

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Eduardo Kaplan

**PEQUENAS BARRAGENS PARA O ABASTECIMENTO DE
ÁGUA DO MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL/RS:
AVALIAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE MÉTODOS DE
RECUPERAÇÃO E CONSERVAÇÃO**

Porto Alegre
junho 2010

EDUARDO KAPLAN

**PEQUENAS BARRAGENS PARA O ABASTECIMENTO DE
ÁGUA DO MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL/RS:
AVALIAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE MÉTODOS DE
RECUPERAÇÃO E CONSERVAÇÃO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Luiz Antônio Bressani
Coorientador: Fernando Setembrino Cruz Meirelles

Porto Alegre

junho 2010

EDUARDO KAPLAN

**PEQUENAS BARRAGENS PARA O ABASTECIMENTO DE
ÁGUA DO MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL/RS:
AVALIAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE MÉTODOS DE
RECUPERAÇÃO E CONSERVAÇÃO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 15 de julho de 2010

Prof. Luiz Antônio Bressani
PhD pelo Imperial College, University of
London, UK
Orientador

Prof. Fernando Setembrino Cruz Meirelles
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento,
UFRGS/ Porto Alegre
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marcelo Giulian Marques (UFRGS)
PhD pela Université Laval/Québec

**Prof. Fernando Setembrino Cruz
Meirelles (UFRGS)**
Dr. pela UFRGS

Eng. Gerson Antônio Panarotto (SAMAE)
Engenheiro Civil pela UFRGS

Prof. Luiz Antônio Bressani (UFRGS)
PhD pela University of London/UK

Dedico este trabalho a meus pais, Régis e Ladi, e à minha
irmã Bruna, que sempre me apoiaram e especialmente
durante o período do meu Curso de Graduação estiveram
ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Luiz Antônio Bressani, orientador deste trabalho, pelas diversas horas dedicadas para que o trabalho se desenvolvesse.

Agradeço ao Prof. Fernando Meirelles pela contribuição fundamental ao andamento do trabalho.

Agradeço aos membros do Samae – Caxias do Sul: Gerson, Marta, Sônia, Tiago e Rossano, por disponibilizar informações importantes ao trabalho.

Agradeço a Profa. Carin Maria Schmitt por esclarecer inúmeras dúvidas sobre o trabalho.

A vida só pode ser comprendida, olhando-se para trás;
mas só pode ser vivida, olhando-se para frente.

Soren Kierkegaard

RESUMO

KAPLAN, E. **Pequenas Barragens Destinadas ao Abastecimento de Água do Município de Caxias do Sul/RS**: avaliação e proposição de métodos de recuperação e conservação. 2010. 99 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O presente trabalho avaliou a segurança de seis pequenas barragens destinadas ao abastecimento de água do município de Caxias do Sul/RS. As barragens analisadas caracterizam-se por serem, em sua maioria, construídas em alvenaria de pedra e apresentarem altura inferior a 10 m. Em três casos as barragens estão localizadas em zonas urbanas, o que evidencia a importância da avaliação de sua segurança. Além disso, as seis barragens foram construídas entre as décadas de 1930 e 1960 e não vinham sendo regularmente monitoradas. Durante os trabalhos de inspeção das barragens, foi verificado que, do ponto de vista de construção e estabilidade estrutural, não existiam problemas significativos. Entretanto foram observados pontos de erosão do solo a jusante de algumas barragens devido ao galgamento em períodos de grandes chuvas. Procedeu-se então uma verificação da segurança das estruturas contra o galgamento a partir da comparação das capacidades de vazão dos vertedouros e vazões estimadas para a bacia e reservatório. Com base na geometria dos vertedouros existentes foram calculadas as capacidades de vazão e estes valores foram comparados com as estimativas de vazões de pico que as bacias contribuintes são capazes de gerar (cheias amortecidas para tempos de recorrência de 100 e 1000 anos). Essa verificação apontou que as 2 barragens de Galópolis e a barragem São Miguel estão com vertedouros subdimensionados. No caso da barragem de São Miguel foi construído um segundo vertedouro (hoje atuando com o principal) o qual dispõe de uma placa metálica vertical com orifícios. Esta estrutura, nas condições normais de operação (posição inferior), tem capacidade de verter apenas 40% da cheia máxima. O vertedouro de Galópolis Inferior tem capacidade de vazão de 75% da cheia máxima e Galópolis Superior tem capacidade de apenas 30%. Na barragem São Paulo verificou-se que o excesso de vegetação bloqueia parcialmente tanto o vertedouro principal, quanto o auxiliar, o que possivelmente é a maior causa do galgamento da estrutura. Sugere-se o detalhamento de obras de proteção contra erosão a jusante das estruturas, com a construção de canais que reconduzam as ondas de cheia de volta à calha do vertedouro principal e o aumento da capacidade de vazão operacional do vertedouro da barragem de São Miguel, através da automatização do levantamento da comporta.

Palavras-chave: segurança de barragens; pequenas barragens; problemas em barragens

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa.....	16
Figura 2: imagem da barragem de Teton, no instante da ruptura.....	20
Figura 3: infiltração a montante.....	32
Figura 4: deslizamento ou colapso no paramento de jusante.....	34
Figura 5: bloqueio no vertedouro.....	36
Figura 6: fissuras longitudinais no paramento de jusante.....	37
Figura 7: erosão no paramento de montante.....	38
Figura 8: representação esquemática do complexo Dal Bó.....	40
Figura 9: localização do complexo Dal Bó.....	41
Figura 10: São Paulo – erosão junto aos muros por galgamento sobre a barragem.....	42
Figura 11: São Paulo – aguapés e gramíneas bloqueando o vertedouro auxiliar.....	43
Figura 12: São Paulo – canal de fuga mal definido e sem revestimento.....	43
Figura 13: São Paulo – árvores no talude da barragem.....	44
Figura 14: São Paulo – grade de proteção do lago da barragem danificada.....	45
Figura 15: São Pedro – falha no rejunte, levando ao vazamento de água.....	46
Figura 16: São Pedro – aguapés bloqueando o vertedouro principal.....	47
Figura 17: São Pedro – revestimento danificado do vertedouro lateral.....	47
Figura 18: São Miguel – falha no rejunte, causando vazamento.....	48
Figura 19: São Miguel – áreas úmidas na periferia da barragem.....	49
Figura 20: localização do complexo Galópolis.....	50
Figura 21: Galópolis Inferior – erosão na margem de Galópolis Inferior.....	51
Figura 22: Galópolis Inferior – conduto de fundo desativado.....	52
Figura 23: Galópolis Inferior – sinais de galgamento na estrutura vertente.....	53
Figura 24: localização da Barragem Samuara.....	54
Figura 25: Samuara – erosão nas margens do reservatório.....	54
Figura 26: Samuara – saída do canal de descarga em ruínas.....	55
Figura 27: Samuara – vazamentos na lateral do vertedouro.....	56
Figura 28: hidrograma unitário triangular genérico.....	59
Figura 29: São Paulo – vertedouro principal da barragem.....	72
Figura 30: São Paulo – vertedouro auxiliar da barragem.....	72
Figura 31: São Pedro – vertedouro principal da barragem.....	74
Figura 32: São Pedro – vertedouro auxiliar da barragem.....	74

Figura 33: São Miguel – vertedouro original da barragem.....	75
Figura 34: São Miguel – novo vertedouro da barragem.....	75
Figura 35: Samuara – vertedouro da barragem.....	77
Figura 36: Samuara – bueiros da barragem.....	77
Figura 37: Galópolis Superior – vertedouro da barragem.....	78
Figura 38: Galópolis Inferior – vertedouro da barragem.....	79
Figura 39: instrumento cortante em forma de V.....	82
Figura 40: ancinho.....	82
Figura 41: barreira para vegetação.....	83
Figura 42: vertedouro automático (vista lateral em corte).....	84
Figura 43: vertedouro automático (vista superior).....	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: categorias e causas de falhas.....	28
Quadro 2: locais de infiltrações e prováveis causas.....	31
Quadro 3: coeficientes de segurança.....	34
Quadro 4 valores de CN para bacias com ocupação urbana para condições de umidade antecedente AMC II.....	61
Quadro 5: áreas das bacias em estudo.....	63
Quadro 6: características das bacias estudadas (ΔH , ΔL , S_o e T_c).....	64
Quadro 7: características das bacias em estudo (T_c , T_r , P e I).....	66
Quadro 8: características dos hidrogramas das bacias em estudo (D , t_p , t_a , t_b e q_p).....	67
Quadro 9: porcentagem de chuva por intervalo.....	67
Quadro 10: valores de CN e S para as bacias analisadas.....	68
Quadro 11: precipitação efetiva e vazão máxima de projeto.....	68
Quadro 12: valores de pico dos hidrogramas amortecidos.....	70
Quadro 13: características geométricas e capacidade de vazão dos vertedouros da barragem São Paulo.....	72
Quadro 14: características geométricas e capacidade de vazão dos vertedouros da barragem São Pedro.....	73
Quadro 15: características geométricas e capacidade de vazão dos vertedouros da barragem São Miguel.....	76
Quadro 16: características geométricas e capacidade de vazão dos vertedouros da barragem Samuara.....	77
Quadro 17: características geométricas e capacidade de vazão dos vertedouros da barragem Galópolis Superior.....	78
Quadro 18: características geométricas e capacidade de vazão dos vertedouros da barragem Galópolis Inferior.....	79
Quadro 19: comparação entre vazões produzidas pela bacia e capacidade de vazão dos vertedouros.....	87
..	

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 MÉTODO DE PESQUISA	14
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	14
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	14
2.2.1 Objetivo principal	14
2.2.2 Objetivos secundários	14
2.3 PREMISSE.....	14
2.4 DELIMITAÇÕES.....	15
2.5 LIMITAÇÕES.....	15
2.6 DELINEAMENTO.....	15
2.6.1 Pesquisa bibliográfica	16
2.6.2 Inspeções de campo	17
2.6.3 Diagnóstico dos problemas	17
2.6.4 Estudo de alternativas de recuperação	17
2.6.5 Proposição da solução escolhida	17
2.6.6 Análise final e conclusões	17
3 BARRAGENS: HISTÓRICO E ACIDENTES	18
3.1 HISTÓRICO.....	18
3.2 PRINCIPAIS REGISTROS DE ACIDENTES.....	19
4 SEGURANÇA DE BARRAGENS	22
4.1 CONCEITOS DE SEGURANÇA.....	24
4.2 PROBLEMAS MAIS COMUNS.....	26
4.2.1 Piping e infiltrações	29
4.2.2 Rupturas estruturais e de fundação	32
4.2.3 Galgamento	35
4.2.4 Outros problemas	36
4.2.4.1 Fissuração.....	36
4.2.4.2 Erosão superficial.....	37
4.3 TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO.....	38
5 RELATÓRIOS DE VISTORIA – ANÁLISE DOS PRINCIPAIS PROBLEMAS ENCONTRADOS	40
5.1 COMPLEXO DAL BÓ.....	40
5.1.1 Barragem São Paulo	41

5.1.1.1 Galgamento e erosão junto aos muros.....	42
5.1.1.2 Vertedouro auxiliar tomado por vegetação.....	42
5.1.1.3 Canal de fuga do vertedouro auxiliar não está definido.....	43
5.1.1.4 Árvores em taludes íngremes.....	44
5.1.1.5 Grade de proteção do lago danificada.....	44
5.1.2 Barragem São Pedro.....	45
5.1.2.1 Falhas nos rejuntas.....	45
5.1.2.2 Vertedouro bloqueado por aguapés.....	46
5.1.2.3 Vertedouro lateral danificado.....	46
5.1.3 Barragem São Miguel.....	47
5.1.3.1 Falhas nos rejuntas.....	48
5.1.2.2 Áreas úmidas na periferia da barragem.....	48
5.2 COMPLEXO GALÓPOLIS.....	49
5.2.1 Barragem Galópolis Inferior.....	50
5.2.1.1 Erosão no terreno lateral junto da barragem.....	50
5.2.1.2 Conduto de fundo desativado.....	51
5.2.2 Barragem Galópolis Superior.....	52
5.3 BARRAGEM SAMUARA.....	53
5.3.1 Erosão nas margens do reservatório.....	53
5.3.2 Estrutura do canal de descarga destruída.....	55
5.3.3 Vazamentos na lateral do vertedouro.....	55
6 ASPECTOS HIDROLÓGICOS.....	57
6.1 ÁREA DA BACIA	63
6.2 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO.....	63
6.3 INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO.....	65
6.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO TRIANGULAR..	66
6.5 AMORTECIMENTO DAS ONDAS DE CHEIA PELOS RESERVATÓRIOS.....	69
6.6 CAPACIDADE DOS VERTEDOUROS EXISTENTES.....	70
6.6.1 Barragem São Paulo.....	71
6.6.2 Barragem São Pedro.....	73
6.6.3 Barragem São Miguel.....	74
6.6.4 Barragem Samuara.....	76
6.6.5 Barragem Galópolis Superior.....	78
6.6.6 Barragem Galópolis Inferior.....	78
7 ANÁLISE E PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES.....	80

7.1 INFILTRAÇÕES.....	80
7.2 EXCESSO DE VEGETAÇÃO.....	81
7.3 GALGAMENTO E EROSÃO.....	83
7.4 DEMAIS PROBLEMAS.....	85
8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	87
REFERÊNCIAS.....	89
APÊNDICE A.....	92
APÊNDICE B.....	96

1 INTRODUÇÃO

Inúmeras são as vantagens desfrutadas pela construção de barragens. Pode-se, por exemplo, citar: produção de energia, irrigação, abastecimento doméstico. Inúmeros são também os riscos que eventuais falhas na estrutura de barragens existentes podem causar à sociedade. Em 1946, em Johnstown, nos Estados Unidos, o colapso da barragem local criou uma onda de cheia com alturas que chegavam a 20 metros, causando a morte de 2209 pessoas. Nem todos os acidentes com essas estruturas têm a mesma gravidade, mas a Engenharia não pode permitir que a sociedade conviva com estes riscos.

Procedimentos para avaliar a segurança das barragens brasileiras são previstos na forma de lei e de manuais. Estes artigos usualmente abrangem apenas estruturas de grande porte. Cita-se como exemplo o Projeto de Lei n. 1.181/2003, o qual se restringe a barragens com altura igual ou superior a 15 metros, do ponto mais baixo da fundação à crista, ou reservatórios com capacidade de acumulação igual ou superior a três milhões de metros cúbicos.

Não se pode deixar de avaliar, porém, as barragens de porte menor. Essas estruturas, usualmente construídas da maneira menos onerosa possível, podem apresentar os mais variados tipos de falhas e são capazes de causar prejuízos tanto sociais, quanto econômicos e ambientais. Assim, o presente trabalho visa estudar medidas de recuperação ou conservação para seis barragens de pequena altura que se apresentaram defeituosas, a fim de que, após a aplicação de tais medidas, as barragens voltem a operar de forma segura.

Após esta introdução, é apresentado o capítulo 2 que expõe o método de pesquisa. No capítulo 3 é apresentado um breve histórico sobre o surgimento das primeiras barragens, assim como registros de acidentes passados. No capítulo 4, fruto de uma revisão bibliográfica, são trazidos conceitos de segurança de barragens, além de problemas comumente encontrados nesse tipo de estrutura. No capítulo 5 são apresentadas fotografias de problemas encontrados em visitas de vistoria realizadas nas barragens em estudo. As anormalidades encontrados nessas imagens são discutidas. O capítulo 6 traz um estudo hidrológico onde as vazões máximas provenientes das bacias de captação são calculadas pelo método do Hidrograma Unitário Triangular e, no capítulo 7, são propostas alternativas para a recuperação dos problemas existentes.

2 MÉTODO DE PESQUISA

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: frente aos problemas verificados nas barragens em estudo, quais os métodos de conservação ou recuperação indicados?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a proposição de métodos de recuperação/conservação para as barragens em estudo.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) revisão de técnicas de inspeção e recuperação que são utilizadas para essa finalidade;
- b) descrição das barragens inspecionadas, salientando seus problemas;
- c) análise hidrológica das bacias contribuintes.

2.3 PREMISSA

Em decorrência do uso, é comum esperar que toda a barragem em operação sofra avarias que prejudiquem o seu desempenho.

2.4 DELIMITAÇÕES

A pesquisa de campo deste trabalho delimita-se a barragens de pequeno porte situadas no interior da cidade de Caxias do Sul. Foram consideradas como de pequeno porte barragens com altura inferior a 15 m, do ponto mais baixo da estrutura até sua crista, ou com volume de água armazenado inferior a 3×10^6 m³. Foram analisadas as barragens do complexo Dal Bó (em número de 3), a barragem Samuara e as duas barragens de Galópolis.

2.5 LIMITAÇÕES

A seguir estão relacionadas as limitações relativas ao estudo proposto:

- a) não serão avaliadas questões relacionadas ao projeto das barragens estudadas;
- b) não será possível acompanhar a implementação das soluções propostas em virtude da escassez de tempo.

2.6 DELINEAMENTO

As etapas da realização deste projeto foram definidas da seguinte forma:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) inspeções de campo;
- c) diagnóstico dos problemas;
- d) estudo de alternativas de recuperação;
- e) proposição das soluções escolhidas;
- f) análise final e conclusões.

Estas etapas estão representadas no diagrama da figura 1 e estão detalhadas nos próximos itens.

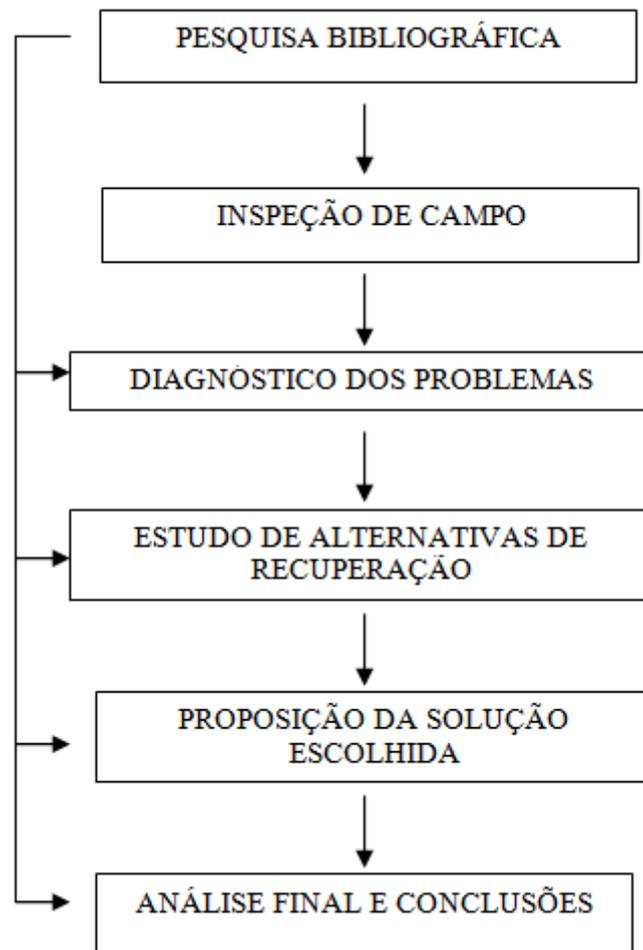


Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa

2.6.1 Pesquisa bibliográfica

O trabalho começou com o desenvolvimento da pesquisa bibliográfica visando conhecer quais as principais técnicas que vem sendo utilizadas pelos engenheiros brasileiros e estrangeiros na avaliação da segurança de barragens existentes. Essa pesquisa também buscou a definição de uma série de conceitos fundamentais no estudo de barragens, assim como a familiarização com os principais tipos de problemas e causas de rupturas já registrados. Conhecer algumas medidas adotadas na correção de problemas em barragens também foi objetivo dessa etapa.

2.6.2 Inspeções de campo

Com as principais técnicas de inspeção devidamente estudadas, foram feitas visitas técnicas às barragens em estudo. Toda a estrutura das barragens foi vistoriada e fotografada, assim como seus arredores, visando identificar problemas. Reunindo as fotografias e anotações de campo, um relatório foi criado para cada barragem vistoriada.

2.6.3 Diagnóstico dos problemas

Em posse dos relatórios das inspeções de campo, foi feito o diagnóstico dos defeitos encontrados em cada barragem. As fotografias tiradas na etapa de inspeção foram fundamentais para esta etapa do trabalho.

2.6.4 Estudo de alternativas de recuperação

Após a realização do diagnóstico, alternativas possíveis de recuperação foram analisadas. A análise levou em conta a viabilidade técnica e econômica.

2.6.5 Proposição da solução escolhida

Dentre as alternativas levantadas na etapa anterior, foi escolhida e apresentada a que demonstrar-se mais eficiente.

2.6.6 Análise final e conclusões

Por fim, foi feita uma análise final, dando um panorama geral da situação de segurança de cada barragem analisada e resumindo as soluções indicadas.

3 BARRAGENS: HISTÓRICO E ACIDENTES

Desde os primórdios da civilização, a água sempre foi um bem fundamental e preocupações em como disponibilizar este bem para o consumo humano sempre estiveram presentes na sociedade. Neste capítulo será apresentado um breve histórico das barragens já construídas pela humanidade. Além disso, serão citados alguns dos acidentes que se tem registro com essas estruturas.

3.1 HISTÓRICO

As primeiras obras hidráulicas provavelmente foram executadas antes que o homem fosse homem, *Homo Sapiens*. Tais quais os castores e outros seres construtores, o homem primitivo já se envolvia com obras hidráulicas. Mas eram oriundas mais de uma inteligência instintiva, do que fruto de reflexão. Muitos conceitos errôneos e a falta de transmissão do conhecimento, dentre outros, foram fatores que limitaram a evolução científica da hidráulica durante todo período, desde a Antiguidade até o Renascimento. É claro que vários outros fatores histórico-tecnológicos reforçaram esta limitação (PEREIRA, 1994 apud SILVA; PIRES 2006).

Segundo Costa e Lança (2001), as primeiras barragens surgiram da necessidade de armazenar as águas das chuvas de modo a poder utilizá-las durante a época de seca. Esses autores também citam registros de barragens antigas. Segundo eles, a primeira de que se tem registro foi construída na Caldeia, no rio Tigre. Outra barragem muito antiga foi construída no rio Nilo, próxima de Mênfis. Na Índia é incontável a quantidade de barragens. Quando os ingleses ocuparam a Índia encontraram, só no estado de Madrasta, milhares de barragens de pequeno porte, todas destinadas à irrigação. Uma delas, em Ponniary, inundava 20.000 ha. Na ilha de Ceilão, quando os portugueses lá desembarcaram, encontraram mais de 700 barragens. Os árabes na Península Ibérica construíram centenas de barragens para guardar água para irrigação, hoje todas completamente assoreadas.

Em suma, onde há civilização existem também barragens e demais obras hidráulicas para o bom aproveitamento da água. Problemas começam a surgir quando a manutenção destas estruturas é mal executada ou inexistente. Em média, ocorrem dez rompimentos significativos

de barragens no mundo a cada década, adicionando-se, ainda, os quase-rompimentos. No século XX, houve 200 casos notáveis de falhas em reservatórios ao redor do mundo e mais de 250.000 pessoas perderam suas vidas em desastres deste tipo (MCCULLY, 2001 apud ZUFFO, 2005, p. 2). No próximo item segue uma descrição de alguns acidentes.

3.2 PRINCIPAIS REGISTROS DE ACIDENTES

Mcculy (2001 apud ZUFFO, 2005, p. 53) constata que o maior desastre mundial relacionado com ruptura de barragens ocorreu na província de Henan, na China, em agosto de 1975. Muito embora as autoridades chinesas conseguiram abafar o caso por quase duas décadas, há indícios de que cerca de 230.000 pessoas tenham perdido suas vidas nesta catástrofe. As barragens de Banqiao e Shimantan foram construídas na bacia do rio Huai, um rio tributário do Yangtze, em meados da década de 50.

Segundo a narrativa do autor, em 5 de agosto, o reservatório Banqiao estava com sua capacidade máxima. As comportas de descarga estavam abertas, porém constatou-se que elas estavam parcialmente bloqueadas por sedimentos. No dia seguinte o nível do reservatório subiu dois metros acima da sua capacidade considerada segura. Na noite de 7 de agosto, a barragem de Banqiao cedeu e 500 milhões de metros cúbicos de água começaram a invadir vales e planícies a jusante, com uma velocidade de 50 quilômetros por hora. Vilas e pequenas cidades inteiras desapareceram em instantes. A pequena barragem de Shimantan entrou em colapso pouco tempo depois e acredita-se que, ao todo, 62 barragens romperam em consequência do desastre. Estima-se que 85.000 pessoas morreram em consequência da onda de cheia acarretada pelo rompimento das barragens e outras 145.000 morreram em consequência de epidemias e fome que assolaram a região nas semanas subsequentes ao desastre.

Acidentes com barragens não ocorrem apenas em países considerados sub-densenvolvidos. O Departamento de Ecologia do Estado de Washington-EUA cita alguns dos acidentes ocorridos no país (UNITED STATES OF AMERICA, 2009a). Os exemplos a seguir trazem uma breve descrição da forma como a ruptura ocorreu.

Seed (1983, p. 922) relata que o maior acidente com barragens da história dos Estados Unidos foi a enchente de Johnstown. O desastre foi recorrência do colapso da **Barragem South Fork**, por galgamento, em 1889. Mais de 2200 que moravam a jusante da barragem perderam suas vidas no acidente.

No ano de 1979, um acidente com grandes perdas econômicas ocorreu na **Barragem de Teton**. A obra, uma grande barragem de terra para armazenamento de água, sofreu uma ruptura por erosão (*piping*) na fundação na região de uma das ombreiras. A ruptura foi rápida e desde a primeira observação de problemas até o colapso total do barramento foram cerca de 5 horas. O problema foi identificado como um gradiente hidráulico excessivo na fundação junto de uma trincheira de vedação de concreto e o solo siltoso erodível que foi utilizado como aterro. A figura 2 apresenta uma fotografia tirada no momento da ruptura.



Figura 2: imagem da Barragem de Teton, no instante da ruptura
(UNITED STATES OF AMERICA, 2009b)

A **Barragem de armazenamento de água Chinook** colapsou por galgamento durante uma cheia em 1989. O vertedouro de concreto havia sido modificado para aumentar a capacidade de armazenamento do reservatório, reduzindo em 70% a capacidade de descarga da estrutura original.

O **Reservatório Seminary Hill** entrou em colapso em outubro de 1991 devido a um grande deslizamento de terra no corpo de aterro. Em menos de 3 minutos, 15.400 m³ de água foram liberados, inundando a área residencial a jusante.

A **Barragem de resíduos de Iowa Beef** colapsou em janeiro de 1993, quando água fruto do derretimento de neve na área adjacente elevou o nível do reservatório, que beirou a crista da barragem. Os efluentes entraram através de buracos de animais localizados próximos da crista, dando início a um processo erosivo fatal. Mais de 8 m³ de efluentes foram liberados e atingiram uma linha férrea localizada a jusante, fazendo com que um trem descarrilasse. O efluente acabou retido em outra barragem próxima ao Rio Columbia, evitando por pouco um desastre ambiental.

Na **Barragem CSC Orchards**, a ruptura ocorreu em julho de 1995 devido a *piping* no material do talude ao longo do conduto vertedouro de soleira. O reservatório era parcialmente coberto por uma lona de PVC. Entretanto, infiltrações passaram por baixo da lona, dando início ao processo erosivo.

Em dezembro de 1996, um buraco de 7 metros de diâmetro apareceu na crista da **Barragem Olufson**. Uma seção do conduto vertedouro de soleira entrou em colapso no interior da soleira, fazendo com que o material do corpo de aterro fosse sugado pelo buraco.

Segundo Carbajo (2005), a **Barragem de Camará**, localizada na cidade de Alagoa Grande/PB, rompeu em 2004 por erosão interna regressiva (*piping*). O autor afirma que a barragem havia sido construída com sua ombreira esquerda apoiada em fundações de rocha alterada, por onde o processo erosivo teve início.

4 SEGURANÇA DE BARRAGENS

Ao projetar uma barragem segura, após a definição do local da obra, o engenheiro responsável deve decidir o tipo de barragem que será construída. Hallmark (1978, p. 12) afirma que as barragens são classificadas de acordo com os materiais de que são executadas. Barragens construídas de concreto se classificam como: de gravidade, de arco, de contraforte ou combinações destes tipos. Barragens de terra são do tipo de gravidade e se constroem com solo ou rocha, tomando cuidado especial com os vertedouros e com o controle das infiltrações. Uma breve descrição dos tipos básicos de barragens será tema deste capítulo. Além disso, serão apresentados conceitos de segurança e problemas usuais encontrados nesse tipo de obra.

Apresentando uma visão geral sobre os principais tipos de barragens, Hallmark (1976) afirma que as **barragens de gravidade de concreto** dependem do peso próprio para sua estabilidade estrutural. Elas podem ser curvas ou retas, transmitindo a carga da água, através do corpo da barragem, ao solo. Geralmente, esse tipo de barragem tem a espessura da base igual a 0,7 a 0,9 de sua altura. A rocha sólida é o apoio mais indicado para este tipo de obra. Porém, muitas barragens pequenas de concreto foram construídas sobre solos permeáveis e menos resistentes e apresentaram comportamento satisfatório. O *Bureau of Reclamation*¹ (UNITED STATES OF AMERICA, 1960, p. 66) salienta que barragens de gravidade se adaptam bem a locais com fundações em rocha. Porém, não se descarta o uso deste tipo de estrutura em locais com solos aluvionares, desde que sejam construídas com pequenas alturas.

Segundo Hallmark (1976, p. 12) as **barragens de arco** se adaptam bem para serem utilizadas em fendas estreitas com forma de V ou U. As paredes das fendas devem ser de rocha suficientemente resistente para suportar as cargas que a ela serão transmitidas pelo efeito do arco. Os tramos dos arcos suportam a maior parte das cargas. Em geral a relação da largura da coroa da barragem com sua altura deve ser menor do que cinco. Quase sempre, a espessura da base varia entre 0,1 a 0,3 da altura de água armazenada. Pode ser projetado um vertedouro de excesso na coroa de uma barragem de arco.

¹ Estabelecido em 1902, o Bureau of Reclamation é uma instituição governamental responsável pela construção de barragens, hidroelétricas e canais em 17 estados noete-americanos.

O autor ainda afirma que as **barragens de contraforte** se adaptam bem para os mais variados locais. Nos vertedouros de excesso são utilizadas lajes de recobrimento e proteção semelhantes às utilizadas nos vertedouros das barragens de gravidade. Controlam a vazão comportas deslizantes inclinadas ou comportas pequenas para baixas vazões. As cargas da água são transmitidas ao solo através de dois sistemas de suporte. Lajes sem nervuras, arcos ou cúpulas suportam a carga direta da água. Na maior parte das barragens de contraforte se usa reforço de aço para suportar as forças de tensão provenientes das lajes e dos contrafortes de apoio.

Numa outra abordagem, *United States of America* (1960, p. 63) sugere uma classificação de acordo com o uso para o qual a barragem é destinada. Três principais categorias são citadas:

- a) armazenamento;
- b) desvio;
- c) controle de cheias.

Barragens de armazenamento são construídas para fornecerem água em períodos em que ela é escassa. Esses períodos podem ser sazonais, anuais ou ainda maiores. Inúmeras pequenas barragens acumulam o excesso de água da primavera para utilizá-la durante a estação seca do verão, no caso de regiões com chuvas abundantes no período da primavera. Essas barragens podem ser subclassificadas de acordo com o propósito do armazenamento: irrigação, geração de energia, criação de açudes para peixes e consumo humano são exemplos de usos comuns (UNITED STATES OF AMERICA, 1960 p. 66).

Barragens de desvio são geralmente construídas a fim de direcionar a água para canais que a levem a seu destino específico. Elas servem usualmente para irrigação e reserva de água para atividade industrial (UNITED STATES OF AMERICA, 1960 p. 66).

Barragens de controle de cheias têm a função de retardarem e minimizarem ondas de cheias provindas de fortes chuvas repentinas. Elas armazenam a água por um determinado período de tempo e a descarregam em quantidades as quais o canal ou rio a jusante é capaz de transportar sem que haja destruição (UNITED STATES OF AMERICA, 1960 p. 66).

Independentemente do tipo de barragem escolhido, requisitos mínimos de segurança devem ser obedecidos. Esses requisitos são apresentados na forma de conceitos no próximo item.

4.1 CONCEITOS DE SEGURANÇA

Muitas são as definições de barragem segura. Em 2002, o Ministério de Integração Nacional, por meio da Secretaria de Infraestrutura Hídrica publica o **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. A publicação tem por objetivo estabelecer parâmetros e um roteiro básico para orientar os procedimentos de segurança a serem adotados em novas barragens, quaisquer que sejam seus proprietários e manter as já construídas em um estado de segurança compatível com seu interesse social e desenvolvimento. O Manual define segurança como sendo a capacidade da barragem para satisfazer as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes e acidentes que se referem a aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais (BRASIL, 2002, p.32).

Guerra (1996, p. 39-40) define a segurança de barragens como sendo sua capacidade máxima de resistir à variação das características operacionais e funcionais, oferecendo determinado grau de confiabilidade, o qual projeta a durabilidade do empreendimento segundo parâmetros técnicos, físicos e econômicos. Relacionando confiabilidade com custos de implantação, o autor expõe as seguintes alternativas-limite:

- a) uma barragem tecnicamente muito segura equivale a um evento pouco econômico;
- b) por outro lado, uma barragem cuja construção pode ser considerada como cara não reflete, necessariamente, em um empreendimento seguro ou confiável.

Como barragens são estruturas expostas continuamente às ações intempéricas e de demais ações da natureza, Zuffo (2005, p. 11) afirma que segurança de uma barragem pode ser afetada por fenômenos naturais como enchentes, deslizamentos, terremotos e deterioração do corpo da barragem e da fundação. Com o passar do tempo, a estrutura da barragem pode se deteriorar devido à idade e, em alguns casos, maiores pressões internas e vazamentos podem se desenvolver. Geralmente, esses processos são lentos e não são prontamente percebidos por meio de um exame de rotina. O monitoramento contínuo do desempenho da barragem irá assegurar a detecção de qualquer não conformidade seja no projeto ou qualquer problema dentro da barragem que possa causar falha.

Visando garantir a segurança das estruturas, Guerra (1996, p. 43-44) define como fundamental a auscultação e o monitoramento das barragens. O autor define auscultar e monitorar como o conjunto de atividades de observação, cálculo, análise e diagnóstico das

condições de existência, funcionamento e desempenho de barragens e estruturas hidráulicas anexas, que visam acompanhar o respectivo funcionamento, desde a fase de projeto até o fim da vida útil do empreendimento. Para isso, é necessário manter equipes altamente especializadas e capazes de interpretar fatos para presumir fenômenos, a partir de instrumentação e inspeções periódicas, o que só ocorre com o tempo e após muito treinamento.

Para Zuffo (2005, p. 11), o propósito da avaliação de segurança é determinar o *status* da barragem no que diz respeito a sua estrutura e segurança operacional. A avaliação deve identificar problemas e recomendar tanto medidas remediadoras, restrições operacionais ou modificações, ou análises de estudos para a solução dos problemas.

A maneira de identificar problemas e fragilidades em potencial, durante uma avaliação é complexa (UNITED STATES OF AMERICA 1987, p. 19). Os registros devem ser pesquisados e a barragem deve ser vistoriada em razão de:

- a) o desempenho não estar de acordo com as especificações de projeto;
- b) evidência de defeitos na construção;
- c) aumento na percolação ou vazamento;
- d) perigos geológicos aparentes;
- e) mau funcionamento dos equipamentos mecânicos e elétricos;
- f) indícios progressivos de deterioração ou enfraquecimento da estrutura e/ou fundação.

Se referindo especificamente a barragens de terra ou enrocamentos, o *Bureau of Reclamation* (UNITED STATES OF AMERICA 1987, p. 63) afirma que a estrutura deve ser cuidadosamente vistoriada, em busca de quaisquer evidências de deslocamento, rachaduras, sumidouros, nascentes, pontos molhados, erosão superficial, buracos de animais, vegetação, etc. Quaisquer destas condições, se não corrigidas, podem levar à falha da barragem.

Ainda dentro do conceito de segurança de barragens, Guerra (1996, p. 64) faz uma diferenciação entre ruptura e acidentes. Ruptura, segundo o autor, é o rompimento total ou parcial da estrutura, resultando na necessidade de reconstrução, paralisação da operação, interrupção do retorno do investimento e, geralmente, com o esvaziamento total do reservatório. Entende-se por acidentes os problemas, geralmente localizados, que causam

comprometimento parcial, afetando com maior ou menor gravidade a integridade física do barramento e o fator de segurança. No próximo item são apresentados os principais problemas que podem vir a comprometer a segurança de uma barragem.

4.2 PROBLEMAS MAIS COMUNS

Segundo o Departamento de Ecologia do Estado de Washington, as causas mais frequentes de rupturas de barragens nos Estados Unidos são (UNITED STATES OF AMERICA, 2009a):

- a) galgamento – 34% das rupturas,
 - projeto inadequado do vertedouros;
 - entulhos bloqueando o vertedouro;
 - recalque da crista da barragem;
- b) defeitos nas fundações – 30% das rupturas,
 - recalques diferenciais;
 - deslizamentos e instabilidade de taludes;
 - altas sub-pressões;
- c) *piping* e infiltrações – 20% das rupturas,
 - erosão no interior da barragem causada por infiltrações – *piping*;
 - infiltrações e erosão ao longo de estruturas hidráulicas como condutos;
 - fissuras na barragem;
- d) condutos e válvulas – 10% das rupturas: erosão interna no material de aterro entrando nos condutos por fissuras ou juntas.

Tais rupturas podem ser relacionadas às suas respectivas causas e associadas aos fatores que a levaram a ocorrer. O quadro 1 relaciona as categorias e causas de falhas.

Falha	Decorrem ou estão associados	Causa
Deterioração da fundação	qualidade e/ou tratamento das fundações apresentam rachaduras visíveis afundamento localizado retirada de materiais	remoção de matérias sólidas e solúveis retirada de rochas erosão
Instabilidade da fundação	materiais solúveis xistos argilosos ou argilas dispersivas que reagem com água	liquefação deslizamentos afundamentos deslocamento de falhas
Vertedouros defeituosos	cheia de projeto adequação do vertedouro histórico de operação do vertedouro e do descarregador obstruções condição a jusante crescimento da vegetação fissuras e/ou rachaduras nas estruturas de concreto equipamento em má condição de uso	obstruções revestimentos fraturados evidência de sobrecarga da capacidade disponível comportas e guinchos defeituosos
Restituições defeituosas		obstruções acumulação de detritos comportas e guinchos defeituosos posição e localização da comporta
Deterioração do concreto	materiais defeituosos; agregados reativos agregados de baixa resistência	reação agregado-álcali congelamento-degelo lixiviação

continua

continuação

Falha	Decorrem ou estão associados	Causa
Defeitos de barragens de concreto		alta subpressão distribuição imprevista de subpressão deslocamentos e deflexões diferenciais sobrecarga
Defeitos de barragens de terra e/ou de enrocamentos	estabilidade e sanidade das rochas do enrocamento fraturamento hidráulico rachaduras no solo solos com baixa densidade	potencial de liquefação instabilidade do talude vazamento excessivo remoção dos materiais sólidos e solúveis erosão do talude
Defeitos das margens do reservatório	erosões deslocamento de falhas rupturas	permeabilidade instabilidade fragilidades inerentes das barreiras naturais

Quadro 1: categorias e causas de falhas (adaptado de BRASIL, 2002, p. 60)

Narayana et al. (1984 apud ZUFFO, 2005 p. 11) afirmam que os registros de falhas em barragens encontrados na Índia indicam que a maioria aconteceu em barragens de terra, seguidas pelas de enrocamentos, arcos múltiplos e arco. Os tipos de problemas encontrados na avaliação de segurança de barragens podem ser enquadrados nas seguintes categorias:

- a) capacidade inadequada do vertedouro;
- b) estabilidade estrutural das barragens não satisfaz os critérios de uma determinada época;
- c) infiltração excessiva nas barragens de alvenaria;
- d) perigo nas barragens de concreto na forma de rachaduras etc;
- e) desgaste excessivo do vertedouro, à jusante, especialmente nas bacias de dissipação.

Os problemas acima relacionados frequentemente se inter-relacionam em uma maneira mais complexa. Por exemplo, percolações não controladas podem enfraquecer o solo e levarem a

falhas estruturais. Da mesma forma, falhas estruturais podem criar caminhos preferenciais para erosão, resultando em um colapso por *piping*.

Defeitos menores como fissuras no corpo da barragem podem ser o primeiro sinal visual de problemas maiores capazes de causar o colapso da estrutura. A gravidade de qualquer defeito deve ser avaliada por alguém especializado com o projeto e construção de barragens. Um engenheiro qualificado pode recomendar medidas apropriadas de recuperação (UNITED STATES OF AMERICA, 2003 p. 2).

Segundo Veltrop (1991 apud ZUFFO, 2005), a idade de uma barragem é um dos fatores primordiais para a determinação das condições de segurança. Deterioração da estrutura pode ser causada pelos efeitos do tempo nos materiais de construção, infiltrações no concreto, reação de agregados alcalinos nas estruturas de concreto e ainda corrosão das partes metálicas da estrutura.

Fazendo uma síntese dos problemas, McCully (2001 apud ZUFFO, 2005 p. 2) afirma que as falhas mais comuns que podem ocorrer em barragens são devidas a: enchentes extremas, incertezas geológicas no local escolhido para implantação, perdas de água através das fundações e aterros, defeitos de construção e projeto e sismicidade. Nos próximos itens, os problemas mais comuns serão detalhados.

4.2.1 *Piping* e infiltrações

O *Bureau of Reclamation* (UNITED STATES OF AMÉRICA, 1960, p. 489) traz uma definição sucinta de *piping* como sendo o movimento de partículas de solo pela água de percolação levando à abertura de dutos. Ou seja, a água que infiltra começa a carregar consigo o material constituinte do aterro da barragem.

Existem forças de infiltração em todos os movimentos gravitacionais da água através dos solos. Seus efeitos na estabilidade do volume de solo e em qualquer estrutura assente sobre ele necessitam ser determinados. Para impedir as falhas decorrentes de infiltrações, a pressão de água deve ser dissipada quase que por completo pelas forças de atrito ao longo da base da barragem (HALLMARK, 1978, p. 28). Segundo o autor, a magnitude e a distribuição das forças de infiltração podem ser determinadas através de uma análise por redes de fluxo. Uma

rede de fluxo é uma representação gráfica dos caminhos percorridos pela água que infiltra e das linhas equipotenciais (pressão mais elevação sobre um plano de referência).

Segundo o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (BRASIL, 2002, p. 88) quando a erosão começa a remover material no ponto de saída, ela progride para a direção do reservatório, dando origem ao *piping*. Tem-se como indicação de percolação áreas molhadas com excesso de vegetação, facilmente identificáveis em uma inspeção de vistoria. O contato do maciço com a ombreira é especialmente favorável à percolação, porque o aterro próximo ao maciço às vezes é difícil de ser compactado.

A ocorrência de *piping* é mais frequente em barragens de terra, pois em todas as estruturas deste tipo há a passagem de água pelo interior ou por baixo do aterro (percolação), pois materiais terrosos são porosos. Os níveis de percolação aumentam quando o nível d'água do reservatório é elevado devido ao aumento da pressão d'água a montante. A velocidade e quantidade das infiltrações devem ser controladas, caso contrário podem progressivamente erodir solo dos taludes ou fundações e resultar no rápido colapso da barragem. A erosão do solo começa no lado a jusante da barragem, seja no aterro ou nas fundações, e progride em direção ao reservatório, desenvolvendo eventualmente um duto (ou *pipe*, na língua inglesa). Este fenômeno, conhecido como *piping*, pode ser reconhecido por (UNITED STATES OF AMERICA, 2003):

- a) elevadas taxas de percolações;
- b) saída de água lamacenta a jusante;
- c) buracos na barragem ou proximidades;
- d) redemoinhos no reservatório, nos casos mais graves.

Quando chegar a ser observado um redemoinho na superfície do reservatório, a ruptura da barragem provavelmente ocorrerá em questão de minutos. Assim como em casos de galgamento, fenômenos de *piping* em estágios avançados são praticamente impossíveis de serem controlados, tornando o colapso da estrutura muito provável. Percolações podem causar a instabilidade dos taludes, seja criando altas pressões nos poros do solo, seja saturando o talude. Pressões devidas à percolação no corpo da barragem são difíceis de serem determinadas sem instrumentação apropriada. Taludes saturados e que apresentem um aspecto fatiado podem indicar sinais de excessiva pressão proveniente de percolações (UNITED STATES OF AMERICA, 2003).

Gould e Lacy (1993, p. 245) citam três principais fontes de problemas que podem levar a ocorrência de *piping*:

- a) defeitos de projeto;
- b) defeitos no processo construtivo
- c) geologia desfavorável não levada em consideração.

Estas causas, assim como outras, estão reunidas no quadro 2 e divididas entre cinco locais comuns de ocorrência de infiltrações.

LOCAL DA INFILTRAÇÃO	CONDIÇÕES PROVÁVEIS QUE LEVARAM AO PROBLEMA
Corpo da barragem e contato com a fundação	Barragem antiga; núcleo ausente ou mal controlado; rachaduras devidas a deslocamentos da estrutura; contato entre ombreira e fundação mal controlado durante a construção. Disposição imprópria de filtros ou ausência de drenagem.
Fundações	Camadas de fundação constituídas de materiais altamente permeáveis. Ausência de cobertura compactada a montante. Reservatório diretamente em contato com camadas permeáveis.
Ombreiras e lados do reservatório	Ausência de compactação nos lados do reservatório. Geologia ao redor do reservatório oferece caminhos preferenciais de fluxo a partir do reservatório.
Buracos ou dutos erodidos	Construção removeu capa de solo residual que cobria materiais solúveis. Gesso intercalado em camadas sedimentares. Investigações prévias não identificaram problemas de solubilidade.
Estruturas de concreto ou alvenaria; Descarregadores	Má compactação do solo no contato com a estrutura. Ausência de filtros drenantes sob vertedouros ou muros. Má construção das juntas de concreto ou alvenaria; frequentes fissuras de retração.

Quadro 2: locais de infiltrações e prováveis causas
(adaptado de GOULD; LACY, 1993, p. 246)

O **Guia Básico de Segurança de Barragens**, lançado pelo Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, afirma que o carreamento das partículas de solo pelas forças de percolação deve ser evitado por filtros adequados. A percolação deve ser monitorada e verificada quanto à presença de partículas em suspensão (BRASIL, 1999, p. 76).

Segundo o Guia, os filtros e drenos internos são particularmente importantes onde se considerar possível a ocorrência de fissuramento na barragem, devido a recalques diferenciais, arqueamento ou fraturamento hidráulico. Fissuras podem causar fluxos de percolação concentrados que podem conduzir a ruptura da barragem por erosão interna (*piping*), a menos que estes sejam interceptados e controlados por meio de filtros e drenos.

Outras recomendações do Guia ainda devem ser observadas. Os gradientes hidráulicos na barragem, nas fundações, nas ombreiras e ao longo de condutos, devem ser baixos o suficiente para prevenir erosão regressiva. A capacidade de vazão dos filtros e drenos não deve ser excedida. Altas pressões neutras podem indicar que a drenagem é insuficiente ou que a permeabilidade dos drenos é excessivamente baixa. A diminuição da percolação proveniente dos drenos pode indicar a colmatagem física, química ou bacteriológica. Para ilustrar problemas por *piping*, a figura 3 demonstra infiltrações a montante que levaram a formação de dutos preferenciais.

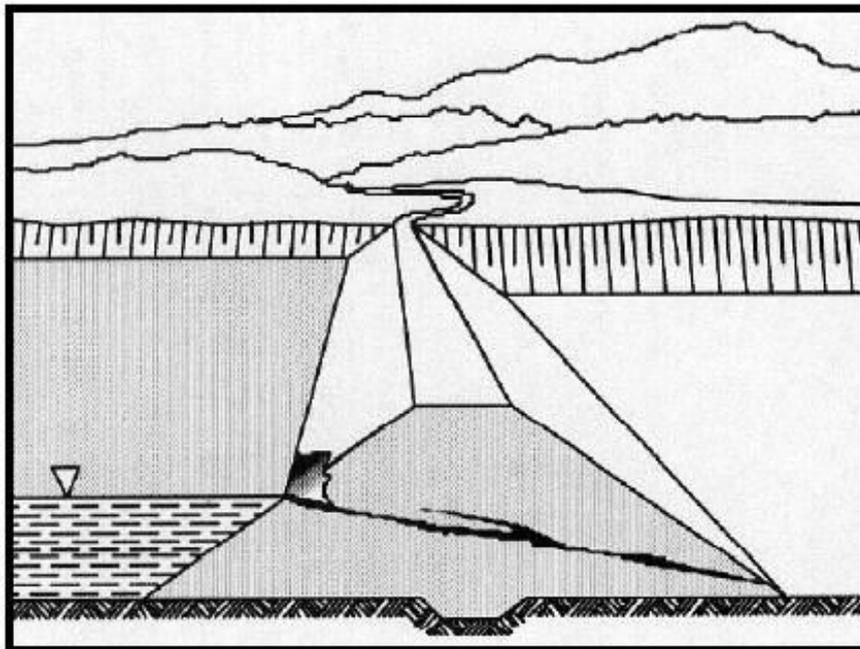


Figura 3: infiltração a montante (UNITED STATES OF AMERICA, 1998, p. 17)

4.2.2 Rupturas estruturais e de fundação

Segundo Bonazzi (1991 apud ZUFFO, 2005, p. 24) as fundações devem ser examinadas sob vários pontos de vista como:

- a) vedação: trabalhos de vedação especial justificado simplesmente pelo volume de água poderão ser necessários se o vazamento for grande;
- b) estabilidade: a instabilidade da fundação se manifesta na forma de deslizamentos ou tubagem. A solução é sempre otimizar a capacidade dos filtros e geralmente envolve um ou ambos procedimentos: reforçar ou mesmo refazer o rejunte das paredes e desentupir e/ou limpar os drenos ou instalar drenos novos.

O autor ainda explica que fundações de barragens em arco podem dar margem a problemas de estabilidade quando o concreto continua a contrair-se ao longo do tempo, após a vedação dos blocos. Vedação para consolidação e mesmo reforço na estrutura básica ou escoramento são também soluções possíveis.

Falhas estruturais podem ocorrer tanto no corpo da barragem, como em suas estruturas auxiliares. Falhas nos vertedouros, drenos, ou outras estruturas auxiliares podem levar a falhas na estrutura principal. Fissuras provenientes de deslocamentos são sinais comuns de falhas no maciço. Fissuras maiores na barragem, grandes deslocamentos ou deslizamentos requerem ações emergenciais para garantir a segurança, especialmente se esses problemas aparecerem de forma repentina. Nessas situações, o nível do reservatório deve ser rebaixado, os responsáveis devem ser contatados e ajuda profissional deve ser procurada (UNITED STATES OF AMERICA, 2003, p. 2). A figura 4 demonstra deslizamento ou colapso no paramento de jusante.

A resistência e a rigidez da rocha deverão ser suficientes para prover a estabilidade adequada sob carregamentos de projeto para a barragem, estruturas associadas, ombreiras e fundação, e as deformações devem ser limitadas a valores aceitáveis (BRASIL, 1999, p. 58-59). Uma quantidade suficiente de informações geológico/geotécnicas deverão estar disponíveis, ou deverão ser obtidas, para se definir o modelo da fundação, adequado à caracterização de quaisquer discontinuidades e para determinar todas as modalidades de rupturas possíveis. Uma avaliação das condições da rocha de fundação deve cobrir a qualidade da rocha e a sua capacidade de suporte. As condições podem ser avaliadas a partir de dados de ensaios *in situ*, testemunhos de sondagens, inspeção visual e dados da instrumentação instalada.

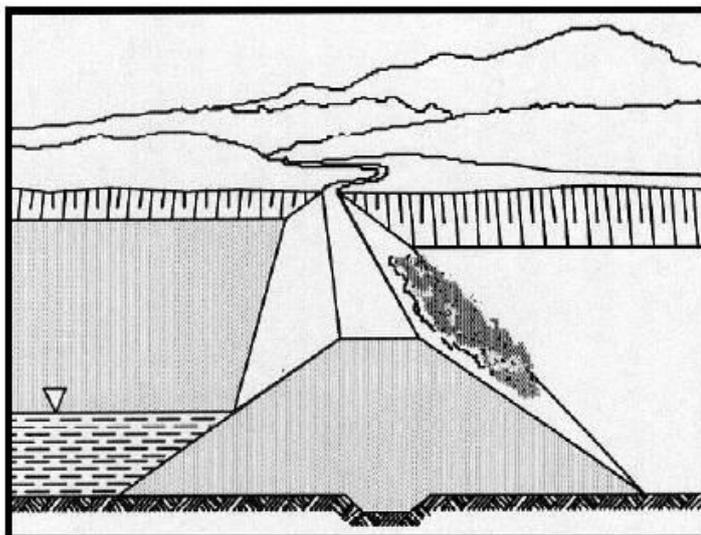


Figura 4: deslizamento ou colapso no paramento de jusante
(UNITED STATES OF AMERICA, 1998, p. 17)

Brasil (1999) ainda acrescenta que, diretamente abaixo da barragem, a principal consideração deve ser a natureza do contato rocha/barragem, sua forma e as características da fundação. Onde as fundações estiverem expostas, ou em contato com o maciço de terra, a ênfase deverá ser na impermeabilidade e nas variações em função do tempo. Deverá ser determinado se detalhes geológicos poderiam conduzir à deterioração do maciço rochoso. Deve-se determinar a necessidade de executar investigações e ensaios de campo. Todos os tratamentos corretivos subsuperficiais executados durante o período de construção da barragem devem ser identificados e avaliados para se determinar se eles permanecem eficientes e em condições estáveis. A estabilidade das fundações em rocha pode ser avaliada em termos dos coeficientes de segurança. Os valores do coeficiente de segurança estão indicados no quadro 3.

CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO	COEFICIENTE MÍNIMO DE SEGURANÇA	TALUDE
Percolação permanente com o reservatório na cota máxima normal	1,5	Jusante
Esvaziamento rápido	de 1,2 a 1,3	Montante
Termino da construção, antes do enchimento do reservatório	de 1,25 a 1,3	Montante e jusante

Quadro 3: coeficientes de segurança (BRASIL, 1999, p. 55)

4.2.3 Galgamento

Falhas por galgamento são resultantes da ação erosiva da água no aterro da barragem. A erosão pode ocorrer devido a fluxo descontrolado de água por cima do barramento, pela lateral ou nas regiões adjacentes. Barragens de terra não são projetadas para suportar fluxos excessivos e por isso são particularmente suscetíveis a erosão. Uma vez que a barragem entra em processo de galgamento, é quase impossível de pará-lo. Um talude bem recoberto por vegetação pode aguentar fluxos excessivos, desde que a água escoe de maneira bem distribuída, sem criar caminhos preferenciais. (UNITED STATES OF AMERICA, 2003, p. 2)

McLean e Hansen (1993, p. 188-189) afirmam que o galgamento pode causar sérias erosões, podendo levar ao colapso estrutural da barragem. O colapso dependerá de fatores como o volume, duração do fluxo, a natureza dos materiais do aterro e o grau de proteção oferecido. Os autores ainda afirmam que problemas de galgamento estão normalmente relacionados com a determinação da cheia máxima de projeto, assim como o projeto dos vertedouros e demais estruturas de descarga. O bloqueio por excesso de vegetação, entulhos ou deslizamentos pode obstruir o vertedouro, como mostra a figura 5.

O Guia Básico de Segurança de Barragens afirma que um vertedouro seguro, assim com canais de aproximação e descarga, devem apresentar as seguintes características ou detalhes (BRASIL, 1999):

- a) resistências adequadas à erosão e cavitação, bem como uma altura adequada dos muros laterais para a passagem segura da cheia afluyente de projeto;
- b) adequada dissipação de energia a fim de prevenir solapamentos e/ou erosões que poderiam por em risco o vertedouro ou a barragem, durante a cheia afluyente de projeto (CAP);
- c) capacidade para suportar a passagem de entulho flutuante durante a CAP, ou provisão de uma barreira efetiva contra entulhos, projetada para carregamento por CAP;
- d) confiabilidade nos mecanismos de abertura das comportas durante grandes cheias incluindo-se o fornecimento de energia, controle e comunicações. Deve existir processo alternativo para sua abertura;
- e) segurança adequada quanto a deslizamentos de terra, entulhos acumulados no canal de aproximação, rampas e canais de saída, que poderiam restringir sua capacidade de descarga;
- f) acesso assegurado sob quaisquer condições para o caso das comportas do vertedouro terem de ser operadas no local.

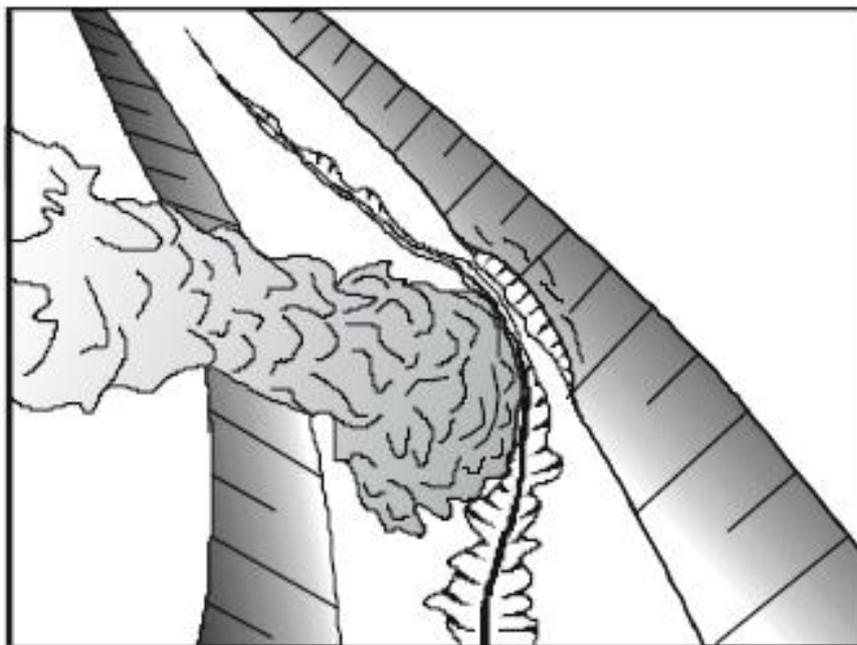


Figura 5: bloqueio no vertedouro
(UNITED STATES OF AMERICA, 1998, p. 21)

4.2.4 Outros problemas

Outros problemas, não tão graves quanto os acima citados, ainda podem ocorrer numa barragem. Tais problemas são citados e exemplificados nos próximos itens.

4.2.4.1 Fissuração

A barragem deve manter o reservatório em condições de segurança, em relação a qualquer fissuração que possa ser induzida por recalque ou fraturamento hidráulico. Uma inspeção completa deve ser executada para se identificar fissuras e suas causas. Análises, ou investigações adicionais, podem ser necessárias caso seja considerado possível o fissuramento do núcleo, por exemplo, caso tenha sido detectado um recalque diferencial (BRASIL, 1999, p. 56). Na figura 6 estão representados problemas de fissuras.

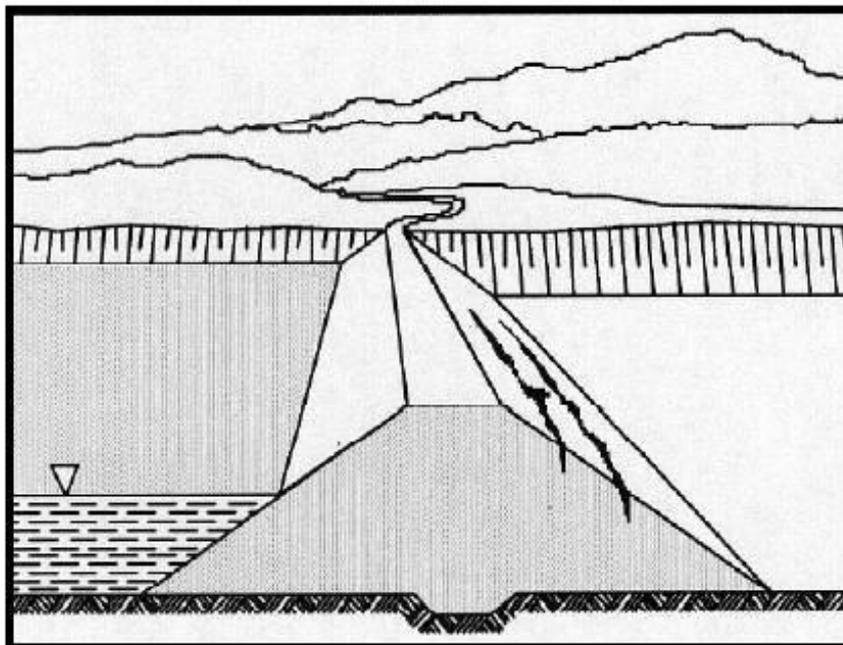


Figura 6: fissuras longitudinais no paramento de jusante
(UNITED STATES OF AMERICA, 1998, p. 17)

4.2.4.2 Erosão superficial

Segundo Brasil (1999), os taludes de montante da barragem e suas ombreiras, devem ser providos de proteção adequada para resguardá-los contra a erosão, inclusive devida à ondas. Quanto aos taludes de jusante, o guia afirma que devem ser protegidos contra a ação erosiva de escoamentos superficiais, eventuais surgências de percolações, do tráfego, de pessoas e de animais. Os canais de entrada e saída para vertedouros e condutos devem ser adequadamente protegidos contra erosão. A figura 7 demonstra processo erosivo no paramento de montante.

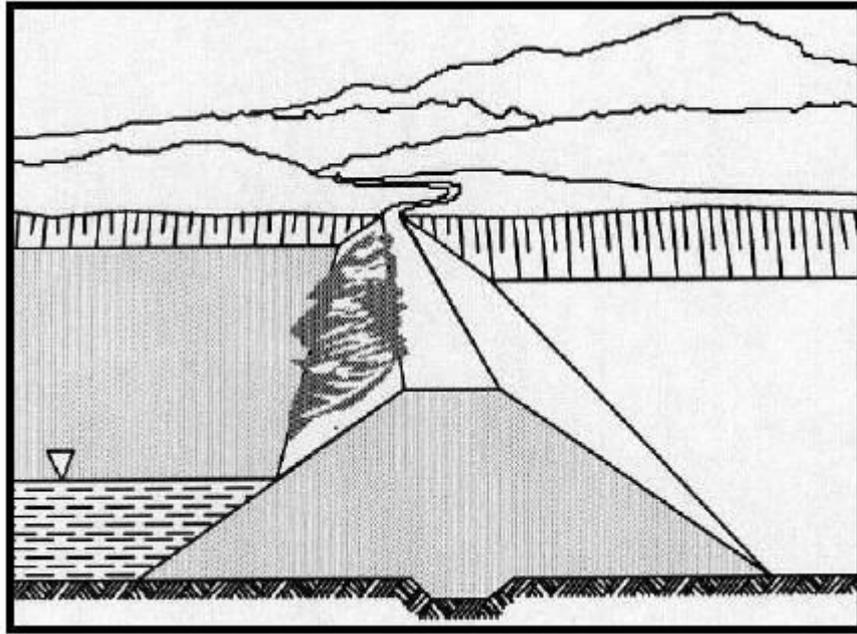


Figura 7: erosão no paramento de montante
(UNITED STATES OF AMERICA, 1998, p. 15)

4.3 TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO

Uma vez encontrados e diagnosticados os problemas de uma barragem, parte-se para a recuperação da estrutura. As medidas adotadas usualmente dependem do problema encontrado.

Findlay e Jones (1993, p. 544) citam maneiras para aumentar a estabilidade dos taludes quando o problema é a erosão dos mesmos:

- a) diminuir sua inclinação com o uso de camadas de pedras ou cascalho;
- b) compactar o aterro o que adensaria o material.

Como meios de adequar a barragem para grandes ondas de cheia, os autores citam com alternativas válidas a elevação da crista do reservatório, assim como o seu reforço com concreto rolado. A primeira alternativa aumentaria a capacidade de armazenamento, mas cuidados deveriam ser tomados com a resistência das fundações. Já a segunda, permitiria que o fluxo extravasasse o vertedouro, mas isso não se tornaria nocivo, pois a camada de cobrimento com concreto rolado tem a função de evitar a erosão.

Para reparar barragens com problemas de galgamento, McLean e Hansen (1993, p. 189) citam como medida comumente adotada a ampliação da barragem e de seu vertedouro, aumentando sua capacidade de armazenamento assim como sua capacidade de lidar e verter maiores cheias.

Visando controlar problemas de infiltrações, Findlay e Jones (1993, p. 545) recomendam a instalação de drenos e filtros na barragem. A *American Society of Civil Engineers*² (UNITED STATES OF AMERICA. 1975, p.106) recomenda a instalação de piezômetros para avaliar o excesso de poropressões e determinar níveis seguros de operação.

² Fundada em 1852, a *American Society of Civil Engineers* representa mais de 147.000 Engenheiros Civis no mundo inteiro.

5 RELATÓRIOS DE VISTORIA – ANÁLISE DOS PRINCIPAIS PROBLEMAS ENCONTRADOS

Após realizada parte da pesquisa bibliográfica, partiu-se para visitas de vistoria às barragens em estudo. Tais visitas têm como objetivo identificar e fotografar quaisquer anormalidades porventura encontradas na estrutura dos barramentos ou em suas periferias. Posteriormente, numa etapa de escritório, os registros fotográficos foram analisados e interpretados tendo suas possíveis causas identificadas e relatadas. O presente capítulo traz uma breve descrição de cada uma das barragens analisadas, assim como fotografias de problemas encontrados nas visitas de vistoria. As possíveis causas dos problemas são analisadas e descritas.

5.1 COMPLEXO DAL BÓ

As primeiras barragens analisadas foram as do complexo Dal Bó. O complexo Dal Bó, localizado nas coordenadas são $29^{\circ}08'20''$ S; $51^{\circ}09'27''$ O, consiste numa sequência de três barragens em série. São elas, ordenadas de montante para jusante: São Paulo, São Pedro e São Miguel. A figura 8 mostra uma representação esquemática do complexo Dal Bó. A figura 9 mostra a localização do complexo Dal Bó.

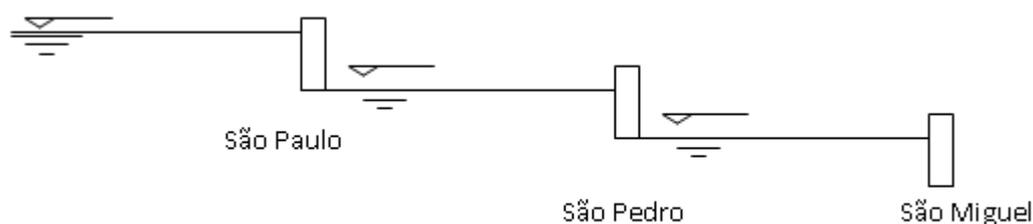


Figura 8: representação esquemática do complexo Dal Bó



Figura 9: Localização do complexo Dal Bó

O Complexo Dal Bó abastece atualmente cerca de 9 % da população de Caxias do Sul e foi construído em quatro etapas. Em 1928 foi construída a represa São Miguel, que teve sua altura aumentada em dois metros em 1937. A seguir, em 1945, a barragem São Pedro foi inaugurada, e em 1955 o complexo adquiriu a sua configuração atual com a construção da barragem São Paulo.

5.1.1 Barragem São Paulo

Localizada na Rua Atílio Andrezza, próximo ao Jardim Botânico Municipal de Caxias do Sul, a barragem São Paulo é uma estrutura com aproximadamente 70 m de comprimento, por 8 m de altura e largura variável. O corpo da barragem é constituído de material de aterro, revestido com alvenaria de blocos de pedra. O vertedouro é do tipo retangular de descarga livre com comprimento de 10,20 m e altura de 0,52 m. Há ainda um vertedouro auxiliar de 7,80 m de comprimento por 0,31 m de altura localizado na ombreira esquerda da barragem.

5.1.1.1 Galgamento e erosão junto aos muros

Problemas de erosão e galgamento são frutos da passagem de ondas de cheia provenientes de precipitações muito intensas. A vazão que passa pela barragem, durante tais chuvas, é superior à que o vertedouro tem a capacidade de liberar, o que faz com que a água escoe pelo topo da barragem, e não apenas pela calha do vertedouro. Dessa forma, locais onde não era esperado o fluxo de água acabam recebendo-o. Em tais locais o fluxo de água acaba carregando consigo partículas de solo, gerando erosão importante embora localizada, como observado na figura 10.

5.1.1.2 Vertedouro auxiliar tomado por vegetação

O bloqueio dos vertedouros por vegetação aquática (aguapés e gramíneas) pode ser citado como um dos causadores do problema de galgamento. Como vertedouros auxiliares são construídos em uma cota levemente superior à cota do vertedouro principal, eles só recebem fluxo d'água em situações de grandes vazões. A grande quantidade de vegetação aquática no local acaba obstruindo o vertedouro e reduzindo sua capacidade de vazão (figura 11). Tal fato sobrecarrega o vertedouro principal e é um dos problemas que tem que ser sanados.



Figura 10: São Paulo – erosão junto aos muros por galgamento sobre a barragem



Figura 11: São Paulo – aguapés e gramíneas bloqueando vertedouro auxiliar

5.1.1.3 Canal de fuga do vertedouro auxiliar não está definido

O canal que recebe as águas provenientes do vertedouro auxiliar não está preparado para tal fluxo de água. No local há apenas uma rampa com terreno natural (sem revestimento, figura 12). O fluxo de água acaba erodindo o solo, formando valetas e sulcos, apresentando depressões com diâmetros da ordem de 1 m.



Figura 12: São Paulo – canal de fuga mal definido e sem revestimento

5.1.1.4 Árvores em taludes íngremes

Não é desejável que se tenha vegetação de grande porte em taludes íngremes no corpo do barramento (figura 13). Neste caso, as árvores estão colocando em risco os muros de contenção do talude. Além disto, quando as árvores deste porte morrem ou são cortadas, o apodrecimento das raízes podem criar caminhos preferenciais para o fluxo de água.



Figura 13: São Paulo – árvores no talude da barragem

5.1.1.5 Grade de proteção do lago danificada

A grade de proteção do lago encontra-se danificada por vandalismo, comprometendo a segurança de visitantes (figura 14). No local foi feita uma tentativa de reparação da grade com o uso de arames. Contudo, tal medida não é satisfatória do ponto de vista de segurança.

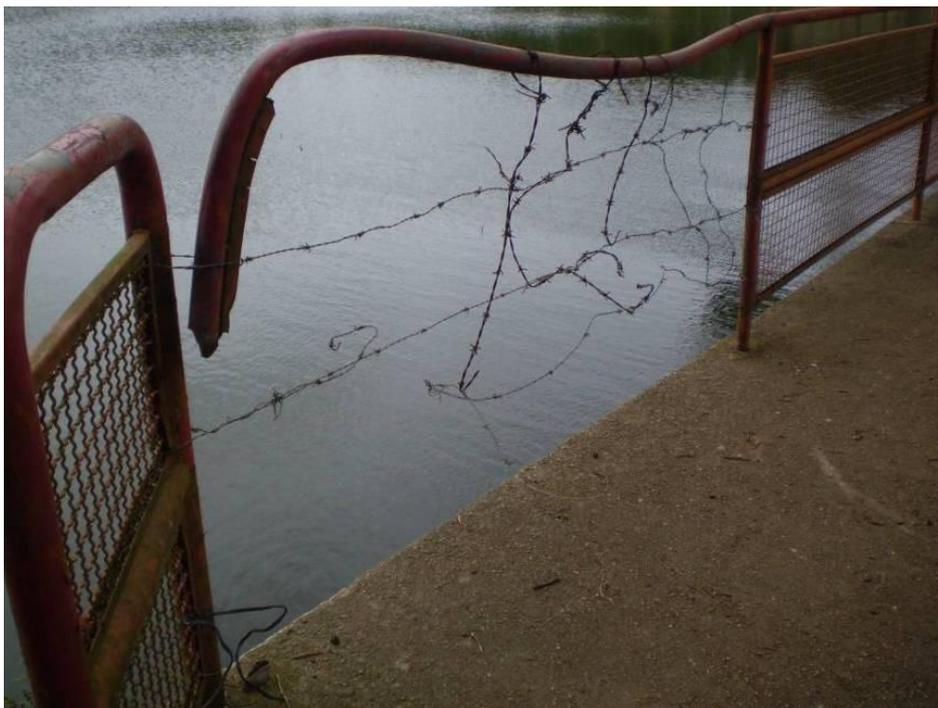


Figura 14: São Paulo – grade de proteção do lago da barragem danificada

5.1.2 Barragem São Pedro

A barragem São Pedro está localizada junto ao Complexo Esportivo do SESI, na Rua Cyro de Lavra Pinto. A estrutura é construída em alvenaria de pedra e tem um comprimento de aproximadamente 80 m. O vertedouro é do tipo canal retangular de descarga livre com 8 m de comprimento. Há ainda um vertedouro auxiliar em arco, com 11,00 m de largura e altura de 0,20 m, localizado na ombreira direita da barragem. A seguir são descritos os principais problemas observados na Barragem e seus arredores.

5.1.2.1 Falhas nos rejuntas

Foram encontradas falhas nos rejuntas, por onde verte uma quantidade pequena de água. Com o passar do tempo a argamassa que une os blocos de pedra pode se fragmentar, deixando buracos na estrutura (figura 15). A argamassa fragmentada fica frágil e pode levar ao afrouxamento e a movimentação dos blocos. Movimentações significativas podem fazer com que os blocos se desprendam durante extravazamentos.

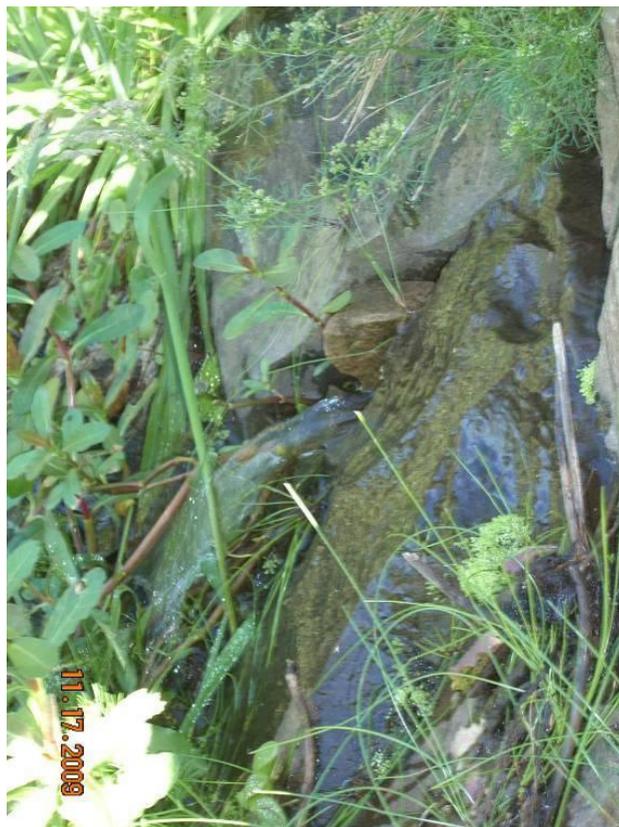


Figura 15: São Pedro – falha no rejunte, levando ao vazamento de água

5.1.2.2 Vertedouro bloqueado por aguapés

Há uma grande quantidade de aguapés, principalmente próximo ao vertedouro. A presença de tal vegetação bloqueia a estrutura e modifica o regime de escoamento, limitando a capacidade de descarga do vertedouro (figura 16). Durante chuvas intensas, é provável que a água ultrapasse os limites do vertedouro e vaza por sobre o corpo da barragem.

5.1.2.3 Vertedouro lateral danificado

O vertedouro auxiliar lateral encontra-se danificado, não tendo mais revestimento de fundo (figura 17). Grandes fluxos de água, ao passarem pelo vertedouro auxiliar, poderão erodir a região. A longo prazo, a estrutura pode ser muito danificada.



Figura 16: São Pedro – aguapés bloqueando o vertedouro



Figura 17: São Pedro – revestimento danificado do vertedouro lateral

5.1.3 Barragem São Miguel

Localizada junto ao Complexo Esportivo do SESI, na Rua Cyro de Lavra Pinto, a barragem é construída em alvenaria de pedra e corpo de aterro. A barragem apresenta desnível máximo de cerca de 10m, e foi construída em curva, formando um L. O comprimento total é de aproximadamente 140 m. Um vertedouro do tipo duplo orifício está localizado na margem esquerda da barragem, apresentando um canal de aproximação retangular com 2,60 m de largura e 8,00 m de comprimento. Durante chuvas intensas a placa metálica com os orifícios é movimentada verticalmente com auxílio de uma retro-escavadeira, aumentando

significativamente sua capacidade de vazão (fuga de água inferior). Há também um vertedouro retangular no canal principal do arroio com descida em degraus, com 11,90 m de largura e 0,50 m de altura que tem funcionado como vertedouro auxiliar. Os principais problemas identificados estão relatados nos próximos itens.

5.1.3.1 Falhas nos rejuntas

Há falhas em alguns rejuntas das fileiras da alvenaria de pedra superiores, por onde verte uma quantidade pequena de água (figura 18), de forma semelhante ao encontrado na barragem São Pedro.



Figura 18: São Miguel – falha no rejunte, causando vazamento

5.1.3.2 Áreas úmidas na periferia da barragem

A presença de áreas úmidas na periferia da barragem indica a existência de zonas de percolação (figura 19). A água do reservatório se infiltra através do corpo da barragem. O problema não parece grave já que a água sai com baixa velocidade e com aspecto claro, mas este problema precisa ser monitorado com fins de controle.



Figura 19: São Miguel – áreas úmidas na periferia da barragem

5.2 COMPLEXO GALÓPOLIS

Implantado no ano de 1967, nas coordenadas 29°13'48" S; 51°10'44" O, o complexo Galópolis consiste em uma sequência de duas barragens de alvenaria de pedra. Ambas as barragens acumulam volumes pequenos de água devido ao fato de possuírem pequena altura e estarem instaladas em vales estreitos e com grande declividade longitudinal. A água proveniente de seus reservatórios abastece apenas a população do distrito de Galópolis, totalizando cerca de 1 % da população de Caxias do Sul. A figura 20 mostra a localização do complexo Galópolis.

Em virtude de não existir, no início do trabalho, uma nomenclatura que distinguisse as duas barragens de Galópolis, o autor passou a chamar de Galópolis Superior a barragem encontrada numa cota mais elevada. Seguindo a mesma lógica, o barramento situado a jusante do primeiro, numa elevação menor, foi denominado Galópolis Inferior. A seguir, é apresentada uma descrição de ambas as barragens, assim como os problemas encontrados.



Figura 20: Localização do complexo Galópolis

5.2.1 Barragem Galópolis Inferior

Localizada no distrito de Galópolis, na Rua José Bolfe, a cerca de 300 m da BR-116, Galópolis Inferior é uma barragem construída em alvenaria de pedra que apresenta um desnível de aproximadamente 8 m e conta com uma largura de 16,00 m. O extravasor é do tipo retangular de descarga livre com comprimento de 6,00 m e altura de 0,70 m. Junto à barragem, há uma estação de tratamento de água. Os problemas encontrados na estrutura são citados nos próximos itens.

5.2.1.1 Erosão no terreno lateral junto da barragem

Foram identificados sinais de galgamento e erosão da margem. A pequena altura do vertedouro faz com que sua capacidade de vazão seja baixa. Dessa forma, durante precipitações intensas, a capacidade do vertedouro é superada pela vazão do rio e a água extravasa a barragem. Assim, grandes volumes de água acabam fluindo ao longo de toda a extensão da barragem. Com exceção da calha do vertedouro, o restante da barragem não é preparado para suportar grandes fluxos de água e o corpo da barragem no local acabou sendo erodido. O operador da estação de tratamento do local afirmou que, durante chuvas intensas

ocorridas no mês de dezembro de 2009, a água passou por cima da estrutura e acabou levando parte do talude mostrado abaixo (figura 21). Segundo ele, o fato se repete toda a vez que chuvas intensas ocorrem.

5.2.1.2 Conduto de fundo desativado

Verificou-se que o conduto de fundo, usado para captar água em períodos de seca está desativado (figura 22).



Figura 21: Galópolis Inferior – erosão na margem

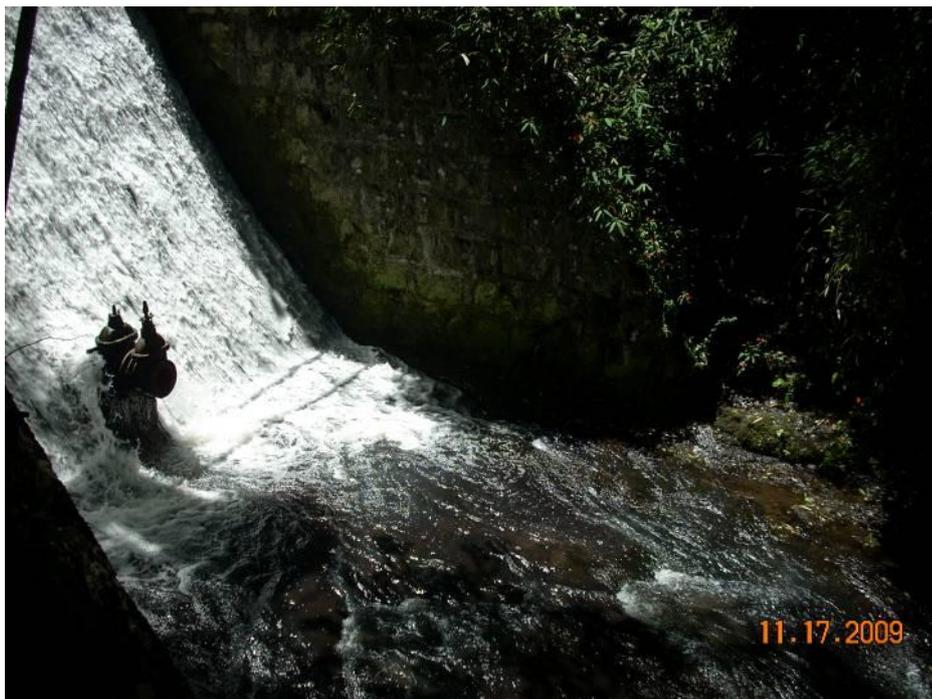


Figura 22: Galópolis Inferior – conduto de fundo desativado

5.2.2 Galópolis Superior

Galópolis Superior está localizada no distrito de Galópolis, na Rua José Bolfe, a 400 m da BR-116. A barragem, construída em alvenaria de pedra, apresenta desnível baixo, de aproximadamente 1,5 m, e um comprimento de cerca de 20 m. O vertedouro é do tipo retangular do tipo escada com altura de 0,26 m e comprimento de 9,15 m.

Foram identificados sinais de erosão provocada pelo galgamento da estrutura vertente (figura 23). Similar ao que ocorre na barragem inferior de Galópolis, o vertedouro tem baixa capacidade de vazão, o que o torna a estrutura facilmente galgável. O dono da propriedade próxima da barragem, antigo operador da estação de tratamento, também afirmou que chuvas recentes provocaram o transbordamento da estrutura e erosão do terreno imediatamente a jusante da barragem.



Figura 23: Galópolis Superior – sinais de galgamento na estrutura vertente

5.3 BARRAGEM SAMUARA

Inaugurada em 1967, a barragem se localiza na Rua Frederico Segalla, 1010, bairro Forqueta, e atualmente abastece 4 % da população de Caxias do Sul. Suas coordenadas são: 29°11'05'' S; 51°15'55'' O. O barramento foi construído em corpo de aterro, revestido com alvenaria de pedra. Sobre a barragem passa uma estrada. O vertedouro tem formato de arco, com 5,90 m de largura e leva a água por baixo da estrada, por meio de quatro bueiros de 0,80 m de diâmetro, até um canal de descarga. A figura 24 mostra a localização da Barragem Samuara. Os problemas observados no local são mencionados nos próximos itens.

5.3.1 Erosão nas margens do reservatório

As margens do reservatório encontram-se levemente erodidas (figura 25). Tal erosão é causada por ondas que colidem nas margens do reservatório, provocadas por ventos intensos.



Figura 24: Localização da Barragem Samuara



Figura 25: Samuara – erosão nas margens do reservatório

5.3.2 Estrutura do canal de descarga destruída

A estrutura que havia na saída do canal de descarga está destruída. O problema, por estar a jusante da barragem, não afeta sua integridade (figura 26), mas deveria ser monitorado ou consertado, para evitar erosão local.

5.3.3 Vazamentos na lateral do vertedouro

Os problemas são causados pela deterioração da argamassa de assentamento dos blocos de pedra (figura 27) e são similares aos encontrados nas barragens São Miguel e São Pedro, sendo de pouca importância neste estágio.



Figura 26: Samuara – saída do canal de descarga em ruínas



Figura 27: Samuara – vazamentos na lateral do vertedouro

6 ASPECTOS HIDROLÓGICOS

Após realizada a primeira visita de vistoria às barragens em estudo verificou-se, frente as evidências de galgamento encontradas nas barragens do complexo DalBó, Galópolis Inferior e Galópolis Superior, a necessidade de um estudo hidrológico para a determinação das vazões de projeto. Sinais de erosão junto a três barragens são fortes evidências de que os vertedouros de tais obras estejam subdimensionados. O objetivo da determinação destas vazões máximas é comparar os resultados com as vazões que os extravasores atuais têm capacidade de verter, em função da sua geometria.

Para tal estudo foram adquiridas junto a 1ª. Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro as cartas topográficas na escala 1:50.000 das cidades de Caxias do Sul e Farroupilha. Comparando as cartas com as imagens aéreas do Google, foi possível identificar a localização das barragens, tomando-se como referência as vias rurais e urbanas.

Foi escolhido para o cálculo das vazões o método do hidrograma unitário triangular (HUT) ou hidrograma sintético do SCS (*Soil Conservation Service*). Tal método é um artifício para o cálculo de eventos extremos, indicado, especialmente, para bacias hidrográficas com áreas menores que 2.600 km², que não dispõem de dados, e onde a vazão máxima é causada principalmente pelo escoamento superficial e precipitações naturais (CARVALHO, 2008, p. 43).

Através do hidrograma pode-se conhecer o volume de água que escoar pela superfície em um determinado tempo. Isto é possível em razão do fato do hidrograma ser um gráfico que relaciona vazão com o tempo.

A determinação da vazão de pico unitária se faz pelo conhecimento das variáveis e suas inter-relações:

$$tp = 0,6tc \quad \text{(equação 1)}$$

$$D = 0,2t_c \quad (\text{equação 2})$$

$$t_a = D/2 + t_p \quad (\text{equação 3})$$

$$t_b = 2,67.t_a \quad (\text{equação 4})$$

$$q_p = 0,208.P_u.A/t_a \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

t_c = tempo de concentração da bacia, horas;

t_p = tempo de retardamento ou tempo decorrido entre o centro de gravidade da chuva até o pico do HUT, horas;

t_a = tempo de ascensão do HUT, horas;

t_b = tempo de base ou duração do HUT, horas;

q_p = vazão máxima ou de pico do HUT, $m^3/s.mm$;

D = duração da chuva unitária, horas;

A = Área da bacia, km^2 ;

P_u = precipitação unitária (1mm).

Este hidrograma é correspondente a uma precipitação efetiva de 1 mm que cai e escoar sobre a bacia. Pode-se multiplicar suas ordenadas por qualquer valor de precipitação para obter o hidrograma referente a tal chuva. A figura 28 representa um hidrograma unitário triangular genérico e seus parâmetros.

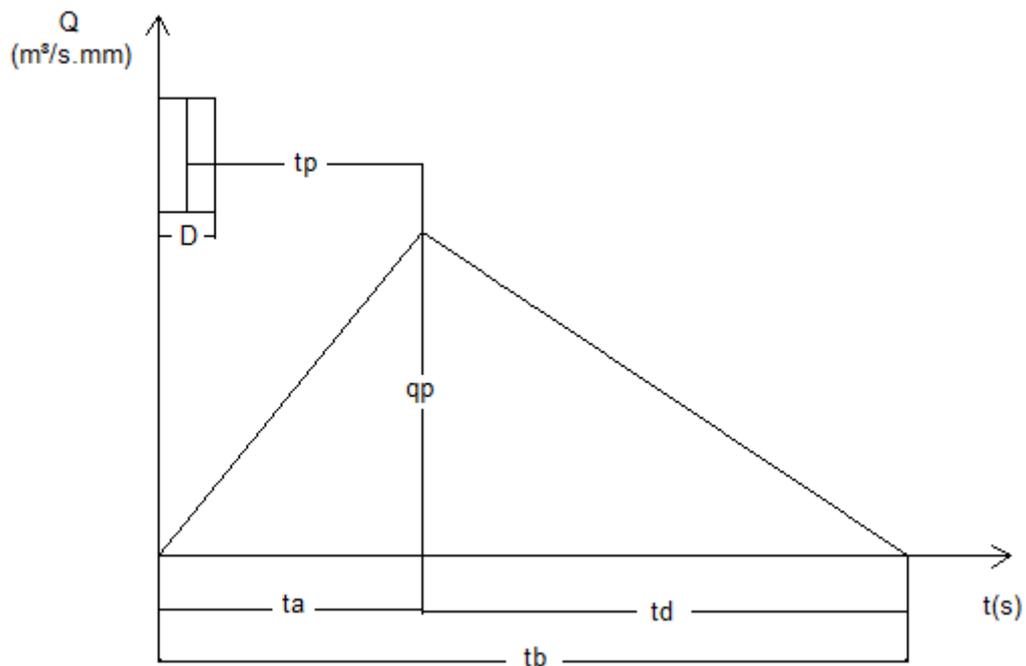


Figura 28: hidrograma unitário triangular genérico (CARVALHO, 2008)

Outro fator importante a ser considerado no cálculo do escoamento superficial é a retenção de água no solo. Esta, por sua vez, depende da capacidade de infiltração do solo, cobertura vegetal e tipo de ocupação da bacia. A retenção de água pelo solo pode ser expressa pela equação:

$$S = 25,4.(1000/CN - 10) \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

S = retenção potencial do solo, mm;

CN = número de curva (varia em função do tipo de solo, vegetação, e ocupação).

Segundo Carvalho (2008) o CN (número da curva de escoamento superficial) depende do uso e manejo da terra, tipo de solo, umidade do solo e condição hidrológica; reflete a quantidade de escoamento superficial, ou seja, quanto maior o valor de CN maior a quantidade de escoamento superficial esperado direto de uma determinada precipitação. Os tipos e características de solos considerados por este método são, de acordo com Tucci (2001):

- a) solo A: solos com baixa capacidade de produção de escoamento superficial, com alta infiltração. Exemplos típicos de solos arenosos profundos, com pouco silte e argila;
- b) solo B: solos com menor permeabilidade que a classe anterior, sendo solos arenosos menos profundos que o tipo A;
- c) solo C: solos que produzem escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da mesma. Normalmente, são do tipo franco-argilosos e pouco profundos;
- d) solo D: solos que contém argilas expansivas, com a mais baixa capacidade de infiltração e as maiores condições de escoamento.

O quadro 4 apresenta valores de CN, levando em consideração diferentes situações.

Utilização ou cobertura do solo		Tipo de Solo			
		A	B	C	D
Zonas cultivadas	sem conservação do solo	72	81	88	91
	com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições		68	79	86	89
Terrenos baldios em boas condições		39	61	74	80
Prado em boas condições		30	58	71	78
Bosques ou zonas com cobertura ruim		45	66	77	83
Florestas com cobertura boa		25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe e cemitérios, todos em boas condições	com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
	com relva em 50 a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritório		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93

continua

continuação

Utilização ou cobertura do solo		Tipo de Solo			
		A	B	C	D
Zonas residenciais					
Lotes (m ²)	% da área impermeável				
< 500	65	77	85	90	92
1000	38	61	75	83	87
1300	30	57	82	81	86
2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84
Parques de estacionamentos, telhados, viadutos, etc.		98	98	98	98
Arruamentos e estradas	Asfaltados e com drenagem de água	98	98	98	98
	Com paralelepípedos	76	85	89	91
	Terra	72	82	87	89

Quadro 4: valores de CN para bacias com ocupação urbana para condições de umidade antecedente AMC II (TUCCI, 2001)

O fator responsável pelo escoamento superficial é a precipitação efetiva, a qual pode ser assim definida:

$$Pe = (P - 0,2.S)^2 / (P + 0,8.S) \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

Pe = precipitação efetiva, mm;

P = precipitação real, mm.

Após a determinação da precipitação efetiva P_e , estima-se a vazão de projeto final pela seguinte equação:

$$Q_p = q_p.P_e \quad (\text{equação 8})$$

Pode-se, porém, considerando que a chuva não precipita todo o seu volume de uma única vez, dividir aleatoriamente a precipitação total em intervalos de duração igual à da chuva unitária (em 5 intervalos, por exemplo). Têm-se, dessa forma, cinco intervalos de tempo com lâminas de chuvas variadas cuja soma resulta na precipitação total. Deve-se ordenar as precipitações da seguinte forma:

- a) a precipitação de maior valor acontece no terceiro intervalo de tempo;
- b) a precipitação de segundo maior valor acontece no quarto intervalo;
- c) a terceira maior precipitação acontece no segundo intervalo;
- d) a quarta maior precipitação fica no quinto intervalo;
- e) a quinta maior precipitação acontece no primeiro intervalo de tempo.

Para a elaboração do hidrograma final é necessário transformar os valores de precipitações dos cinco intervalos em precipitações efetivas, conforme a equação 7. Vale ressaltar que, para o cálculo da precipitação efetiva em cada intervalo, é considerada a soma das precipitações totais de todos os intervalos anteriores, e não apenas as chuvas do intervalo em questão. A seguir, multiplica-se a precipitação efetiva de cada intervalo pelo hidrograma unitário e somam-se os cinco hidrogramas, respeitando o instante de início de cada um. O resultado é hidrograma final causado pela precipitação total considerada.

Para tornar possível a aplicação do método do hidrograma unitário triangular, é necessário conhecer a fisiografia das bacias em estudo, bem como o regime de chuvas da região. Tais aspectos são abordados nos subitens 6.1, 6.2 e 6.3.

6.1 ÁREA DA BACIA

Inicialmente, pelo traçado das linhas dos divisores de águas, delimitaram-se as bacias que contribuem com o escoamento das águas que chegam até as represas das barragens em estudo. Foram delimitados os eixos de cada barragem, definindo os limites de jusante de cada bacia. Para a medição das áreas delimitadas foi utilizado um planímetro. O quadro 5 mostra os valores das áreas encontradas para as bacias contribuintes das barragens em estudo.

Bacia	Área (hectares)
São Miguel	584
São Pedro	503
São Paulo	297
Samuara	498
Galópolis Inferior	294
Galópolis Superior	273

Quadro 5: áreas das bacias em estudo

6.2 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

Estimou-se o tempo de concentração da bacia pela equação de Ven Te Chow, indicada para áreas menores que 2500 ha (CARVALHO, 2008):

$$t_c = 5,77 \cdot (L/S_o^{0,5})^{0,64} \quad (\text{equação 9})$$

onde,

L= comprimento do talvegue, km;

So = declividade média do talvegue, m/m.

A declividade média do talvegue foi obtida dividindo-se a diferença de altitude dos pontos extremos da bacia pela distância entre estes dois pontos, conforme a equação:

$$S_o = \Delta H / \Delta L$$

(equação 10)

Onde,

ΔH = diferença de cota entre os pontos extremos da bacia, em m;

ΔL = comprimento do talvegue que une os pontos extremos da bacia, em m.

Definidos os pontos extremos, sendo o limite a jusante o eixo da barragem (também conhecido como seção de controle) e o limite a montante o ponto pertencente à bacia mais afastado da seção de controle, foram avaliadas as cotas correspondentes a tais pontos. Para tal, foram identificadas as curvas de nível na planta na escala 1:50.000. Em seguida, foi feita uma interpolação, comparando a distância entre as curvas com a distância das curvas até os pontos de interesse.

Para a determinação da distância entre os dois pontos, utilizou-se um curvímeter. Percorreu-se com o instrumento toda a extensão em planta do talvegue entre os dois pontos.

O quadro 6 resume o procedimento de estimativas dos tempos de concentração das bacias (T_c), contendo os valores medidos para os comprimentos de talvegue (ΔL), diferença de cota entre extremos do talvegue (ΔH), e declividades médias dos talvegues para as seis bacias em estudo.

Bacia	ΔH (m)	ΔL (m)	S_o (%)	T_c (minutos)
São Miguel	96	4.400	2,18	50,65
São Pedro	95	3.800	2,47	44,30
São Paulo	85	2.700	2,15	32,95
Samuara	103	3.000	3,43	30,29
Galópolis Inferior	253	2.300	11,00	19,93
Galópolis Superior	248	2.200	11,27	19,23

Quadro 6: características das bacias estudadas (ΔH , ΔL , S_o e T_c)

6.3 INTENSIDADE DE PRECIPITAÇÃO

Após o cálculo do tempo de concentração das bacias, definiu-se qual o período de retorno (T_r) que se deve adotar para as obras em análise. Períodos de retorno são definidos em função dos riscos associados à ruptura da barragem, sejam eles econômicos, ambientais ou sociais. Também é levado em conta o tamanho da barragem, assim como a capacidade de armazenamento do reservatório.

As barragens do complexo Dal Bó e a barragem do Samuara apresentam um tamanho intermediário ($5 \text{ m} < H < 15 \text{ m}$), porém suas rupturas acarretariam graves perdas econômicas e sociais. Para elas foi adotado um período de retorno de 1000 anos. Para as barragens de Galópolis, por apresentarem menores alturas e menores consequências de ruptura, foi adotado um período de retorno de 100 anos.

As chuvas foram obtidas a partir da curva PDF de Caxias do Sul, elaborada por Pfafstetter (1957). Estas curvas seguem a equação 11:

$$P = T^{\alpha + \frac{\beta}{T^{0,25}}} \cdot [0,50 \cdot t + 23 \cdot \log(1 + 20 \cdot t)] \quad (\text{equação 11})$$

Onde:

α e β são coeficientes que dependem da duração;

t é o tempo em horas;

P é a precipitação acumulada, em mm;

T é o tempo de retorno, em anos.

Calculando-se os valores de precipitação (P), em mm, e dividindo-se pelo respectivo tempo, em horas, obtiveram-se os valores de intensidade (I), em mm/h. Os valores encontrados para as bacias estão representados no quadro 7.

Bacia	Tc (minutos)	Tr (anos)	P (mm)	I (mm/h)
São Miguel	50,65	1000	90,83	107,6
São Pedro	44,30	1000	85,22	115,43
São Paulo	32,95	1000	66,24	120,62
Samuara	30,29	1000	59,95	118,75
Galópolis Inferior	19,93	100	41,33	124,44
Galópolis Superior	19,23	100	40,51	126,41

Quadro 7: características das bacias em estudo (Tc, Tr, P e I)

Definidas as intensidades e precipitações de projeto, partiu-se para a aplicação do método do hidrograma unitário triangular.

6.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO TRIANGULAR

Com posse dos valores de tempo de concentração das bacias, foi possível definir os hidrogramas unitários triangulares. Os valores de duração, tempo de retardamento, tempo de ascensão, tempo base e vazão máxima, calculados pelas equações 1, 3, 4 e 5, estão apresentados no quadro 8. Os hidrogramas unitários triangulares das seis bacias em estudo estão representados no Apêndice A deste trabalho. A seguir, divide-se as precipitações totais em cinco intervalos. As porcentagens da chuva total foram distribuídas para cada intervalo conforme indicado no quadro 9.

O potencial de retenção de água pelo solo (S) é função do número de curva (CN), e pode ser calculado pela equação 6.

Bacia	D (horas)	tp (horas)	ta (horas)	tb (horas)	qp (m ³ /s.mm)
São Miguel	0,23	0,51	0,62	1,65	1,96
São Pedro	0,20	0,44	0,54	1,45	1,93
São Paulo	0,15	0,33	0,40	1,08	1,53
Samuara	0,15	0,34	0,42	1,12	2,47
Galópolis Inferior	0,09	0,20	0,24	0,65	2,51
Galópolis Superior	0,09	0,19	0,23	0,63	2,42

Quadro 8: características dos hidrogramas das bacias em estudo (D, tp, ta, tb e qp)

Intervalo	Porcentagem da chuva total
primeiro	7 %
segundo	19 %
terceiro	37 %
quarto	24 %
quinto	13 %
total	100 %

Quadro 9: porcentagem de chuva por intervalo

O quadro 4 forneceu os valores de CN. Para as três bacias o solo foi considerado com sendo tipo C. Para a bacia de Galópolis, por ela ser quase na sua totalidade composta por florestais com cobertura boa, leu-se diretamente o valor do quadro, resultando um valor de CN = 70. Para a bacia Dal Bó, executou-se uma ponderação, considerando-a parte urbanizada e parte com cobertura vegetal, resultando num CN = 80. Para a bacia Samuara, realizou-se uma ponderação semelhante, que resultou num CN = 81.

Definidos os valores de CN, foi possível inseri-los na equação 6, resultando os valores de retenção de água pelo solo para cada bacia conforme mostrado no quadro 10.

Bacia	CN	S
Dal Bó	80	63,5
Samuara	81	59,58
Galópolis	70	108,96

Quadro 10: valores de CN e S para as bacias analisadas

Assim, a precipitação efetiva pode ser calculada, para cada um dos cinco intervalos, pela aplicação da equação 7, que considera os valores de precipitação total e de retenção de água pelo solo. A precipitação efetiva pode ser definida com a parcela de precipitação que gera escoamentos superficiais. Multiplicando-a pelo valor de pico do hidrograma unitário (q_p), conforme equação 8, obtiveram-se os valores de vazão máxima para cada intervalo. A seguir, somaram-se os hidrogramas dos cinco intervalos, respeitando sempre o tempo de início de cada um deles. Como resultado, obtiveram-se os hidrogramas resultantes das precipitações totais, cujos picos representam as vazões máximas de projeto, a serem consideradas para a verificação dos vertedouros. Os hidrogramas totais das seis barragens em estudo estão contidos no apêndice B deste trabalho. O quadro 11 traz os valores de vazões máximas de projeto encontradas para cada uma das bacias.

Bacia	Q_p (m ³ /s)
São Miguel	72,89
São Pedro	64,30
São Paulo	38,90
Samuara	67,60
Galópolis Inferior	6,70
Galópolis Superior	5,97

Quadro 11: precipitação efetiva e vazão máxima de projeto nas bacias estudadas

6.5 AMORTECIMENTO DAS ONDAS DE CHEIA PELOS RESERVATÓRIOS

As barragens São Paulo, São Pedro, São Miguel e Samuara têm por característica a presença de lagos de armazenamento relativamente grandes. Estes lagos irão influenciar diretamente a onda de cheia que neles entra, amortecendo-a. Tal efeito deve ser considerado no cálculo das vazões de projeto para os vertedouros.

Para o cálculo da onda de cheia amortecida, considerou-se que, no instante do início da precipitação, o reservatório encontra-se totalmente cheio. A partir desse instante, as vazões que entram no reservatório obedecem ao hidrograma total calculado previamente. Tal hidrograma foi dividido em intervalos de tempo de dois minutos de duração. A vazão de entrada, multiplicada pelo intervalo de tempo, resulta no volume de água que entra no reservatório. Este volume irá se distribuir por toda a área do reservatório, gerando uma altura de lâmina d'água que definirá a vazão de que passa pelo vertedouro no intervalo seguinte (será a altura de carga sobre o vertedouro). A cada novo intervalo de tempo, uma nova vazão de entrada é definida pelo hidrograma, portanto um novo volume. Existirá também uma nova vazão de saída definida pela equação do vertedouro. Assim, pode-se calcular a variação de volume do reservatório e distribuí-lo sobre a área, aumentando a carga e a vazão de saída no instante seguinte. Este procedimento deve ser repetido por sucessivos intervalos de tempo, até que as vazões de saída, após atingir seus valores máximos, voltem a apresentar valores baixos. Define-se, assim, o hidrograma de saída, ou hidrograma amortecido.

Os valores máximos dos hidrogramas amortecidos serão considerados como as vazões de projeto, ou vazões máximas, para fim de dimensionamento dos vertedouros. O quadro 12 mostra os valores de pico dos hidrogramas amortecidos (Q_{pa}) para as barragens São Paulo, São Pedro, São Miguel e Samuara (as barragens de Galópolis não apresentam amortecimento significativo, logo o pico do hidrograma amortecido é igual à vazão máxima calculada no item anterior). Para fins de comparação, criaram-se outras duas colunas neste quadro. A primeira reapresenta os valores de pico sem o efeito do amortecimento (Q_p), enquanto a segunda relaciona Q_{pa}/Q_p . No apêndice A deste trabalho, encontram-se os hidrogramas amortecidos para as quatro barragens acima citadas.

Bacia	Qpa (m ³ /s)	Qp (m ³ /s)	Qpa/Qp (%)
São Miguel	19,98	72,89	27,41
São Pedro	22,38	64,30	34,81
São Paulo	17,94	38,90	46,12
Samuara	7,18	67,60	10,62
Galópolis Inferior	6,70	6,70	100,00
Galópolis Superior	5,97	5,97	100,00

Quadro 12: valores de pico dos hidrogramas amortecidos

6.6 CAPACIDADE DOS VERTEDOUROS EXISTENTES

Para verificar se os vertedouros existentes são capazes de verter as vazões máximas calculadas no item anterior, foram calculadas suas capacidades de vazão. Tal capacidade depende de fatores como geometria, espessura de parede, existência ou não de pilares e contrações laterais. Bonafé (1988) sugere a seguinte equação para a determinação de vazão em sangradores retangulares (equação 12):

$$Q = m.L.H.(2g.H)^{0,5} \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

Q = vazão máxima esperada, em m³/s;

L = largura do vertedouro, em m;

H = altura da lâmina de água no vertedouro, em m;

g = gravidade, 9,81 m/s².

Bonafé (1988) ainda traz a seguinte equação para vertedouros do tipo orifício (equação 13):

$$Q = m.S.(2g.H)^{0,5} \quad (\text{equação 13})$$

Onde:

Q = vazão máxima esperada, em m³/s;

S = área do orifício, em m²;

H = altura da lâmina de água no vertedouro, em m;

g = gravidade, 9,81 m/s².

Os valores do coeficiente m dependem da geometria das bordas dos vertedouros e da existência de contrações laterais. Nos próximos itens serão detalhados os cálculos dos vertedouros de cada barragem.

6.6.1 Barragem São Paulo

Esta barragem apresenta dois vertedouros. O vertedouro principal é do tipo retangular de parede espessa com soleira livre e está representado na figura 29. Verificam-se dois pilares localizados a um terço das margens com formato pontiagudo interferindo levemente no escoamento do vertedouro.

O segundo vertedouro, representado na figura 30, é um extravasor de emergência situado numa cota 20 cm acima da cota do vertedouro principal. O quadro 13 apresenta as características geométricas dos dois vertedouros, assim como a vazão resultante da aplicação da equação 9.



Figura 29: São Paulo – vertedouro principal da barragem

Vertedouro	L (m)	H (m)	m	Qv (m ³ /s)
Principal	9,90	0,52	0,323	5,47
Auxiliar	7,20	0,31	0,323	1,78
			Total:	7,25

Quadro 13: características geométricas e capacidade de vazão dos vertedouros da barragem São Paulo



Figura 30: São Paulo – vertedouro auxiliar da barragem

A soma das vazões que os dois extravasores são capazes de verter operando em suas capacidades máximas é de 7,25 m³/s e corresponde a 40,41 % da vazão máxima calculada

para a bacia, a qual é 17,94 m³/s. Os resultados confirmam a expectativa inicial, criada pelas evidências de galgamento, de que os vertedouros estão subdimensionados.

6.6.2 Barragem São Pedro

Esta barragem também apresenta dois vertedouros, sendo um principal e outro auxiliar, mostrados nas figuras 31 e 32. O quadro 14 apresenta as características geométricas de ambos os vertedouros, assim como suas capacidades de vazão.

Vertedouro	L (m)	H (m)	m	Qv (m ³ /s)
Principal	10,00	0,53	0,323	5,75
Auxiliar	11,10	0,20	0,323	1,42
			Total:	7,17

Quadro 14: características geométricas e capacidade de vazão dos vertedouros da barragem São Pedro

A soma das capacidades de vazão dos vertedouros é de 7,17m³/s, bem inferior à vazão máxima calculada de 22,38 m³/s. O resultado mostra que o vertedouro está subdimensionado. O problema, porém, é amenizado pelo fato de a barragem, em toda a sua extensão, ser de alvenaria de pedra e não estar apoiada num terreno natural suscetível à erosão. Exceção se faz à região do vertedouro auxiliar, que apresenta-se parcialmente destruída, provavelmente em virtude da passagem de ondas de cheia.



Figura 31: São Pedro – vertedouro principal da barragem



Figura 32: São Pedro – vertedouro auxiliar da barragem

6.6.3 Barragem São Miguel

A barragem apresenta dois vertedouros. O primeiro, original da barragem, é do tipo escada, com uma soleira retangular de parede espessa e funciona atualmente como vertedouro auxiliar. O segundo, construído na década de 1990, apresenta um canal de aproximação e leva as águas por meio de bueiros subterrâneos até o arroio Tega. Este vertedouro, que tem funcionado como vertedouro principal, é bloqueado por uma chapa metálica com dois orifícios quadrados de 0,60 m de lado. Esta chapa é removida pelos operadores do Samae,

com o auxílio de uma retro-escavadeira, em situações de vazões intensas. As figuras 33 e 34 mostram os dois vertedouros.



Figura 33: São Miguel – vertedouro original da barragem

O quadro 15 apresenta as características geométricas de ambos os vertedouros, assim como suas capacidades de vazão.



Figura 34: São Miguel – novo vertedouro da barragem

Vertedouro	L (m)	H (m)	m	Qv (m³/s)
Auxiliar	12,14	0,50	0,40	7,60
Principal (sem a chapa metálica)	2,60	2,00	0,40	13,03
Vertedouro	S (m²)	H (m)	m	Qv (m³/s)
Principal (com a chapa metálica)	0,36	0,50	0,402	0,45
Total sem a chapa metálica:				20,63
Total com a chapa metálica:				8,05

Quadro 15: características geométricas e capacidade de vazão dos vertedouros da barragem São Miguel

Verifica-se que a retirada da chapa metálica aumenta significativamente a capacidade de vazão do vertedouro principal, tornando o conjunto de vertedouros capaz de escoar a vazão máxima calculada de 19,98 m³/s. Porém, com a presença da chapa metálica obstruindo o escoamento no vertedouro principal, a vazão de projeto supera em cerca de 12 m³/s a capacidade dos extravasores somadas.

6.6.4 Barragem Samuara

A barragem possui um único vertedouro no formato de arco, que conduz a vazão afluyente por meio de 4 bueiros por baixo da via de acesso da estação de tratamento do local. A figura 35 mostra o vertedouro em arco da barragem. A figura 36 mostra os bueiros que conduzem a água proveniente do vertedouro.

A equação para o cálculo da vazão em um vertedouro em arco é a mesma usada nos vertedouros retangulares. Utiliza-se o valor de L como sendo o comprimento externo do arco soleira do vertedouro. O quadro 16 apresenta as características geométricas do vertedouro, assim como sua capacidade de vazão.

Vertedouro	L (m)	H (m)	m	Qv (m ³ /s)
Principal	6,17	0,58	0,323	3,90

Quadro 16: características geométricas e capacidade de vazão do vertedouro da barragem Samuara.

A capacidade de vazão do vertedouro 3,90 m³/s é insuficiente para escoar a vazão máxima calculada de 7,18 m³/s.



Figura 35: Samuara – vertedouro da barragem



Figura 36: Samuara – bueiros da barragem

6.6.5 Barragem Galópolis Superior

A barragem possui um vertedouro retangular de parede espessa, representado na figura 37.



Figura 37: Galópolis Superior – vertedouro da barragem

A capacidade de vazão do vertedouro, assim como suas características geométricas estão descritas no quadro 17.

Vertedouro	L (m)	H (m)	m	Qv (m ³ /s)
Principal	9,15	0,26	0,323	1,73

Quadro 17: características geométricas e capacidade de vazão do vertedouro da barragem Galópolis Superior

Verifica-se que a capacidade do vertedouro de 1,73 m³/s é muito menor do que a vazão máxima calculada de 5,97 m³/s. Confirma-se a suspeita inicial de que o vertedouro está subdimensionado.

6.6.6 Barragem Galópolis Inferior

A barragem também possuiu um vertedouro retangular de parede espessa, representado na figura 38.



Figura 38: Galópolis Inferior – vertedouro da barragem

A capacidade de vazão do vertedouro, assim como suas características geométricas estão descritas no quadro 18.

Vertedouro	L (m)	H (m)	Qv (m³/s)
Principal	6,00	0,70	5,03

Quadro 18: características geométricas e capacidade de vazão do vertedouro da barragem Galópolis Inferior

Verifica-se que a capacidade do vertedouro de 5,03 m³/s é inferior à vazão máxima calculada de 6,70 m³/s. A comparação destes resultados confirma a hipótese levantada durante as visitas de vistoria, fruto dos sinais de galgamento, de que o vertedouro dessa barragem está subdimensionado.

7 ANÁLISE E PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES

Após identificados os principais problemas nas barragens em estudo e compreendidas suas causas, parte-se para a proposição de medidas de recuperação. É importante salientar que alguns dos problemas requerem manutenção permanente da estrutura.

7.1 INFILTRAÇÕES

Problemas de infiltrações por entre as juntas de assentamento foram detectados nas barragens de São Pedro, São Miguel e Samuara. Almeida Junior (2008) recomenda o uso de injeções flexíveis para o selamento de infiltrações das estruturas de concreto e alvenaria. O autor explica que tais injeções são compostas de resinas de poliuretano (espuma de poliuretano hidroativado e gel de poliuretano) e resinas acrílicas (géis acrílicos). Normalmente o emprego de resinas de poliuretano em estruturas de concreto de barragens tem a finalidade de estancar as infiltrações através de fissuras, trincas, juntas de concretagem, pequenos orifícios e defeitos de concretagem. Já os géis acrílicos poliméricos são empregados geralmente para fazer uma impermeabilização em uma área formando uma manta impermeabilizante na face oculta do concreto e para estancar infiltrações em juntas de dilatação.

Almeida Junior (2008) ressalta que todos os serviços de injeção requerem uma perfeita preparação e limpeza do substrato, uma instalação planejada e bem executada da linha dos bicos de injeção, uma cuidadosa operação de injeção dos produtos de acordo com o tipo de tratamento especificado, além de uma equipe técnica bem treinada e familiarizada com os produtos, a fim de se obter bons resultados e principalmente solucionar os problemas técnicos das estruturas de concreto.

Além das injeções de géis acrílicos e de resinas de poliuretano, para casos de infiltrações pequenas como as de São Miguel, São Pedro e Samuara, o simples preenchimento com argamassa convencional das juntas que apresentam vazamentos é uma solução eficiente.

7.2 EXCESSO DE VEGETAÇÃO

Para que os vertedouros possam operar próximos de suas capacidade máximas, deve-se evitar que a vegetação aquática se acumule, tanto no vertedouro principal, quanto no auxiliar. Foram encontrados aguapés nas barragens de São Paulo, São Miguel e São Pedro.

As macrófitas, espécies de plantas aquáticas visíveis ao olho nú, são plantas que aparecem naturalmente nos reservatórios. Embora sua proliferação seja uma resposta da natureza aos ambientes poluídos, por se alimentar de matéria orgânica e fósforo e, em suas raízes ficar retido material em suspensão e absorver metal pesado da água, os problemas a ela associados ainda são maiores que os benefícios (CAVENAGUI ET al., 2005 apud BARBOSA; GENTIL 2009). Outro fator muito relevante é o fato das raízes servirem de habitat para larvas de insetos e as folhas de abrigo aos insetos adultos, vetores de doenças e transtornos sociais.

Pompêo (2008) cita uma série de procedimentos de controle de macrofilas. Segundo o autor, o método mais simples e semelhante à remoção manual de ervas daninhas no jardim, com emprego de pás, facas e bolsas vazadas para retirar e armazenar as porções vegetais removidas, toda a planta (tais como frações aéreas, aquáticas e sob o sedimento). Em ambientes rasos não há necessidade de equipamentos sofisticados, mas em águas profundas é necessário experiência e equipamento de mergulho autônomo. Este método, complementa o autor, é recomendado para lagos pequenos e ligeiramente infestados. Sua vantagem é ser específico, com remoção unicamente das espécies desejadas, com mínimo impacto sobre as demais plantas presentes no lago.

Outro procedimento implica no corte das macrófitas enraizadas, mas sem remoção de suas raízes. Para esta finalidade pode ser empregado instrumento em forma de “V” com lâminas cortantes na parte externa (figura 39). Este instrumento é lançado na água e puxado sobre o sedimento cortando a macrófita aquática, posteriormente removida. Também é útil para aplicação em pequenos corpos de água com a desvantagem de não ser seletivo e permitir a rebrota dos fragmentos. Um ancinho robusto também é um instrumento útil para remover as macrófitas aquáticas enraizadas, permitindo inclusive a remoção de raízes (figura 40). O ancinho é lançado a curta distância e puxado em direção a margem, com a posterior retirada da vegetação. Sua aplicação é recomendável na fase inicial de colonização. Sua desvantagem é não ser específico, removendo qualquer planta aquática, além de revolver o sedimento, com

impacto sobre os organismos bentônicos e na qualidade da água (POMPÊO, 2008). Além destes procedimentos físicos manuais, o autor ainda cita métodos de remoção físicos mecânicos (com o uso de ceifadeiras mecânicas), métodos biológicos e químicos. Essas alternativas, porém, foram descartadas por envolverem elevados custos e maiores incertezas. Por fim, o autor afirma que a biomassa de macrófitas aquáticas deve ser devidamente descartada, não causando assim impactos ambientais.

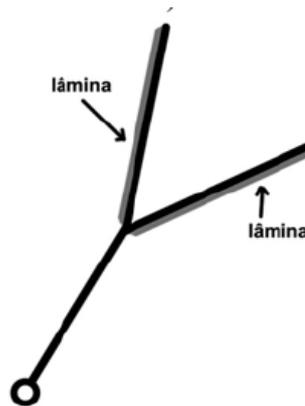


Figura 39: instrumento cortante em forma de V (POMPÊO, 2008)



Figura 40: ancinho (POMPÊO, 2008)

Outra sugestão para lidar com o problema de excesso de vegetação é a construção de uma barreira que impeça que tal vegetação chegue até os vertedouros e obstrua-os. A figura 41 é uma vista em planta de um modelo de barreira de vegetação. A barreira é composta por uma chapa metálica no formato de arco, presa à bóias que a façam flutuar e acompanhar o nível de água do reservatório. Dessa forma, a vegetação fica retida na chapa, enquanto a água tem passagem livre por baixo da estrutura.

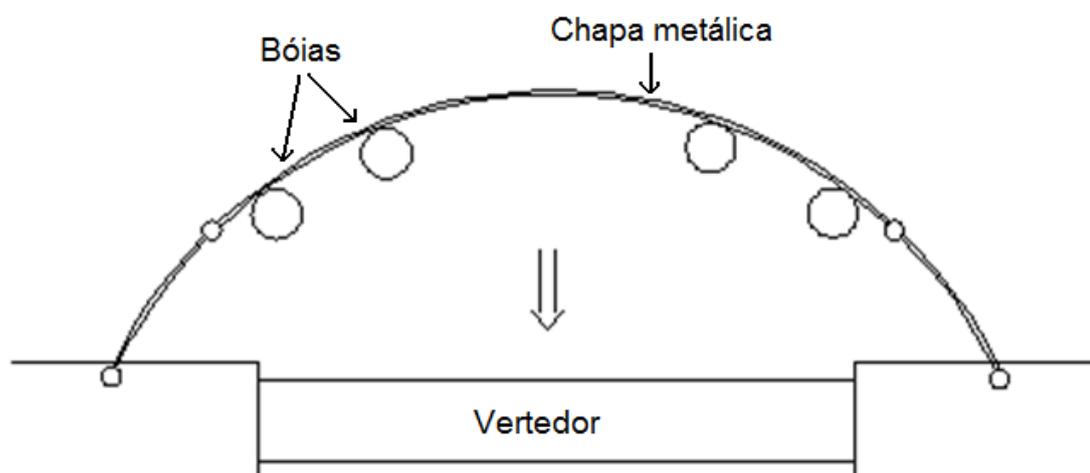


Figura 41: barreira para vegetação

7.3 GALGAMENTO E EROSÃO

Nas barragens Galópolis Superior e Galópolis inferior os estudos hidrológicos e o depoimento dos moradores do local, assim como do operador da estação de tratamento, indicam que os vertedouros estão subdimensionados. Em ambas as barragens citadas, assim como na barragem São Paulo, também foram encontrados sinais de galgamento na estrutura.

Nas barragens Galópolis Inferior e Galópolis Superior sugerem-se duas opções. A primeira opção é, admitindo que a água vá transpor a barragem, construir de uma calha de concreto capaz de reconduzir as vazões vindas de chuvas mais intensas de volta para o leito do rio. Dessa forma, o solo no local fica protegido da erosão. A segunda opção é a ampliação da altura do vertedouro da barragem, aumentando sua capacidade de vazão sem que se reduza a capacidade de armazenamento do reservatório.

Na barragem São Paulo deve-se, também, proteger os taludes que vem sendo erodidos pela passagem de ondas de cheia com uma calha semelhante à adotada para os casos de Galópolis.

Não foi encontrada nenhuma evidência de galgamento na barragem São Miguel. Porém, a segurança da barragem depende do içamento da chapa metálica que controla a vazão no seu vertedouro principal. Nada pode garantir que o operador responsável por levantar a chapa em situações de grandes vazões o fará sempre que necessário. Chuvas torrenciais podem atingir a barragem de forma inesperada e pegar o operador desprevenido. Por isso, é recomendável a

instalação de um sistema que independa da presença de operadores. As figuras 42 e 43 trazem um exemplo de vertedouro automático. A idéia do vertedouro é bastante simples. Substitui-se a atual chapa metálica por uma comporta. Acopla-se a essa comporta dois cilindros de ar (bóias) que ficarão flutuando conforme o nível do reservatório. Dessa forma, se o nível d'água subir rapidamente, a força de empuxo que atuará sobre as bóias será transmitida para a comporta levantando-a. Assim, surgirá um fluxo por baixo da comporta que será tão maior quanto mais alta for levantada a comporta pelas bóias, evitando que o reservatório transborde. Outra opção válida para este local é a instalação de um vertedor basculante, que tem como característica aumentar significativamente sua capacidade de vazão para grandes alturas de lâmina d'água. Tal opção vai a favor da segurança, uma vez que, no caso de mau funcionamento, vertedores basculantes permanecem operando em suas capacidades máximas.

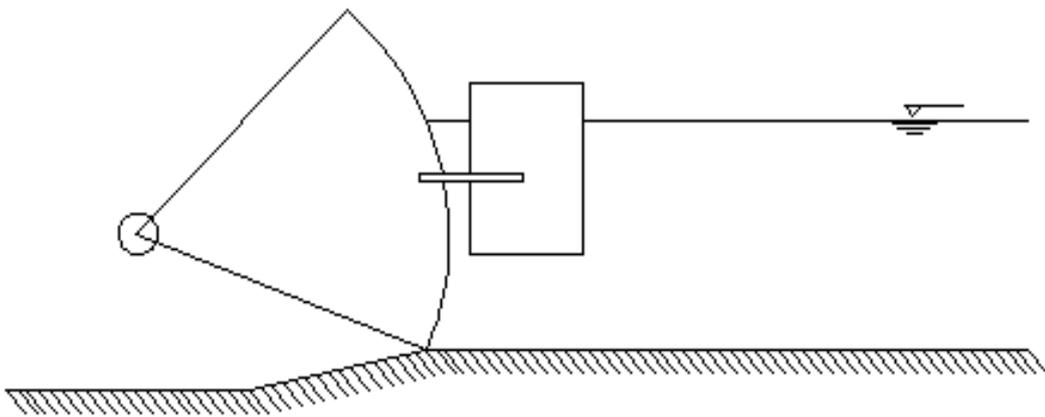


Figura 42: vertedouro automático (vista lateral em corte)

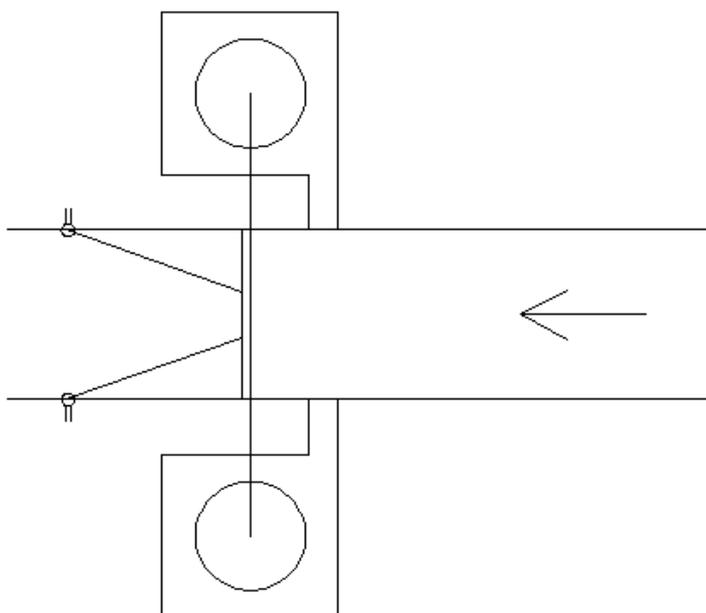


Figura 43: vertedouro automático (vista superior)

7.4 DEMAIS PROBLEMAS

É recomendada a substituição da grade de proteção do lago da represa São Paulo, danificada na região próxima ao vertedouro. Tal ação visa zelar pela segurança dos visitantes do local, prevenindo possíveis afogamentos.

Deve-se manter sob observação as árvores encontradas no corpo da barragem São Paulo. Suas raízes, caso a planta morra e comece a apodrecer, podem gerar caminhos preferenciais de erosão.

Ainda na barragem São Paulo, sugere-se a criação de um canal que conduza a água que escoar pelo vertedouro lateral e a faça desaguar junto ao canal que conduz as águas do vertedouro principal. Carvalho (2008) recomenda canais de concreto para o local, em virtude da inclinação ser muito elevada e, conseqüentemente, com velocidades altas.

Na barragem São Pedro, além da remoção da vegetação e das injeções de argamassa nos locais com infiltrações, acima citadas, uma outra medida de recuperação aplicável é a limpeza e desobstrução do canal lateral e a reconstrução de seu vertedouro auxiliar

Na barragem São Miguel, a periferia deve ser inspecionada. Nos locais onde surgirem infiltrações e áreas molhadas, a turbidez dessa água deve ser analisada. No caso da água apresentar-se turva, um engenheiro especializado deve ser contatado, pois pode ser um sinal de erosão regressiva tubular.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após visitar e inspecionar as barragens em estudo, foi possível concluir que, do ponto de vista de construção e estabilidade estrutural, não existiam problemas significativos. Os problemas encontrados estavam relacionados a pequenos vazamentos resultantes da deterioração da argamassa nas juntas da estrutura, excesso de vegetação e algumas áreas úmidas a jusante da barragem. Porém foram observados pontos de erosão do solo a jusante de algumas barragens, de intensidade variável, devido ao galgamento hidráulico em períodos de chuvas intensas. Frente a tais evidências de sub-dimensionamento dos vertedouros, foi feito um estudo hidrológico das vazões de cheia com amortecimento do reservatório e da capacidade dos vertedouros.

As vazões máximas amortecidas calculadas para cada bacia foram comparadas com as capacidades de vazão dos vertedouros, constatando-se que nas seis barragens os vertedouros estão sub-dimensionados. O quadro 19 traz uma comparação dos valores calculados de vazões máximas amortecidas (Q_{pa}) com capacidade dos vertedouros (Q_v).

Bacia	Q_{pa} (m ³ /s)	Q_v (m ³ /s)	Q_{pa}/Q_v (%)
São Miguel	19,98	8,05	40,29
São Pedro	22,38	7,17	32,04
São Paulo	17,94	7,25	40,41
Samuara	7,18	3,90	54,32
Galópolis Inferior	6,70	5,03	75,07
Galópolis Superior	5,97	1,73	28,98

Quadro 19: comparação entre vazões produzidas pela bacia e capacidade de vazão dos vertedouros

Para as duas barragens de Galópolis e para a barragem São Paulo, as quais apresentaram sinais de erosão devido ao galgamento, a sugestão é de que se construa calhas de concreto para proteger os taludes do fluxo de água. Para a barragem São Miguel, cuja segurança

depende do içamento da chapa metálica do vertedouro principal (mais recente), é recomendada a instalação de um vertedouro de funcionamento automático.

O bloqueio dos vertedouros pelo excesso de vegetação é outro fator que contribui para que as barragens sejam galgadas. Sugere-se construir uma estrutura capaz de impedir que a vegetação se acumule nos vertedouros, ou então promover a remoção periódica do excesso acumulado. Esta é uma solução recomendada para as barragens São Paulo, São Pedro e São Miguel.

Para corrigir as infiltrações encontradas nas barragens São Miguel, São Pedro e Samuara é recomendado que se retire toda a argamassa que se encontrar fragilizada e realizar o preenchimento dos locais com argamassa convencional ou estabilizada com aditivos especiais para maior durabilidade.

Recomenda-se também que seja feito o revestimento dos canais de fuga laterais das barragens São Pedro e São Paulo como proteção à erosão. É importante que seja estabelecido um monitoramento das áreas úmidas nas áreas de jusante próximas da barragem São Miguel, assim como das árvores nos taludes da barragem São Pedro.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA JUNIOR, W. Sistema de Injeção para Estancamento de Infiltrações e Recomposição Estrutural das Estruturas de Concreto de Usinas Hidrelétricas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 4., 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Comitê Brasileiro de Grandes Barragens. 2008.
- BARBOSA, A. C.; GENTIL, I. C. Histórico do manejo de Macrófitas Aquáticas no Reservatório Guarapiranga. In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL: RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, SERVIÇOS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE, 2., 2009, Taubaté. **Anais...** Taubaté: IPABHi. 2009.
- BONAFÉ, D. E. **Hidráulica para Ingenieros**. Madrid: Bellisco, 1988.
- BRASIL. Comitê Brasileiro de Barragens. Núcleo Regional de São Paulo. **Guia Básico de Segurança de Barragens**. São Paulo, SP, 1999.
- _____. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília, DF, 2002.
- CARBAJO, D. E. **Barragens – riscos, acidentes e aprendizado**. 2005. 74 f. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo.
- CARVALHO, J. A. **Dimensionamento de pequenas barragens para irrigação**. Lavras: UFLA, 2008.
- COSTA, T.; LANÇA, R. Notas de Aula: Disciplina de Hidráulica Aplicada – Núcleo de Hidráulica e Ambiente. Escola Superior de Tecnologia Universidade do Algarve. Faro, Portugal. 2001. Disponível em: <<http://w3.ualg.pt/~rlanca/sebenta-hid-aplicada/ha-08-barragens.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2009.
- FINDLAY, R. C.; JONES, A. N. Graham Lake Dam Remedial Measure Project. In: ASCE SPECIALTY CONFERENCE ON GEOTECHNICAL PRACTICE IN DAM REHABILITATION. 1993 Raleigh, USA. **Proceedings...** Raleigh: American Society of Civil Engineers, 1993. p. 536-550.
- GOULD, J. P.; LACY, H. P. Seepage Control in Dam Rehabilitation. In: ASCE SPECIALTY CONFERENCE ON GEOTECHNICAL PRACTICE IN DAM REHABILITATION. 1993 Raleigh, USA. **Proceedings...** Raleigh: American Society of Civil Engineers, 1993. p. 240-255.
- GUERRA, M. O. **Qualidade como Fator de Melhoria da Performance de Auscultação e Monitoramento de Barragens**. 1996. 191 f. Dissertação (Mestrado em Qualidade) – Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- HALLMARK, D. E. **Presas pequeñas de concreto**. México: Limusa, 1978.

McLEAN, F. G.; HANSEN, K. D. Roller Compacted Concrete for Embankment Overtopping Protection. In: ASCE SPECIALTY CONFERENCE ON GEOTECHNICAL PRACTICE IN DAM REHABILITATION, 1993, Raleigh, USA. **Proceedings...** Raleigh: American Society of Civil Engineers, 1993. p. 188-209.

PFAFSTETTER O. **Chuvas intensas no Brasil**. Porto Alegre: Globo S.A, 1957

POMPÊO, M. Monitoramento e Manejo de Macrófitas Aquáticas, 2008. Disponível em: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/fichero_articulo?codigo=2882865&orden=0>. Acesso em: 20 abr. 2010.

SEED, H. B. The role of Case Studies in the Development of Geotechnical Engineering Practice. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 7., 1983, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver: Canadian Geotechnical Society, 1983.v 3.

SILVA, P. J.; PIRES, M. A. F. Renaturalização de Rios, em Áreas de Trechos Urbanos, com a Aplicação de Técnicas de Bioengenharia em Obras de Engenharia Hidráulica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2006, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/novo/xvii_simp_bras_rec_hidric_sao_paulo_022.pdf> Acesso em: 23 nov. 2009.

TUCCI, C. E. M. Vazão máxima e hidrograma de projeto. In: _____. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2001. v. 4, Coleção ABRH de Recursos Hídricos.

UNITED STATES OF AMERICA. Department of Interior. Bureau of Reclamation. **Desing of Small Dams**. Washington. 1960.

_____. Committee on Large Dams. Lessons from Dam Incidents, USA. New York: American Society of Civil Engineers. 1975.

_____. Department of Interior. Bureau of Reclamation. **Avaliação da Segurança de Barragens Existentes**. Rio de Janeiro: Eletrobrás. 1987.

_____. Alberta Enviromental Protection. Inspection of Small Dams. Edmonton, USA, 1998 Plublication n. T/434. Revision 3. Disponível em: <<http://environment.gov.ab.ca/info/posting.asp?assetid=6209&categoryid=5>>. Acesso em: 19 nov. 2009.

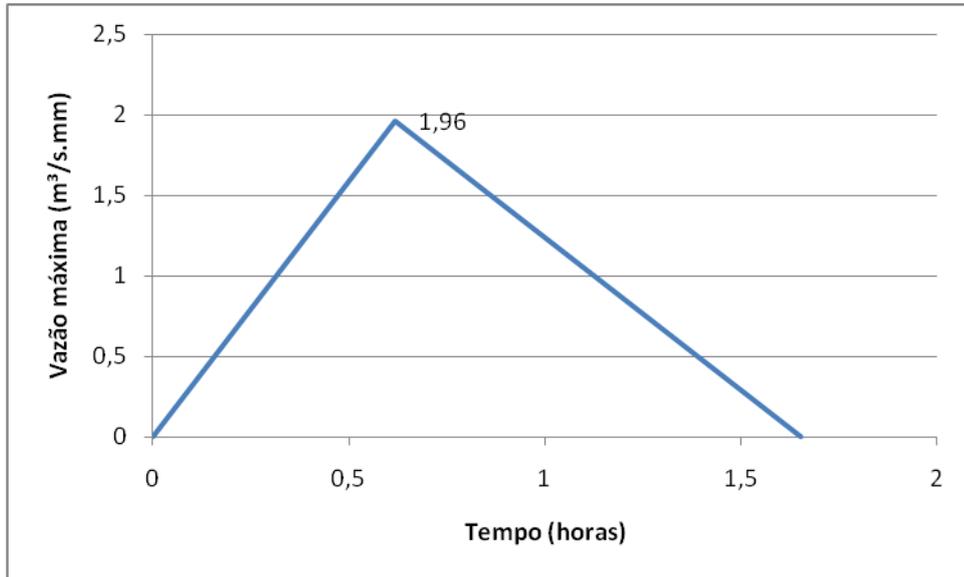
_____. Indiana Department of Natural Resources. Dam Safety: Earth Dam Failures. 2003. Disponível em: <<http://www.in.gov/dnr/water>>. Acesso em: 25 ago. 2009.

_____. Department of Ecology. State of Washington. Dam Safety. 2009a. Disponível em: <<http://www.ecy.wa.gov/PROGRAMS/wr/dams/failure.html>>. Acesso em: 2 nov. 2009.

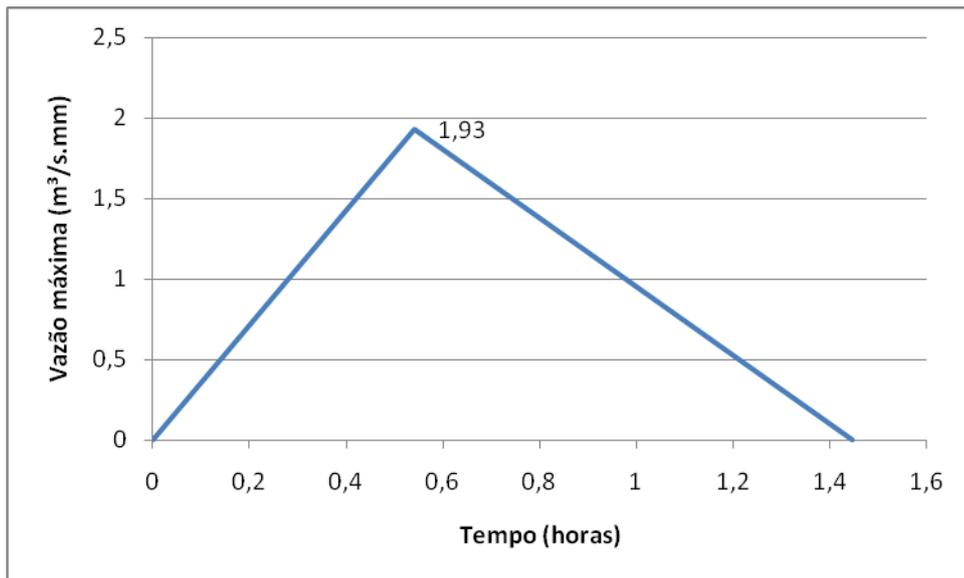
_____. Department of Interior. Bureau of Reclamation. Failure of Teton Dam. 2009b. Disponível em: <<http://www.usbr.gov/pn/about/Teton.html>>. Acesso em: 19 dez. 2009.

ZUFFO, M. S. R. **Metodologia para avaliação da segurança de barragens**. 2005. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

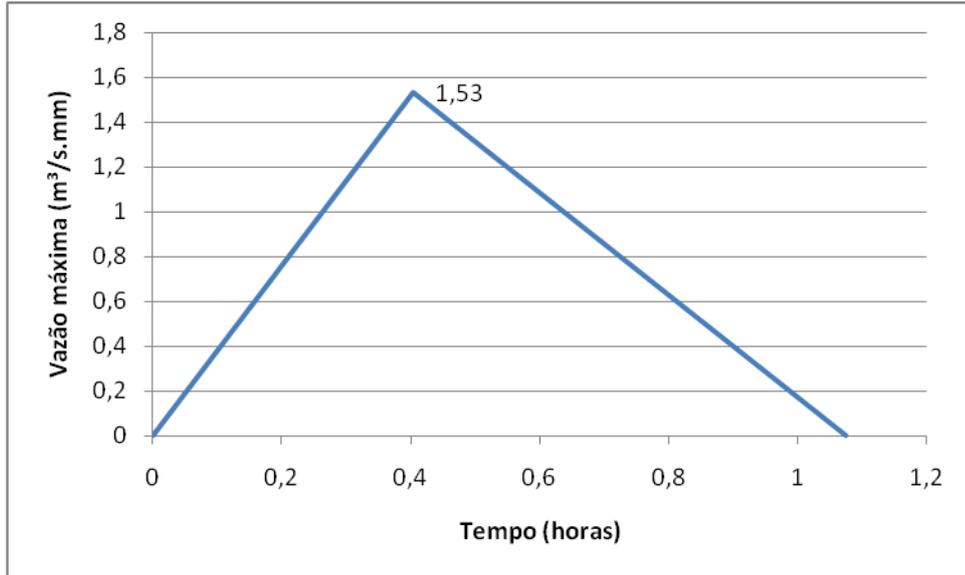
**APÊNDICE A – Hidrogramas unitários triangulares para as bacias em
estudo**



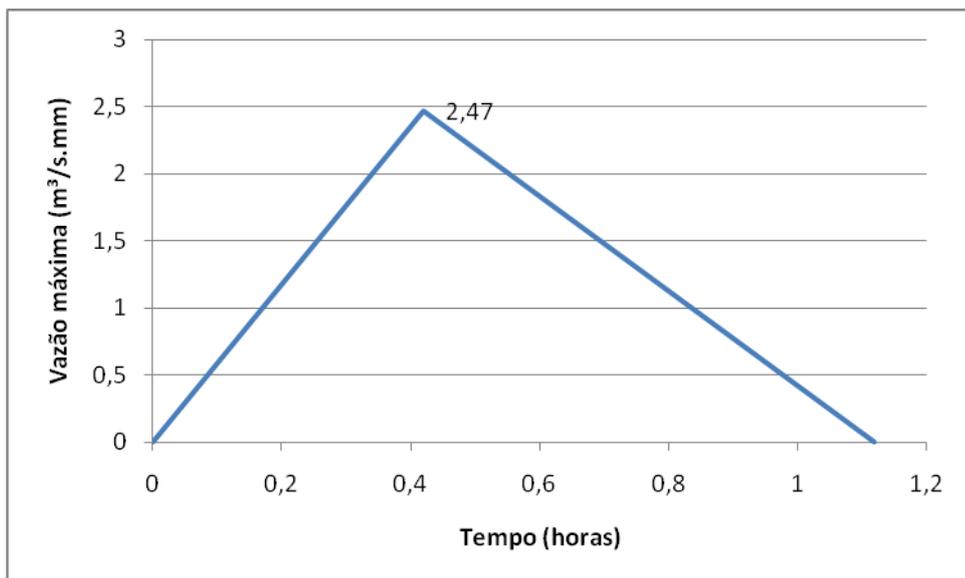
Hidrograma unitário triangular para a bacia da barragem São Miguel



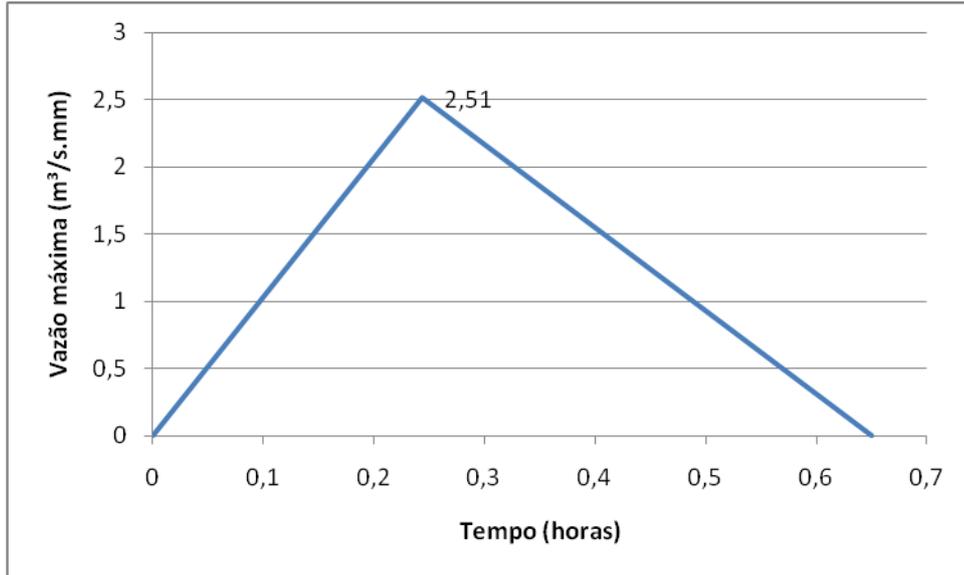
Hidrograma unitário triangular para a bacia da barragem São Pedro



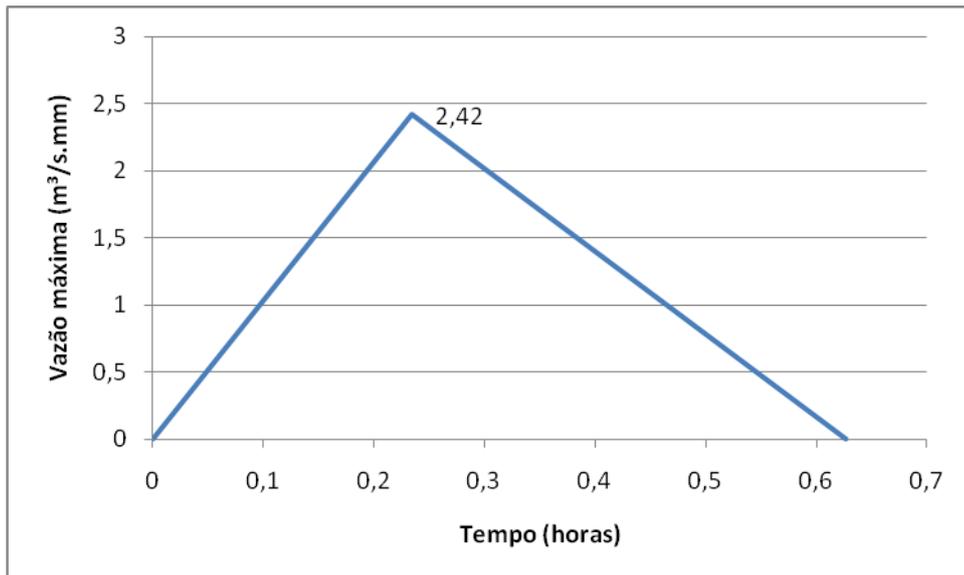
Hidrograma unitário triangular para a bacia da barragem São Paulo



Hidrograma unitário triangular para a bacia da barragem Samuara

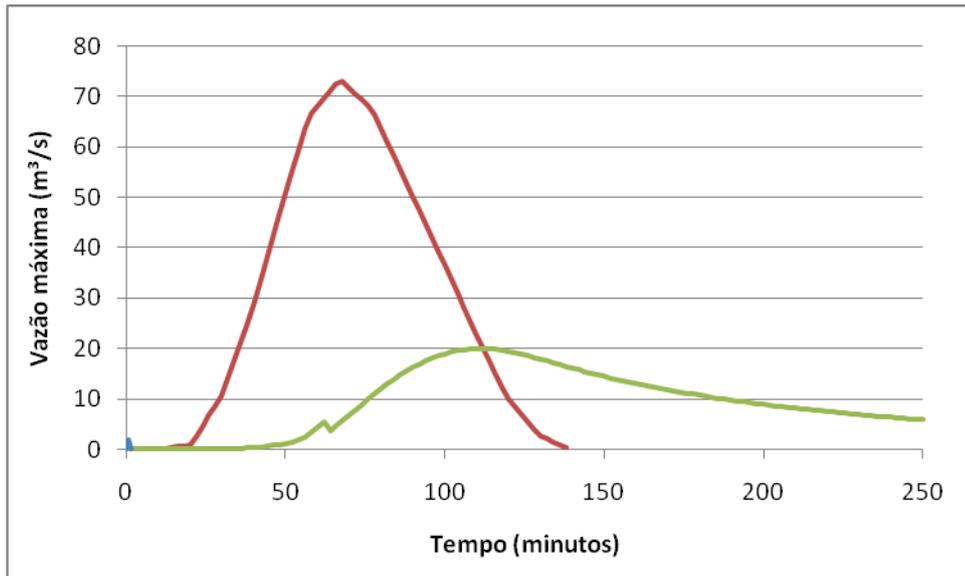


Hidrograma unitário triangular para a bacia da barragem Galópolis Inferior

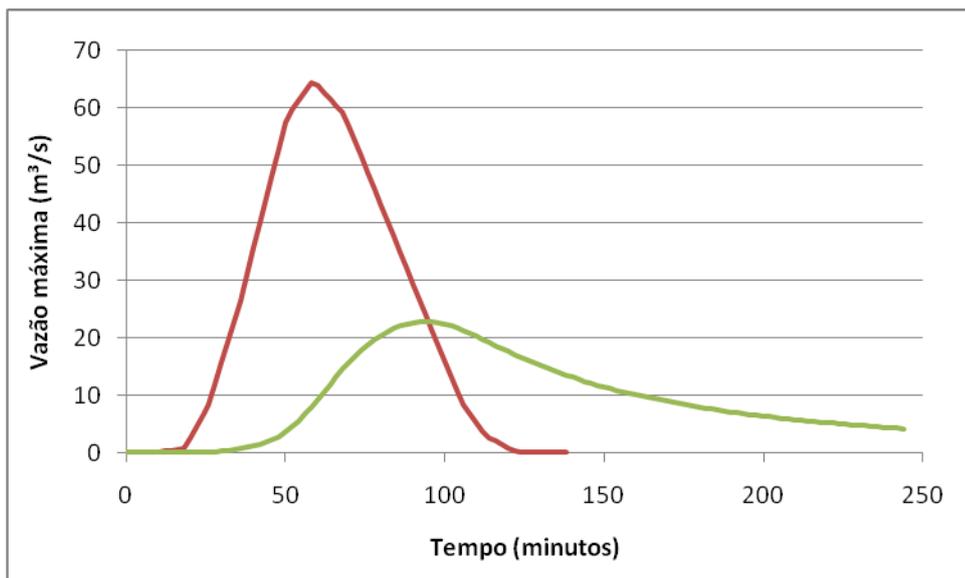


Hidrograma unitário triangular para a bacia da barragem Galópolis Superior

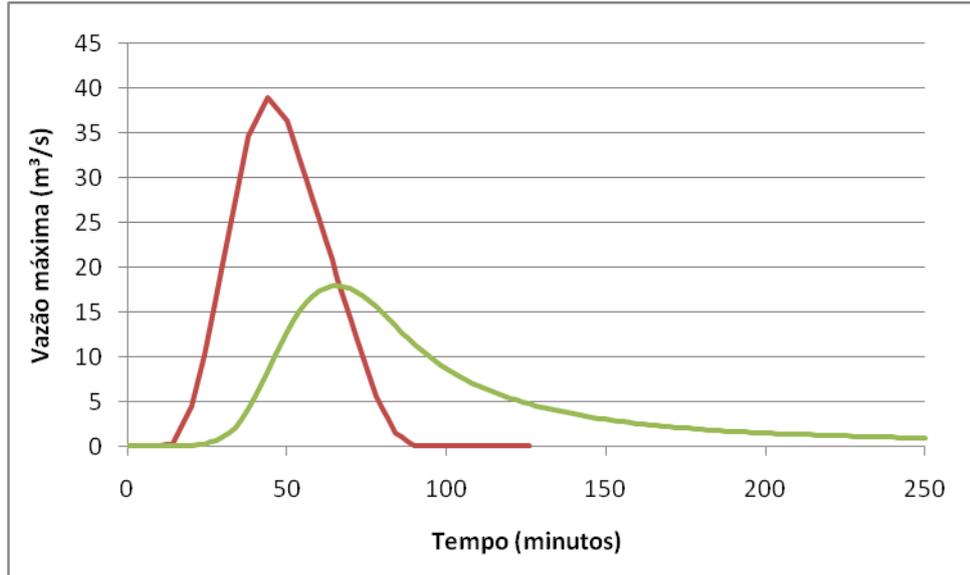
**APÊNDICE B – Hidrogramas totais e amortecidos para as barragens em
estudo**



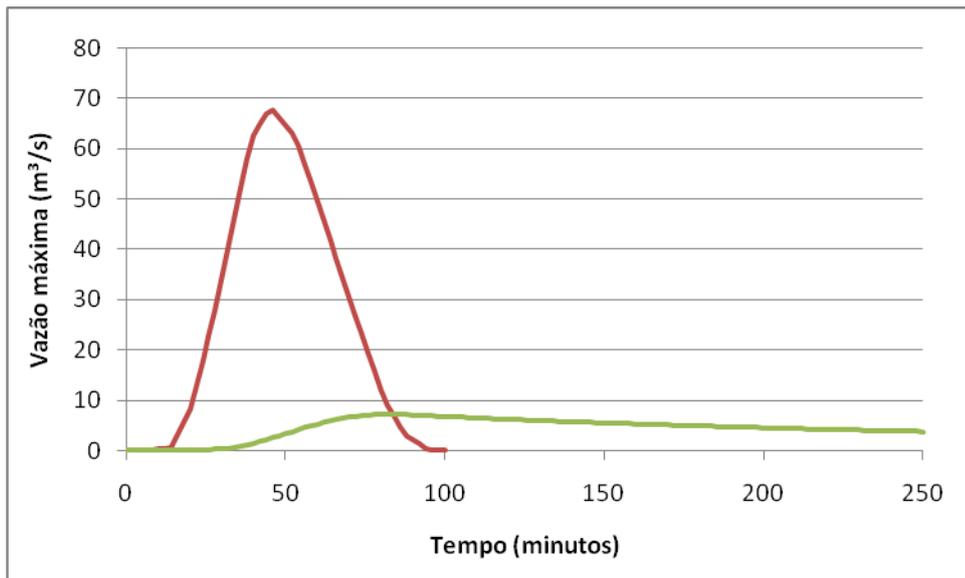
Hidrogramas total e amortecido para a barragem São Miguel



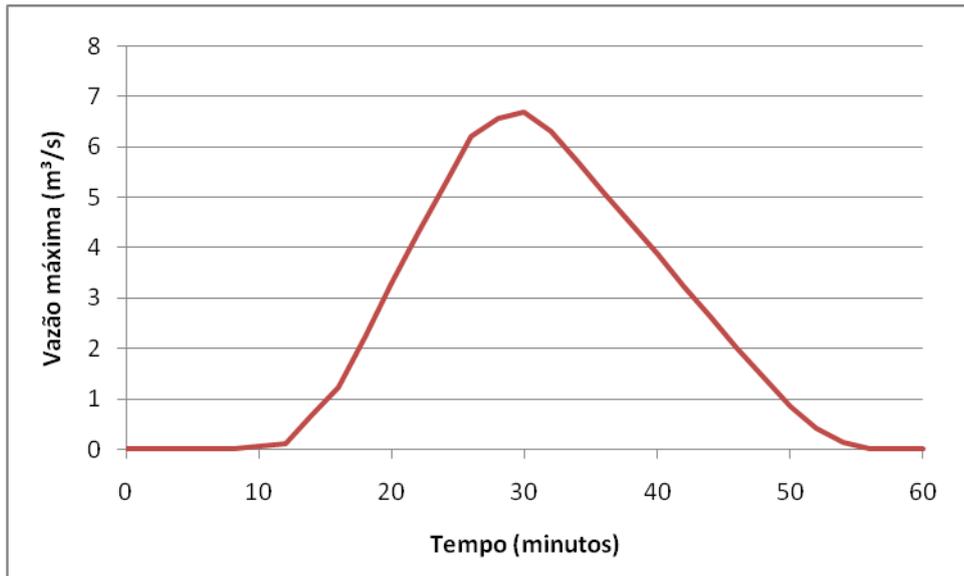
Hidrogramas total e amortecido para a barragem São Pedro



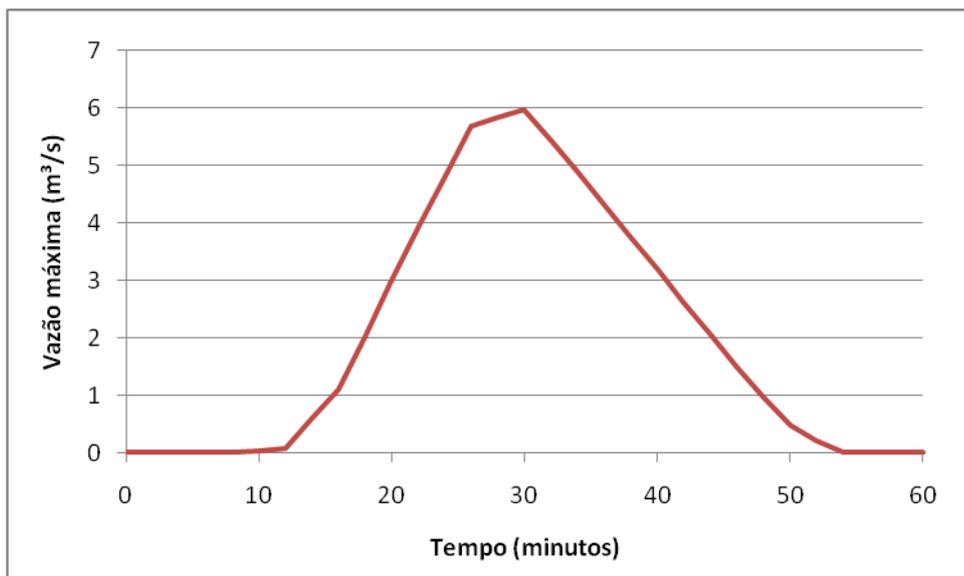
Hidrogramas total e amortecido para a barragem São Paulo



Hidrogramas total e amortecido para a barragem Samuara



Hidrograma total para a barragem Galópolis Inferior



Hidrograma total para a barragem Galópolis Superior