

ANÁLISE DO FENÔMENO DE RUPTURA HIDRÁULICA EM MACIÇOS DE BARRAGENS DE TERRA PROVOCADO PELO MAU FUNCIONAMENTO DE VERTEDORES DO TIPO POÇO ATRAVÉS DE MODELO DE FLUXO PERMANENTE EM MEIO SATURADO

Maria da Glória Braz¹ & Raul Zanoni Lopes Cançado²

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, tendo como estudo de caso a barragem da Pampulha, em Belo Horizonte.

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 sobrepressões hidráulicas atuantes no maciço da barragem.

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.

¹Universidade Federal de Minas Gerais; Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas; Departamento de Engenharia de Minas; Rua Espírito Santo, 35, sala 708; 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.

²Universidade Federal de Minas Gerais; Departamento de Engenharia de Minas; Rua Espírito Santo, 35, sala 708; Bairro Centro; CEP: 30160-030; Belo Horizonte; Minas Gerais; Brasil; Fone: (+55-31) 3238-1938; Fax: (+55-31) 3238-1966; e-mail: rzanoni@demin.ufmg.br.

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 other 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 be 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, to the case study of the Pampulha dam, located in Belo Horizonte city.

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.

Palavras-chave – vertedores, barragens de terra, instabilidade.

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.

Neste trabalho, apresenta-se o estudo do extravasor da barragem da Pampulha, em Belo Horizonte, com as conseqüências do seu mau funcionamento hidráulico na estrutura do maciço, onde está assentado.

O ESTUDO DE CASO

Histórico do problema

A barragem da Pampulha é um reservatório projetado para amortecimento de cheias, construído na década de 30 e ampliado em 1943, para prover parte de Belo Horizonte, terceira maior cidade do Brasil, de água potável e recreação.

O sistema extravasor existente era constituído 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 com diâmetro interno de 3,30 m, que atravessava o corpo do maciço e o vertedor de emergência, localizado na ombreira esquerda, era constituído por um canal.

Rompida em 1954, em virtude da ocorrência de erosão tipo *piping*, teve sua reconstrução em 1957 a cargo do DNOS, sendo que sua reinauguração se deu em 31 de janeiro de 1958. A cota do NA ficou estabelecida em 800,4 m e o fundo da passarela da tulipa na cota 802,6 m, conservando-se as mesmas características para o corpo da barragem, estando o terreno natural em cota variável, sendo 784,50 m sua cota mais profunda. Posteriormente, a cota da crista do vertedouro da tulipa foi alterada para 801,3 m, conforme mostrado na figura 1.

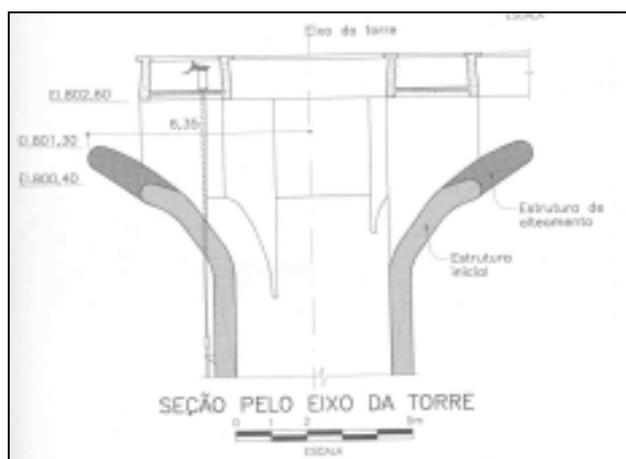


Figura 1 – Alteamento da tulipa (SUDECAP/DAM, 1998)

Após a sua reconstrução, acelerou-se a ocupação da região e, atualmente, a barragem da Pampulha está localizada a montante de uma região densamente habitada do município e sua eventual ruptura teria conseqüências catastróficas.

Em novembro de 1997, foram realizadas inspeções rotineiras na barragem da Pampulha que detectaram alguns sinais de instabilidade do maciço na região da galeria do vertedouro, tendo sido observadas trincas e abatimentos no talude.

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.

Investigações geológico-geotécnicas

Para verificação das condições do aterro próximo à galeria do vertedouro e das condições da fundação da barragem, foi elaborado um programa de sondagens acompanhado de reconhecimento geológico-geotécnico de superfície. Tal programa consistiu da execução de sondagens a percussão, trado e poços de inspeção, cuja localização é mostrada na figura 2.

Pela análise dos testemunhos de sondagem à percussão e do material terroso retirado das escavações dos poços de inspeção, verificou-se que o aterro é constituído de material proveniente de solo residual de gnaisse.

De acordo com SUDECAP/DAM Engenharia (1998a), na região da galeria, foram identificados três horizontes de aterro, com diferentes valores médios de resistência ao ensaio SPT, de acordo com a profundidade que se segue:

- Um horizonte superficial de espessura em torno de 3 metros, com uma resistência média de 5 golpes ao ensaio SPT;
- Um horizonte intermediário, entre as profundidades de 3 e 11 metros, com resistência média de 12 golpes ao ensaio SPT;
- Um horizonte mais profundo, situado entre a profundidade de 11 metros e o solo residual da fundação, com resistência média de 6 golpes ao ensaio SPT.

Este último horizonte de aterro apresentou resistência ao ensaio SPT equivalente à resistência encontrada para o aterro superficial da barragem. Este trecho está situado nas proximidades da galeria do vertedouro.

Quanto ao solo de fundação, todo o maciço está assentado diretamente sobre solo residual proveniente da decomposição “in situ” de gnaisse. Sua resistência ao ensaio SPT é da ordem de 20 golpes e foi encontrado a partir da El. 780,00 metros, aproximadamente.

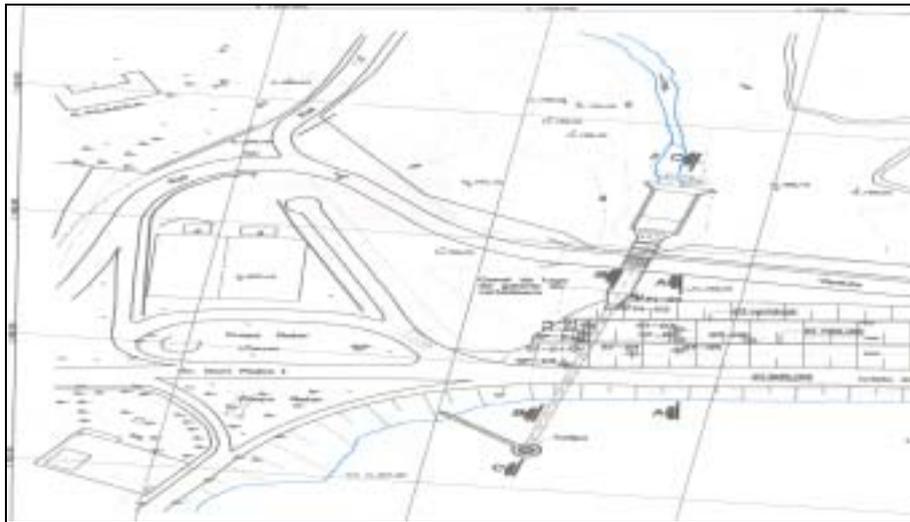


Figura 2 – Localização das investigações geológico-geotécnicas

Na primeira destas inspeções, realizada durante o período de descarga de cheia, foram observadas explosões de ar na saída da bacia de dissipação, conforme figura 3. 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 3 – Explosões devido a emulsão de ar na tulipa

É importante ressaltar que, durante essa inspeção, ocorrida quando o vertedor de serviço estava funcionando à plena altura de lâmina d'água, pode-se observar no poço n° 1, 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.

Nas inspeções executadas no interior da galeria foram identificados vários sinais do desenvolvimento de instabilidade do maciço. Dentre os mais significativos, pode-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, conforme figura 4. Foram observados, também, na região de contato do canal de restituição, abatimentos e colapsos do aterro, indicando processos de erosão do tipo piping.



Figura 4 – Juntas abertas no interior da galeria

Os furos de sondagem executados para a avaliação das condições do aterro da barragem mostraram a presença do nível de água muito próximo da superfície do talude, quando do início da campanha, ocorrida em período de cheia.

A primeira linha de sondagens, localizada próxima à galeria, no eixo da seção B-B mostrada na figura 2, foi iniciada durante período de fortes chuvas e o nível de água obtido foi elevado, estando na maioria dos furos, a menos de 2 metros de profundidade.

A segunda linha de sondagem, localizada mais afastada da região da galeria, no eixo da seção A-A mostrada na figura 2, foi executada no período de estiagem e observou-se o rebaixamento do nível de água em cerca de 1 metro, em relação à primeira linha de sondagens. O nível geral estabelecido no talude de jusante, na altura da primeira berma, ficou, então, em torno de 2,60 metros de profundidade, não havendo mais disparidade entre o nível medido nos furos executados próximos à galeria e nos furos executados mais afastados da região da galeria. Quando do rebaixamento do nível geral do lago, todos os furos rebaixaram, respondendo rapidamente às novas condições de percolação estabelecidas no maciço da barragem.

A terceira linha de sondagens foi executada apenas para se confirmar a diferença significativa do nível do lençol freático no período de estiagem em relação ao período de chuvas. Essa diferença

indicou que as juntas abertas da galeria funcionavam como drenos na fase de estiagem e como alimentadores de água sob pressão no período de chuva.

As análises de estabilidade foram elaboradas para determinar os fatores de segurança ao escorregamento para diversas seções da barragem. O talude de jusante da barragem foi verificado apenas para a condição de percolação estável. Nesse caso, considerou-se que o NA do reservatório tenha se mantido por tempo suficiente para estabelecer a rede de fluxo pelo maciço. Admitiu-se, ainda, que o adensamento provocado pelo peso próprio do aterro já houvesse ocorrido.

Foi analisada a estabilidade na seção de maior altura, bem como na seção próxima à galeria do vertedouro, considerada crítica. Os parâmetros de resistência para o material foram definidos a partir de ensaios de laboratório, realizados com amostra indeformada deste material.

As análises de estabilidade ao escorregamento foram realizadas por equilíbrio limite, utilizando-se o método de Spencer. Esse método satisfaz às condições de equilíbrio de forças e de momentos e admite que as forças entre lamelas têm a mesma direção. As subpressões no corpo do maciço e da fundação devido à percolação foram calculadas através de redes de fluxo, traçadas pelo método dos elementos finitos.

Prováveis causas da instabilização da barragem

De acordo com as análises de estabilidade ao escorregamento, concluiu-se que a barragem encontrava-se em níveis aceitáveis de segurança, exceto para a seção próxima à galeria do vertedouro. Os processos de piping, já instalados neste trecho, poderiam evoluir, caso não houvesse intervenção, para um processo de escorregamento, dado o enfraquecimento da estrutura do aterro no entorno da galeria do vertedouro. As trincas abertas e os abatimentos detectados nas inspeções de campo demonstraram estar ocorrendo movimentações de terra, as quais poderiam se transformar num escorregamento de massa no pé da barragem, provocando a instabilização e ruptura total do maciço.

Detectou-se, nesses estudos, que as causas da instabilização progressiva da região da barragem eram provenientes da associação dos seguintes fatores:

- Forte vibração no aterro junto à galeria, causada pelo mau funcionamento do vertedouro nos períodos de descarga de grandes vazões, conforme figura 3;
- Fuga de solo do maciço da barragem para dentro da galeria, através das juntas de dilatação, que se encontravam totalmente abertas, conforme figura 4, e entrada de água sob pressão no corpo do aterro, através dessas juntas de dilatação, nos períodos de descarga de grandes vazões pelo vertedouro, conforme figura 5 e que;
- A diminuição da resistência do aterro situado nas proximidades da galeria do vertedouro estava relacionada a dois fatores: menor grau de compactação devido ao contato com a estrutura

da galeria e variação do nível de água devido à ocorrência de entrada de água sob pressão, da galeria para o maciço.

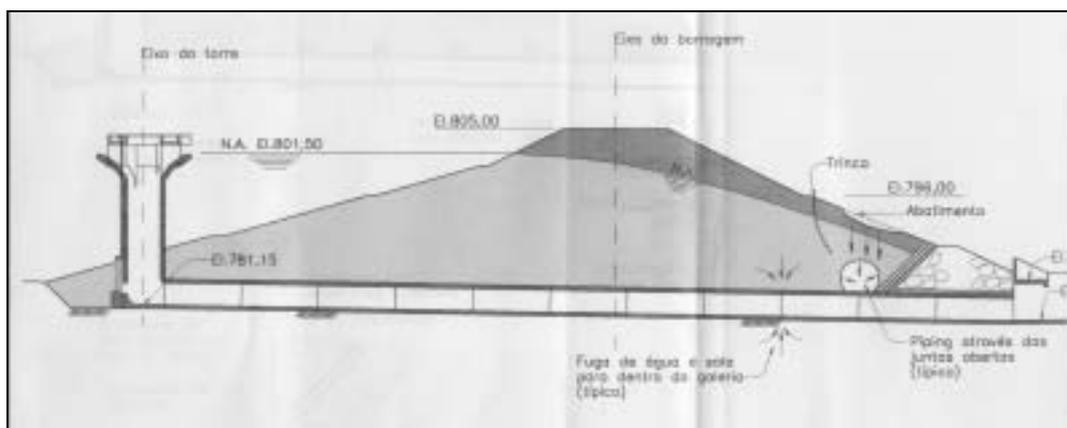


Figura 5 – Perda de solo do maciço através das juntas abertas do túnel

Características do escoamento nos vertedores tipo tulipa

Segundo os estudos de Mussali e Carsten (1968), existem cinco tipos diferentes de escoamento que se processam nas diversas partes do extravasor tulipa, listados a seguir:

- a) Descarga da vazão de projeto pela crista circular;
- b) Queda livre ou escoamento em pressão no poço vertical, ressaltando-se o problema do arraste de ar nessa condição;
- c) Impacto e deflexão do escoamento na curva;
- d) Escoamento com superfície livre no túnel, ressaltando-se, nessa condição, o problema do ar emulsionado na água, que provoca um aumento da seção molhada e o problema do escoamento de ar, acima da lâmina d'água;
- e) Ressalto hidráulico na bacia de dissipação, para a redução do excesso de energia cinética.

Segundo Oliveira (1984), para pequenas cargas, acima da crista, prevalecerá o controle na crista do extravasor, nesta situação, um pequeno acréscimo da carga sobre a crista produz um grande aumento na vazão. A transição a jusante da crista trabalha parcialmente cheia e a água tende a concentrar-se nas paredes laterais do poço.

Conforme Laushey e Mavis (1953), aumentando-se a carga sobre a crista, o escoamento que possui, no poço, a forma anular aumenta de espessura e pode convergir e preencher toda a seção transversal. O ponto onde o escoamento passa a ser a seção plena é denominado de garganta. Devido ao encontro dos filetes de água que caem, forma-se, acima da garganta, um menisco denominado “Boil”. Aumentando-se a carga, a parte superior do “Boil” eleva-se, progressivamente, até produzir a submergência da crista. A transição, então, passa a funcionar a seção plena e o poço vertical a seção parcialmente cheia. Nessa condição, o controle passa a se localizar na garganta e o escoamento se processa semelhante ao de um orifício.

Aumentando-se, ainda mais, a vazão, o poço vertical passa a escoar à seção plena e o controle passa a se localizar na parte inferior do poço. Caso haja, ainda, mais acréscimo de vazão, o escoamento iniciará o preenchimento da parte interna da curva até atingir a saída do túnel. Nesse caso, a vazão é calculada pela equação que rege o escoamento em condutos forçados.

Conforme Genovez (1986), os vertedores tipo tulipa representam uma pequena porcentagem em relação ao número de vertedores empregados em barragens. Justifica-se essa pequena utilização, pelas condições locais e pelas características hidráulicas desfavoráveis destas estruturas, tais como: afogamento da soleira, possibilidade de aumento das vibrações e obstrução do vertedor.

De acordo com Mussali e Carsten (op. cit.), na mudança da seção de controle da crista 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).

Fluxo Multifásico em Meios Porosos.

O comportamento do fluxo num meio poroso contendo um único fluido é totalmente diferente do fluxo simultâneo de dois ou mais fluidos. A existência de vários fluidos requer o conhecimento de conceitos básicos para melhor entendimento, quando se tratar do fluxo simultâneo de dois ou mais fluidos.

Ao se estudar os sistemas multifásicos, é necessário considerar o efeito das forças que atuam na interface formada pelo contato de dois fluidos imiscíveis. Quando estes dois fluidos são líquido e gás, a interface é denominada de superfície líquida.

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 tensão de adesão, que é função da tensão interfacial, determina qual fluido molhará, de forma preferencial à superfície sólida, sendo que a molhabilidade do meio poroso é afetada por diversos fatores tais como a mineralogia do meio poroso, a composição química dos fluidos, a presença de matéria orgânica e história de saturação do meio poroso.

Já a pressão capilar é a propriedade que induz o meio poroso a absorver um fluido molhante ou que o faça repelir um fluido não molhante. Ainda segundo DELGADO (op.cit.), 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 de pressão de entrada. No caso de solos saturados

com água, esta pressão é denominada de pressão de borbulhamento, ou simplesmente pressão de entrada de ar.

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.

Em vista disto, a mobilidade dos fluidos é reduzida, podendo ser quantificada multiplicando-se a permeabilidade absoluta do meio poroso por uma razão adimensional, denominada de permeabilidade relativa, sendo que esta razão varia de zero a um.

Craig (1985), Das (1985), Mitchell (1993) e vários outros pesquisadores da área geotécnica, discutem alguns dos fatores que influenciam a condutividade hidráulica nos solos, sendo que os mesmos estão descritos a seguir.

Efeito da Temperatura: De acordo com estudos de Olson e Daniel (op. cit.), um acréscimo na temperatura pode, por um lado, diminuir a espessura da água adjacente às paredes dos poros em sucção constante, com a conseqüente redução da condutividade hidráulica. Por outro lado, este aumento de temperatura provocará a redução da viscosidade da água, aumentando a condutividade hidráulica.

Efeito da Tensão Líquida Aplicada: Blight (1971), analisando o efeito da variação da tensão líquida aplicada ($\sigma - u_a$) mantendo o teor de umidade constante, observou que a condutividade do ar (k_a) diminui com o aumento do valor de ($\sigma - u_a$), e a condutividade hidráulica (k_w) aumenta, pois aumenta a espessura da água adjacente às paredes dos poros.

Influência do Tipo de Compactação: A Figura 6 apresenta a influência do método de compactação sobre k_a , sendo que os corpos de prova compactados dinamicamente exibem maior valor de k_a do que aqueles compactadas estaticamente, conforme pesquisas de Blight (1971).

Este comportamento do solo contraria o esperado, uma vez que a compactação dinâmica, produz maiores deformações cisalhantes e, conseqüentemente, deveria reduzir os macroporos.

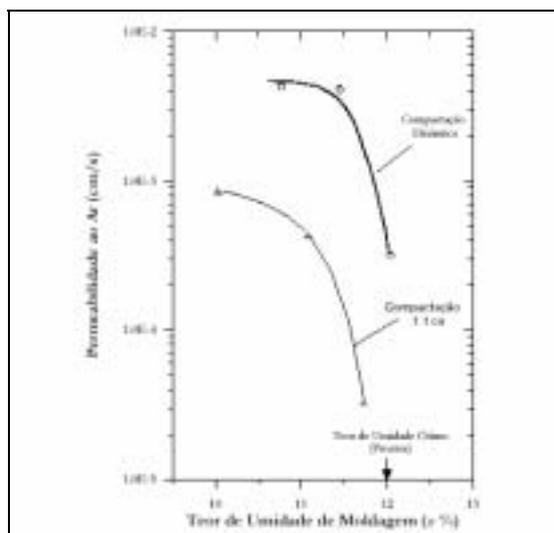


Figura 6 - Influência do método de compactação sobre k_a (Blight, 1971).

Verificação das causas de instabilização do maciço

A metodologia adotada no presente estudo envolve estudos hidrológicos, hidráulicos e geotécnicos.

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, ultrapassando-o e inclusive inundando áreas, localizadas ao longo da Av. Otacílio Negrão de Lima, que margeia o lago formado pela represa.

Com base em dados de observações de funcionários da INFRAERO e SUDECAP e de moradores da região que observaram alagamentos nas áreas sujeitas a inundações, conforme abordado anteriormente e, simultaneamente vibrações no aterro, nos meses de Dezembro/94, Janeiro/95 e Dezembro/97, pode-se assumir para esse estudo que a altura da lâmina d'água que provocava o mau funcionamento do vertedor era correspondente à vazão de 155,9 m³/s. Assumindo-se a altura $h = 1,30$ m, calculou-se o volume acumulado acima da soleira da tulipa para essa altura, considerando-se que o espelho d'água foi reduzido ao longo do tempo de 3 para 2,4 km², conforme OLIVEIRA (1996). Pode-se, assim, verificar os volumes correspondentes de $V = 3.900.000$ m³ e $V = 2.400.000$ m³, respectivamente.

No caso dos estudos hidrológicos, foram elaboradas análises e quantificação das precipitações ocorridas de Fevereiro/58 a Dezembro/97 e que poderiam contribuir no aumento de volume do

reservatório e, conseqüentemente, no aumento da carga hidráulica do vertedor tulipa e frequência nas vibrações do túnel.

Para se efetuar essa quantificação, necessitou-se de dados referentes aos eventos chuvosos ocorridos na região em estudo, que foram obtidos em OLIVEIRA (1996), PINHEIRO (1997), INEMET, CDTN, Usina de Biogás (CEMIG), INFRAERO e SUDECAP.

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 SILVA et al (1994) e OLIVEIRA (1996), para os diferentes períodos de retorno estudados por PINHEIRO (1997).

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.

Procurou-se verificar, junto à INFRAERO e aos moradores da localidade, a veracidade dessa frequência de mau funcionamento do vertedor, para que não houvesse prejuízos ao estudo empreendido. As informações obtidas conduziram na adoção dos resultados dos estudos hidrológicos na análise geotécnica efetuada, posteriormente.

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. Este modelo utiliza o método dos elementos finitos para traçar as redes de fluxo. Utilizou-se esse modelo por ser bem aceito no meio técnico e, portanto, de uso corrente na área de geotecnia.

Para as simulações foram adotados os parâmetros de resistência à coesão ($C = 5 \text{ KN/m}^2$ e $\phi = 25^\circ$), conforme SUDECAP/DAM (1998). Foram simulados 58 cenários com diferentes valores de percolação de água e ar. Esses cenários foram subdivididos em dois grupos: o primeiro com condição de contorno impermeável no topo do maciço e o segundo com a condição permeável, ambos obedecendo a linha freática estabelecida pela rede de fluxo, conforme mostrado na figura 7.

Adotaram-se, também, os parâmetros do solo correspondentes ao aterro existente, ou seja, desconsiderou-se a fatia correspondente à região adjacente ao túnel.

Para a condutividade hidráulica, adotou-se 3 valores de k : obedecendo SUDECAP/DAM (1998), adotou-se $4,22 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ e dentro da faixa de valores indicada por VARGAS (1977), $4,22 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ e $4,22 \times 10^{-7} \text{ m/s}$.

Para o ar, adotou-se os valores extremos e o mediano de k_a , indicados por Blight (1971), mostrados na figura 6. Obedeceu-se o critério de uniformidade de valores significativos de k , para facilitação no entendimento das análises.

Simulou-se as juntas da galeria totalmente abertas, conforme relatado em SUDECAP/DAM (1998) e com dois 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. A tabela 1 apresenta as datas e o volume total escoado simultaneamente. Apresenta, também, as alturas correspondentes a esses volumes, desconsiderando o extravasamento pelo vertedor de emergência e áreas adjacentes à represa.

Tabela 1 – Volumes escoados (hm^3) simultaneamente para o reservatório

Ano	Volume Total Escoado	h (m)
1972	3,59	1,35
1985	4,82	2,01
1994	5,73	2,39
1995	4,95	2,06
1997	4,39	1,83

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, conforme figuras 9 a 11 e 15 a 17, 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, conforme pode ser visto na figura 8, com o menor valor da condutividade do ar (k_a) adotado.

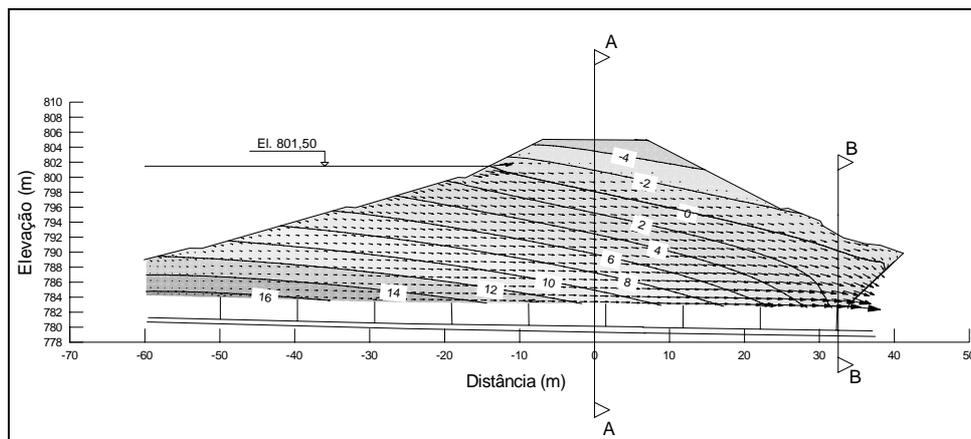


Figura 7 – Rede de fluxo da barragem da Pampulha

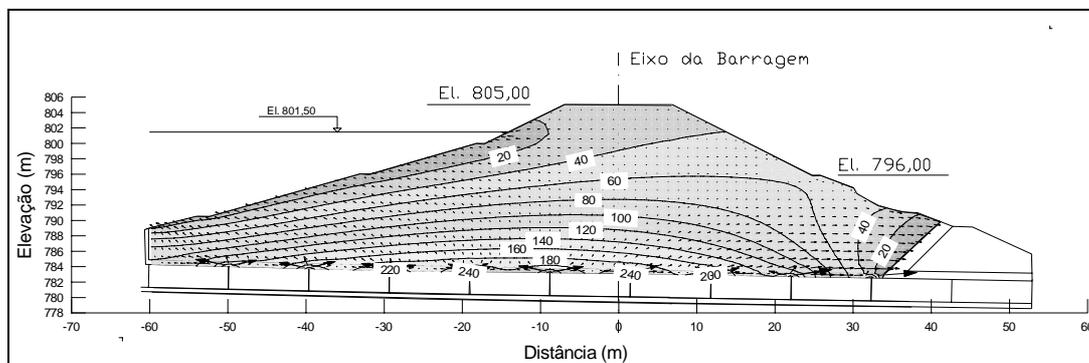


Figura 8 – Poropressões resultantes da percolação de ar ($q = 8 \times 10^{-6}$ m/s)

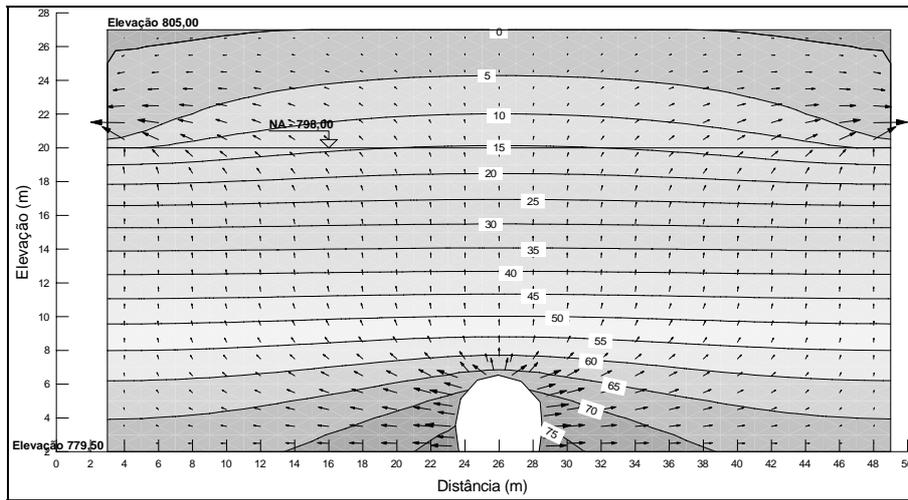


Figura 9 – Seção AA – junta totalmente aberta – poropressões resultantes da percolação de água
 $(q = 4,22 \times 10^{-7} \text{m/s})$

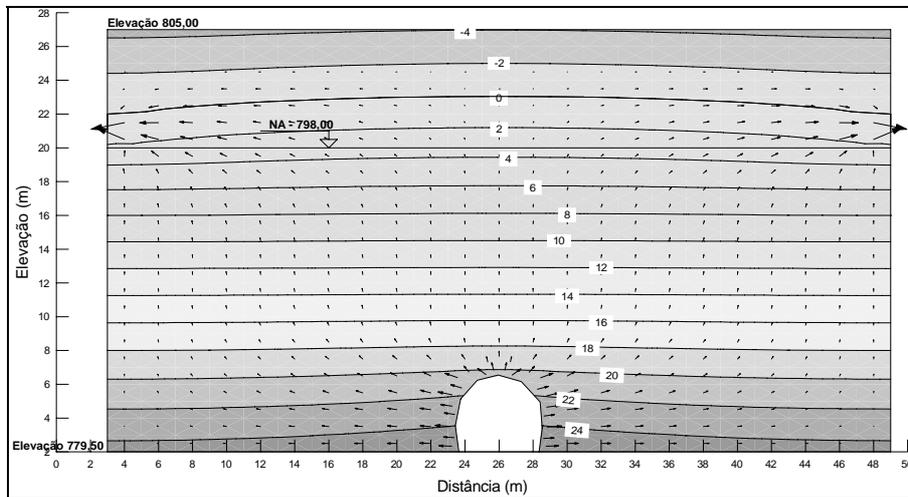


Figura 10 - Seção AA – junta totalmente aberta – poropressões resultantes da percolação de água
 $(q = 4,22 \times 10^{-8} \text{m/s})$

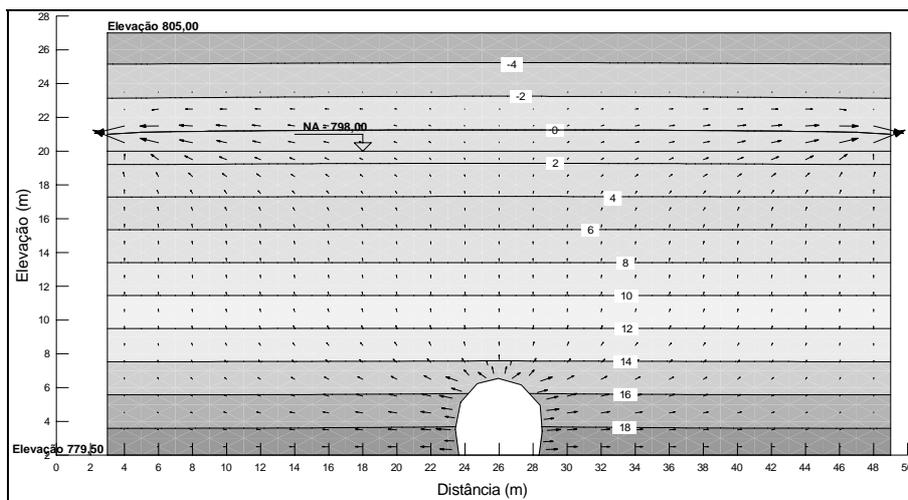


Figura 11 - Seção AA – junta totalmente aberta – poropressões resultantes da percolação de água
 $(q = 4,22 \times 10^{-9} \text{m/s})$

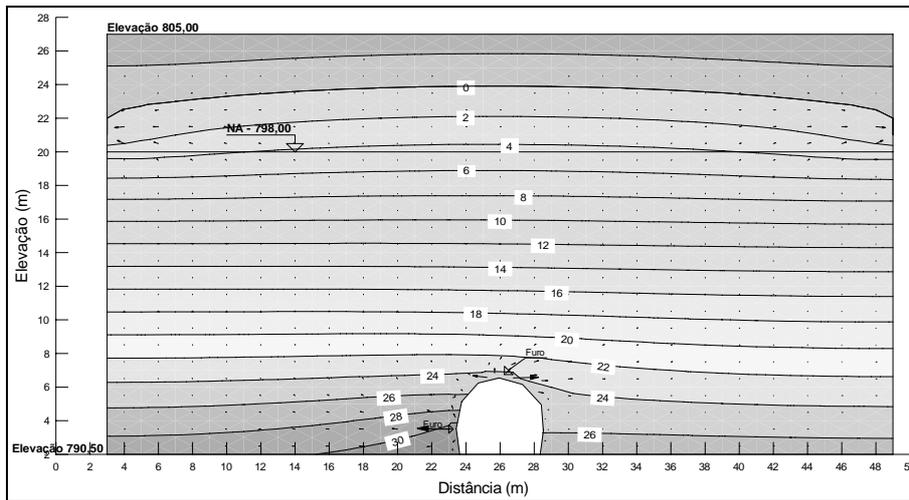


Figura 12 - Seção AA – com duas rupturas na junta – poropressões resultantes da percolação de água ($q = 4,22 \times 10^{-7} \text{ m/s}$)

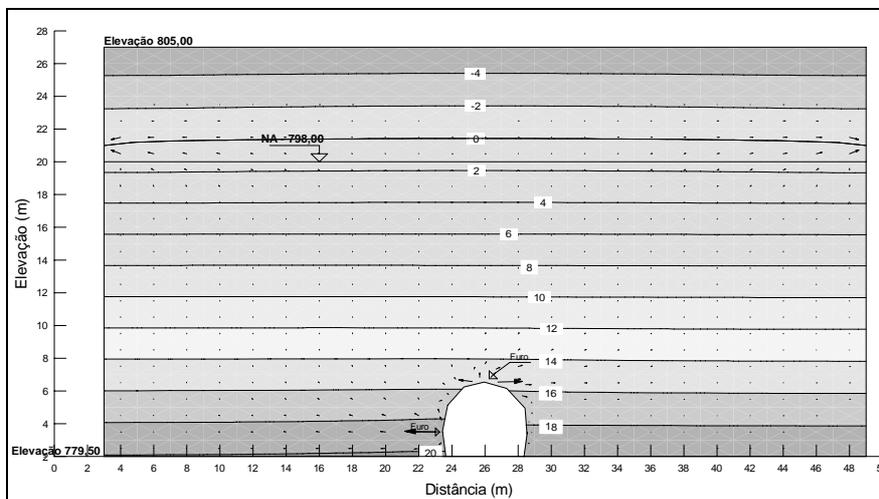


Figura 13 - Seção AA – com duas rupturas na junta – poropressões resultantes da percolação de água ($q = 4,22 \times 10^{-8} \text{ m/s}$)

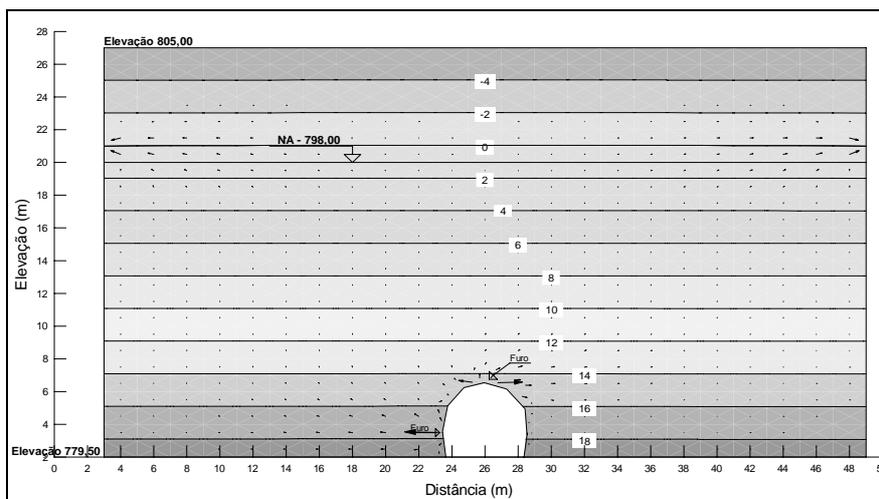


Figura 14 - Seção AA – com duas rupturas na junta – poropressões resultantes da percolação de água ($q = 4,22 \times 10^{-9} \text{ m/s}$)

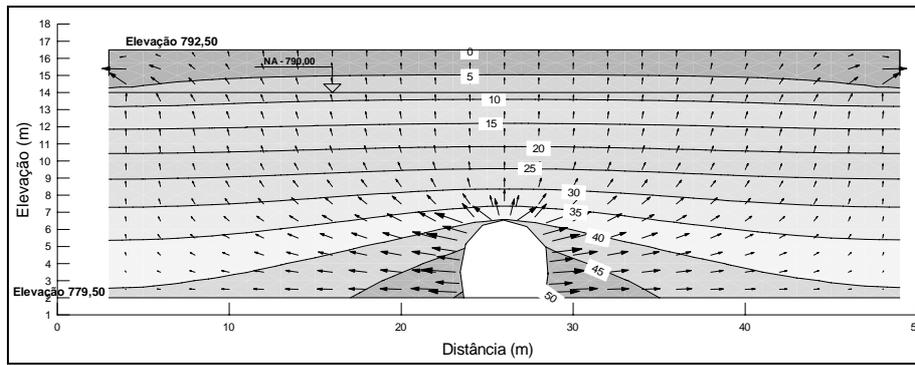


Figura 15 - Seção BB –com junta totalmente aberta– poropressões resultantes da percolação de água ($q = 4,22 \times 10^{-7} \text{ m/s}$)

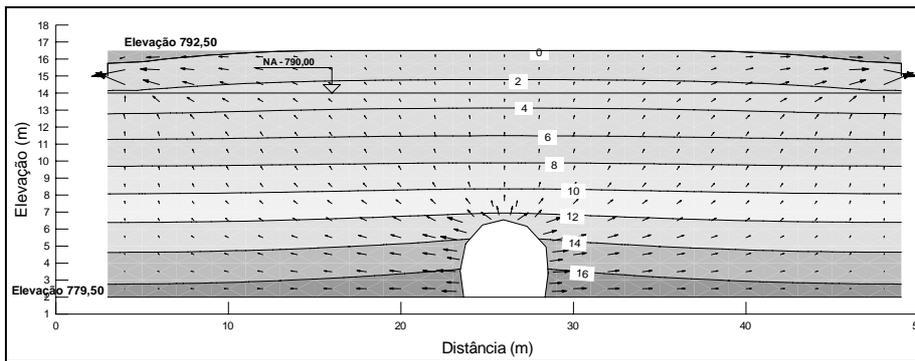


Figura 16 - Seção BB –com junta totalmente aberta– poropressões resultantes da percolação de água ($q = 4,22 \times 10^{-8} \text{ m/s}$)

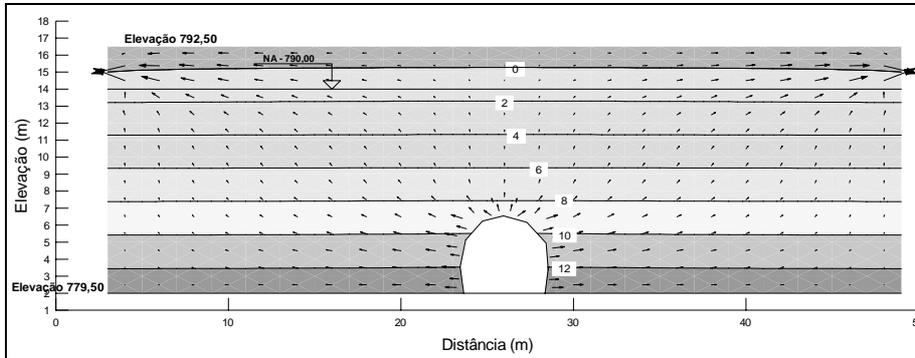


Figura 17 - Seção BB –com junta totalmente aberta– poropressões resultantes da percolação de água ($q = 4,22 \times 10^{-9} \text{ m/s}$)

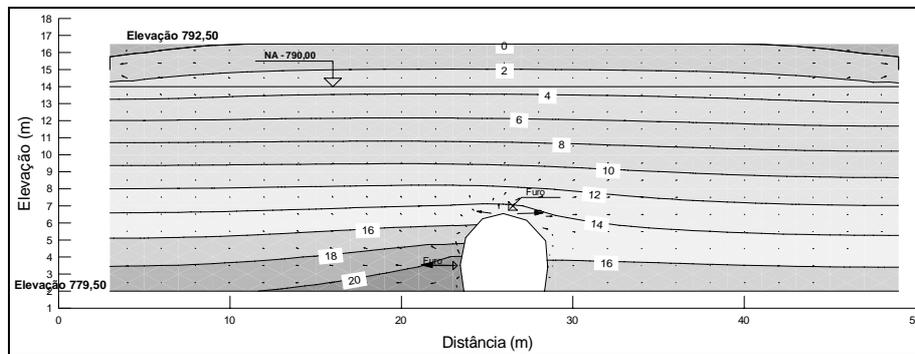


Figura 18 - Seção BB – com duas rupturas na junta – poropressões resultantes da percolação de água ($q = 4,22 \times 10^{-7} \text{ m/s}$)

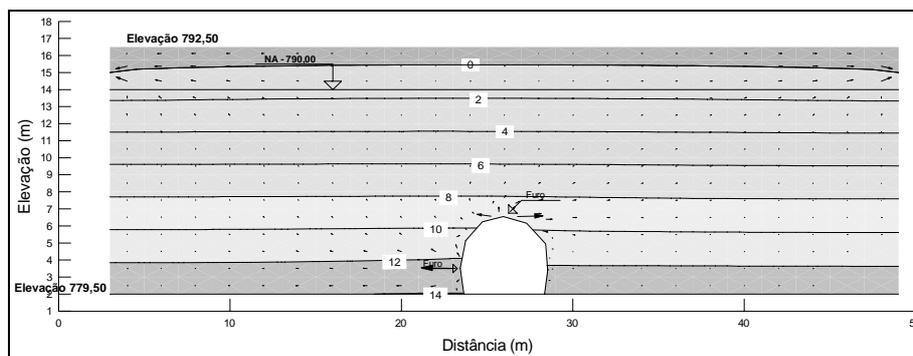


Figura 19 - Seção BB – com duas rupturas na junta – poropressões resultantes da percolação de água ($q = 4,22 \times 10^{-8} \text{ m/s}$)

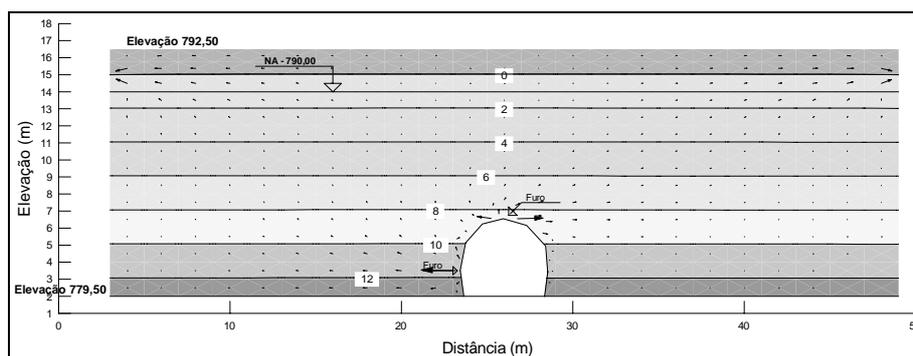


Figura 20 - Seção BB – com duas rupturas na junta – poropressões resultantes da percolação de água ($q = 4,22 \times 10^{-9} \text{ m/s}$)

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

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 a figura 1, verifica-se que o alteamento sofrido pela tulipa implicou no aumento da frequência do seu mau funcionamento, uma vez que, de acordo com a tabela 1, à exceção do ano de 1972, o vertedor funcionaria com o controle no túnel, não havendo perturbações com relação à flutuação de pressão.

Assim deve-se empreender, no caso da adoção de dispositivos vertedores do tipo poço, um estudo de frequência de funcionamento do mesmo, para posterior simulação geotécnica.

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, conforme figura 8. O fenômeno que ocorreu no poço nº 1, quando de sua abertura, foi o efeito da pressão de entrada de ar ou pressão de borbulhamento, indicando que a pressão capilar foi ultrapassada para que a fase não molhante (ar) pudesse penetrar num meio poroso saturado, com uma fase molhante (água).

b) Baseado em que, de uma forma geral, as variações das tensões produzem variações de volume e, estas por sua vez, variações de porosidade, alterando a quantidade de canais de fluxo para o fluido permeante, sugere-se, com base nos resultados das simulações das poropressões, que a compactação do aterro foi homogênea e, com a frequência de seu funcionamento, houve sérias variações no grau de compactação e acomodação do solo.

c) O efeito da tensão líquida, também, deve ser considerado nesse processo de alteração do grau de compactação, uma vez que a condutividade do ar diminui com o incremento da tensão líquida que aumenta a condutividade hidráulica, pois aumenta a espessura da água adjacente às paredes dos poros;

d) Os cenários mais condizentes com o ocorrido no maciço da barragem da Pampulha 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, atenuando, assim, as poropressões verticais;

f) Deve-se, em situações que o túnel do extravasor tulipa funcionar sob pressão (conduto forçado), simular a entrada de água nas juntas com a pressão dinâmica apropriada.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, pode-se verificar que a metodologia sugerida para a adoção do vertedor tipo poço em projetos de barragem de terra poderá ser utilizada amplamente, uma vez que indica a frequência de funcionamento hidráulico inadequado e o associa ao estudo de instabilidade do maciço. Assim, poderão ser adotados graus de compactação e materiais adequados às pressões impostas no aterro, evitando que o mesmo entre em colapso.

Sugere-se, como trabalho futuro, o aprimoramento da modelagem física em solos com determinado grau de compactação e acomodação, associando-os aos esforços referentes ao mau funcionamento de estruturas hidráulicas que poderão atuar sobre os mesmos.

REFERÊNCIAS

- Blight, E., “*Flow of Air Through Soils*”, ASCE *J. Soil Mech. Found. Eng. Div.*, Vol. 97 SM4, pp. 607-624.1971
- Craig, R.F. – *Soil Mechanics*, Van N. Reinhold, UK0 Co. Ltd, Wokingham, England, 1985, 419 p.
- Das, Braja M. – *Advanced soil mechanics*, Mac-Grow Hill Book Company, Singapore, 1985, 511 p.
- 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.

- Genovez, A.I.B. *Arrastamento de ar em poço com embocadura tipo tulipa. Um estudo experimental comparativo*, Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1986.
- Laushey, L.N. e Mavis, F.T. *Air entrained by water flowing down vertical shafts*. In: Congress IAHR, 5º, Minnesota, U.S., 1953, Proceedings, v.1, p.183-487.
- Mitchell, J.K. “*Fundamentals of Soil Behavior*” (2nd. Edition), John Willey & Sons, New York, 437 pp.1993.
- Mussali, Y.G. e Carsten, M.R. *A study of flows condition in shaft spillways*, Atlanta, U.S., 1968, 158 p.
- Oliveira, D.D. *Extravasores tipo tulipa. Estudo teórico experimental*. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1984.
- 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
- Olson, R.E. and Daniel D.E “*Measurement of the Hydraulic Conductivity of Fine- Grained Soils*”, *Permeability and Groundwater Contaminant Transport. ASTM STP 746*. Zimmie T.F. and Riggs C.º Eds., *American Society for Testing and Materials*.1981.
- Pinheiro, M.G. – *Equação de chuvas intensas para a RMBH* – Dissertação de Mestrado. EHR– UFMG. 1997.
- Silva, A.B., Carvalho, E.T., Fantinel, L.V., Romano, A.W. – *Estudos Técnicos para o levantamento dos focos de erosão e do risco geológico na bacia hidrográfica da Pampulha, Belo Horizonte*. Relatório Técnico FUNDEP, IGC/UFMG. 1994.
- SUDECAP – *Condições hidrológicas da represa da Pampulha* – Relatório Técnico. 1985.
- SUDECAP/DAM Engenharia. *Condições de estabilidade e segurança da barragem da Pampulha* – Relatório Técnico, Fevereiro/1998.
- 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.
- Vargas, M. – *Introdução à mecânica dos solos*, Mac-Grow Hill, São Paulo, 1977, 509 p.