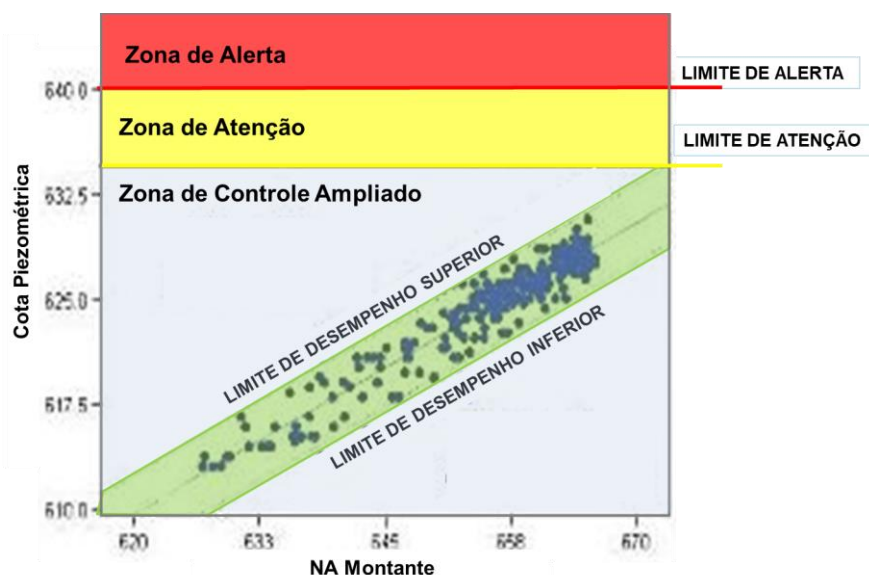


FIGURA 11 – Zonas delimitadas pelos valores de controle da instrumentação.

7. CONCLUSÕES

Os valores de controle da instrumentação são um componente importante no monitoramento e avaliação do desenvolvimento de possíveis modos de falha. Nesse contexto, devem ser capazes de fornecer alarmes de mudança de comportamento que possam indicar risco à segurança da barragem.

Não há uma metodologia única para o estabelecimento de valores de controle aplicável a todos os tipos de instrumentos e situações de carregamento e operação. É importante que sejam consideradas as condições de contorno específicas da estrutura em estudo, tais como condições locais, de projeto e construção, idade da barragem, grandezas-causa, sazonalidade ou não das medidas, existência de série histórica suficientemente longa, tipo e posição de instalação dos instrumentos.

No entanto, tais estudos levam ao aprofundamento do conhecimento do comportamento da barragem e, quando elaborados adequadamente podem ser muito úteis na análise preliminar dos dados da instrumentação. Ganham importância ainda maior quando do emprego de instrumentos automatizados, cujas leituras possuem frequência tal que exigem também a automatização dos métodos de controle e análise preliminar dos dados, para que possa ser auferida vantagem da automatização (de nada adiantam leituras horárias dos instrumentos se as análises dos dados serão mensais!).

Finalmente, existem várias outras metodologias para definição de valores de controle não abordadas no presente trabalho, tais como fluxogramas combinado as respostas de vários instrumentos, redes neurais, séries temporais, dentre outras. Portanto, esta é uma área de conhecimento que deve nos apresentar muitas novidades num futuro próximo.

8. PALAVRAS-CHAVE

Segurança de barragens, instrumentação, valores de controle, valores de referência.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ICOLD (1989) – “Bulletin 68. “Monitoring of Dams and their Foundations”.
- [2] ICOLD (2014) – “Bulletin 158. Dam Surveillance Guide”. Chapter 9.
- [3] ASCE (2018) – “Monitoring Dam Performance -Instrumentation and Measurements”. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice no. 135.
- [4] FERC (2020) – “Federal Energy Regulatory Commission – Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects”. Chapter 9 item 9-5.7. Disponível em: <<https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/chap9.pdf>>. Acesso em 19/05/2023.
- [5] USACE (2020). EM 1110-2-1908 – Instrumentation of Embankment Dams and Levees. Disponível em: <https://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/>. Acesso em 21/05/2023.
- [6] USACE (2004). EM 1110-2-2300 - General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams. Appendix E - Process for Establishing Performance Parameters. Disponível em:

<<https://www.publications.usace.army.mil/USACE-Publications/Engineer-Manuals/>>. Acesso em 21/05/2023.

[7] ANM (2023). Resolução nº 95. “Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração”. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>>. Acesso em: 18/05/2023.

[8] ANEEL (2022). Resolução Normativa nº 1.064. “Estabelece critérios e ações de segurança de barragens associadas a usinas hidrelétricas fiscalizadas pela ANEEL, de acordo com o que determina a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010”.

[9] ELETROBRÁS (2003). “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas”. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>>. Acesso em 21/05/2023.

[10] VELTEN, R. Z., SANTOS, R.D.N., ELIAN, L.H., RIBEIRO, L.L., E DIAS, M.A.L. (2016). “Proposição de Metodologia para a Elaboração de Carta de Risco de Barragens de Terra e Terra-Enrocamento”. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte.

[11] FERREIRA, J.A. (2022). “Critérios para Definição de Valores de Controle para Piezômetros e Medidores de Vazão em Barragens de Aterro”. Revista Brasileira de Engenharia de Barragens. nº13. CBDB.

[12] FUSARO, T.C. (2007). “Estabelecimento de Valores de Controle para a Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação e Piau”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 369p.

[13] VIOTTI, C.B., FUSARO, T.C. (2018) – “Discussion on Interfaces between Embankments and Concrete Dams and their Instrumentation”. Damworld 2018, Foz do Iguaçu, Brasil.

[14] LORD, D.W., GROSS, E. (2015) – “Are We Preventing Dam Failures? Rethinking Surveillance and Monitoring”. Dam Safety 2015. ASDSO.

[15] SILVEIRA, J.F.A. (2006) – “Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento”, Oficina de Textos, São Paulo.

[16] SILVEIRA, J.F.A. (2003) – “Instrumentação e Comportamento de Fundações de Barragens de Concreto”, Oficina de Textos, São Paulo.

[17] MENGA, R., MASERA, A., BECOCCI, L., JULIANI, M. (1999). “Gestão, Tratamento e Interpretação de Dados de Monitoração Estrutural para Controle de Barragens”. XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Belo Horizonte, pp. 329-335.

[18] SALAZARI, F., TOLEDO, M.A., OÑATE, E.O., MÓRAN, R. (2014). “Data-based models for the prediction of dam behavior: a review and some methodological

considerations". Disponível em <<https://doi.org/10.1007/s11831-015-9157-9>> Acesso em 29/05/2023.

[19] RADZICKI, K., BONELLI, S. (2008) – “On Pore Pressure Analysis in Earth Dams by Means of Impulse Response Function.” *Studia Geotechnica et Mechanica*. Vol XXX, Nº1-2. Disponível em <<https://www.researchgate.net/publication/237459881>>. Acesso em 29/05/2023

	Túlio Marcos de VASCONCELLOS Filho Engenheiro Civil pela UFMG (2020). Atua na Enemax Engenharia e Consultoria na área de Segurança de Barragens e Geotecnia, na realização de estudos de estabilidade, Revisões Periódicas de Segurança (RPS), inspeções de segurança, análises de instrumentação, relatórios de inspeção e elaboração de Planos de Segurança de Barragem (PSB).
	g Engenheira Civil pela UFMG (2021). Atua na Enemax Engenharia e Consultoria na área de Segurança de Barragens e Geotecnia, na realização de estudos de estabilidade, Revisões Periódicas de Segurança (RPS), inspeções de segurança, análises de instrumentação e elaboração de Planos de Segurança de Barragem (PSB).
	Marcela Nogueira Cesar MARTINS Engenheira Civil pela UFMG (2022). Atua na empresa Walm BH Engenharia na área de Engenharia Geotécnica, aplicada ao setor de mineração, na realização de estudos de estabilidade e análises de instrumentação, bem como na elaboração de documentos técnicos como Especificações Técnicas e Memoriais de Cálculo.
	Eric Silveira NUNES Graduando em Engenharia Civil pela UFMG. Atua como estagiário na Enemax Engenharia e Consultoria na área de Segurança de Barragens e Geotecnia, auxiliando na elaboração de relatórios de Inspeção de Segurança Regular (ISR), análises de instrumentação e relatórios de inspeção rotineira.



Teresa Cristina FUSARO

Engenheira Civil pela UFMG e Mestre em Geotecnia de Barragens pela UFOP, com mais de 35 anos de experiência na área de segurança e manutenção de barragens. Atuou na Cemig como engenheira (1986 a 2003) e como gerente de Segurança de Barragens e Manutenção Civil (2004 a 2013). Sócia-proprietária da Fusaro Engenharia e Consultoria Ltda, atualmente atua como consultora nas áreas de inspeção, instrumentação e análises de riscos de barragens.