

INSTRUMENTOS DE AVALIAÇÃO E GESTÃO DE IMPACTOS GERADOS POR RUPTURA DE BARRAGENS

Sandra Uemura¹ & José Rodolfo Scarati Martins²

RESUMO --- Barragens são estruturas geralmente construídas transversalmente a um rio, tendo como objetivos, a geração de energia elétrica, a captação de água para abastecimento público, o controle de cheias e a navegação. Devido às grandes dimensões envolvidas, dos impactos provocados e dos investimentos necessários, as barragens devem ser sempre seguras, pois acidentes a ela relacionados, geralmente ligados a liberação dos volumes de água acumulados, afetam fortemente o meio ambiente e a sociedade em geral, incluindo vidas humanas. Desta forma, ferramentas que permitam a previsão destes impactos, e a subsequente organização de planos de ações preventivas e emergenciais, fazem parte das rotinas de projeto, construção e operação destes empreendimentos. Neste trabalho apresenta-se um estudo metodológico aplicado à Barragem Guarapiranga-SP voltado para a gestão de emergências ocasionadas por rupturas de barragens, visando o estabelecimento de rotinas para a avaliação dos impactos, através de ferramentas capazes de simular o efluente de um acidente hidrológico ou estrutural, seu desenvolvimento na forma de uma onda de cheia que se propaga pelo vale a jusante e finalmente, a proposição de uma seqüência de atividades relacionadas à interpretação dos resultados das simulações, que permitam a formação dos planos de ações preventivas e emergenciais.

ABSTRACT --- Dams are structures usually built across a river with goals of, generation of electricity, public water supply, flood control and navigation. Due to the large dimensions, the caused impacts and the necessary investments, the dam must be safe because accidents usually release big amount reserved water and strongly affect the environment and the society, including human lives. Thus, tools those are able to predict such impacts and then, construct plans for the preventive and emergency actions, must be part of the routine of design, built and operation of those dams. This work presents a methodological study applied to a Guarapiranga Dam – SP for the management of emergencies caused by dam-breaks, with the purpose of establishing routines to evaluate the impacts, with the using of tools that are able to simulate the effluent flow of a hydrologic or structural failure, and its wave propagation through the downstream. Finally this work proposes a sequence of activities related to interpretation of the simulation results that allow the construction of plans for preventive and emergency plans.

Palavras-Chave: Rompimento de Barragens, Mapas de Inundação, Plano de Ações Emergenciais

¹ Aluna do programa de Mestrado do Curso de pós-graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP e Engenheira Civil da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. sandrauemura@gmail.com.

² Professor Assistente da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. scarati@usp.br

INTRODUÇÃO

Países desenvolvidos, que possuem recursos financeiros e infra-estrutura com tecnologias mais avançadas, já empregam técnicas de conservação, reutilização e “reciclagem” capazes de conservar a quantidade necessária para o consumo de acordo com a procura do recurso. Em muitas outras regiões onde a disponibilidade hídrica é desuniforme, crítica, principalmente no que diz respeito ao abastecimento humano, o homem não pode renunciar ao auxílio das barragens para formação de reservatórios. Durante milhares de anos as barragens têm servido para garantir, em determinadas estações do ano, quantidades suficientes de água para o abastecimento público e geração de energia, armazenando água nos períodos de cheia para posterior utilização nos períodos de seca.

A segurança de uma barragem está associada a muitos fatores interligados, como seu partido hidráulico e estrutural, condicionantes geológicos, geotécnicos, hidrológicos e meteorológicos, bem como à própria falha humana na concepção, implantação, operação e manutenção da mesma. Um dos conceitos aceitáveis em diferentes partes do mundo é o da previsão e gestão dos impactos, através do planejamento. Este pode ser feito a partir de diferentes ferramentas de modelação, dentre as quais se destacam os modelos estatísticos e os determinísticos ou de simulação. Nos primeiros, a avaliação dos impactos é reduzida essencialmente a fatores econômico-financeiros, e procura criar uma estratégia de decisão que associa quaisquer danos a valores de risco previamente definidos com base no histórico de eventos similares. Na segunda procura-se simular processos físicos típicos dos acidentes de barragens, delimitando-se a área dos danos e então quantificando-se seus prejuízos.

As vantagens do segundo em relação aos primeiros é claramente visível, pois algumas peculiaridades relacionadas aos acidentes com barragens podem ser aventadas:

Embora acidentes com barragens impliquem na liberação de grandes volumes de água para jusante, raramente o comportamento dos mesmos leva a uma correlação entre causas e efeitos consistente e que possa ser generalizada. A gestão da crise ou emergência é um aspecto que altera totalmente a interpretação real dos motivos geradores do fato. Este aspecto foi observado nas repercussões do acidente com os diques da cidade norte-americana de Nova Orleans, durante o evento do Furacão Catrina. Desta forma, o desenvolvimento e a sofisticação das sociedades exige que o planejamento e a implantação de empreendimentos passe a englobar também a análise de seus impactos em caso de acidentes, independentemente de suas causas, como fator inerente ao risco. Isto significa que, na concepção destes empreendimentos, afetarão o risco final do mesmo a existência do conhecimento prévio dos impactos decorrente de falhas diversas e da forma de tratá-las. Neste trabalho objetiva-se analisar e discutir o processo de gestão dos impactos gerados por ruptura de barragens, através do estudo hipotético de ruptura da barragem Guarapiranga localizada no município de São Paulo/SP. O estudo engloba as técnicas de previsão e simulação da falência estrutural destas obras, a propagação

das ondas de cheia efluentes e a formação de planícies de inundação. Como resultado deste processo, pretende-se discutir a metodologia para elaboração dos planos de contingência e gerenciamento destas emergências.

METODOLOGIA

A metodologia adotada buscou avaliar as potencialidades de formação das brechas provocadas pelos fenômenos de overtopping e falência estrutural do maciço de terra. Os critérios empregados basearam-se na análise de fatores ligados às características do barramento, que resultaram na indicação de uma seção considerada com maior potencial de ser afetada por estes fenômenos. O conhecimento e o entendimento do fenômeno de propagação de ondas geradas por ruptura de barragens são de fundamental importância na escolha das equações que mais adequadamente descrevem o fenômeno, bem como na determinação de sua faixa de validade, e ainda na escolha e aplicação de métodos numéricos mais adequados para resolução das equações selecionadas.

Mecanismos de Ruptura

Nas últimas décadas, muitos avanços têm sido alcançados no campo da modelação dos processos de ruptura de barragens (Martins, 2003). Nos estudos realizados para o estabelecimento de ruptura de barragens de terra, enrocamento ou concreto, buscou-se contemplar a avaliação de todos os principais condicionantes hidráulicos e geotécnicos que consideram os possíveis mecanismos de rompimento, ou seja, falência estrutural e a falência hidráulica das barragens.

Por falência estrutural de uma barragem entende-se a ruptura originada por causas inerentes ao próprio barramento, em contraposição àquelas originadas por causas hidrológicas como o excesso de vazão ou a condutividade insuficiente de algum órgão. O processo mais recorrente é o piping, que se pode traduzir por retro-erosão, correspondente ao fenômeno de erosão interna que progride de jusante para montante em função do fluxo hidráulico no interior de uma massa do barramento. Este fluxo, iniciado sob condição de gradiente de pressão elevado, é capaz de carrear materiais do aterro formando canais dentro da massa do mesmo, que evoluem em sentido contrário ao do fluxo de água. Este fenômeno é mais freqüente no início dos chamados 'períodos secos', pois nesta situação os reservatórios encontram-se totalmente cheios tendo em vista que o atendimento das demandas de água durante a seca dispensa da alocação de volumes de espera para controle de cheias. Embora observado com maior freqüência em maciços de solo, também afeta estruturas mistas de terra-enrocamento e concreto compactado.

Também podem ser consideradas como falhas estruturais, aquelas ocorridas nas fundações das barragens, oriundas das acomodações geológicas quando da saturação do material da fundação por infiltração (Collischonn, 1998) e as imperfeições construtivas no contato entre o maciço estrutural e o solo existente nas margens, usualmente chamadas de 'ombreiras'.

O overtopping corresponde ao fenômeno de galgamento ou transbordamento da barragem, ou seja, a passagem das águas sobre a estrutura da mesma, resultado da chegada de uma onda de cheia excepcional, de uma falha operacional do reservatório ou ainda da falta de condutividade hidráulica de algum órgão como os dispositivos de extravasamento. Este fenômeno está associado a um evento hidrológico extremo, onde o volume do reservatório e as estruturas de descarga da barragem não são suficientes para armazenar e extravasar a quantidade de água.

Pode-se citar ainda como fenômeno causador do overtopping, a formação de uma onda no interior do reservatório, provocada pelo aporte de grandes quantidades de material para o mesmo, ocasionado pelo deslizamento de encostas do reservatório ou por abalos sísmicos. A brecha é uma abertura formada na barragem pela qual a água do reservatório escoar, alterando progressivamente sua forma. A modelação da evolução da brecha na barragem é de fundamental importância no processo de simulação de rompimento, quando da simulação de cenários como acidentes provocados por eventos de cheia. Entende-se que a evolução da brecha depende das características do material a ser erodido e da energia associada ao escoamento através dela. As variáveis envolvidas são a vazão, o nível d'água no reservatório, a velocidade a montante da brecha, a forma da soleira formada na brecha e o tempo do fenômeno.

A determinação das prováveis dimensões das brechas, do tempo de ruptura e da estimativa da vazão máxima através das brechas foi feita de acordo com os trabalhos apresentados por MacDonald et al.(1984) e por Fread et al.(1998). Os autores apresentaram ábacos para a estimativa das características das brechas com base em resultados da análise de dezenas de casos reais de ocorrência dos fenômenos em pauta, em barragens de pequeno a médio portes, que romperam no início do século passado por overtopping ou piping. Destaca-se que o uso destes ábacos e fórmulas, quando extrapolado para barragens bem projetadas e construídas com tecnologias modernas, pode gerar algumas imprecisões na estimativa dos parâmetros de ruptura e que este estudo se restringe a considerar as condições projetadas da obra, não levando em conta as condições execução e grau de compactação do maciço de terra, como é praxe na análise de estruturas já construídas.

Modelo CLiv Plus

O modelo hidrodinâmico unidimensional CLiv Plus, desenvolvido Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica – CTH (FCTH, 2001) deriva do aperfeiçoamento da tecnologia de simulação e análise de propagação de ondas de enchentes em canais já consagrada desde os anos 1990 com o Modelo CLiv. Para incorporar os efeitos provocados por rompimento de barragens foram introduzidas as equações desenvolvidas por Fread & Lewis (1998) e o acoplamento de condições de contorno tipo 'reservatório' para as extremidades de montante e jusante, de forma a permitir também a simulação de cadeias de barragens. Neste modelo, o tratamento genérico do escoamento

em canais é baseado na utilização das Equações Básicas de Saint-Venant, as quais se derivam da aplicação das equações de Navier-Stokes reduzidas a uma dimensão, combinando os princípios da conservação da massa e da quantidade de movimento. O modelo apresenta ainda a possibilidade de geração de um modelo digital de terreno - MDT (Digital Terrain Modeling - DTM) consiste na geração de uma grade ou malha de pontos igualmente espaçados a partir das coordenadas (x,y,z) de pontos conhecidos, adquiridos segundo uma distribuição irregular no plano xy – por exemplo, pontos obtidos em levantamentos topográficos.

Com relação à aplicação do modelo na simulação de cenários dam-break, algumas observações são pertinentes. Inicialmente, observa-se que a acuracidade com que os cenários de dam-break podem ser modelados é consideravelmente menor que a obtida na modelação dos cenários tradicionais de escoamento em rios e canais. No primeiro caso, as condições do escoamento são muito mais complexas e os dados disponíveis para validação dos resultados são escassos. Há, ainda, incertezas relativas aos mecanismos de ruptura e formação de brechas e à modelação da propagação de ondas de grande magnitude - sobretudo em sua interação com a topografia do vale e com a infra-estrutura existente, como pontes, rodovias e áreas urbanas – que não devem ser desprezadas. Em função destas incertezas mencionadas, destaca-se a necessidade de se dar maior atenção às características globais da topografia do vale, as quais realmente influenciam na propagação da onda de dam-break. Pequenos detalhes da topografia serão submersos imediatamente à passagem da onda, não apresentando influência sobre o resultado final e tornando-se, assim, irrelevantes. Por outro lado, as planícies de armazenamento lateral mostram ter grande efeito no amortecimento da onda e nos níveis d'água resultantes.

Gestão de Emergências

Os impactos causados pelo rompimento de estruturas hidráulicas de barramento podem ser classificados de acordo com diferentes critérios, destacando-se aqueles que consideram os efeitos da perda do barramento e das estruturas em si, os impactos causados pela cheia efluyente e aqueles indiretos, causados pelos desdobramentos dos dois primeiros. No primeiro caso, citam-se os danos gerados pela perda do volume reservado, a interrupção do atendimento proporcionado pela barragem, prejuízos com a falta de energia, água e etc. No segundo caso, são computados os danos gerados pela cheia efluyente, como a destruição de pontes e estradas, interrupções diversas, a inundação de áreas urbanas e rurais com a conseqüente destruição de propriedades e outros bens, perdas de vida diretamente e função das cheias e etc. Por fim, os impactos indiretos são aqueles originados pelos desdobramentos dos anteriores, como doenças de veiculação hídrica, desabastecimento de gêneros de primeira necessidade como alimentos e remédios na região atingida, perda do valor das propriedades, fazendas e etc.

Assim, devido à possibilidade de ocorrência de rupturas em barramentos, faz-se necessário um planejamento antecipado, integrado à finalidade e características da estrutura, com o objetivo de se minimizar as probabilidades de ocorrência e os danos provocados pelas falhas.

A gestão da emergência deve englobar aspectos que procuram antes de mais nada, evitar ou reduzir o risco de ruptura de estruturas já implantadas, incluindo as chamadas medidas preventivas, como as inspeções das estruturas e dos equipamentos, a instrumentação da barragem, treinamento da operação e realização das manutenções preventivas e corretivas. São ações que visam eliminar ou reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas e desastres.

Considerando fatores como o porte da barragem, sua idade e histórico de inspeções e manutenções, condições geológicas e hidrológicas locais e a evolução observada da bacia a montante e a jusante, a gestão de eventuais emergências exige a elaboração de planos de ações rotineiras e emergenciais. No primeiro são realizadas tarefas de preparação e simulação para tratamento de emergências reais. No segundo são organizadas as estruturas para comando, comunicações, salvamento, normalização e reparação de danos. As premissas para a elaboração dos planos de ações são (adaptado de ELETROBRÁS, 2003 e FEMA, 1986):

- Quantificação dos riscos naturais, tais como os hidrológicos, geotécnicos, sísmicos e etc.;
- Avaliação dos riscos extraordinários como guerra, atentados e etc.
- Identificação e avaliação de impactos diretos e indiretos, estabelecimento dos mapas de inundações;
- Estabelecimento de ações preventivas como sistema de informações, monitoramento da bacia, dos agentes naturais, monitoramento estrutural, vigilância e segurança;
- Estabelecimento de modelos de previsão e identificação de eventos críticos;
- Rotinas de treinamento e simulação de ações emergenciais como evacuação, interrupção de estradas, paralisação no abastecimento de energia e água;
- Elaboração dos fluxogramas de notificações e do sistema de comunicações de emergência;
- Dimensionamento de equipamentos e mão de obra necessários;
- Dimensionamento dos estoques de suprimentos, fontes de energia de emergência.

Em função das possíveis alterações tanto sob o aspecto dos riscos como dos impactos, estes planos devem ser periodicamente atualizados e revisados.

ESTUDO DE CASO: SISTEMA GUARAPIRANGA

O Estado de São Paulo está organizado em 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI, sendo que sua Capital situa-se naquela considerada como em pior situação com relação aos conflitos de uso e de conservação dos recursos hídricos, a UGRHI – 6, denominada de Bacia do Alto Tietê. Tendo que dar suporte a cerca de 50% da população do Estado, 2/3 de suas indústrias e

servir de referência principal para o Brasil, os problemas de gestão são vultuosos e demandam, além de boa dose de tecnologia, grandes investimentos financeiros. O abastecimento de água na Região Metropolitana de São Paulo é basicamente feito por 4 sistemas principais e outros tantos secundários, interligados parcialmente através do próprio sistema adutor de água: Sistema Cantareira, Sistema Guarapiranga, Sistema Alto-Tietê e Sistema Cotia. O território da bacia do Alto Tietê é quase o mesmo da RMSP. (ALTO TIETÊ, 2002), sendo ocupado por 39 municípios incluindo a cidade de São Paulo, com uma área territorial de aproximadamente 8.000 km², sendo 2200 km² de área urbanizada e população de aproximadamente 20.000.000 de habitantes (IBGE, 2007).

O Sistema Guarapiranga está localizado na zona Sul do município de São Paulo, sendo composto por um reservatório com altura máxima de aproximadamente 14m (LIGHT, 1978). A barragem Guarapiranga foi construída entre 1906 e 1907 pela LIGHT S.A. com o objetivo de regularizar a vazão do rio Guarapiranga e permitir seu aproveitamento para geração de energia elétrica por meio da reversão de suas águas para o reservatório Billings, adjacentes a ela, além de contribuir para o abastecimento de água da cidade de São Paulo. Esta barragem foi executada parcialmente através de aterro hidráulico e completada com aterro compactado, sendo dotada em sua ombreira esquerda três descargas de fundo com capacidade de cerca de 50m³/s cada uma e um vertedouro escavado em rocha, com soleira na cota 732,60 m, e dotado de comportas tipo segmento. Originalmente situada em área desocupada, a evolução da metrópole e as precárias condições de fiscalização e conservação adotadas no passado, fizeram com que suas margens fossem completamente urbanizadas, sendo atualmente fortemente. Da mesma forma se comportou o vale a jusante, ocupado atualmente com importantes vias expressas, linhas férreas e metroviárias, além de entroncamento de 8 das principais rodovias do Brasil.

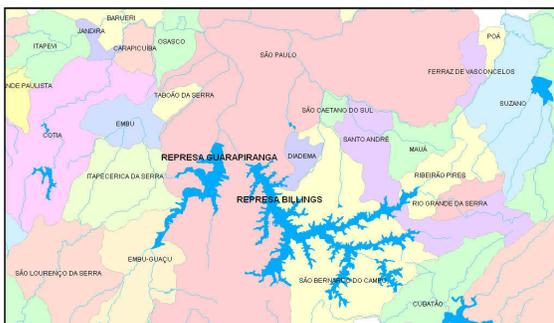


Figura 1: Esquema do Sistema Guarapiranga - Billings



Figura 2: Região Metropolitana do Estado de São Paulo

Componente do segundo maior sistema produtor de água de São Paulo, a represa Guarapiranga localiza-se próxima a Serra do Mar, sendo um subsistema da Bacia do Rio Pinheiros, afluente do Rio Tietê. O reservatório é formado pela contribuição dos rios Embu-Mirim, Embu-Guaçu, Santa Rita, Vermelho, Ribeirão Itaim, Capivari e Parelheiros e permite a regularização média anual para a

produção de 14 m³/s de água, abastecendo as zonas sul e sudoeste da Capital do Estado de São Paulo.

Nos dias 27, 28 e 29 de janeiro de 1976 fortes chuvas fizeram com que o nível do reservatório Guarapiranga começasse a subir. Este “fenômeno” teve seu início a partir das 12 horas do dia 28 de janeiro de 1976, fazendo com que o nível de água no reservatório chegasse à cota 736,62m (cota da crista do vertedor) às 00:00h do dia 29 e a cota 736,67m (máximo atingido no evento) às 12:00h do dia 31 de janeiro de 1976. Durante esse período de 72 horas, o reservatório sofreu um acúmulo adicional no seu volume de aproximadamente 67 milhões de metros cúbicos (cerca de 34% de sua capacidade máxima). As comportas de fundo foram acionadas a partir das 21:30h do dia 29, com a última operação executada somente no dia 30 às 10:00h. Foram colocados sacos de areia com o intuito de garantir uma altura adicional de 0,88m na possibilidade de ocorrência de mais chuva, permitindo um armazenamento de mais 30 milhões de metros cúbicos.

Medições de vazões realizadas no dia 31 de janeiro de 1976, em postos fluviométricos do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo e pela então Companhia LIGHT, determinaram um valor aproximado de 91m³/s de vazão no canal Guarapiranga. O hidrograma de cheia foi constituído somando-se a vazão descarregada a jusante, a vazão aduzida pela SABESP e as vazões calculadas correspondentes às variações de volume do reservatório de Guarapiranga.

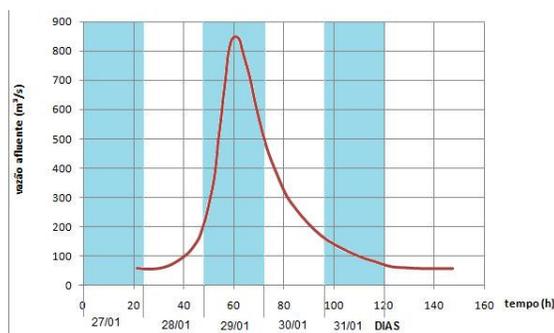


Figura 3: Hidrograma da Cheia de Janeiro de 1976 . Adaptado de LIGHT (1978)

A partir deste hidrograma, pode-se observar que o pico da cheia fluente atingiu aproximadamente 850 m³/s e a vazão média de 24 horas igual a aproximadamente a 660 m³/s. A enchente durou aproximadamente 30 horas e a vazante 70 horas. O volume total desta cheia resultou em 43% (95 milhões de metros cúbicos) do volume do reservatório Guarapiranga.

Desta forma, considerando-se tanto a importância do manancial para a Cidade de São Paulo, como a magnitude dos impactos diretos e desdobramentos de um eventual acidente que envolvesse a liberação do volume de água reservado, a Barragem Guarapiranga constitui-se num importante exemplo para este estudo metodológico.

Características do Sistema Guarapiranga

A barragem Guarapiranga se compõe de um maciço de terra com as seguintes características:

Tabela 1: Características do Sistema Guarapiranga	
Volume do Aterro (m ³)	490.000
Cota da Crista (m)	738,60
Cota da crista do vertedor (m)	736,62
NA máximo normal (m)	735,00
NA máximo maximorum (m)	738,10
Fim das Obras	1909
Área de Drenagem (km ²)	631,00
Volume Útil (m ³)	200.000.000

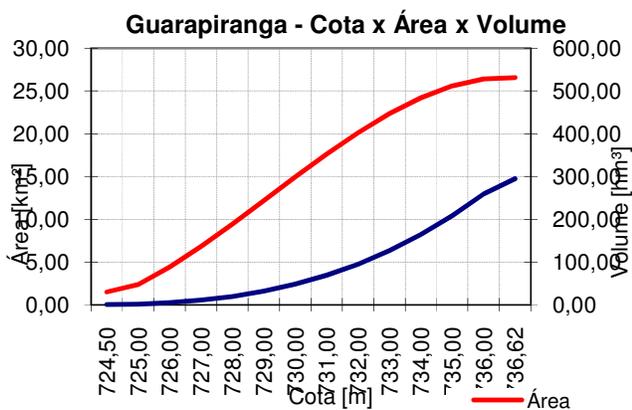


Figura 4: Curva Cota-Área-Volume do Reservatório Guarapiranga

Após o evento ocorrido em 1976, a Eletropaulo S.A. sucessora da Ligth S.A., promoveu a implantação de reformas na estrutura vertente, mantendo-se as descargas de fundo e implementando-se em parte do vertedouro existente uma nova soleira, desta feita livre, na cota 736,60m, com cerca de 45 m de extensão. Foram mantidas 4 comportas originais, num vão total de 24 m. As áreas inundadas pelo reservatório formado e o volume acumulado são determinados em função do nível d'água através das curvas apresentadas na Figura 4.

Para a identificação de pontos notáveis situados em áreas possivelmente inundadas da região em estudo, faz-se necessário possuir uma base fotográfica confiável, que permita a detecção de pontos críticos de interesse. Para este estudo, foram utilizadas imagens do satélite IKONOS-II (FUNCATE – 2003).

A determinação das prováveis dimensões das brechas e do tempo de ruptura foi feita com base em fórmulas empíricas divulgadas por Fread et al. (1977). Destaca-se que este estudo se restringe a considerar as condições documentadas obra, não levando em conta ensaios e variações nas condições de execução, como e grau de compactação do maciço de terra, praxe usual na análise de estruturas já construídas.

A partir dos estudos desenvolvidos por Fread & Lewis (1998), considerando parâmetros como a largura da brecha, altura da barragem, volume do reservatório, foi possível estimar o tempo de ruptura, bem como a vazão de pico no caso de ruptura da barragem. Para a barragem Guarapiranga foram analisadas duas possibilidades de altura de brecha considerando as seções transversais do maciço. Sendo assim, foram consideradas duas situações: a primeira com a cota final da base da brecha, na cota 725,00m e a segunda com a cota final da base da brecha na cota 728,00m.

Tabela 2: Valores Máximos Obtidos das Simulações de Rompimento da Barragem Guarapiranga

	Qafluente	Qefluente	N.A. montante	N.A. jusante	
	m ³ /s	m ³ /s	m	m	
Overtopping	Cenário 1	848,15	7779,33	738,6	733,46
	Cenário 2	848,15	8557,25	738,6	733,46
	Cenário 3	848,15	9699,63	738,6	733,46
	Cenário 4	848,15	11393,24	738,6	733,46
	Cenário 5	848,15	8928,77	738,6	733,46
	Cenário 6	848,15	9814,52	738,6	733,46
	Cenário 7	848,15	10957,68	738,6	733,46
	Cenário 8	848,15	12506,93	738,6	733,46
	Cenário 9	848,15	4257,21	738,6	733,46
	Cenário 10	848,15	9699,63	738,6	733,46
	Cenário 11	848,15	12307	738,6	733,46
	Cenário 12	848,15	4415,96	738,6	733,46
	Cenário 13	848,15	10957,68	738,6	733,46
	Cenário 14	848,15	14162,41	738,6	733,46
	Cenário 15	848,15	12769,66	738,6	733,46
	Cenário 16	848,15	9699,63	738,6	733,46
	Cenário 17	848,15	8224,1	738,6	733,46
	Cenário 18	848,15	10957,68	738,6	733,46
	Cenário 19	848,15	13406,04	738,6	733,46
	Cenário 20	848,15	8380,48	738,6	733,46
Piping	Cenário 21	58,95	7487,09	735	733,33
	Cenário 22	58,95	5768,52	733,63	732,6
	Cenário 23	58,95	4233,55	731,83	732,6

Para as duas situações foi estimada a altura de água sobre a brecha (h_d) pela subtração da cota da crista da barragem pela cota final da base da brecha. Sendo assim:

Situação 1: $h_d = 10,60\text{m}$;

Situação 2: $h_d = 13,60\text{m}$;

Considerando a cota da crista da barragem igual a 738,60m e o volume de água correspondente igual a 429,19 hm³, foi possível determinar, através das formulas empíricas de Fread & Lewis (1998), a largura média da brecha. Os valores resultantes para as situações apresentadas acima são:

Situação 1: $b = 171\text{m}$;

Situação 2: $b = 182\text{m}$;

O tempo de ruptura foi estimado levando em consideração o volume do reservatório no início da ruptura e a altura de água sobre a brecha.

Situação 1: $\tau = 9,8$ horas – aproximadamente 9 horas e 50 minutos;

Situação 2: $\tau = 7,8$ horas – aproximadamente 7 horas e 50 minutos;

Uma vez definidos os parâmetros ‘tempo de evolução da brecha’ e ‘largura da brecha’, puderam ser elaborados alguns cenários de ruptura visando à simulação no modelo matemático Cliv Plus e a determinação de linhas d'água e áreas inundáveis resultantes. Para as simulações de overtopping foram elaborados cenários considerando a variação dos parâmetros: expoente de evolução da brecha, largura da brecha e tempo de ruptura. Os cenários foram elaborados com o propósito de avaliar a sensibilidade dos parâmetros adotados e sua influência na cheia resultante.

Para todos os cenários simulados, foi considerado o evento ocorrido em janeiro de 1976, cujo hidrograma está apresentado na Figura 3 e que, tanto na situação original das obras, como sob as novas condições das estruturas, isto é, a reforma e aplicação promovida em 1978, não resultam em potencial galgamento. A condição de overtopping foi obtida simulando-se uma condição na qual o reservatório, no início do evento, foi admitido como no máximo de sua capacidade, isto é na cota 736,00m e portanto acima do nível meta de controle de cheias usual, 735,00m.

A elaboração dos cenários para a simulação de piping levou em consideração o volume de água presente no reservatório. Sendo assim, foram consideradas três situações, correspondentes ao reservatório cheio, isto é, no N.A. meta de 735,00 m, que reserva a faixa de 1m para controle de cheias, o segundo considerando 70 % do volume do reservatório e o terceiro, considerando o reservatório operando com 40% de sua capacidade.

Os valores máximos obtidos nas simulações de rompimento estão apresentados na tabela Tabela 2.

Com base nos estudos elaborados anteriormente foram selecionados três cenários para a avaliação da propagação da cheia efluente no sistema de rios a jusante. Para as simulações de overtopping, foram selecionados três cenários compreendendo uma situação extrema, uma intermediária e outra menos severa. São estas:

- Cenário 7: Este cenário apresenta os valores estimados segundo as fórmulas empíricas apresentadas por Fread & Lewis (1998) cujos parâmetros largura da brecha e tempo de ruptura são 182,0m e 7,8h respectivamente;
- Cenário 12: Onde o parâmetro largura da brecha foi fator determinante para esta escolha. O hidrograma efluente desta simulação apresentou uma vazão de pico inferior a 4.500 m³/s;
- Cenário 19: Cujo parâmetro determinante foi o tempo de ruptura da barragem. Neste cenário, a vazão efluente máxima foi superior a 13.000 m³/s para o tempo de ruptura igual a 4 horas.

Para complementar os cenários de simulação das cheias resultantes, foram considerados os três cenários de piping foram elaborados, com o intuito de avaliar a sensibilidade do modelo no que diz respeito ao volume de água em que se encontrava o reservatório. Neste caso, serão apresentadas nos itens a seguir a propagação dos hidrogramas gerados e a mancha de inundação, para estes três cenários.

A simulação da propagação da onda contemplou o canal Guarapiranga, toda extensão do Rio Pinheiros, desde a Barragem Pedreira/Billings até a barragem reguladora denominada Estrutura de

Retiro, seguindo até a confluência com o Rio Tietê. Este foi considerado deste uma seção situada 6 km a montante da confluência, desde a Ponte do Limão, até a Barragem Edgard de Souza.

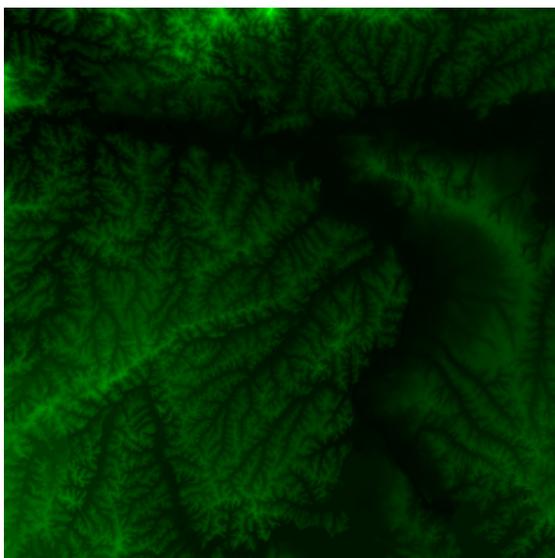


Figura 5: Porção do MDT gerado pela FUNCATE (2003) na região do estudo, observando-se nas zonas escuras os vales dos Rios Guarapiranga, Pinheiros e Tietê.

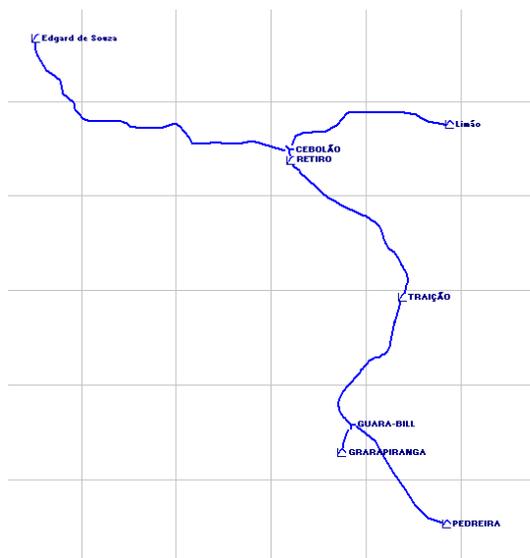


Figura 6: Rede de simulação da onda de enchente Efluente resultante do rompimento da Barragem Guarapiranga.

A delimitação da área de inundação é feita sobre uma superfície topográfica previamente gerada por meio de uma modelagem digital de terreno (MDT), que consiste na geração de uma malha de pontos igualmente espaçados a partir de coordenadas de pontos conhecidos, adquiridos segundo uma distribuição irregular, ou seja, pontos obtidos de um levantamento batimétrico, curvas de nível, etc. Para a geração das áreas inundadas resultantes do rompimento da Barragem Guarapiranga, foi utilizada parte do MDT desenvolvido pela FUNCATE (2003). O modelo gerado foi baseado em cartas 1:10.000 e 1:25.000 e possui resolução altimétrica de 5,0m e 10,0m, para as áreas conurbadas e periféricas da RMSP respectivamente, e resolução horizontal de 20.

Os valores dos níveis de águas calculados na simulação são confrontados com essa superfície topográfica e nos pontos onde o N.A. ficar acima da cota do terreno, estes pontos são considerados inundados (Figura 7). Este processo foi efetuado para os níveis máximos ocorridos ao longo do canal.

Para a simulação da propagação da onda de cheia ao longo da calha Guarapiranga, Rio Pinheiros e Rio Tietê, foi concebida uma rede de fluxo composta de nós e trechos, como apresentada na Figura 6. Nesta rede estão estabelecidos nós que representam as condições de contorno que foram determinadas para o cálculo. Em cada nó da rede são definidas as condições externas a serem consideradas nos cálculos. Aos trechos são associados os dados hidrogeométricos, tais como seções transversais.

Para o presente estudo foram identificados alguns pontos notáveis ao longo do canal Guarapiranga e do Rio Pinheiros, que merecem ser interpretados para a obtenção de informações para a construção dos planos de ação. A seleção destes pontos foi norteada por fatores como:

- localização de equipamentos urbanos fundamentais ou que possam apresentar grande ocupação de pessoas, como hospitais, escolas, praças esportivas, estações metroviárias ou ferroviárias
- corredores de tráfego rodoviário vitais para entrada e saída das áreas atingidas
- corredores de acesso aos hospitais e demais locais destinados ao tratamento de emergência, alojamentos provisórios e centros de decisão
- centros de abastecimento
- estações de tratamento de água, elevatórias, subestações elétricas
- infra-estrutura aeroportuária, ferroviária e rodoviária urbana

Para cada ponto foram obtidos, a partir do modelo matemático, as informações relativas aos instantes de início e fim de inundação, níveis e vazões máximos atingidos bem como tempo em que o equipamento ou infra-estrutura fica inacessível.

A título de exemplo, foram selecionados os seguintes pontos: Barragem Guarapiranga, confluência entre o canal Guarapiranga e o Rio Pinheiros, Ponte Estaiada (Av. Jornalista Roberto Marinho/Água Espraiada), Ponte da Av. Eusébio Matoso, Ponte Jaguaré, Cebolão (confluência entre os Rios Pinheiros e Tietê). A Figura 8 apresenta a localização destes pontos notáveis.

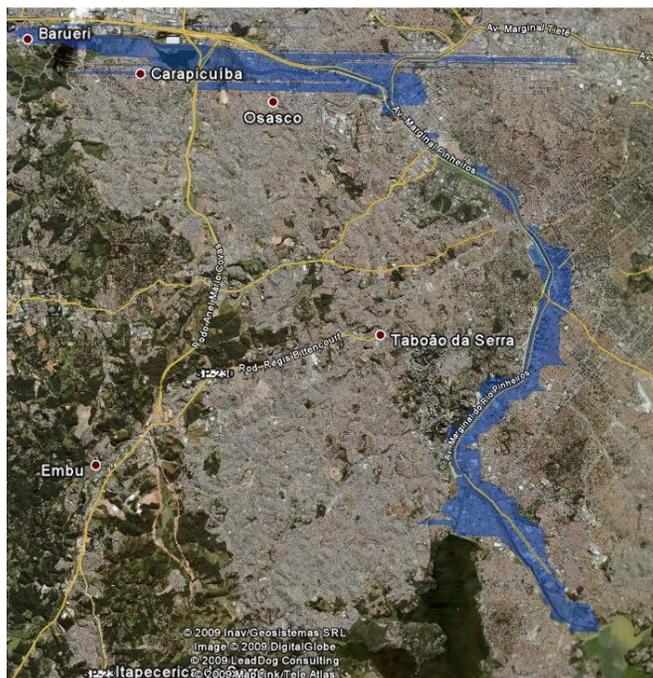


Figura 7: Área Inundada para o Rompimento da Barragem Guarapiranga no Cenário 7. Adaptado de Google Earth (2009)

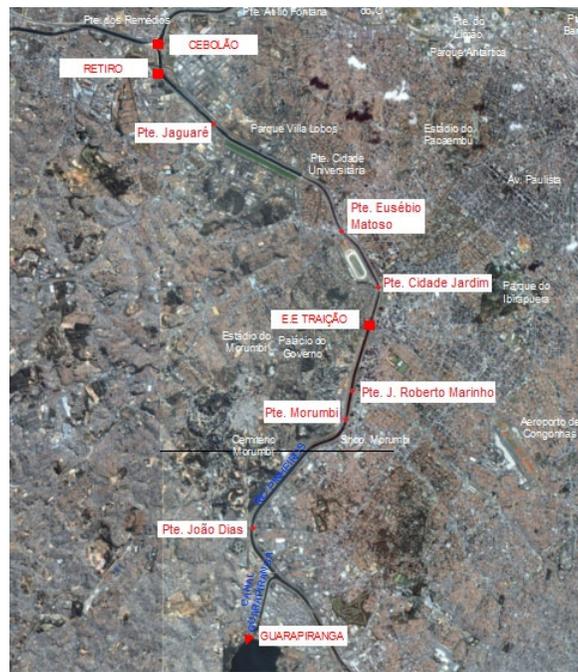


Figura 8: Pontos Notáveis no Canal Pinheiros

Os resultados obtidos das simulações para estes pontos notáveis esta resumidos nas tabelas a seguir.

Tabela 3: Resultados das Simulações da Onda de Enchente

		Conf. Guarapiranga-Pinheiros				Ponte	
		Guarapiranga	Canal	Rio Pinheiros	Rio Pinheiros	João	
			Guarapiranga	Montante	Jusante	Dias	
cenário 7	Qmáx	[m ³ /s]	10957,68	9388,45	756,82	4515,29	3986,81
	Tempo	[h]	9,00	9,33	20,00	9,67	11,33
	NA máx	[m]	728,43	727,56	727,25	727,40	726,14
	Tempo	[h]	9,67	10,67	11,00	11,00	13,67
cenário 12	Qmáx	[m ³ /s]	4415,96	3625,87	391,11	1851,39	1728,30
	Tempo	[h]	9,00	10,00	37,00	12,67	15,33
	NA máx	[m]	726,26	725,98	725,84	725,91	725,31
	Tempo	[h]	13,67	15,33	16,33	15,67	30,00
cenário 19	Qmáx	[m ³ /s]	13406,04	10669,80	774,09	4945,66	4177,63
	Tempo	[h]	5,00	5,67	17,33	6,00	8,00
	NA máx	[m]	728,62	727,67	727,35	727,50	726,19
	Tempo	[h]	6,00	7,67	8,00	7,67	10,67
cenário 21	Qmáx	[m ³ /s]	7487,09	5942,53	363,41	2755,62	1982,45
	Tempo	[h]	4,00	5,33	17,67	5,67	8,33
	NA máx	[m]	726,85	726,20	726,00	726,09	724,94
	Tempo	[h]	5,67	7,33	8,00	7,67	9,33
cenário 22	Qmáx	[m ³ /s]	5768,52	4399,90	269,52	2048,25	1305,94
	Tempo	[h]	4,00	5,67	18,67	6,33	8,67
	NA máx	[m]	726,17	724,75	725,39	725,47	724,15
	Tempo	[h]	6,00	7,00	8,00	7,67	9,67
cenário 23	Qmáx	[m ³ /s]	4233,55	2718,23	166,20	1227,88	692,94
	Tempo	[h]	5,00	5,67	19,67	6,33	9,33
	NA máx	[m]	725,29	724,58	724,58	724,65	723,44
	Tempo	[h]	5,67	8,67	8,67	8,33	20,67

Tabela 4: Resultados das Simulações da Onda de Enchente (cont.)

			Estrut. Retiro				
			Ponte	Ponte	Ponte	Rio	Rio
			Estaiada	Eusébio	Jaguaré	Pinheiros	Pinheiros
			Montante	Jusante			
cenário 7	Qmáx	[m ³ /s]	2030,94	1421,38	1349,23	1275,16	1275,16
	Tempo	[h]	16,33	29	32	34	34
	NA máx	[m]	725,03	719,63	719,07	718,58	718,58
	Tempo	[h]	17,67	31,33	37	65,67	66
cenário 12	Qmáx	[m ³ /s]	1371,02	1175,91	1154,44	1120,03	1120,03
	Tempo	[h]	25	42,67	44,67	48	48
	NA máx	[m]	724,35	719,49	718,92	718,46	718,46
	Tempo	[h]	33,33	45,33	49,33	75	74,33
cenário 19	Qmáx	[m ³ /s]	2087,52	1449,01	1372,09	1292,25	1292,25
	Tempo	[h]	13	25,67	28,67	31	31
	NA máx	[m]	725,06	719,65	719,1	718,59	718,59
	Tempo	[h]	14,33	29	33	61,33	62
cenário 21	Qmáx	[m ³ /s]	889,38	715,67	683,04	667,82	667,82
	Tempo	[h]	16,33	30,33	39	39,67	39,67
	NA máx	[m]	723,45	719,02	718,57	717,66	717,66
	Tempo	[h]	17	36,67	37,33	58,67	58,67
cenário 22	Qmáx	[m ³ /s]	610,6	519,46	488,61	476,09	476,09
	Tempo	[h]	19,67	32	41,67	44,67	45
	NA máx	[m]	723,17	718,67	718,23	717,12	717,12
	Tempo	[h]	20,67	39,67	45,33	60,67	61,67
cenário 23	Qmáx	[m ³ /s]	369,44	342,64	328,46	321,41	321,41
	Tempo	[h]	24	35	38	41,67	41,67
	NA máx	[m]	722,71	718,23	717,68	716,4	716,39
	Tempo	[h]	24,33	37,67	43,67	58,33	59

DIRETRIZES PARA ELABORAÇÃO DO PLANO DE AÇÕES EMERGENCIAIS PARA A BARRAGEM GUARAPIRANGA

Os eventos que podem elevar os níveis de segurança variam a cada estrutura e a cada situação. Para tanto de acordo com os cenários elaborados e simulados, segue um roteiro para elaboração de um Plano de Ações Emergenciais para a Barragem Guarapiranga baseado nos exemplos citados. Sendo assim, o PAE Guarapiranga deve conter:

1. Lista de Atribuição de Responsabilidades

No caso de uma eventual ruptura, devem responder quanto às responsabilidades da Barragem Guarapiranga:

- Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A. – EMAE (Proprietária da Barragem Guarapiranga) – que deve coordenar a comunicação oficial sobre o acidente, disponibilizar emergencialmente os recursos a serem utilizados, etc.

- Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP (Operadores da Barragem Guarapiranga) – que deve comunicar externamente a ocorrência do acidente, proporcionar apoio às equipes executivas, aprovar a aplicação do PAE, etc.
- Equipes Executivas – devem coordenar todas as ações referentes aos atendimentos emergenciais, bem como avaliar o estado da emergência, notificar a Defesa Civil do município de São Paulo, Prefeituras dos municípios de São Paulo, Guarulhos, Barueri, Carapicuíba, Complexos Hospitalares, Concessionárias rodoviárias (DERSA, ECOVIAS, VIA OESTE, AUTOBAN, Rodoanel), Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM), Companhia do Metropolitano de São Paulo (METRO), Companhia de Engenharia de Tráfego (CET), entre outros. Estes devem manter uma comunicação direta com os órgãos responsáveis pela operação da Barragem (SABESP).
- Equipe Local – deve operar e garantir o funcionamento dos equipamentos hidráulicos e os sistemas de comunicação/aviso, notificar a equipe executiva de quaisquer anormalidades, seguir o fluxo de informações.
- Observador – pessoa responsável que deverá notificar e avisar caso haja qualquer anormalidade nas operações da barragem Guarapiranga. Este deve também relatar toda e qualquer alteração no nível da represa, documentar os acontecimentos, etc.

2. Fluxo de Notificações

Este fluxo deve ser seguido no caso de constatado à situação de emergência na Barragem Guarapiranga.

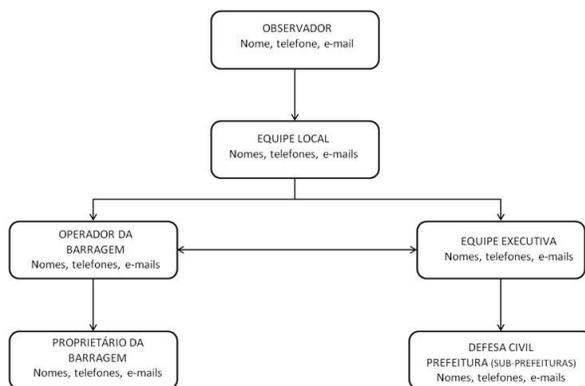


Figura 9: Fluxograma de Notificações

3. Sistemas de Comunicações

Devem estar disponíveis e em funcionamento todos os tipos de meios de comunicações, tais como rádios, telefones, celulares, e-mails, etc. de todas as pessoas envolvidas, principalmente àquelas cujos nomes constam nas atribuições de responsabilidades e fluxo de notificações.

4. Acessos ao Local

Dentro do PAE, deve haver um mapa de localização da Barragem Guarapiranga, com a sua localização e principais vias de acesso.

A barragem Guarapiranga está localizada no bairro do Socorro, zona Sul da cidade de São Paulo. O principal acesso a Barragem é feito pela Rua Vicente de Carvalho, próximo à Av. Guarapiranga (dando acesso à Marginal do Rio Pinheiros). Cabe ressaltar que a Marginal do Rio Pinheiros certamente será alvo das inundações provocadas pelo rompimento da Barragem Guarapiranga. Sendo assim, o Plano deverá conter acessos que permitam o trânsito das equipes que atuarão no combate as emergências.

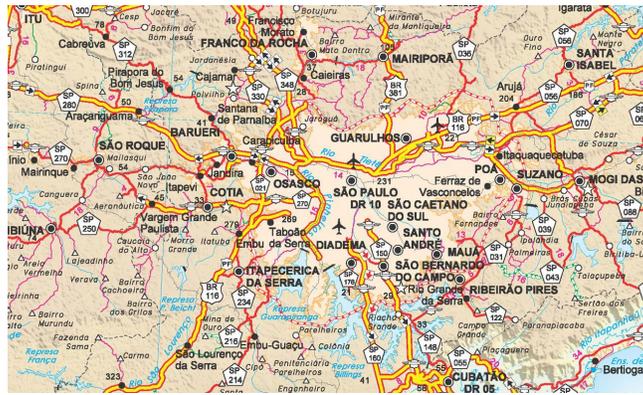


Figura 10: Mapa de Acesso a Barragem Guarapiranga (DER, 2008)

5. Mapas de Inundação

O PAE Guarapiranga deve conter mapas de inundação com sinalizações dos principais pontos de interesse devidamente identificados e com indicações do tempo de chegada da onda de enchente efluente. As figuras a seguir ilustram as áreas potencialmente atingidas pelas inundações causadas pelo rompimento da Barragem Guarapiranga. Foram selecionados três locais que compreendem na interdição de vias de tráfego – por exemplo a Av. Luiz Carlos Berrini – importante centro empresarial da cidade (Figura 12), no alagamento do principal centro de distribuição alimentícia da cidade – CEASA (Figura 11) e na interdição de uma das principais vias de acesso ao complexo hospitalar Clinicas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Para a elaboração dos mapas de inundação, neste estudo, foram utilizados sistemas simplificados de informações espaciais com imagens de satélite. Estes sistemas são popularmente conhecidos como Ferramentas CAD e Google Earth/Maps.

6. Apêndices

Neste item deve conter a descrição do projeto de execução da Barragem Guarapiranga; os estudos e análises de rompimento desenvolvidos para a Barragem Guarapiranga; demais documentos.

O PAE deve servir como um documento que auxilia nas ações a serem tomadas no caso do rompimento da barragem Guarapiranga.

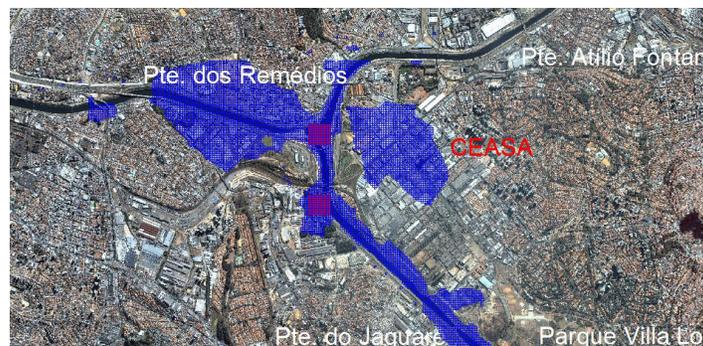


Figura 11: CEASA - Área Potencialmente Inundada causada pelo Rompimento da Barragem Guarapiranga no cenário 19



Figura 12: Av. Luiz Carlos Berrini - Área Potencialmente Inundada causada pelo Rompimento da Barragem Guarapiranga no cenário 19; e Ponte da Av. Eusébio Matoso - Área Potencialmente Inundada causada pelo Rompimento da Barragem Guarapiranga no cenário 22

CONCLUSÕES

As barragens são estruturas compostas de elementos projetados, construídos e operados de acordo com critérios de segurança que visam, entre outros aspectos, garantir o atendimento de suas finalidades precípuas, como criação de desníveis, a retenção e o armazenamento dos volumes o escoamento das cheias afluentes. Estes critérios seguem diretrizes institucionais e tecnológicas, consolidadas a partir da experiência reunida em sucessos e fracassos de muitos empreendimentos similares. Diversos fatores, entretanto, podem levar a situações onde tanto os critérios da segurança estrutural como da hidrológica podem ser insuficientes, ocasionando acidentes que resultam na ruptura destas estruturas. Estas situações, documentadas historicamente na literatura específica, levaram ao surgimento de toda uma área de estudo, relacionada à gestão da segurança de barragens. Os resultados do modelo permitiram a elaboração dos mapas de áreas potencialmente inundáveis, conforme preconizado em diversas recomendações pesquisadas. Para tal os perfis de linha d'água foram transformados em superfície de inundação e com o auxílio de aplicativos de CAD e SIG, sobrepostos modelos digitais de terreno e a imagens de satélite detalhadas para identificação de pontos notáveis para o planejamento de ações preventivas e emergenciais. No caso específico estudado verificou-se o comprometimento de importantes corredores de tráfego rodoviário, metroviário e ferroviário, vias de acesso a áreas inundadas, além de extensas regiões ocupadas por vias de tráfego local e edificações diversas. Desta forma, foi possível mapear não apenas os locais atingidos como o tempo de exposição dos mesmos.

A interpretação dos resultados permitiu ainda o levantamento de condicionantes para ações emergenciais, como a necessidade da preservação dos acessos a algumas pontes que cruzam a área inundável, de forma a permitir o acesso a estruturas importantes como centro hospitalares e centrais de abastecimento, bem como a necessidade de proteção do sistema ferroviário e metroviário no local, de forma a reduzir o impacto sobre a mobilidade na cidade.

Por fim, a proposição de diretivas para a elaboração de um plano de ações emergenciais para a Barragem do Guarapiranga ilustra a compilação das informações produzidas e a organização de um documento específico para gestão dos impactos.

Cabe ressaltar que este estudo se refere a uma hipotética ruptura da Barragem Guarapiranga, que levou em consideração os aspectos hidrológicos ocorridos em 1976.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALBI, D. A. (2008). Metodologias Para A Elaboração De Planos De Ações Emergenciais Para Inundações Induzidas Por Barragens. Estudo De Caso: Barragem De Peti - Mg. *Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito* , 354. Belo Horizonte, MG.

COLLISCHONN, W. (1997). Análise do Rompimento da Barragem de Enerstina. *Dissertação de Mestrado* , 213. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

EMAE. (2001). *EMAE*. Retrieved Março 2005, from Empresa Metropolitana de Águas e Energia S/A: <http://www.emae.com.br/>

ENERGIA, C. D. (2003). Projeto de Lei Nº 1181 de 2003. *Projeto de Lei Nº 1181 de 2003* .

FCTH - Fundação Centro Tecnológico Hidráulica. (2001). CLIV Plus. *Manual do Usuário* . São Paulo.

FCTH. (2006). Plano de Contingência para as Barragens Pertencentes ao Sistemas Cantareira, Guarapiranga e Alto Tietê. São Paulo, SP, Brasil.

FEMA. (2004, Abril). Emergency Action Planning for Dam Owners. *Federal Emergency Management Agency- U. S. Department of Homeland Security* , 34. USA.

FREAD, D. L. et al. (1998, Novembro). NWS FLDWAV Model. *Theoretical Description & User Documentation - National Weather Service NOAA* .

FUNCATE. (2003). *Relatório de Descrição dos Produtos de Sensoriamento Remoto" - contrato IG 003/2003 - Instituto Geologico*. São Paulo.

GOOGLE, E. (2009).

MACDONALD, T. C. et al. (1984). Breaching Characteristics of Dam Failure. *Journal of Hydraulic Division* , pp. 567-586.

MARTINS, J. R. (2003). Hidrodinâmica das Macro-rugosidades de Fundo em Canais. *Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo* . São Paulo, SP.

MARTINS, J. R., et al. (1989). Rompimento de Barragens. Cálculo Adimensional da Propagação da Enchente Efluente. *13º Congresso Latino Americano de Hidráulica - AIRH* , 561-573. Foz do Iguaçu.

UEMURA, S., et al. (2007, Novembro). Rompimento de Barragens: Estudo de Caso da Barragem Guarapiranga em São Paulo. *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos* . São Paulo, SP, Brasil: ABRH.

UEMURA, S., (2009, Maio). Instrumentos de Avaliação e Gestão de Impactos Gerados por Ruptura de Barragens. *Dissertação de Mestrado apresentada ao programa de pós-graduação da Escola Politécnica da Universidade São Paulo* , São Paulo, SP, Brasil