

RUPTURA HIDRÁULICA EM MACIÇOS DE BARRAGENS DE TERRA X MAU FUNCIONAMENTO DE VERTEDORES DO TIPO POÇO – ESTUDO DE CASO

Maria da Glória Braz

Spec – Planejamento, Engenharia e Consultoria Ltda; Avenida João Pinheiro, 146, 12º andar; Bairro Centro; CEP: 30160-030; Belo Horizonte; Minas Gerais; Brasil; Fone: (+55-31) 3218-3705; Fax: (+55-31) 3218-3701; e-mail: gloria.hillel@spec.eng.br.

Escrito para apresentação no

XXXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola

31 de julho a 04 de agosto de 2006 – João Pessoa - PB

RESUMO: O estudo dos efeitos da admissão de ar em estruturas hidráulicas envolve muitas áreas do conhecimento e possui grande relevância na formulação de critérios de projeto e operação de obras de engenharia. Para os vertedores com emboque tipo poço ou tulipa, o fenômeno do arrastamento de ar não é perfeitamente conhecido, havendo necessidade de se utilizar modelos físicos para estudá-los. Por outro lado, a instabilidade de maciços de terra, causada pelos fenômenos de ruptura hidráulica, esses provenientes das vibrações induzidas através das juntas de dilatação da estrutura transversal, submetida a um funcionamento hidráulico inadequado, necessitam de modelagem matemática, uma vez que a modelagem física em solos coesivos apresenta, ainda, dificuldades de ser representada. Este trabalho apresenta a verificação da instabilidade de maciço de terra causada pelo mau funcionamento de estrutura hidráulica tipo poço, com o apoio de modelo para análise de fluxo permanente em meios porosos saturados. Esse estudo avaliou as pressões exercidas pelas juntas de dilatação e vibrações do túnel de um vertedor tipo tulipa, causadas pelo seu mau funcionamento hidráulico, associando-o ao estudo das sub e sobrepensões hidráulicas atuantes no maciço da barragem.

PALAVRAS-CHAVE: vertedores, barragens de terra, instabilidade.

THE HYDRAULIC DISAGGREGATION PHENOMENON IN EARTHEN-FILLED DAMS X MALFUNCTIONING OF SHAFT TYPE HYDRAULIC STRUCTURES – A CASE STUDY

ABSTRACT: Knowledge of the effects of air entrainment in hydraulic structures is a matter that involves many science areas and is of a great relevance to the formulation of design and operational criteria of engineering works. As shaft and morning glory type spillways are concerned, the air entrainment phenomenon is not perfectly known, thus implying in testing their behavior in physical models. In the order hand, the instability of earthen-filled dams as caused by hydraulic disaggregation phenomenon; these due to vibrations and fluctuating pressures induced by existing expansion joints along the crossing structure under hydraulic malfunctioning, needs mathematical modeling since physical modeling of cohesive soils still shows difficulties to the represented. This work presents the verification the instability of earthen dams as caused by malfunctioning of shaft type hydraulic structures, with the support of a mathematical model for analyzing steady flow through saturated porous media. In this study the pressures as resulting from expansion joints and tunnel vibrations, have been evaluated and associated to fluctuating negative and positive pressures inside an earthen dam, subjected to a malfunctioning morning glory type spillways.

KEY-WORDS: spillways, earthen-filled dams, instability.

INTRODUÇÃO: As estruturas hidráulicas compostas de um poço vertical para a condução do escoamento de uma elevação superior a uma inferior são, basicamente, os vertedores com emboque tipo tulipa ou vórtice, as tomadas d'água e os poços de queda. Recentemente, estruturas hidráulicas com poços verticais estão sendo construídas em áreas metropolitanas, com a finalidade de conduzir as águas provenientes da drenagem superficial para galerias subterrâneas. Esse tipo de estrutura hidráulica é, também, uma boa solução em locais onde não existe espaço para a construção de outros tipos de vertedores, como é o caso de reservatórios formados em vales estreitos, onde a topografia local impede a construção de um canal extravasor lateral ou o caso de barragens que não dispõem de um comprimento de crista suficiente para um vertedor convencional. Entretanto, o projeto inadequado desse tipo de vertedor em barragens de terra pode induzir a problemas de percolação indevida e instabilidade do maciço, podendo provocar a ruptura do mesmo e causar danos à população e moradias localizadas à jusante.

MATERIAL E MÉTODOS: A barragem da Pampulha, localizada em Belo Horizonte, é um reservatório projetado para amortecimento de cheias, construído na década de 30. O sistema extravasor era constituído (até 2002) por um vertedor de serviço e um vertedor de emergência. O vertedor de serviço era composto por uma tulipa, ligada a uma galeria de concreto que atravessa o corpo do maciço e o vertedor de emergência, localizado na ombreira esquerda, constituído por um canal. Rompida em 1954, teve sua reconstrução em 1957, sendo a cota da crista do vertedor tulipa elevada e, posteriormente, após a reconstrução, alterada mais uma vez. Em inspeção, realizada durante o período de descarga de cheias (1997), foram observadas explosões de ar na saída da bacia de dissipação, conforme figura 1. Pode-se constatar, então, que o vertedouro de serviço apresentava, nos momentos de maior descarga, um mau funcionamento hidráulico. O engolimento pela tulipa de grandes volumes de ar emulsionado na água acarretava grandes explosões durante as descargas, causando vibrações na galeria de concreto e no aterro adjacente, enquanto a ogiva existente na bacia de dissipação provocava o afogamento dessa galeria.



Figura 1 – Explosões devido a emulsionamento de ar na tulipa

Essas observações desencadearam uma série de inspeções mais criteriosas e estudos para avaliar as condições de estabilidade e segurança da barragem. Para esta avaliação foram realizadas inspeções geológico-geotécnicas no maciço, inspeção interna na galeria do vertedouro, análise de percolação e estabilidade. É importante ressaltar que, durante a inspeção, ocorrida quando o vertedor de serviço estava funcionando à plena altura de lâmina d'água, pode-se observar no poço, localizado acima da 3ª junta a montante da saída do túnel, a saída de bolhas de ar e de água com odor desagradável, indicando a percolação de ar e água através do solo do maciço e que nas inspeções executadas no interior da galeria foram identificados vários sinais do desenvolvimento de instabilidade do maciço, podendo-se destacar a abertura das juntas de deformação da estrutura da galeria no interior do maciço e do canal de restituição do vertedouro, sendo que a 3ª junta a montante da saída do túnel estava totalmente aberta. Foram observados, também, na região de contato do canal de restituição, abatimentos e colapsos do aterro, indicando processos de erosão do tipo piping. De acordo com Mussali e Carsten (1968), na mudança da seção de controle da crista do vertedor tulipa para o túnel, para a seção de

funcionamento com controle na crista, o poço vertical não se encontra totalmente cheio e o escoamento no túnel se processa à seção parcialmente cheia. A água engole grande quantidade de ar e cai livremente; ao se chocar com o fundo da curva, pode gerar ondas no escoamento. Se alguma dessas ondas tocar o teto do túnel, tem-se o selamento com flutuação de pressão no mesmo. Assim, a seção de controle muda para o túnel, com o conseqüente aumento da vazão, ocasionando vibrações, conforme U.S. Army Corps of Engineers (1995). Segundo Delgado (2000), a combinação das forças que atuam na interface de duas fases líquidas imiscíveis, e entre os líquidos e a superfície sólida determina, tanto a molhabilidade como a pressão capilar do meio poroso. A pressão capilar que deve ser ultrapassada de modo que a fase não molhante possa penetrar num meio poroso saturado, com uma fase molhante, é denominada, no caso de solos saturados com água, de pressão de borbulhamento. Caso exista fluxo simultâneo de dois ou mais fluidos imiscíveis, é natural assumir que, ao se considerar o fluxo de um dos fluidos, parte do espaço poroso nas vizinhanças está ocupada pelo(s) outro(s) fluidos e, assim, a permeabilidade do meio poroso será reduzida em relação ao fluido considerado. A metodologia adotada no presente estudo envolve estudos hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos e de fluxo em meios porosos saturados. Os estudos hidráulicos se limitaram na verificação da altura de lâmina d'água, a partir do qual o vertedor tulipa, funcionasse com controle, inicialmente, na parte inferior do poço, acarretando, assim, um escoamento instável associado a flutuações de pressão no túnel. Segundo estudos de SUDECAP (1985), a vazão máxima do vertedor tulipa da barragem da Pampulha é de 155,9 m³/s, correspondente à altura máxima de 1,30 m a partir da crista da soleira. Essa altura restringiu-se a este valor porque acima dele atingir-se-ia o vertedouro de emergência da barragem. Nos estudos hidrológicos, foram elaboradas análises e quantificação das precipitações ocorridas no período dos estudos e que poderiam contribuir no aumento de volume do reservatório e, conseqüentemente, no aumento da carga hidráulica do vertedor tulipa. Após o tratamento desses dados de precipitações, discretizou-se todos os eventos chuvosos ocorridos na bacia hidrográfica da Pampulha, utilizando-se o mapeamento da evolução da urbanização na bacia de acordo com estudos de OLIVEIRA (1996). O volume escoado para cada evento ocorrido, de acordo com a evolução da urbanização, foi calculado, verificando-se, posteriormente, a simultaneidade do acontecimento dos eventos na bacia. Após essa verificação, empreendeu-se o cálculo do volume total escoado para a represa, o qual acarretava um aumento da carga hidráulica acima da soleira da tulipa que correspondia ao seu mau funcionamento. Na análise geotécnica, as subpressões atuantes no corpo do maciço da barragem, mais precisamente, na região da galeria, devido à percolação de água e ar foram calculadas através do modelo SEEP/W, versão 4.0, desenvolvido pela Geo-Slope International.. Para as simulações foram adotados os parâmetros de resistência à coesão, conforme SUDECAP/DAM (1998). Foram simulados 58 cenários com diferentes valores de percolação de água e ar, todos obedecendo a linha freática estabelecida pela rede de fluxo. Adotou-se os parâmetros do solo correspondentes ao aterro existente, desconsiderando-se a fatia correspondente à região adjacente ao túnel. Para a condutividade hidráulica, adotou-se 3 valores de k : Um obedecendo SUDECAP/DAM (1998), e dois dentro da faixa de valores medianos. Para o ar, adotou-se os valores extremos e o mediano de k_a , indicados por BLIGHT (1971). Simulou-se as juntas da galeria totalmente abertas e com furos em regiões estratégicas para verificação do início do processo de rompimento solo no entorno da mesma.

RESULTADOS E DISCUSSÕES: Os resultados dos estudos hidrológicos indicam que o vertedor tulipa do exemplo utilizado para o estudo metodológico funcionou, de forma a produzir vibrações na estrutura, 5 vezes, durante o período adotado no estudo. Com relação aos estudos de percolação verificou-se que tanto os cenários de condição de contorno de topo permeável como os de topo impermeável indicaram o mesmo resultado. Nos cenários de percolação de água com as juntas totalmente abertas, verificou-se que: a) para $k = 4.22 \times 10^{-8}$ m/s: existe poropressão maior que a coesão do solo numa faixa de cerca de 6 metros de comprimento e menos de 1 metro de altura junto ao solo de fundação e existe capilaridade numa faixa de altura equivalente a 14 metros, chegando ao limite de coesão no topo do talude; b) para $k = 4.22 \times 10^{-9}$ m/s: o comportamento é semelhante ao cenário da letra (a) no que diz respeito à zona de capilaridade, sendo sua altura aumentada em 1 metro, no entanto para a região no entorno à galeria junto ao solo de fundação, as poropressões chegaram no limite da coesão, em uma faixa de comprimento de 11 metros; c) para $k = 4.22 \times 10^{-7}$ m/s: Nesse cenário há o

rompimento do aterro, tanto no corpo do maciço, quanto do solo de fundação. Nos cenários de percolação de água com duas pequenas rupturas nas juntas, mostrados nas figuras 12 a 14 e 18 a 20, verifica-se que: a) Para $k = 4.22 \times 10^{-8}$ m/s: o comportamento é semelhante ao cenário das juntas totalmente abertas no que diz respeito à zona de capilaridade, sendo sua altura aumentada em 1 metro, no entanto para o caso da região no entorno à galeria, as poropressões chegaram no limite da coesão junto ao solo de fundação, em uma faixa de comprimento de 12 metros; b) para $k = 4.22 \times 10^{-9}$ m/s: comportamento semelhante ao cenário anterior, na faixa de altura de 11 metros acima do solo de fundação, entretanto a pressão de capilaridade acima dessa faixa é maior do que no cenário anterior; c) para $k = 4.22 \times 10^{-7}$ m/s: Nesse cenário há o rompimento numa porção do corpo do aterro adjacente à galeria e ao solo de fundação. Continua havendo capilaridade, porém numa faixa maior, cuja altura é cerca de 13 metros. Em todos os cenários simulados com vazão de ar, o aterro entraria em colapso, com o menor valor da condutividade do ar (k_a) adotado. De acordo com os estudos hidrológicos e hidráulicos empreendidos, verificou-se que o vertedor tulipa da Pampulha teria funcionado de forma a produzir vibrações e flutuação de pressão, apenas uma vez, se a cota de sua soleira não houvesse sofrido alterações. De acordo com os resultados obtidos nas simulações das possíveis poropressões atuantes na porção do maciço adjacente à galeria, tem-se a observar: a) Em nenhum momento houve, somente, entrada de ar nas juntas, uma vez que a permeabilidade do ar induziria ao colapso imediato do maciço. O fenômeno que ocorreu no poço, citado anteriormente, foi o efeito da pressão de borbulhamento, b) Sugere-se que a compactação do aterro foi homogênea e, com a frequência de seu funcionamento, houve variações no grau de compactação do mesmo; c) O efeito da tensão líquida, também, deve ser considerado nesse processo de alteração do grau de compactação, d) Os cenários mais condizentes com o ocorrido no maciço da barragem equivalem ao coeficiente de permeabilidade $k=4,22 \times 10^{-9}$, com juntas totalmente abertas e com pequenas aberturas. Os demais cenários, caso ocorressem, levaria o solo adjacente à galeria a um colapso e, conseqüentemente, à ruptura; e) Verificou-se, também, que a carga hidráulica do reservatório atuou como “*fator de amortecimento*”, quando da aplicação das injeções de água, promovendo uma recirculação do fluxo e atenuando as poropressões verticais.

CONCLUSÃO: Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se verificar que a metodologia sugerida para a verificação do funcionamento adequado de vertedores tipo poço pode ser utilizada amplamente, garantindo-se, na fase de escolha desse vertedor, as condições extremas em que o mesmo possa ter um funcionamento adequado e seguro aos empreendimentos.

REFERÊNCIAS

- BLIGHT, E., “**Flow of Air Through Soils**”, ASCE *J. Soil Mech. Found. Eng. Div.*, Vol. 97 SM4, pp. 607-624.1971
- DELGADO, C.W.C., **Desenvolvimento de um equipamento para o estudo da permeabilidade efetiva em meios multifásicos** – Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil-PUC–RJ, 2000.
- MUSSALI, Y.G. e CARSTEN, M.R. **A study of flows condition in shaft spillways**, Atlanta, U.S., 1968, 158 p.
- OLIVEIRA, M.G.B. – **Estudos dos processos erosivos e avaliação da produção de sedimentos na bacia hidrográfica da Pampulha** – Dissertação de Mestrado. EHR – UFMG.1996
- SUDECAP – **Condições hidrológicas da represa da Pampulha** – Relatório Técnico. 1985.
- SUDECAP/DAM Engenharia. **Análise de percolação e estabilidade da barragem da Pampulha** – Relatório Técnico, Setembro/1998.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS/ASCE. **Hydraulics design of spillways**, ASCE Press, American Society of Civil Engineers, 345 East 47th Street, New York, New York 10017-2398, 1995.