

Avaliação de Segurança de Barragens: Piping como Critério para Elaboração de Carta de Segurança

Sandra Mara Ribeiro
UFMG, Belo Horizonte, Brasil, sribeiro.mr@hotmail.com

Terezinha Espósito
UFMG, Belo Horizonte, Brasil, esposito@etg.ufmg.br

RESUMO: O trabalho parte do contexto da segurança das barragens de terra e da importância da carta de segurança como referencial na sinalização de situações de potencial ruptura. Na carta de segurança são estabelecidos níveis de segurança representados por intervalos de variação de um fator de segurança, que geralmente representa a estabilidade devido à resistência da estrutura. A cada um desses níveis são correlacionados valores simulados, referentes à instrumentação de monitoramento da barragem, que inclui piezômetros e medidores de nível d'água, por exemplo, servindo de referência para o acompanhamento e interpretação das leituras obtidas em campo. No entanto, nem sempre o potencial de rompimento se deve à resistência apenas, estando condicionado a outros fatores. Nesses casos, na elaboração da carta de segurança, o fator de segurança em função da resistência causaria interpretações equívocas. Nesse sentido, o trabalho tem por objetivo apresentar um critério alternativo para o estabelecimento dos níveis de segurança na elaboração da carta de segurança, tendo em vista situações de ruptura hidráulica, relacionadas ao fenômeno do *piping*, condicionado a perda de resistência em função de fluxo ascendente. Assim, a pesquisa consistiu na realização de análises de percolação e estabilidade para situações simuladas de comportamento do maciço frente à colmatação de seu sistema de drenagem interna, baseando-se na redução da permeabilidade do material do dreno. O resultado mostrou variações pouco significativas do fator de segurança devido à resistência. Por outro lado, a posição do nível d'água no maciço, aproximando-se da face jusante do talude, indicou concentração de fluxo. Tal concentração aumenta o gradiente hidráulico, induzindo ao fenômeno do *piping*. Logo, a partir dessas constatações, as simulações foram novamente realizadas, tendo como foco da avaliação, no entanto, a medida do gradiente hidráulico. Considerando que em barragens de terra, o pé de jusante é o local mais crítico para a formação do *piping*, pois nesta região os gradientes hidráulicos são elevados e os níveis de tensão confinante são baixos, na pesquisa foi este o ponto tomado por referência para a medida do gradiente hidráulico. Assim, partindo como critério da suscetibilidade ao *piping*, o gradiente hidráulico torna-se o parâmetro na determinação do coeficiente de segurança e, conseqüentemente estabelecimento dos níveis de segurança na elaboração da carta de segurança.

PALAVRAS-CHAVE: Piping, Níveis de Segurança, Carta de Segurança, Gradiente Hidráulico.

1 INTRODUÇÃO

A avaliação de segurança das barragens é de suma importância para garantir seu funcionamento e evitar acidentes, os quais dependendo da grandeza podem gerar danos socioambientais e econômicos de grandes proporções. Nesse contexto, o monitoramento, envolvendo inspeções e instrumentação, tem o

papel de identificar falhas na estrutura e sinalizar situações de instabilidade.

No entanto, certos dados de monitoramento, para serem corretamente interpretados, necessitam de uma referência. Nesse sentido, a carta de segurança, como parte do plano de segurança de barragens, estabelece sinalizações para diferentes níveis de significância frente à possível instabilidade da mesma, direcionando

principalmente a interpretação dos dados obtidos da instrumentação.

Para o estabelecimento dos níveis da carta de segurança, designados níveis de segurança, é adotado como critério a variação do fator de segurança, em função da resistência da barragem, geralmente avaliada por meio de análises de estabilidade. No entanto, muitas das vezes, o potencial de ruptura não está relacionado diretamente à condição de resistência, mas à condição hidráulica. Nesses casos, o fator de segurança, em função da resistência, deixa de ser representativo, surgindo a necessidade de estabelecer um novo critério para carta de segurança.

Assim, este trabalho tem por enfoque o estabelecimento de um critério para barragens que rompem devido a condição hidráulica, com foco nos casos onde há potencial de *piping* ou erosão regressiva. Este fenômeno está relacionado a alterações na rede de fluxo e, conseqüentemente, nas forças de percolação, contribuindo para elevação do gradiente hidráulico.

2 SEGURANÇA DAS BARRAGENS

A segurança das barragens refere-se à garantia das condições de desempenho necessárias para evitar incidentes e acidentes com reflexos estruturais, econômicos, ambientais e sociais.

A segurança de uma barragem é avaliada desde a fase de projeto até sua operação e desativação, a fim de que se possa corrigir qualquer deficiência prevista ou constatada.

Durante a fase de projeto, a segurança da estrutura é avaliada por meio de verificações dos dimensionamentos, de modo a garantir as mínimas condições de estabilidade exigidas por norma. Para o período de operação e desativação, a avaliação de segurança requer um plano de inspeção e monitoramento, o qual direciona a tomada de medidas de manutenção e reparos.

Em últimos casos, onde a ocorrência de acidentes é inevitável, faz-se necessária a tomada de providências para evitar ou atenuar suas conseqüências. Nesses casos, é elaborado o Plano de Emergência, contendo diretrizes para lidar com as situações que possam causar

graves danos econômicos ou perigo para a vida humana.

2.1 Monitoramento

O monitoramento tem por objetivo verificar a segurança e o funcionamento da barragem, envolvendo o acompanhamento do desempenho das diversas estruturas que a compõem. Segundo Cruz (2004), um plano de monitoramento é fundamental não apenas para alertar sobre comportamentos não previstos, mas também para verificar hipóteses adotadas em projetos, com o objetivo de tornar as obras mais econômicas, dentro das necessárias condições de segurança.

Os principais meios que se dispõe para avaliar a segurança de uma barragem ao longo de sua vida útil são: inspeções visuais, auscultação de deslocamentos verticais e/ou horizontais, levantamentos batimétricos e instrumentação, além de ensaios geotécnicos de campo e de laboratório.

2.1.1 Inspeções Visuais

De acordo com as diretrizes do Manual de Segurança de Barragens (Ministério da Integração Nacional, 2002), o plano de inspeção deve conter: tipos de inspeção a serem executados; o propósito de cada tipo de inspeção e a frequência destas; os itens a serem inspecionados; a documentação necessária; a qualificação e o treinamento dos inspetores; e os procedimentos para a correção das deficiências.

As inspeções normalmente são registradas em relatórios periódicos, documentadas com fotos, desenhos e gráficos, de maneira que possam ser efetuadas comparações à distância de anos, permitindo verificar lentas modificações no comportamento da barragem.

2.1.2 Instrumentação

A instrumentação consiste num conjunto de dispositivos que são instalados na barragem e em sua fundação, com o objetivo de monitorar seu desempenho utilizando-se a medição de parâmetros, cujos resultados, devidamente analisados e interpretados, servirão para avaliar

suas condições de segurança.

Os instrumentos mais comuns em termos de grandeza medida, utilizados para avaliação de barragens de terra e enrocamento são: indicador de nível d'água – determina a posição da linha freática em maciços de terra ou rocha; piezômetros – determinam a poropressão em maciços de terra ou rocha; medidores de recalque – medem deslocamentos verticais (recalques) absolutos, na fundação ou no maciço; inclinômetro – determina deslocamentos horizontais, superficiais e em subsuperfície; extensômetros de haste – determinam a deformabilidade de maciços rochosos; e medidores de vazão – determinam as vazões individuais de drenos ou o somatório ao longo de trechos ou totalidade da estrutura, e determinação de percolação por maciço de terra ou rocha.

Vale destacar que indicador de nível d'água e piezômetro medem, respectivamente, posição da linha freática e poropressão, não podendo ser confundidos. A poropressão representa a pressão que água exerce no vazio dos solos, relacionada à carga piezométrica da lei de Bernoulli, podendo ser positiva ou negativa. Já o nível freático refere-se à superfície superior de um corpo d'água subterrâneo, onde a pressão correspondente é a atmosférica (Figura 1).

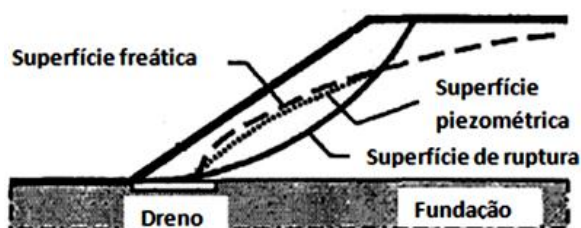


Figura 1. Superfície piezométrica x freática.

Fonte: Gerscovich, 2008, pag. 66.

Quanto à localização dos instrumentos, de acordo com Silveira (2006), deve refletir os comportamentos previsíveis da barragem e de sua fundação, devendo ser compatível com os métodos de análise dos dados obtidos posteriormente.

2.2 Carta de Segurança

A carta de segurança pode ser definida como um documento que compõe o manual de operação de uma barragem e que serve para

orientar o acompanhamento do funcionamento dessa estrutura e verificação de sua segurança. A partir da carta de segurança são estabelecidos níveis de segurança aceitáveis que orientam na definição do grau de perigo em possíveis situações de emergência, auxiliando nas tomadas de decisão, bem como indicando os passos a serem seguidos após a identificação de uma situação que possa colocar em risco a segurança da estrutura.

Cada nível de segurança corresponde a um intervalo de fator de segurança que, normalmente, representa a estabilidade global da estrutura em termos de sua resistência. Para cada um desses níveis, ou intervalos, são apresentados valores simulados de medidas de instrumentação, que servirão de referência para o acompanhamento de campo. Os principais instrumentos contemplados na carta de risco de uma barragem são os piezômetros e indicadores de nível d'água, que fornecem, respectivamente, o nível piezométrico e o nível d'água.

Os níveis de segurança geralmente estabelecidos numa carta de segurança, em função da resistência da barragem são:

- **Nível Normal:** representa o funcionamento normal da barragem ou quando são detectadas pequenas anomalias que não afetam a segurança da mesma. Nele, o fator de segurança da barragem corresponde ao fator de segurança para sua condição normal de funcionamento. A barragem opera com fator de segurança igual ou superior a 1,50;
- **Nível Atenção:** é aplicado quando são detectados problemas com elementos operacionais, estruturais, de observação, ou ainda outras condições que possam vir a comprometer a estabilidade da barragem. A barragem opera com fator de segurança entre 1,30 e 1,50;
- **Nível Alerta:** aplicado quando se detectam problemas graves em que se admite não ser possível controlar a situação. Neste cenário a ruptura da estrutura é uma possibilidade. A barragem opera com fator de segurança entre 1,10 e 1,30;
- **Nível Emergência:** grau máximo de

gravidade, que define situações com elevado potencial de falha, quando a ruptura está eminente ou já ocorreu. A barragem opera com fator de segurança inferior a 1,10.

Ressalta-se que a carta de segurança deverá sofrer atualização sempre que houver modificações na estrutura, tais como adequações de projeto, implantação de reforço ou drenos e alteamento.

3 MECANISMO DO PIPING

3.1 Gradiente Crítico

Em condição de fluxo, a água escoar de um ponto de maior potencial hidráulico para outro de menor potencial hidráulico, ou seja, submetida a um gradiente hidráulico (i). Conforme a Lei de Darcy, dada pela equação a seguir, o gradiente hidráulico representa a dissipação da energia ou carga (h) decorrente da percolação da água numa distância L .

$$Q = KiA \quad (1)$$

Onde,

$$i = h/L$$

Q = vazão de percolação

K = permeabilidade do material

A = área da seção transversal do escoamento

Caso a carga hidráulica h aumente progressivamente, a tensão efetiva irá diminuir até o instante em que se torne nula. A partir dessa condição, as forças transmitidas de grão para grão irão se anulando até chegar a zero. Como a resistência é proporcional à tensão efetiva, quando esta se anula, o material perde completamente sua resistência. Nesse estado ocorre o fenômeno da liquefação (areia movediça), cujo gradiente responsável é chamado de gradiente crítico, dado pela fórmula:

$$i_c = \gamma_{sub}/\gamma_w \quad (2)$$

Onde,

i_c = gradiente crítico

γ_{sub} = peso específico submerso do material

γ_w = peso específico da água

Quando a perda de resistência se inicia em um ponto, ocorre erosão neste local, o que provoca ainda maior concentração de fluxo nesta região. Com o aumento do gradiente, surge maior erosão e assim, progressivamente, forma-se um furo que progride regressivamente para o interior do solo, gerando o fenômeno do *piping* ou erosão progressiva. Portanto, o *piping* ocorre em regiões onde o gradiente hidráulico alcança valores elevados, próximos ao gradiente crítico e os níveis de tensão confinante são baixos. Dessa forma, em barragens, o local mais crítico para formação do *piping* é o pé de jusante, pois nesta região os gradientes hidráulicos são elevados e os níveis de tensão confinante são baixos, diminuindo progressivamente o potencial erosivo em direção a montante (Figura 2).

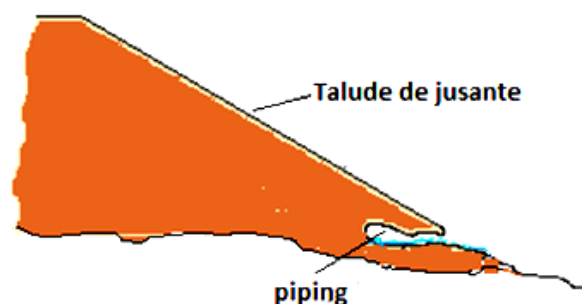


Figura 2. Esquema de ocorrência do *piping*.

3.2 Controle do Piping

Considerando os mecanismos geradores do *piping*, mencionados anteriormente, uma forma de controle desse fenômeno seria a redução do gradiente de saída. Conforme já dito, o fenômeno do *piping* ocorre em condições onde o gradiente atinge valores iguais ao crítico. Segundo Massad (2010), na prática, valores de 0,5 a 0,8 já são considerados elevados, tendo em vista que, teoricamente, muitas vezes o valor do gradiente crítico é igual a 1. Nesse sentido, a fim de se evitar o fenômeno, deve-se reduzir os gradientes de saída a valores inferiores a 0,4 ou 0,5. Logo, considerando o valor crítico igual a 1, o coeficiente de segurança (F) deverá estar na faixa de 2 a 3, sendo:

$$F = i_c/i \quad (3)$$

Onde,

i = gradiente de saída da barragem

i_c = gradiente crítico

Assim, para evitar a ocorrência do fenômeno do *piping* em barragens, deve-se aumentar o caminho de percolação da água dentro da barragem ou pela sua fundação, reduzindo-se o gradiente hidráulico. O fluxo que passa pelo maciço deverá ser conduzido, através de filtros e drenos, de forma a garantir que no talude de jusante não aparecerá fluxo emergente.

Para garantir tal condição, no projeto e implantação da barragem alguns pontos devem ser considerados, tais como: graduação de materiais aplicados na transição entre o filtro e o solo compactado, controle tecnológico na construção do barramento, tratamento do intemperismo na rocha de fundação do barramento, monitoramento das poropressões no maciço e controle da vazão a jusante do barramento.

4 ESTUDO DE CASO

A pesquisa consistiu na realização de estudos do comportamento de uma barragem frente a diferentes níveis de funcionamento de sua drenagem interna, buscando-se observar o fator de maior influência no potencial de ruptura. A partir deste, estabelecer um critério apropriado para representação dos níveis de segurança em sua carta de segurança.

A barragem em questão consiste em uma estrutura em solo compactado para contenção de rejeitos, alteada por montante. É formada por maciço inicial, dotado de uma berma de equilíbrio, que atua como reforço, sistema de drenagem interna, e dois alteamentos. O sistema de drenagem interna é composto por filtro vertical e horizontal de areia, conectado a um dreno de pé ou de saída em enrocamento.

A fundação constitui-se numa camada de solo residual de 3,00 m de espessura, seguida por camada de saprolito em torno de 8,00 m e rocha sã (filito).

Além disso, é dotada de um sistema de instrumentação para o monitoramento e acompanhamento do seu comportamento

composto por 5 piezômetros do tipo Casa Grande e 5 indicadores de nível d'água. A Figura 3 apresenta um croqui da barragem e de sua instrumentação.

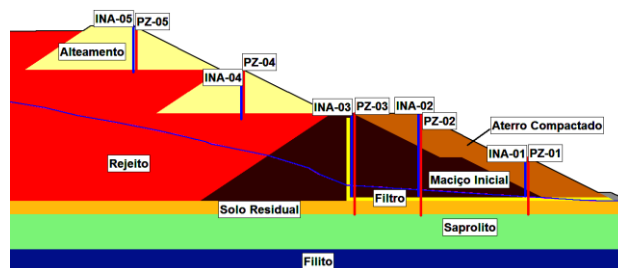


Figura 3. Barragem instrumentada.

4.1 Simulações Realizadas

Para verificar o comportamento da barragem, frente a condições críticas de funcionamento, considerou-se a hipótese do sistema de drenagem sendo colmatado. Isso porque o mau funcionamento da drenagem gera aumento das poropressões e do gradiente hidráulico, em função da ascensão do fluxo no maciço, contribuindo para a sua instabilização e, consequentemente, risco de ruptura.

Assim, as simulações foram realizadas utilizando-se análises de percolação e de estabilidade, reduzindo gradativamente os valores do coeficiente de permeabilidade do material drenante, que compõe o filtro e tapete.

As análises de percolação e estabilidade foram desenvolvidas a partir do *software* Slide 5.0 da Rocscience (Toronto - Canadá). Este *software* baseia-se no Método de Elementos Finitos (MEF) para fornecer entre outras informações, a posição da linha freática no maciço e na fundação da barragem, as pressões neutras e as redes de fluxo. Para obtenção dos fatores de segurança baseia-se no método do equilíbrio limite.

Os parâmetros de permeabilidade e de resistência são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros dos Materiais.

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	K_v/K_h	k (cm/s)
Filito	20	50	28	1	1,00E-06
Saprolito	20	30	28	1	1,00E-05
Solo Residual	16	12	28	1	2,50E-04
Maciço Inicial	17	21	25	0,25	8,00E-05
Reforço	19	15	28	0,25	1,00E-05
Alteamento	17	21	25	0,25	1,00E-04
Rejeito	21	0	28	1	1,00E-04
Dreno	20	1	28	1	1,00E-02
Enrocamento	23	0	36	1	100

A partir das análises realizadas, observou-se que os fatores de segurança globais (FS) sofriam pouca alteração, apesar do nível freático se elevar no maciço até bem próximo à face do talude de jusante. Tal condição, de fluxo quase emergente no talude, sugere a possibilidade de *piping*, abrindo margem para verificação de variáveis relacionadas ao mesmo.

Assim, partindo do conceito de elevação do gradiente hidráulico, provocado por fluxo ascendente, as análises de percolação e estabilidade foram novamente realizadas, considerando a mesma hipótese para condição crítica de funcionamento da estrutura, ou seja, a colmatagem do sistema de drenagem interna. Porém, o foco na observação dos resultados passou a ser os valores de gradiente hidráulico medidos, ao invés do fator de segurança em função da resistência, calculado pelo software.

Deve-se ressaltar que a medida do gradiente hidráulico, em cada uma das simulações, foi realizada num mesmo ponto de referência, localizado na região mais crítica ou a mais suscetível à ocorrência do *piping*. Neste caso, a do pé do talude de jusante, já que é onde o gradiente tende a ser mais elevado e os níveis de tensão confinante são baixos.

Além disso, considera-se que para a avaliação das análises realizadas, deve-se conhecer o valor do gradiente crítico da barragem de estudo. Logo, calculou-se o mesmo, com base nos dados disponíveis, sendo encontrado o valor de 0,9, conforme Equação 2.

4.2 Avaliação dos Resultados

A partir dos valores de gradiente hidráulico medidos e do gradiente crítico da barragem em questão ($i_c = 0,9$), foram calculados os coeficientes de segurança (F) correspondentes às condições simuladas, conforme apresentado na Tabela 2.

Com base nos referidos resultados pode-se estabelecer como recomendável para a barragem em questão, considerando o gradiente crítico calculado, um coeficiente de segurança (F) equivalente a no mínimo 3,0. Logo, para valores inferiores ($F < 3,0$), medidas de manutenção e controle deverão ser tomadas.

Tabela 2. Coeficientes de Segurança (F) devido ao gradiente hidráulico.

CONDIÇÃO	GRADIENTE HIDRÁULICO (i)	COEFICIENTE DE SEGURANÇA (i_c/i)	COEFICIENTE DE SEGURANÇA (F)
Drenagem interna operante e freática normal	0,075	0,9/0,075	12
Drenagem interna parcialmente operante e freática pouco elevada	0,30	0,9/0,3	3,0
Drenagem interna parcialmente operante e freática elevada	0,50	0,9/0,5	1,8
Drenagem interna inoperante e freática elevada	0,60	0,9/0,6	1,5

4.3 Estabelecimento dos Níveis de Segurança

Assim, tendo em vista os resultados foram estabelecidos os seguintes níveis de segurança:

- **Nível Normal:** a drenagem interna opera normalmente, ou seja, a superfície freática passa através do sistema de drenagem interna da barragem, e o gradiente hidráulico deverá ser equivalente a no máximo 0,30. O coeficiente de segurança (F) é de no mínimo 3,0;
- **Nível Atenção:** o sistema de drenagem encontra-se parcialmente colmatado, e a superfície freática elevada, porém, em níveis aceitáveis de operação. O gradiente hidráulico apresenta-se razoavelmente elevado. O coeficiente de segurança (F) deverá estar entre 1,8 e 3,0. Logo, medidas corretivas podem ser aplicadas a estrutura a fim de garantir a sua segurança;
- **Nível Alerta:** o sistema de drenagem interna funciona parcialmente (colmatagem parcial), a superfície freática aproxima-se do talude de jusante e gradiente hidráulico apresenta-se elevado. O coeficiente de segurança (F) deverá estar entre 1,5 e 1,8. Este nível equivale a quando se detectam problemas graves não sendo possível controlar a situação;
- **Nível Emergência:** grau máximo de gravidade, onde se atinge ou se aproxima do gradiente crítico (0,9), ou seja, o coeficiente de segurança (F) é

menor que 1,5. O sistema de drenagem interna encontra-se inoperante, com completa colmatagem. Esse estado define situações de acidente inevitável, quando a ruptura por *piping* está eminente ou já ocorreu.

4.4 Carta de Segurança

Para cada um dos níveis de segurança foram obtidas as respectivas leituras dos piezômetros e indicadores de nível d'água (PZ's e INA's) da barragem e realizada a representação da carta de segurança (Figuras 4 e 5).

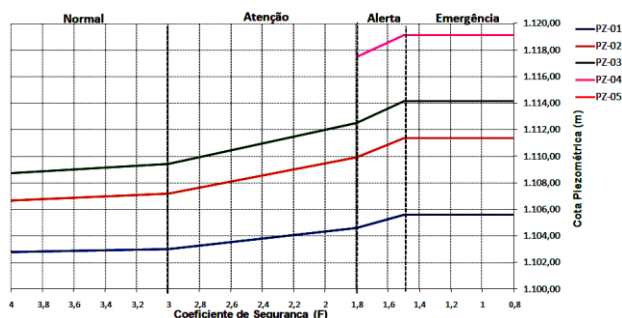


Figura 4. Carta de Segurança - Piezômetros.

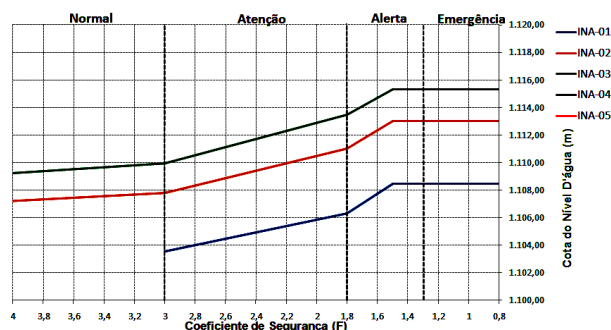


Figura 5. Carta de Segurança – Indicadores de Nível d'água.

4 CONCLUSÃO

O estudo de caso apresentado mostra que, geralmente, as cartas de segurança baseiam-se no fator de segurança devido a resistência, calculado em função da variação do fluxo no maciço. No entanto, há casos em que a estabilidade da estrutura está relacionada muito mais a outras variáveis que à resistência, representada pelo fator de segurança obtido em análises de estabilidade. Nesses casos, conforme abordado, faz-se necessária a verificação de outros critérios e variáveis que

representem a estabilidade. No caso abordado, as análises mostraram que a condição de estabilidade da barragem em questão está relacionada, principalmente, ao potencial ao *piping*. Este, causado pela elevação do gradiente hidráulico, em função do aumento do fluxo no maciço. Assim, na elaboração da carta de segurança para essa estrutura, o gradiente hidráulico tornou-se a variável responsável pelo cálculo do coeficiente de segurança na determinação dos níveis de segurança.

Desse modo, destaca-se a importância em avaliar os condicionantes de ruptura de uma barragem, quando da elaboração de sua carta de segurança. Caso esta seja baseada em critérios inadequados, pode representar grande risco a segurança da barragem, visto que os dados coletados na instrumentação de campo poderão ser interpretados erroneamente, gerando conclusões distorcidas sobre a real situação da estrutura.

REFERÊNCIAS

- Cruz, Paulo. (2004) *100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto*, 2. ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 648 p.
- Massad, Faïçal. (2010) *Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia*, 2. ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 216 p.
- Ministério da Integração Nacional. (2002) *Manual de Segurança e Inspeção de Barragens*. Brasília: Secretaria de Infraestrutura Hídrica. 148 p.
- Silveira, J. F. (2006) *Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento*, 1. ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 416 p.