

**IV-259 - ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DE BARRAGEM LOCALIZADA EM MEIO URBANO E O MAPEAMENTO DO VALE DE JUSANTE– ESTUDO DE CASO: BARRAGEM DA PAMPULHA****Maria da Glória Braz<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil pela Escola de Engenharia Kennedy. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Escola de Engenharia da UFMG. Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela Escola de Engenharia da UFMG. Professora da Faculdade de Engenharia e Arquitetura (FEA) da Universidade FUMEC e Professora e Coordenadora do Curso de Engenharia Civil da Faculdade Novos Horizontes. Diretora da EH<sup>2</sup>– Estudos Hidrológicos e Hidráulicos Ltda.

**Rodrigo Castro Pereira<sup>(2)</sup>**

Graduando em Engenharia Civil pela Faculdade Novos Horizontes e Bolsista de Iniciação Científica FAPEMIG do Núcleo de Pesquisas da Faculdade Novos Horizontes.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Alvarenga Peixoto, 1270 – Santo Agostinho - Belo Horizonte - MG - CEP: 30.180-121 - Brasil - Tel: (31) 3293-7010- e-mail: [maria.gloria@unihorizontes.br](mailto:maria.gloria@unihorizontes.br)

**RESUMO**

A ruptura de uma barragem acarreta consequências catastróficas, principalmente se essas estruturas se localizarem a montante de regiões urbanizadas, podendo, até mesmo, causar perdas de vidas humanas.

Por essa razão, a prevenção e redução das vulnerabilidades de vales a jusante de barragens têm merecido atenção especial, principalmente no que diz respeito às medidas não estruturais para minimizar os riscos e custos de um evento de ruptura ou, até mesmo, um evento hidrológico de grande magnitude, constituindo uma importante ferramenta de apoio à decisão.

Neste trabalho, foi elaborada a mancha de inundação do vale a jusante da barragem da Pampulha, localizada em Belo Horizonte, estado de Minas Gerais, até sua confluência com o córrego Cachoeirinha, através de cenário de rompimento do maciço e, com base no mesmo, foram indicadas as situações críticas e elaboradas as recomendações e sugestões para auxiliar a gestão e planejamento urbano na região do estudo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragens em Meio Urbano, Rompimento, Mancha de Inundação.

**INTRODUÇÃO**

Provavelmente, em todos os países do mundo ocorreram e ocorrerão casos de rompimento de barragens, sendo impossível se precisar um número correto, tendo em vista alguns governos não divulgarem as estatísticas de sinistros ocorridos. No entanto, pode-se afirmar que a ruptura de uma barragem possivelmente acarretará consequências catastróficas, principalmente se essas estruturas se localizarem a montante de regiões urbanizadas.

No Brasil, pode-se enumerar vários casos, um dos principais, localizado no rio Pardo no estado de São Paulo, foi o rompimento, por “*overtopping*” da barragem da Usina de Euclides da Cunha em janeiro de 1977, que produziu uma onda de cheia de tal magnitude em cascata, que rompeu a barragem de Armando Sales de Oliveira (limoeiro) a jusante e destruiu as usinas Rio do Peixe e Santa Alice. Esse acidente paralisou a usina por dois anos, aproximadamente.

Pode-se citar, ainda, vários exemplos mais recentes, tais como Algodões, no estado do Piauí (2009) e o Açude das Nações, cujo rompimento em 2010, provocou grandes transtornos em Pernambuco. No caso da barragem de Algodões, a onda de cheia escoou sobre a cidade de Cocal da Estação, tendo destruído, aproximadamente, 500 casas. (Jornal O Globo, 2009). Já o rompimento do Açude das Nações provocou o deslocamento de um grande volume de água no leito do rio Papacacinha, inundando parte do centro da cidade de Bom Conselho, em Pernambuco, invadindo casas e desabrigando famílias (Gazeta de Alagoas, 2010).

Datada de 20/09/2010, a Lei 12334 indica a elaboração do PAE – Plano de Ação de Emergência, para barragens de médio e grande porte e/ou para aquelas, cujo rompimento seja considerado de alto risco para a comunidade a jusante.

O PAE deve conter a identificação e análise das possíveis situações de emergência, bem como os procedimentos preventivos a serem tomados no caso da ocorrência dessas situações de emergência.

Para que se possa preparar o PAE, deve-se efetuar estudos que propiciem a elaboração do mapa da planície de inundação, cuja execução se baseia na avaliação e previsão das cotas máximas inundadas, vazões e velocidades máximas decorrentes da ruptura da barragem ao longo do vale de jusante.

## HISTÓRICO DA BARRAGEM DA PAMPULHA

A bacia hidrográfica da Pampulha possui área de 97,572 km<sup>2</sup> sendo 42,986 km<sup>2</sup> pertencentes ao município de Belo Horizonte e 54,586 km<sup>2</sup> ao município de Contagem. Limita-se ao norte com o município de Ribeirão das Neves e a sudoeste com o município de Betim.

O reservatório, de mesmo nome da bacia, foi projetado e construído para receber um volume de acumulação de 18 milhões de m<sup>3</sup>, correspondendo a uma área inundada de 2,61 km<sup>2</sup> e perímetro de 21 km, ultrapassando a profundidade de 15 m em cerca de 5% de sua área total.

A construção da barragem da Pampulha iniciou-se em 1936, sendo sua inauguração efetuada em 1938. O projeto inicial previa, em 1ª etapa, o enchimento de terra e sua compactação até a cota 797,6 m na crista e 796,1 m no NA da represa, que correspondia a uma altura máxima de 11,50 m. Em uma 2ª etapa, o nível da crista da barragem alcançaria a elevação de 802,6 m no vertedouro de emergência, localizado na ombreira esquerda, com 90,0 m de largura, e elevação de 805,0 m na seção de cota mais elevada, correspondente à ombreira direita, e cota do NA prevista em 800,0 m, sendo que o terreno natural do fundo da barragem estaria na cota 786,0 m.

As obras de 2ª etapa foram iniciadas e concluídas, na administração do, então prefeito, Juscelino Kubitschek, sendo a represa reinaugurada em 1943. No dia 20 de abril de 1954, deu-se a ruptura do maciço, em virtude da ocorrência de erosão subterrânea do tipo “*piping*” através do corpo da barragem, segundo estudos constatados pela Comissão Técnica Especial, nomeada pelo prefeito em exercício na época, Américo René Gianetti, para avaliação do problema.

O sistema de drenagem da barragem da Pampulha, quando de sua construção, era constituído de drenos franceses normais ao eixo da barragem, espaçados de 7 em 7 metros, que avançavam, anormalmente, até muito próximo do talude de montante. O talude de montante era revestido por uma placa contínua de concreto armado, que defendia o maciço contra a possibilidade de fluxo violento através dos drenos. Mas, mesmo assim, após 16 anos de sua construção, a cortina de concreto se rompeu, devido, segundo VARGAS (1977), a recalques das fundações da barragem.

Estabeleceu-se, então, um fluxo intenso de água entre a fenda da cortina e alguns dos drenos franceses. O fluxo de saída, visível numa boca de lobo do sistema de drenagem, conforme reportagens da época, aumentou progressivamente durante 5 dias, carreando cada vez mais material, até que se formou um túnel ao longo dos drenos.

Quando esse túnel alcançou dimensões excepcionais, o topo do mesmo desabou formando um canal em S, por dentro da barragem, pelo qual se escoou toda a água do reservatório, conforme figura 1.



**Figura 1 – Rompimento da barragem da Pampulha**

Fonte: revista ISTO É MINAS, 1992

A reconstrução da barragem da Pampulha ficou a cargo do Departamento de Obras contra as Secas - DNOS, sendo que sua reinauguração se deu em 31 de janeiro de 1958. A cota do NA ficou estabelecida em 800,4 m, 0,40 m acima do NA do projeto anterior, tendo sido conservadas as mesmas características para o corpo da barragem, estando o terreno natural em cota variável, sendo 784,50 m sua cota mais profunda.

O sistema extravasor permaneceu com as mesmas características, sendo constituído por um vertedor de serviço e um vertedor de emergência. O vertedor de serviço era composto por uma tulipa, cujo coroamento original localizava-se na El. 800,40 m e que, posteriormente, foi alterada para a El. 801,30 m. A passarela da tulipa se encontra na El. 802,60 m. Esse vertedor está ligado a uma galeria de concreto com diâmetro interno de 3,30 m, que atravessa o corpo do maciço e que, atualmente atua como descarregador de fundo para eventuais manutenções e como vertedor auxiliar, quando de cheias de grande magnitude.

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 consequências 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, de acordo com SUDECAP/DAM (Fev/1998). Para esta avaliação, foram realizadas inspeções geológico-geotécnicas no maciço, inspeção interna na galeria do vertedouro, análise de percolação e estabilidade.

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 2.



**Figura 2 – Vista frontal das explosões devido ao emulsão de ar ao volume de água na tulipa**  
Fonte: SUDECAP/DAM (1998)

Pode-se constatar, então, que 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.

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, conforme figura 3. Foram observados, também, na região de contato do canal de restituição, abatimentos e colapsos do aterro, indicando processos de “*piping*”.



**Figura 3 – Juntas abertas no interior da galeria**  
Fonte: SUDECAP/DAM (1998)

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. Pela análise dos testemunhos de sondagem à percussão e do material terroso retirado das escavações dos poços de inspeção, verificou-se que a região da galeria, apresentava 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 se localizava nas proximidades da galeria do vertedouro.

A primeira linha de sondagens, localizada próxima à parede esquerda da galeria (de montante para jusante), foi iniciada durante período de intensas chuvas e o nível de água obtido se encontrava elevado. Porém, o que mais chamou a atenção dos engenheiros foi ter se observado poço número 1, localizado acima da 3ª junta da galeria na 1ª berma de jusante, a saída de bolhas de ar e de água, apresentado na figura 4, exalando odor característico da água da represa e aparentando processo de “ebulição”, comprovando haver abertura das juntas da galeria.



**Figura 4 – Início da elevação do nível d’água no poço número 1, podendo-se notar a saída de bolhas de ar aparentando processo de “ebulição”**

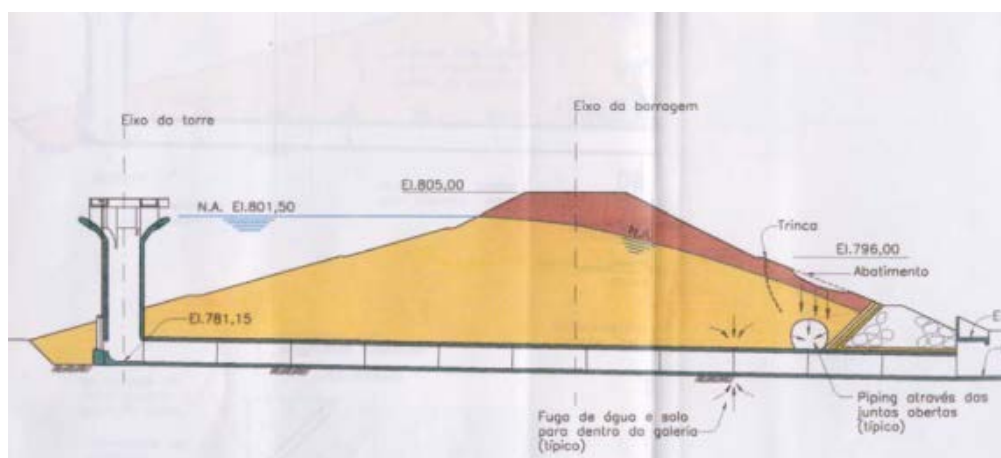
Fonte: SUDECAP/DAM (1998)

Os materiais recolhidos das outras linhas de sondagem apresentaram resultados satisfatórios com relação à resistência do maciço. Assim, foram efetuadas análises de percolação e estabilidade, sendo a primeira com o objetivo de verificar o funcionamento/eficiência do sistema de drenagem existente na barragem e a segunda para determinar os fatores de segurança ao escorregamento para diversas seções da barragem.

Segundo SUDECAP/DAM (Set/1998), de acordo com as análises de estabilidade ao escorregamento, a barragem encontrava-se em níveis aceitáveis de segurança, exceto para a seção próxima à galeria do vertedouro. Nesta região foi necessário, à época, se executar um reforço e drenos sub-horizontais, para garantir a estabilidade do maciço e elevar o coeficiente de segurança para níveis aceitáveis.

Ainda segundo SUDECAP/DAM (1998), a causa da instabilidade progressiva da região do maciço da barragem, foi a associação dos seguintes fatores: forte vibração no aterro junto à galeria, causada pelo mau funcionamento do vertedouro nos períodos de descarga de grandes vazões, fuga de solo do maciço da barragem para dentro da galeria, através das juntas de dilatação, que se encontravam totalmente abertas, 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 explicitado na figura 5.



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

Fonte: SUDECAP/DAM (1998)

## METODOLOGIA UTILIZADA

De acordo com a Lei de Segurança de Barragens e as Normas de Projeto, definidas pelo ICOLD - *International Comitê on Large Dams* (1999), estabelece-se a obrigatoriedade do estudo da zona inundável a jusante da barragem, por simulação da ruptura de modo súbito ou progressivo, parcial ou total, conforme o modo de ruptura mais provável. Dentre os mecanismos de ruptura pode-se admitir o galgamento ou *overtopping* e a erosão interna do solo, também conhecida como *piping*.

O galgamento é a passagem da água sobre a barragem, podendo ser causado pelo mau dimensionamento do vertedor de superfície, ocorrendo quando da manifestação de cheia de grande magnitude, origem sísmica ou deslizamento de taludes.

O *piping* resulta da passagem da água através das paredes do maciço. A brecha inicia como um poro, em um ponto qualquer da barragem. Este poro aumenta, por erosão, em todas as direções, até que o colapso ocorra. Este problema é de especial importância nos encontros e nas interfaces entre o corpo do aterro da barragem e os elementos de concreto das estruturas hidráulicas, como o conduto de descarga de fundo.

De acordo com o histórico da barragem da Pampulha, apresentado anteriormente, optou-se por estudar o rompimento do maciço através do fenômeno de *piping*, localizando-se a brecha sobre a galeria do vertedouro auxiliar.

A Superintendência de Desenvolvimento da Capital – SUDECAP, órgão gestor da drenagem urbana de Belo Horizonte, ciente da importância desse estudo, forneceu trezentas e dezoito seções topobatimétricas do trecho fluvial que se iniciam no dissipador de energia do antigo vertedor de serviço e atual auxiliar de emergência da barragem da Pampulha e se estendem até a confluência com o córrego Cachoeirinha, região que sempre apresenta problemas de inundação e onde se inicia o ribeirão da Onça.

Existem diversos modelos numérico-computacionais para simulação do escoamento provocado pela ruptura de barragens, no entanto foi utilizado o modelo computacional HEC-RAS, amplamente disseminado no meio técnico e que permite a solução completa das equações que representam o processo de escoamento (Equações de Saint Venant) com o modelo UNET (*One-Dimensional Unsteady Flow Through a Full Network of Open Channels*). Ele considera diferentes condições de contorno, em níveis, vazões e hidrogramas, a montante.

Esse modelo computacional também permite simular a ruptura da barragem, calcular o hidrograma originado pelo esvaziamento do reservatório e modelar a onda de inundação no vale de jusante da barragem. A brecha é modelada como um vertedor de geometria variável, sendo suas dimensões majoradas conforme desenvolvimento da erosão provocada pela água. Na verdade, a brecha, no modelo, tem a configuração de um



trapézio produzida por três parâmetros básicos: o tempo de formação, largura final, adotados com o intuito de simplificação e, também, pelo pouco conhecimento dos processos reais de abertura e formação da abertura. A fórmula utilizada na determinação da vazão máxima efluente produzida pela ruptura foi a de Froehlich, apresentada a seguir:

$$Q_M = 0,607V_0^{0,295}H_0^{1,24} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

$V_0$  volume inicial de água acima da cota final da brecha ( $m^3$ )

$H_0$  altura inicial de água acima da cota final da brecha (m).

Adotou-se para a rugosidade do canal principal, o valor do número de Manning de 0,035, considerando a média ponderada dos valores considerados em cada trecho com ma revestimento diferente.

O presente estudo simulou a formação da cheia condicionada pelo tipo de ruptura e pelas características da brecha na barragem da Pampulha e, também, a modelagem do processo de propagação da cheia, baseado no estudo e modelação dos regimes hidráulicos transitórios de modo a caracterizar a planície de inundação a jusante, quando da ocorrência do sinistro.

## RESULTADOS OBTIDOS

A simulação forneceu o valor da vazão de pico efluente próximo de  $1280m^3/s$  e o tempo de abertura da brecha equivalente a 90 minutos. A partir dos resultados de propagação, fornecido pelo modelo HEC-RAS, efetuou-se o mapeamento da mancha de inundação, utilizando-se o aplicativo *Google Earth*, podendo-se caracterizar de forma clara, as áreas passíveis de intervenção, a jusante da barragem da Pampulha. A Figura 6 apresenta o mapa das áreas potencialmente inundáveis, caso ocorra o rompimento hipotético da barragem da Pampulha.



**Figura 6 – Mancha de Inundação Proveniente do Rompimento Hipotético da Barragem da Pampulha**

Pode-se observar que equipamentos públicos, quais sejam o aeroporto da Pampulha e estações metrológicas, bem como áreas residenciais e comerciais estão localizadas no caminamento da onda de cheia e, dessa forma, questiona-se tempo hábil para a perfeita evacuação desses locais.

A figura 7 apresenta, em destaque, a confluência do córrego Cachoeirinha com o Pampulha, onde se pode verificar a abrangência da mancha de inundação, que alcança a pista da Avenida Cristiano Machado, parte do Anel Rodoviário Celso Mello Azevedo e se aproxima da entrada da Estação metroviária São Gabriel. No trecho abaixo da Estação São Gabriel, não foi possível prever o caminhamento da onda de cheia, mas, pela topografia e conformação do terreno, tem-se a sensação de que a água alcançará os estabelecimentos comerciais, embaixo do viaduto a direita da imagem.



**Figura 7 - Abrangência da mancha de inundação na região da confluência do córrego Cachoeirinha com o córrego Pampulha**

A Figura 8, abaixo, mostra que a jusante da Estação São Gabriel se inicia a canalização do córrego do Onça (ou ribeirão do Onça), a céu aberto, sendo a junção do córrego Cachoeirinha com o ribeirão Pampulha, a sua origem. Provavelmente, haverá funcionamento sob pressão nessa confluência, podendo ocorrer, inclusive, a extensão da mancha de inundação em locais não previstos no atual estudo. Infelizmente, não se obteve seções e informações adequadas para essa avaliação.





Figura 8 - Local de início do córrego do Onça e região sem dados para o estudo adequado.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os impactos ambientais, econômicos diretos e indiretos, e o risco de perda de vidas humanas são muito expressivos, principalmente em se tratando de uma barragem em meio urbano. Dessa forma, o desenvolvimento de estudos que permitam a caracterização adequada dos cenários de avaliação do risco associados à caracterização de suas consequências é de extrema relevância.

Ressalta-se que, quando de um rompimento, os efeitos da onda de cheia podem afetar a topografia e a rugosidade do caminho do fluxo, pois devido às altas velocidades do escoamento, à elevação dos níveis de água no leito do canal de drenagem e ao grande volume de sedimentos erodidos e carregados que são arrastados, o potencial de destruição da translação da onda de cheia é muito alto.

Existem, ainda, considerações que se deve levar em conta, tendo em vista que se a vegetação for de pequeno porte e a onda de cheia possuir altura e grande velocidade, o número de Manning tenderá a diminuir, porque o revestimento cederá ao peso e velocidade do fluxo, então a cota de inundação diminuirá.

Por outro lado, se a vegetação for de maior porte, o número de Manning poderá aumentar, haja vista que os galhos e folhas poderão formar uma trama que reterá mais obstáculos à passagem do fluxo, inclusive troncos e escombros e, assim, a cota de inundação aumentará. Alguns autores citam variações do número de Manning entre 0,067 e 0,029, no caso de escoamentos provenientes de ruptura de barragens.

Segundo USBR – *Bureau of Reclamation* (1995, 1995a), a modelagem da propagação da onda de cheia devido à ruptura de uma barragem é ferramenta útil no mapeamento da mancha de inundação. Esse mapeamento é de fundamental importância para a caracterização e determinação dos limites das áreas de risco, sendo base para a implantação do plano de alerta e evacuação da população situada no vale de jusante da barragem, caso ocorra a ruptura do maciço.

Nos processos da gestão da emergência é primordial que se tenha informação resumida e precisa para que o processo de decisão seja ágil, pois é fator determinante no salvamento de vidas e minimização de prejuízos. Pode-se, com base no mapeamento das manchas de inundação, elaborar informações que apoiem à gestão do vale de jusante, podendo-se caracterizar população que habita a área inundável, sua faixa etária e capacidade de mobilização; a tipologia das edificações na área inundável, identificação de eventuais pontos de fuga e as estruturas fora da área inundável que possam ser utilizadas nas ações de socorro, dentre outras.

Todas essas informações dão origem ao Plano de Ação Emergencial – PAE, que deve ser criado com os vários níveis de alerta no vale a jusante de uma barragem, para efetuar a gestão de eventos emergenciais, estabelecendo a hierarquia e as responsabilidades de cada órgão envolvido e quais os meios e recursos disponíveis.

Ressalta-se a importância da continuação do presente estudo até a confluência com o rio das Velhas, dado que a região é bastante urbanizada até a dita confluência, sendo necessária topografia detalhada, necessária para a demarcação das áreas potencialmente inundáveis a jusante da barragem da Pampulha até a confluência do ribeirão do Onça com o rio das Velhas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BUREAU OF RECLAMATION (1995) - *Emergency Planning and Exercise Guidelines: Guidance Documents*. Volume I, U. S. Department of the Interior, USA.
2. BUREAU OF RECLAMATION (1995a) - *Emergency Planning and Exercise Guidelines: Technical Handbook*. Volume II, U. S. Department of the Interior, USA.
3. ICOLD (1999) - *Bulletin on Risk Assessment: Risk Assessment as an Aid to Dam Safety Management*. Draft, International Commission of Large Dams, Draft 24.08.99, 102p.
4. LEI FEDERAL 12334 – 20/09//2010
5. SUDECAP/DAM Engenharia. *Condições de Estabilidade e Segurança da Barragem da Pampulha* – Relatório Técnico, Fevereiro/1998.
6. SUDECAP/DAM Engenharia. *Análise de Percolação e Estabilidade da Barragem da Pampulha* – Relatório Técnico, Setembro/1998.