

**ESTUDO DA INUNDAÇÃO E PROPAGAÇÃO DA ONDA DE  
CHEIA PROVENIENTE DO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DE  
UMA BARRAGEM**

**Danilo Pontes Esteves**

Orientadora

**Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Nadia Bernardi Bonumá**

**2013/1**





Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico  
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental  
Trabalho de Conclusão de Curso

**ESTUDO DA INUNDAÇÃO E PROPAGAÇÃO DA ONDA DE  
CHEIA PROVENIENTE DO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DE  
UMA BARRAGEM**

Danilo Pontes Esteves

Orientadora  
Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Nadia Bernardi Bonumá

2013/1



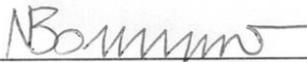
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL

ESTUDO DA INUNDAÇÃO E PROPAGAÇÃO DA ONDA DE  
CHEIA PROVENIENTE DO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DE  
UMA BARRAGEM

DANILO PONTES ESTEVES

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte  
dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação  
em Engenharia Sanitária e Ambiental – TCC II

BANCA EXAMINADORA:



Prof.ª. Dr.ª. Nadia Bernardi Bonumá  
(Orientadora)



Prof. Dr. Pedro Luiz Borges Chaffe  
(Membro da Banca)



Eng.ª. MSc. Patricia Kazue Uda  
(Membro da Banca)

Florianópolis, (SC)  
JULHO/2013



## AGRADECIMENTOS

Todos aqueles que me acompanharam durante esses intensos anos de graduação merecem um agradecimento especial neste espaço, já que o presente trabalho marca a conclusão dessa importante etapa de minha vida. Gostaria de agradecer àqueles colegas, no curso ou na vida, que além de caminharem ao meu lado contribuíram de alguma forma para minha evolução. Muito especialmente desejo expressar meus agradecimentos:

À professora Nádia, pela orientação do melhor caminho e disponibilidade sempre que necessário.

Aos membros da Banca Examinadora, professor Pedro, por aceitar o convite, e à Patrícia, pelos comentários e ajuda.

Aos ex-colegas da empresa Sulconsult, pela apresentação da problemática e ferramentas utilizadas, além da disponibilização de dados, apesar de não estarem presentes na elaboração do trabalho.

À minha namorada Simone, por estar sempre ao meu lado e ser meu apoio emocional durante todos esses anos, mesmo quando involuntariamente.

À minha família, que sempre me apoiou e tornou tudo possível.



## RESUMO

A regularização de vazões dos corpos hídricos é fundamental para o desenvolvimento humano, uma vez que várias atividades necessitam de uma boa quantidade de água ao longo de todo o ano, sem distinção de estações de cheia e estiagem. Para atender a essa e outras demandas, as obras hidráulicas de contenção dos corpos hídricos destinadas a criação de reservatórios artificiais, as barragens, são amplamente utilizadas no território nacional. Juntamente com os benefícios proporcionados pelas barragens e seus respectivos reservatórios artificiais, é oferecido também o perigo devido à grandes volumes de água acumulados. Um grande número de rupturas de barragens é citado em bibliografia, com consequências de prejuízo econômico, social e ambiental. Recentemente foi promulgada a Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, onde é estabelecida a Política Nacional de Segurança de Barragens, decretando por um de seus instrumentos a elaboração de um Plano de Segurança de Barragens para aquelas que se caracterizem como incluídas na Lei, por conta de classificação exposta. O objetivo geral do presente trabalho é o estudo da inundação e propagação da onda de cheia proveniente do rompimento hipotético de uma barragem, visando oferecer informações que fundamentem a elaboração de um dos itens do Plano de Segurança de Barragens, o Plano de Ações de Emergência. Foi utilizada para o estudo de caso a barragem da Pequena Central Hidroelétrica Angelina, situada na divisa dos municípios de Angelina e Major Gercino – SC. A simulação da inundação foi desenvolvida através do modelo hidrodinâmico computacional HEC-RAS, apoiado em dados hidrológicos – calculados através do método da distribuição de Gumbel – e topográficos – manipulados com o auxílio do software AutoCAD Civil 3D. O mapa da inundação foi elaborado partindo dos resultados obtidos na simulação, manipulados no software ArcGIS e auxiliado pela extensão HEC-geoRAS, sobrepostos em imagens de satélite obtidas no software Google Earth. O perigo oferecido pelas barragens pode ser minimizado com o conhecimento detalhado das consequências que possam vir a ocorrer com sua ruptura. Mapeamentos de inundação que sigam a metodologia apresentada poderão servir de apoio à elaboração de ações que diminuirão prejuízos tanto econômicos como sociais, na forma de perdas materiais, humanas e ambientais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Segurança de barragens, modelagem hidráulica, mapa de inundação.



## **ABSTRACT**

The rivers flow regularization is primordial for human development, since many activities need certain amount of water throughout the year, in drought or rainy seasons. Artificial storages created by dam structures are commonly used in national territory. The benefits of these elements are followed by the danger that is offered by water volumes contained at high loads. The recently Law n° 12.334 of September 20, 2010, installed the National Politics of Dam Safety, that establish the need of elaboration of a Safety Dam Plan to determinate dams. The main goal of this work is the flood study and studying the propagation of flood due a hypothetic dam breach, aiming to offer information for justifying an Emergency Action Plan, one of the items on the Safety Dam Plan. The case study was developed on the dam of the Small Hydroelectric Central Angelina, between the cities of Angelina e Major Gercino – SC. The simulation of the dam breach was developed in the hydrodynamic software HEC-RAS, using hydrologic and topographic data – the first calculated through Gumbel distribution, and the second manipulated in AutoCAD Civil 3D. The floodplain map was developed by the union of the HEC-RAS results, manipulated in the software ArcGIS supported by the extension HEC-geoRAS, and Google Earth satellite images. The main achieve objective was the development of a methodology that supports next studies in this same proposal. Inundation definitions that follow this exposed methodology should serve to support the planning of actions that decrease economic and social losses.

**KEY-WORDS:** Dam safety, hydraulic modeling, floodplain map



## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
2.	OBJETIVOS.....	21
2.1.	OBJETIVO GERAL .....	21
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	21
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	23
3.1.	BARRAGEM.....	23
3.2.	SEGURANÇA DE BARRAGENS .....	24
3.1.1.	Histórico e Causas de Rupturas de Barragens .....	25
3.1.2.	Fundamentação Legal.....	31
3.1.3.	Plano de Ações de Emergência.....	33
3.3.	SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA.....	35
3.2.1.	Vazões Máximas.....	35
3.2.2.	HEC-RAS .....	36
3.4.	ANÁLISE DE RISCO.....	37
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
4.1.	ÁREA DE ESTUDO.....	39
4.2.	MATERIAIS .....	44
4.3.	FLUXOGRAMA METODOLÓGICO .....	47
4.4.	ESTUDO DOS DADOS HIDROLÓGICOS .....	48
4.5.	MANIPULAÇÃO DE DADOS TOPOGRÁFICOS .....	48
4.6.	APLICAÇÃO DO MODELO HEC-RAS .....	52
4.7.	ELABORAÇÃO DO MAPA PARA ANÁLISE DE RISCO.....	55
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	67
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	69
8.	ANEXOS.....	73

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cidade antes do rompimento da barragem de Vajont. ....	29
Figura 2. Cidade devastada após rompimento da barragem de Vajont. ....	29
Figura 3. Localização da PCH Angelina. ....	40
Figura 4. Planta baixa da barragem. ....	41
Figura 5. Layout da barragem e estruturas a jusante. ....	42
Figura 6. Vista à montante e seção da barragem. ....	43
Figura 7. Curva cota x volume - Reservatório PCH Angelina ....	45
Figura 8. Localização estação ANA. ....	46
Figura 9. Fluxograma metodológico. ....	47
Figura 10. Dados topográficos organizados e manipulados. ....	50
Figura 11. Superfície na região da PCH Angelina. ....	51
Figura 12. Elementos para a inserção topográfica no HEC-RAS. ....	51
Figura 13. Seção de dados de relevo e estruturas no HEC-RAS – Rio Garcia, seções e barragem. ....	53
Figura 14. Barragem inserida na plataforma HEC-RAS. ....	54
Figura 15. Plano de rompimento suposto para a barragem. ....	55
Figura 16. Terreno digital com mancha de inundação. ....	57
Figura 17. Perfil d'água no Rio Garcia antes do rompimento. ....	60
Figura 18. Perfil d'água no Rio Garcia após o rompimento. ....	60
Figura 19. Rio Garcia antes do rompimento. ....	61
Figura 20. Rio Garcia 4 horas após o rompimento. ....	61
Figura 21. Rio Garcia 22 horas após o rompimento. ....	62
Figura 22. Simulação em seção a jusante da barragem. ....	63
Figura 23. Mapa de inundação. ....	64
Figura 24. Detalhe mapa de inundação - Região da casa de força. ....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Perdas humanas e materiais em rompimentos históricos de barragens. ....	25
Tabela 2. Causas de falhas em barragens. ....	27
Tabela 3. Lista de falhas em grandes barragens – dados da falha e da barragem. ....	27
Tabela 4. Lista de falhas em grandes barragens – dados da ruptura.....	30
Tabela 5. Recomendações para períodos de retorno mínimo. ....	35
Tabela 6. Dados do empreendimento. ....	40
Tabela 7. Fontes de obtenção de dados. ....	44
Tabela 8. Cota x Volume - Reservatório PCH Angelina.....	45
Tabela 9. Dados estação ANA. ....	47
Tabela 10. Vazões máximas pelo método de Gumbel.....	48



# 1. INTRODUÇÃO

Nos moldes atuais da sociedade, é inquestionável a importância da regularização de vazões dos cursos d'água, pelas suas utilidades para variados setores. Isto se aplica ao abastecimento de água às populações, às indústrias, aos aproveitamentos hidroelétricos, aos sistemas de irrigação e navegação, e para todos aqueles empreendimentos nos quais uma certa vazão disponível em qualquer época do ano interesse fundamentalmente (GARCEZ, 1962). Para atender a estas demandas de regularização de vazões, são utilizadas as barragens, estas levantadas sempre que os objetivos são a criação de um reservatório, uma carga hidráulica ou uma superfície de água (VISCHER; HAGER, 1997). Garcez (1962) resume a finalidade básica da construção de uma barragem, ocorrendo esta sempre que se deseje retirar de um curso d'água uma vazão superior à vazão mínima de estiagem que este curso d'água ofereça.

O histórico da construção de grandes barragens no Brasil foi marcado pelas trágicas consequências da seca iniciada em 1877 que se alastrou por todo o Nordeste do País, tornando-se a tragédia de maior vulto causada por fenômenos naturais (COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS, 1982). Devido ao fato do Brasil contar com uma grande quantidade de recursos hídricos, o número de barragens no território nacional vem se tornando expressivo desde então (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002). Tal ponto de vista se reforça com Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (1982), ao lembrar que “quando as disponibilidades de água já estão quase completamente comprometidas em diversas regiões do mundo, o Brasil permanece sendo um dos países mais bem dotados de recursos hídricos ainda inexplorados”.

Com a utilização das barragens como instrumentos fundamentais do desenvolvimento nacional, são proporcionados, juntamente com os benefícios de suas aplicações, o perigo que grandes volumes de água armazenados podem oferecer, como citado no Decreto nº 344, de 15 de outubro de 1997 “a construção e exploração das barragens podem [...] envolver danos potenciais para as populações e bens materiais e ambientais na sua vizinhança” (PORTUGAL, 1997). Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (1982), a respeito de problemas com os maciços onde se instalam as barragens, comenta que “a baixa plasticidade de alguns solos de empréstimo e as limitações construtivas resultaram em alguns problemas de fissuração nos maciços de terra,

apesar de as condições geométricas dos vales serem, geralmente boas”, podendo ser complementado por Golzé (1997) “Não importa quão bom o design da estrutura pode ser do ponto de vista técnico, este pode ser o mais desprezível se a estrutura for construída sobre uma fundação incapaz de suportar a carga ou permanecer intacta sob condições saturadas”. Portanto, por melhores que pareçam a estrutura construída e a geometria do local, o perigo de acidentes estará sempre presente.

Tendo em vista essa problemática, em 20 de setembro de 2010 foi sancionada a Lei nº 12.334, que “estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, [...]” (BRASIL, 2010). O trabalho aqui exposto se justifica em dois pontos desta Lei: pela classificação da barragem quanto a categoria de risco, o que define, entre outras coisas, se as determinações da Lei se aplicam à barragem. Um critério desta classificação é citado no artigo 7º, inciso 2º da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010: “A classificação por categoria de dano potencial associado à barragem em alto, médio ou baixo será feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem” (BRASIL, 2010); e a segunda justificativa está presente em um instrumento específico desta Lei, onde é instituída a necessidade da existência de um Plano de Segurança de Barragem para aquelas às quais rege a Lei. Sempre que o dano potencial associado à barragem é considerado alto, é solicitado como parte constituinte do Plano de Segurança de Barragem um PAE – Plano de Ação de Emergência (BRASIL, Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010), este baseando suas ações também na potencial ruptura da barragem.

Visando elaborar um método que dê suporte para as exigências citadas da Lei, o presente trabalho, elaborado no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, teve como objetivo o estudo da inundação e propagação da onda de cheia proveniente do rompimento hipotético de uma barragem. O estudo de caso foi realizado em uma barragem existente, construída em CCR – Concreto Compactado a Rolo, localizada na divisa dos municípios de Angelina e Major Gercino, no leste do estado de Santa Catarina. Esta se situa no Rio Garcia, na bacia do Rio Tijucas, e tem a finalidade do abastecimento de uma PCH – Pequena Central Hidrelétrica, a PCH Angelina. U.S. Army Corps of Engineers (2010) cita como um aspecto da segurança de barragens a capacidade de

responder à pergunta: “O que aconteceria se esta barragem viesse a romper?”. Pretende-se, ao final deste trabalho, fornecer embasamento para que esta pergunta possa ser respondida para o caso estudado, ou ao menos desenvolver metodologia com que se possa atender a essa necessidade.

Todos aqueles que residem ou são interessados de alguma forma na região à jusante da barragem são beneficiários deste tipo de estudo, já que os resultados esperados constituem na possibilidade de quantificar prejuízos sociais, econômicos e ambientais que viriam a ocorrer com o hipotético acidente apresentado.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste trabalho é o estudo da inundação e propagação da onda de cheia decorrente do rompimento hipotético de uma barragem.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

São objetivos específicos deste trabalho:

1. Avaliar metodologia que possibilite o estudo hidráulico do rompimento de uma barragem;
2. Estimar as vazões máximas do rio em que se localiza a barragem;
3. Aplicar um modelo hidráulico para a situação do rompimento da barragem;
4. Elaborar um mapa da área de influência no trecho à jusante da barragem.



### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. BARRAGEM

De acordo com Garcez (1972), barragem é o “elemento estrutural construído em um curso d’água transversalmente à direção do escoamento da corrente e destinado à criação de um reservatório artificial que poderá atender uma ou a várias finalidades”. Conceito este complementado pelo texto da Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010, quando se refere à barragem como “qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas” (BRASIL, 2010). A legislação portuguesa vai mais além, ao definir não só o conceito de barragem, mas seus componentes e finalidades: “as barragens, no sentido geral de estrutura propriamente dita, sua fundação, zona vizinha a jusante, órgãos de segurança e exploração e reservatório, são necessárias para uma adequada gestão das águas, nomeadamente para o abastecimento de água às populações, a rega, o controle de cheias, a produção de energia, atividades turísticas e industriais e navegação” (PORTUGAL, Decreto nº 344, de 15 de outubro de 1997).

Uma das utilizações das barragens de maior interesse é a de produção de energia elétrica, porquanto está normalmente presente mesmo naquelas obras construídas para outros fins e por representar um elemento precioso e frequentemente decisivo no balanço global da conveniência do empreendimento (GARCEZ, 1972), finalidade tal que representa também a utilização da barragem objeto de estudo do presente trabalho. Uma barragem é formada não só pela estrutura que represa o curso d’água, possibilitando a formação de um reservatório artificial, mas uma série de partes constituintes, como relata o mesmo Garcez (1972):

- A barragem propriamente dita, consistindo no maciço, assentado na maior parte, sobre a espessa camada do solo natural de seção trapezoidal;
- As estruturas da tomada e condutos, sendo o conjunto de obras que permitem a retirada do reservatório, de água a ser utilizada, retirada esta normalmente sob pressão;
- Os extravasores, que atuam como dispositivos de segurança quando a vazão assumir valores que tornem perigosa a estabilidade da barragem.

O Ministério da Integração Nacional (2002), em seu Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, descreve ainda outras partes que constituem a barragem como um todo:

- A fundação, constituída do maciço de rocha e/ou solo que forma a base de assentamento para a barragem, dique e suas estruturas associadas;
- As ombreiras, partes da encosta contra as quais a barragem é construída;
- Os dispositivos de descarga, combinando as estruturas de tomada e condutos descritas anteriormente, acrescida dos túneis, dispositivos de controle de fluxo e dissipação de energia, que permitam a liberação da água do reservatório da barragem;
- Vertedouro sangradouro, sendo a estrutura projetada somente para permitir descargas d'água do reservatório; e
- Estruturas associadas, compreendendo todas aquelas que não fazem parte da barragem propriamente dita, mas se encontram associadas a ela.

### 3.2. SEGURANÇA DE BARRAGENS

A necessidade do estudo de segurança de barragens vem do perigo que estas oferecem, devido ao grande acúmulo de água a cargas elevadas, como comenta DAEE (2005): “Obras civis como canalizações, travessias e barramentos distinguem-se por interferirem nos cursos d'água e estarem sujeitas ao poder destruidor das enchentes, envolvendo riscos que jamais podem ser desconsiderados”. O Ministério da Integração Nacional (2002) vai além, ao exemplificar possíveis consequências de um acidente associado ao colapso de uma barragem: “As barragens são obras geralmente associadas a um elevado potencial de risco devido à possibilidade de um eventual colapso, com consequências catastróficas para as estruturas das próprias barragens, ao meio ambiente, com destruição da fauna e flora, e, principalmente, pela perda de vidas humanas”.

A ruptura de uma barragem consiste na perda da integridade estrutural, podendo ocorrer uma liberação incontrolável do conteúdo de um reservatório, ocasionada pelo colapso da barragem ou alguma parte dela (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002). Vischer e Hager (1997) ainda complementam esta definição, comentando que estas grandes quantidades de água podem criar ondas de fluxo máximo à jusante do reservatório e causar sérios danos.

### 3.1.1. Histórico e Causas de Rupturas de Barragens

Infelizmente, as rupturas de barragens não permanecem apenas como hipóteses para avaliação de risco. Mais de 1000 rompimentos de barragens foram registrados desde o século 12, e cerca de 200 ocorreram no século 20, causando a perda de mais de 8000 vidas e prejuízo de milhões de dólares (SINGH, 1996). Golzé (1997) e Vischer e Hager (1997) registram importantes rompimentos de barragens ocorridas nos EUA e outros países do mundo, mas estes citados em tabelas mais completas por outros autores. À exemplo de Lou (1981) *apud* Singh (1996), que apresenta, entre outras, a Tabela 1, onde são organizados rompimentos históricos e suas consequências econômicas e sociais.

Tabela 1. Perdas humanas e materiais em rompimentos históricos de barragens.

Barragem	País	Ano do Acidente	Perdas humanas	Prejuízo (milhões de dólares)
Puentes	Espanha	1802	600	1.0
Mill River	EUA	1874		
Lynde Brook	EUA	1876		1.0
South Fork	EUA	1889	2200	100.0
Saint Francis	EUA	1928	450	1.5
Brokaw 2	EUA	1938		0.7
Veg da tera	Espanha	1959	144	
Malpasset	França	1959	421	68.0
Oros	Brasil	1960	50	
Baii Yar	URSS	1961	145	4.0
Hyokiri	Coreia	1961	250	
Quebrada La Chapa	Colômbia	1963	250	
Vajont	Itália	1963	3000	
Baldwin Hills	EUA	1963	3	50.0
Mayfield	EUA	1965		2.5
Vratsa	Bulgária	1966	600	

Barragem	País	Ano do Acidente	Perdas humanas	Prejuízo (milhões de dólares)
Nanak Sagar	Índia	1967	100	
Sempor	Indonésia	1967	200	
Wyoming	EUA	1969		1.5
Pardo	Argentina	1970		20.0
Buffalo Creek	EUA	1974	118	65.0
Teton	EUA	1976	6	70.0
Hirakund	Índia	1980	118	

Fonte: Adaptado Lou (1981) *apud* Singh (1996).

Há a possibilidade de uma série de problemas ocorrerem com barragens de contenção, entre estes, os particularmente hidráulicos, onde estão inclusos a formação de vórtice nos dispositivos de descarga, cavitação e vibração, dissipação e erosão (VISCHER; HAGER, 1997). Mais especificamente a respeito de falhas em barragens, Singh (1996) cita as principais causas:

- 30% ( $\pm 5\%$ ) fluxo excedente à capacidade dos vertedouros;
- 37% ( $\pm 5\%$ ) problemas na fundação
- 10% ( $\pm 5\%$ ) deslizamentos (terra, pedras, geleiras, avalanches);
- 23% ( $\pm 12\%$ ) construção e design impróprios, baixa qualidade de materiais, situações de guerra, falta de operação e manutenção.

Visto assim, problemas de fundação e galgamento são as mais significantes causas de falhas em barragens (VISCHER; HAGER, 1997). Ministério da Integração Nacional (2002) descreve as principais situações de emergência que possam vir a ocorrer em uma barragem e as medidas que devem ser tomadas. São estas situações: abalo sísmico (baixo risco e intensidade no território nacional); enchente; erosão, abatimento, encharcamento ou trincamento da barragem ou ombreiras; novas fontes, infiltração, charcos, aumento de fluxo ou sumidouros; deslizamentos; descargas súbitas de água; e outros problemas. Lou (1981) *apud* Singh (1996) apresenta ainda uma análise de literatura onde se é possível verificar a distribuição das principais causas de falhas em barragens segundo uma série de autores, expresso na Tabela 2.

Tabela 2. Causas de falhas em barragens.

Autor	Causa da falha da barragem (%)			
	Vertedouro ou galgamento	Rompimento tubular ou infiltração	Deslizamentos	Causas mistas
Middlebrooks (1953)	30	38	15	17
Gruner (1967)	23	40	2	35
Takase (1967)	28	44	10	18
Babb e Mermel (1968)	36	30	15	19
Biswas e Chatterjee (1971)	35	25	-	40
USCOLD (1975)	38	44	9	9

Fonte: Adaptado Lou (1981) *apud* Singh (1996).

A organização grega Natural Hazards (2012) publicou em um artigo uma compilação de vários rompimentos históricos de grandes barragens e suas características técnicas. Parte desta lista é exposta na Tabela 3.

Tabela 3. Lista de falhas em grandes barragens – dados da falha e da barragem.

Barragem	País	Ano de Conclusão	Ano da Falha	Modo da Falha	Altura (m)
Alcova	EUA	1938	1968		81
Apishapa	EUA	1920	1923	Tubular	34
Baldwin Hills	EUA	1951	1963	Tubular	71
Velden	EUA	1958	1967		50
Bradfield	Reino Unido	1863	1864	Tubular	28
Cheney	EUA	1965	1971		38
Dantiwada	India	1965	1973		41

<b>Barragem</b>	<b>País</b>	<b>Ano de Conclusão</b>	<b>Ano da Falha</b>	<b>Modo da Falha</b>	<b>Altura (m)</b>
Eucl. da Cunha	Brasil	1958	1977	Galgamento	53
Hell Hole	EUA	1964	1964		67
Khadkawasla	India	1879	1961		31
Lower Otay	EUA	1897	1916	Galgamento	41
Machhu II	India	1972	1979	Infiltração	60
Malpasset	França	1954	1959		66
Oros	Brasil	1960	1960	Galgamento	35
Salles Oliveira	Brasil	1966	1977	Galgamento	35
Schaeffer	EUA	1909	1921	Galgamento	30
Sherman	EUA	1959	1962		41
St. Francis	EUA	1926	1928		62
Swift	EUA	1914	1964	Galgamento	58
Teton	EUA	1975	1976	Tubular	93
Vaiont	Itália	1959	1963	Galgamento	267
Wanater Bouldin	EUA	1967	1975	Infiltração	50

Fonte: Adaptado Natural Hazards (2012)

É importante de se observar que muitos dos acidentes com as grandes barragens ocorreram poucos anos após ou até no mesmo ano da sua construção. São citadas três barragens localizadas no Brasil, e em todas elas as falhas ocorridas foram por galgamento. A barragem do açude Oros, no Ceará possuía o maior reservatório dos casos expostos na lista, 650 ha de área alagada. O acidente considerado como um dos mais, senão o mais catastrófico foi o ocorrido em Vajont, na Itália, em 1963, causando cerca de 3000 mortes, como observado na Tabela 1. A Figura 2 usa como exemplo a ruptura da barragem de Vajont para expor a devastação que uma inundação decorrente deste tipo de acidente pode causar, sendo possível utilizar a Figura 1 como objeto de comparação, retratando a cidade antes da onda de cheia.

Figura 1. Cidade antes do rompimento da barragem de Vajont.



Fonte: Vischer e Hager (1997)

Figura 2. Cidade devastada após rompimento da barragem de Vajont.



Fonte: Vischer e Hager (1997)

Menescal (2005) desenvolve um pensamento mais específico para as falhas, não apenas por deficiências de projeto, mas por serviço pouco qualificado, atribuindo-as à falta de fiscalização durante a construção. No primeiro caso, o projeto foi elaborado por um profissional não experiente, e no segundo caso a construção não foi confiada a uma empresa devidamente qualificada. Peck (1984) *apud* Menescal (2005) complementa este pensamento de forma ainda mais específica, afirmando que “9 entre 10 rupturas recentes ocorrem não por deficiências do ‘estado da arte’, mas por causa de negligências que poderiam ter sido evitadas, ou por falta de comunicação entre pessoal envolvido no projeto e na construção ou por causa de interpretações excessivamente otimistas das condições geológicas”.

Barragens podem romper gradualmente ou instantaneamente. O tipo da ruptura depende do tipo de falha e do tipo da barragem. A forma da ruptura pode ser aproximada em todos os casos como trapezoidal, com uma relação entre a largura de topo e de fundo de 1,29 ( $\pm 1,8$ ) (VISCHER; HAGER, 1997). A complementação da lista de Natural Hazards (2012) exposta anteriormente é exposta na Tabela 4, onde se é possível verificar as condições técnicas das rupturas históricas.

Tabela 4. Lista de falhas em grandes barragens – dados da ruptura.

Barragem	Forma da ruptura	Largura da Ruptura		Altura da Ruptura (m)	Vazão de Pico ( $m^3/s$ )	Tempo de Formação (h)
		Fundo (m)	Topo (m)			
Alcova						
Apishapa	Trapez.	81,5	91,5	31,1	$6 \times 10^3$	0,75
Baldwin Hills	Triang.			21,3	$1 \times 10^3$	0,33
Velden						
Bradfield					$1 \times 10^3$	
Cheney						
Dantiwada					$7 \times 10^3$	
Eucl. da Cunha	Trapez.		131	53	$1 \times 10^3$	
Hell Hole	Trapez.			56,4	$7 \times 10^3$	0,75
Khadkawasla					$2 \times 10^3$	
Lower Otoy	Trapez.	93,8	172,2	39,6		1

Barragem	Forma da ruptura	Largura da Ruptura		Altura da Ruptura (m)	Vazão de Pico (m <sup>3</sup> /s)	Tempo de Formação (h)
		Fundo (m)	Topo (m)			
Machhu II			540	60		
Malpasset						
Oros	Trapez.	130	200	35,5	9x10 <sup>3</sup>	8,5
Salles Oliveira	Trapez.			35	7x10 <sup>3</sup>	
Schaeffer	Trapez.	64	210	30,5	4x10 <sup>3</sup>	0,5
Sherman						
St. Francis					14x10 <sup>3</sup>	
Swift	Trapez.	225	225	57,6	24x10 <sup>3</sup>	
Teton	Trapez.			86,9	65x10 <sup>3</sup>	1,25
Vaiont						
Wanter						
Bouldin						

Fonte: Adaptado de Natural Hazards (2012)

A probabilidade anual de rompimento de barragem é estimada em  $10^{-4}$  e a probabilidade do rompimento durante a vida útil de uma barragem (100 anos) é de  $10^{-2}$  (VISCHER; HAGER, 1997). Portanto, tomando como base a situação exposta, é inegável a importância do estudo e aplicação de métodos que proporcionem a segurança de barragens. Segundo Ministério da Integração Nacional (2002), a segurança é 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”, definição concordada em parte pela Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010. Aliás, é inviável a discussão a respeito de segurança de barragens sem um profundo estudo da recente Lei promulgada que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens.

### 3.1.2. Fundamentação Legal

A Lei N° 12.334, de 20 de setembro de 2010 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Esta

Lei aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

I - altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);

II - capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m<sup>3</sup> (três milhões de metros cúbicos);

III - reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;

IV - categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º.

Além dos objetivos relativos a garantir os padrões de segurança, promover o monitoramento e coligir informações, a cultura de gestão de riscos também é citada como uma finalidade da Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010. Portanto, o risco da existência da barragem e seu reservatório deve ser quantificado e utilizado na gestão da segurança. Este princípio pode ser observado também em um dos fundamentos da Lei: “a segurança de uma barragem influi diretamente na sua sustentabilidade e no alcance de seus potenciais efeitos sociais e ambientais”.

Em outro fundamento, é possível determinar o responsável legal, portanto, o maior interessado na segurança da barragem: “o empreendedor é o responsável legal pela segurança da barragem, cabendo-lhe o desenvolvimento de ações para garanti-la”. Ministério da Integração Nacional (2002) em seu Manual de Segurança e Inspeção de Barragens vai além ao desenvolver, em dois pontos, sobre as responsabilidades perante a barragem:

I - O proprietário (e o concessionário, quando designado) é o responsável pela segurança da barragem em todas as fases, isto é, construção, comissionamento, operação e eventual abandono, respondendo pelas consequências de eventuais incidentes e acidentes;

II - O proprietário da barragem tem a responsabilidade de prevenir a população quanto a uma situação perigosa, porém esses alertas devem basear-se nas informações prestadas pelo proprietário ou pelo operador da barragem.

Dois instrumentos da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010 dizem respeito ao presente trabalho: o Plano de Segurança de Barragem e o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e,

principalmente neste caso, por dano potencial associado. A classificação da barragem por dano potencial associado é dada pelo “potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem”. Com este índice em mãos, acompanhado pela categoria de risco, agentes fiscalizadores determinam se as competências desta Lei se aplicam à barragem.

São mencionadas uma série de informações mínimas que devem estar contidas no Plano de Segurança da Barragem, entre elas, o PAE – Plano de Ação de Emergência, quando exigido. O PAE deverá ser elaborado por determinação do órgão fiscalizador, sempre que o dano potencial associado à barragem for classificado como alto. Vale ressaltar que o Plano de Segurança da Barragem é um instrumento da PNSB e deve ser, obrigatoriamente, implantado pelo empreendedor (ANA, 2012).

### **3.1.3. Plano de Ações de Emergência**

Todo o conteúdo do PAE é relacionado diretamente com as causas e consequências da potencial ruptura da barragem. Isto pode ser observado nas exigências mínimas que a Lei 12.304 de 20 de setembro de 2010 enumera para o Plano:

I - identificação e análise das possíveis situações de emergência;

II - procedimentos para identificação e notificação de mau funcionamento ou de condições potenciais de ruptura da barragem;

III - procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situações de emergência, com indicação do responsável pela ação;

IV - estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência.

A legislação portuguesa é mais específica quando se diz respeito ao planejamento de emergência, primeiramente ao definir os objetivos deste no Decreto de Lei nº 344, de 15 de outubro de 1997 sendo “proteção e defesa da população, bens e ambiente, bem como a mitigação das consequências de um acidente em situações de emergência associadas a ondas de inundação”. São enumerados itens mais detalhados que devem ser contidos no PAE, sendo aqui demonstrados dois deles, mais importantes para o estudo em questão (PORTUGAL, 1997):

- Caracterização das populações, bens e ambiente em risco nas zonas afetadas pela onda de inundação, para o cenário de acidente mais desfavorável;
- Mapas de inundação com a caracterização hidrodinâmica das ondas de inundação para os cenários de acidente considerados, incluindo o cenário de colapso da barragem e, sempre que se justifique, cenários de descargas em fase de exploração, com delimitação da zona de autodefesa e dos limites administrativos dos distritos e municípios e ainda, eventualmente, dos bairros.

O decreto nº 344, de 15 de outubro de 1997 detalha ainda o conteúdo do mapa de inundação a ser elaborado para o PAE: "devem indicar, para cada aglomerado populacional ou bem material ou ambiental a se preservar, os instantes de chegada da frente e do pico da onda de inundação, os níveis máximos atingidos em termos de cota e altura da onda, a velocidade máxima, o caudal máximo e o tempo de duração da fase crítica da inundação" (PORTUGAL, 1997). Nos Estados Unidos o estudo das consequências do rompimento de barragens também tem sido solicitado por autoridades para várias barragens existentes (VISCHER; HAGER, 1997).

Apesar do não detalhamento preciso pela Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010 do conteúdo necessário para a elaboração do PAE, o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, desenvolvido por Ministério da Integração Nacional (2002), fornece um exemplo prático de formato para a elaboração de um PAE, contendo atribuição de responsabilidades para as ações, tipos de ruptura e situações de emergência, ações preventivas e organização de recursos e suprimentos de emergência. Tratando-se dos mapas de inundação, Ministério da Integração Nacional (2002) os considera necessários para as autoridades locais desenvolverem um adequado plano de evacuação, e demonstra informações que devem ser respondidas com a interpretação dos mapas elaborados:

“\_\_\_\_\_ construções poderão ser afetadas por ondas de cheia, causadas por um súbito rompimento da barragem \_\_\_\_\_. Estas construções estão marcadas no mapa de inundação apresentado nos apêndices. As primeiras construções serão atingidas pela água, aproximadamente

\_\_\_\_\_ minutos após o rompimento da barragem” (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002).

### 3.3. SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA

Quando uma barragem rompe instantaneamente, ou seja, uma grande parte da barragem ou ela inteira é removida em um curto espaço de tempo, uma liberação súbita de água gera, na região a jusante da barragem, a propagação de uma onda de cheia (VISCHER; HAGER, 1997). Segundo o modelo de Singh para o desenvolvimento da ruptura de uma barragem, exposto por Vischer e Hager (1997), a ruptura de uma barragem pode ser modelada como um fluxo de água/sedimentos em duas fases, utilizando o balanço da água/volume mais a taxa de erosão como função da velocidade ao longo da ruptura.

#### 3.2.1. Vazões Máximas

De acordo com Ministério da Integração Nacional (2002), tempo de recorrência “equivale ao tempo médio decorrido entre ocorrências de um evento igual ou superior a uma certa magnitude específica”. A Tabela 5 aponta períodos de retorno a serem adotados em projetos de barragens de contenção (DAEE, 2005).

Tabela 5. Recomendações para períodos de retorno mínimo.

<b>h - Altura do maciço (m)</b>	<b>L - Comprimento do maciço (m)</b>	<b>TR - Período de retorno (anos)</b>
$h \leq 5$	$L \leq 200$	100
$5 \leq h \leq 15$	$L \leq 500$	1000
$h > 15$	$L > 500$	10000 ou precip. máx. provável

Fonte: DAEE (2005)

Uma forma de verificação da vazão que sairá pelo vertedor em uma cheia catastrófica é dada pela equação [1] (DAEE,2005).

$$Q_{s,máx} = 1,55 \times L \times H^{2/3} \quad [1]$$

Onde  $Q_{s,máx}$  é a vazão em cheia catastrófica,  $L$  é a largura do vertedor e  $H$  a carga sobre a sua soleira.

De acordo com Naghettini e Pinto (2007) a distribuição dos valores extremos do tipo I, ou distribuição de Gumbel, é uma das funções de distribuição de probabilidade mais utilizada para a determinação de vazões máximas.

### 3.2.2. HEC-RAS

O HEC - *Hydrologic Engineer Center* (Centro de Engenharia Hidrológica) parte do USACE – *U.S. Army Corps of Engineers* (Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos) desenvolveu o *software* de modelagem hidráulica unidimensional HEC-RAS – *River Analysis System* (Sistema de Análise de Rios), podendo ser usado também para a modelagem da ruptura de uma barragem e propagação da onda de cheia. O programa é disponibilizado gratuitamente para download em [www.hec.usace.army.mil](http://www.hec.usace.army.mil), juntamente com outros programas do Centro. O HEC-RAS é um software de sistema integrado, projetado para uso interativo em um ambiente de rede de múltiplas tarefas e múltiplos usuários. O sistema é constituído de uma interface gráfica do usuário, separando componentes de análise hidráulica, armazenamento de dados, ferramentas de gerenciamento, gráficos e formas de apresentação (USACE, 2010).

O software contém quatro componentes de análise unidimensional, sendo eles (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2010): cálculo de perfis e superfícies de água em regime permanente; simulação em regime não permanente; cálculo de limites móveis de transporte de sedimentos; e análise de qualidade da água. Os tipos de escoamento simulados, por sua vez, são (GRACIOSA, 2010): permanente uniforme, permanente gradualmente variado e não permanente. Segundo Lauriano, *et al* (2010), “atualmente, o HEC-RAS vem sendo empregado em casos práticos, já que sua versão mais atual possui um módulo que permite a simulação de ruptura e a modelagem de escoamento não-permanente”. Este módulo citado é possível de ser empregado apenas com escoamento simulado em regime não permanente, o qual é regido pelas leis da conservação de massa e o princípio da conservação do momento (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2010). Para uma abordagem unidimensional, as equações de Saint-Venant para equação da conservação de massa e conservação

da quantidade de movimento podem ser representadas pelas equações matemáticas [2] e [3], respectivamente (LAURIANO, 2010).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad [2]$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) \quad [3]$$

Onde:  $t$  é a variável independente relativa ao tempo [s];  $x$  é a variável independente relativa à direção do escoamento [m];  $u$  é a velocidade média do escoamento [m/s];  $g$  é a aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>];  $h$  é a espessura da lâmina líquida [m];  $S_0$  é a declividade média da calha fluvial ou do fundo do canal [m/m]; e  $S_f$  é a declividade da linha de energia [m/m].

### 3.4. ANÁLISE DE RISCO

Ministério da Integração Nacional (2002) conceitua risco como “Probabilidade e severidade de um efeito adverso para a saúde, para a propriedade ou para o meio ambiente. O risco é estimado por expectativas matemáticas das consequências de um evento adverso”. No texto da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010 é possível se observar uma referência à gestão de risco: “Ações de caráter normativo, bem como aplicação de medidas para prevenção, controle e mitigação de riscos”. Portanto, para determinação dos riscos a serem gerenciados, a expectativa de consequências de um evento adverso deve ser estudada de acordo com sua severidade de um efeito adverso social e ambiental. Em complementaridade a esta linha, Guimarães, *et al* (2012) descreve risco como a potencialidade de que ocorra um acidente, um desastre, um evento físico que resulte em perdas e danos sociais ou econômicos. Usualmente é utilizada a expressão [4], ou ainda sua modificação apontada na expressão [5], como definição de risco (UNDP, 2004).

$$R = H \times V \quad [4]$$

$$R = H \times Pop \times V \quad [5]$$

Onde:  $R$  é o risco,  $H$  é o perigo (*hazard*),  $V$  é a vulnerabilidade e  $Pop$  a população.

Goerl (2010) aponta definições de diversos autores para perigo e vulnerabilidade, são aqui apontadas algumas delas:

- Perigo: “Refere-se ao risco ou perigo potencial, o qual geralmente é assumido como sendo uma catástrofe ou desastre em potencial, que envolve grandes danos e perda de vidas” (SCHUMM, 1994 *apud* GOERL, 2010); “Pode ser definido como uma ameaça potencial para o ser humano e seu bem-estar” (SMITH, 1996 *apud* GOERL, 2010)
- Vulnerabilidade: “É o grau em que o sistema age adversamente em virtude da ocorrência de um evento perigoso” (TIMMERMAN, 1981 *apud* GOERL, 2010); “São as diferentes capacidade de grupos e indivíduos para lidar com perigos naturais, com base em suas posições dentro da sociedade e no espaço” (DOW, 1992, *apud* GOERL, 2010).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é localizada na bacia hidrográfica do Rio Tijucas, mais especificamente no Rio Garcia, situado na divisa dos municípios de Angelina e Major Gercino - SC. Será detalhado no desenvolver do trabalho o local da barragem da PCH Angelina e sua região a jusante, ao longo do Rio Garcia. Os municípios de Angelina e Major Gercino estão localizados no leste do estado de Santa Catarina, na região da Grande Florianópolis, e possuem populações de 7558 e 22101 habitantes, respectivamente (IBGE, 2010). A Figura 3 localiza a PCH Angelina em relação aos municípios de Angelina e Major Gercino, ao estado de Santa Catarina e ao Brasil.

O empreendimento se trata de uma barragem construída em CCR – Concreto Compactado a Rolo, com a finalidade da acumulação de água para abastecimento de um aproveitamento hidrelétrico, a PCH Angelina, situada nas coordenadas geográficas 27°28'S, 48°50'W. A PCH Angelina foi liberada à operação comercial em 16 de março de 2010, conforme relatado no Diário Oficial da União nesta mesma data.

Informações a respeito das estruturas, topografia do local da barragem, entre outras foram obtidas com o auxílio da empresa Sulconsult Consultoria e Engenharia Ltda., empresa que tomou parte em etapas de projeto e construtivas da PCH Angelina. A empresa possui (encerrou suas atividades em 2013) sede em Florianópolis e teve como área de atuação a prestação de serviços no ramo de engenharia de energia elétrica, com ênfase no atendimento a clientes empreendedores da área de novas unidades de geração. Foi liberado o acervo técnico da empresa relacionado ao empreendimento para a elaboração do presente trabalho. Dados específicos do empreendimento foram organizados na Tabela 6. É possível observar a distribuição das estruturas implementadas na região na Figura 5 e mais especificamente a barragem na Figura 4 e na Figura 6.

Figura 3. Localização da PCH Angelina.

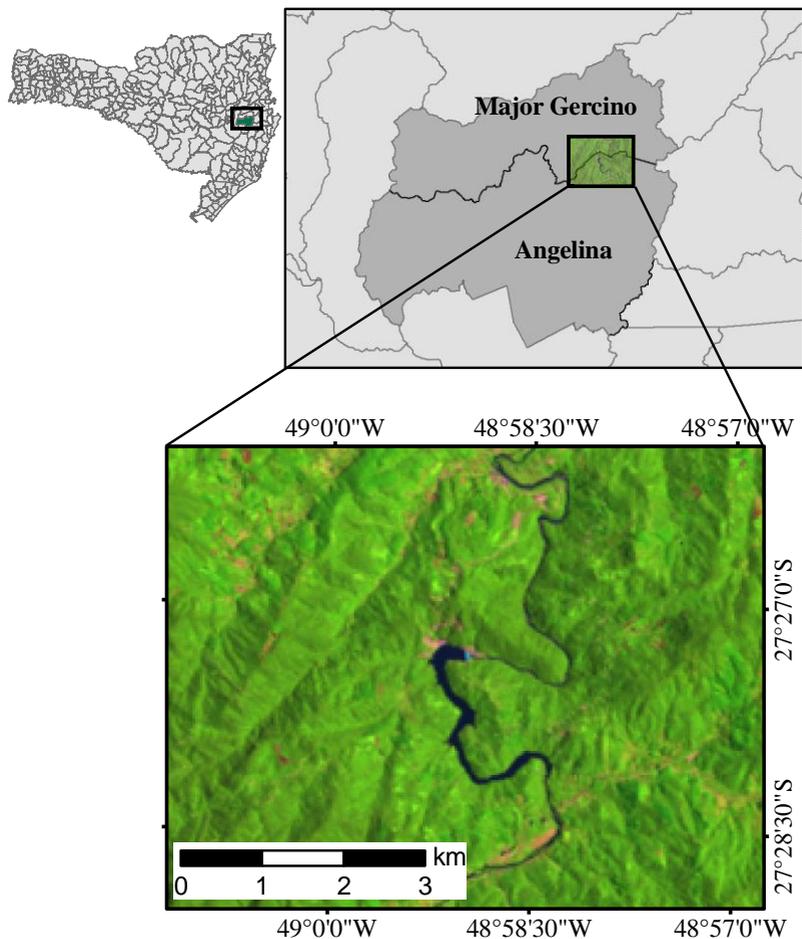


Tabela 6. Dados do empreendimento.

**Dados do Projeto**

Área de drenagem	787 km <sup>2</sup>
Vazão média de longo período	21 m <sup>3</sup> /s
Vazão mínima mensal	6.1 m <sup>3</sup> /s
Potência Instalada	26.27 MW

### Níveis de Água do Reservatório

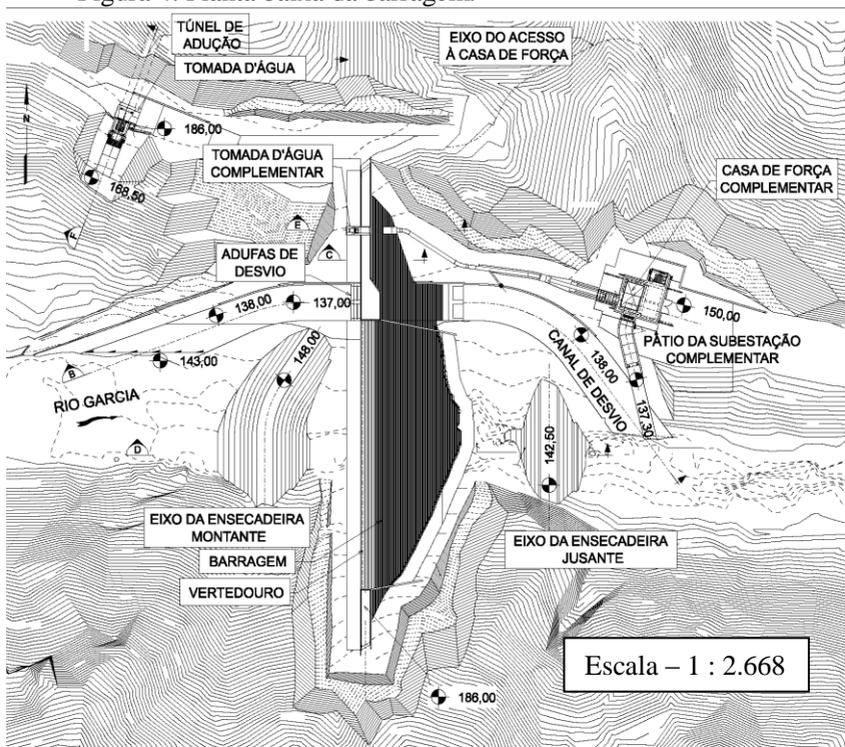
Mínimo operacional	176 m
Normal	181 m
Máximo Maximorum - TR = 500 anos	185 m
Vazão de projeto do vertedouro - TR = 500 anos	1656 m <sup>3</sup> /s

### Níveis de Água da Casa de Força

Mínimo operacional	52.5 m
Normal	53.4 m
Máximo Maximorum - TR = 1000 anos	57.8 m
Vazão de projeto de proteção CF - TR = 1000 anos	1826 m <sup>3</sup> /s

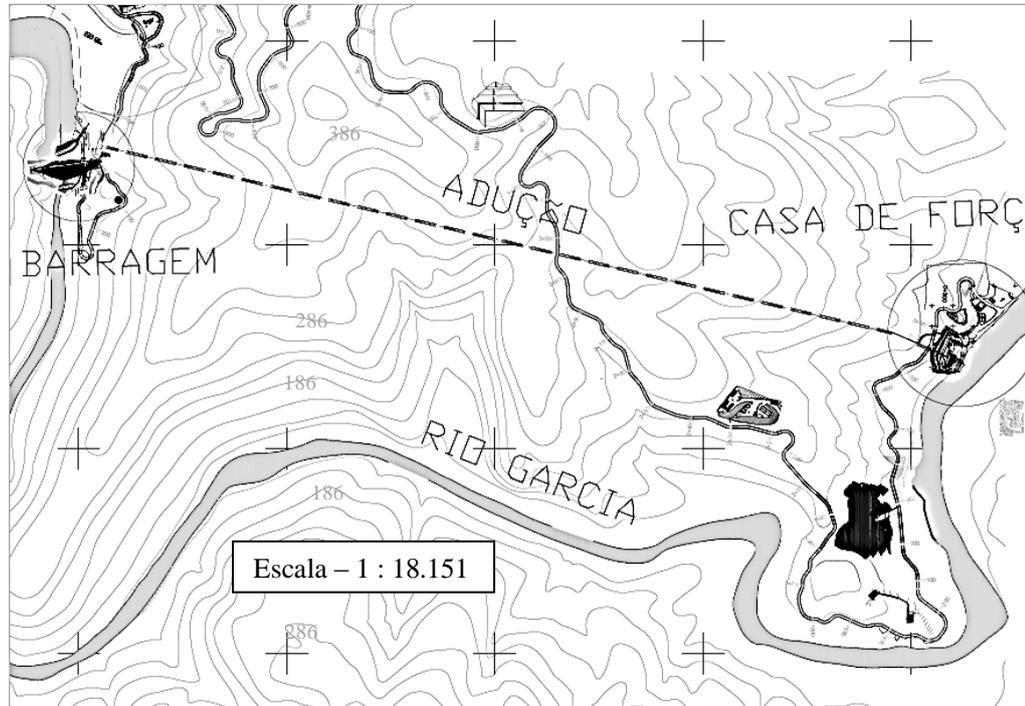
Fonte: Sulconsult Consultoria e Engenharia Ltda. (2008)

Figura 4. Planta baixa da barragem.



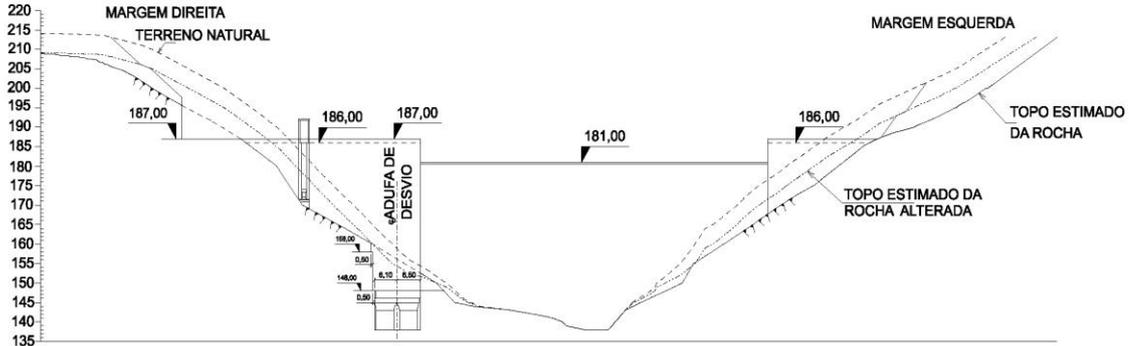
Fonte: Sulconsult Consultoria e Engenharia Ltda. (2008)

Figura 5. Layout da barragem e estruturas a jusante.

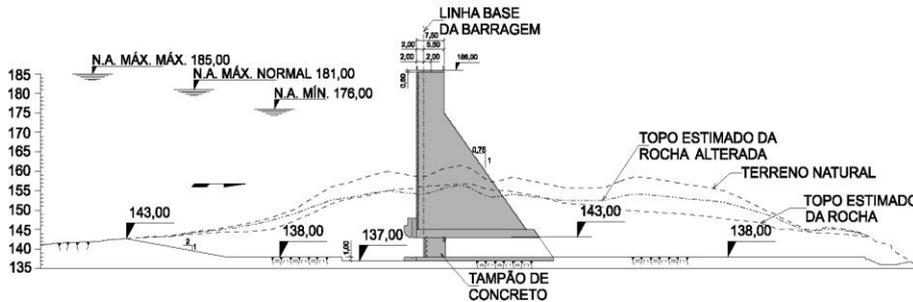


Fonte: Adaptado de Sulconsult Consultoria e Engenharia Ltda. (2008)

Figura 6. Vista à montante e seção da barragem.



VISTA BARRAGEM MONTANTE



SEÇÃO BARRAGEM

Fonte: Sulconsult Consultoria e Engenharia Ltda. (2008)

## 4.2. MATERIAIS

As fontes de dados obtidos para a aplicação no modelo hidráulico e elaboração dos mapas de inundação estão organizadas na Tabela 7. De posse destes elementos, a manipulação de dados hidrológicos e topográficos foi necessária para a entrada no modelo HEC-RAS, e com os resultados obtidos na simulação foi elaborado um mapa de inundação.

Tabela 7. Fontes de obtenção de dados.

<b>Dados hidrológicos</b>	Histórico de vazões no Rio Garcia	Agência Nacional das Águas 24 anos de vazões diárias
	Cota-Volume do reservatório	Sulconsult Consultoria e Engenharia Ltda.
<b>Dados topográficos</b>	Curvas de nível na região da barragem e casa de força	Sulconsult Consultoria e Engenharia Ltda. Escala 1:5.000, Datum WGS-84
	Curvas de nível no restante da área de interesse	EPAGRI Escala 1:5.000, Datum SAD-69
<b>Imagens de satélite</b>	Google Earth	

Os dados hidrológicos obtidos foram basicamente dados históricos de vazões em um ponto no trecho estudado e os dados de cota-vazão utilizados no dimensionamento do reservatório visando conhecer o aproveitamento energético disponível.

A curva cota x volume – Figura 7 e Tabela 8 – foi obtida em um documento obtido junto à empresa Sulconsult Consultoria e Engenharia Ltda., onde estavam expressos estudos hidráulicos e hidrológicos do reservatório da PCH Angelina.

Uma série de 24 anos de vazões diárias foi obtida junto a plataforma HidroWeb da Agência Nacional das Águas, em uma estação distante cerca de 2 km da barragem em linha reta e cerca de 5 km pelo leito do rio (Figura 8). Os dados da estação estão expressos na Tabela 9.

Tabela 8. Cota x Volume - Reservatório PCH Angelina

<b>Cota (m)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>
142,5	0
155,0	150.000
160,0	350.000
165,0	1.000.000
170,0	1.800.000
175,0	3.000.000
180,0	4.700.000
181,0	5.100.000
185,0	6.800.000

Fonte: Sulconsult Consultoria e Engenharia Ltda. (2008)

Figura 7. Curva cota x volume - Reservatório PCH Angelina

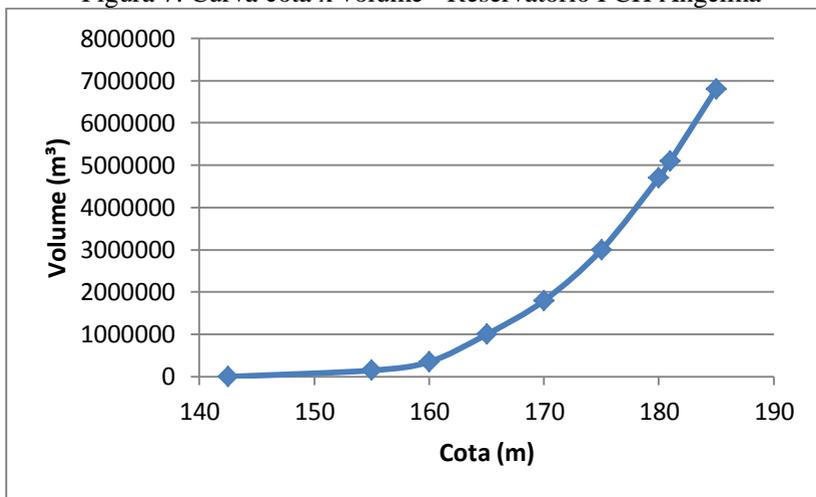


Figura 8. Localização estação ANA.



Fonte: Google Earth (2011)

Tabela 9. Dados estação ANA.

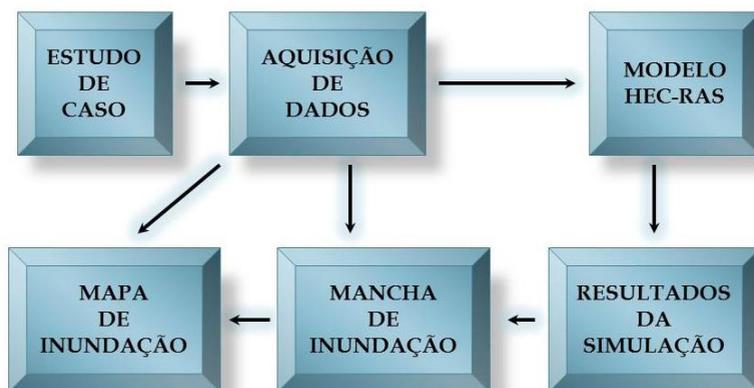
<b>Código</b>	84020000
<b>Nome</b>	Garcia de São José
<b>Bacia</b>	Atlântico, Trecho Sudeste
<b>Sub-bacia</b>	Rios Tubarão e Araranguá e Outros
<b>Rio</b>	Rio Garcia
<b>Estado</b>	Santa Catarina
<b>Município</b>	Angelina
<b>Responsável</b>	ANA
<b>Operadora</b>	ANA
<b>Latitude</b>	- 27:29:0
<b>Longitude</b>	- 48:59:0
<b>Altitude (m)</b>	210
<b>Área de Drenagem (km<sup>2</sup>)</b>	354

Fonte: Adaptado de ANA (2013)

### 4.3. FLUXOGRAMA METODOLÓGICO

A Figura 9 sintetiza as atividades desenvolvidas para este trabalho:

Figura 9. Fluxograma metodológico.



#### 4.4. ESTUDO DOS DADOS HIDROLÓGICOS

As vazões máximas foram calculadas para os tempos de retorno estipulados por meio do método das distribuições de valores extremos do tipo I, ou distribuição de Gumbel. Na Tabela 10 estão expressas as vazões obtidas, partindo da vazão média no período estudado – 61,6 m<sup>3</sup>/s – e do desvio padrão – 89,3 m<sup>3</sup>/s. A terceira coluna da Tabela 10 se refere a uma correção das vazões encontradas, devido a uma diferença de áreas de drenagem – os dados históricos se referem a uma bacia de 354 m<sup>2</sup> (Tabela 9) e a PCH tem uma área de drenagem de 787 m<sup>2</sup> (Tabela 6).

Tabela 10. Vazões máximas pelo método de Gumbel

Período de retorno (anos)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Vazão corrigida para 787 km <sup>2</sup> (m <sup>3</sup> /s)
2	46,95	104,38
5	125,90	279,89
10	178,17	396,09
20	228,30	507,55
50	293,20	651,83
100	341,83	759,94
1000	502,52	117,19

#### 4.5. MANIPULAÇÃO DE DADOS TOPOGRÁFICOS

Os dados topográficos obtidos foram manipulados para serem combinados na elaboração de um modelo único para entrada no modelo HEC-RAS. O programa utilizado neste caso foi o AutoCAD Civil 3D, utilizando dados de elevação na forma de curva de nível, obtidas já digitalizadas em plataforma CAD.

Como expresso na Tabela 7 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, para a região da barragem e casa de força foram utilizadas curvas de nível obtidas junto a empresa Sulconsult, e para localidades externas a esses dados foram empregadas curvas de nível obtidas junto à Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

(EPAGRI), na plataforma de Mapas Digitais em seu endereço virtual, na quadrícula com a referência “São João Batista”.

A manipulação dos dados partiu da transformação das propriedades das curvas de nível na região da barragem no software AutoCAD Civil 3D, de forma que estas poderiam ser posteriormente reconhecidas pelo software HEC-RAS, onde seria feita a simulação hidrodinâmica. Estas modificações consistiram basicamente da mudança de tipo de linha em que as curvas se encontravam, de *spline* para *polyline*, passando a se comportar de outra forma no que se trata de suas propriedades e aplicações, e a inserção de elevações nas propriedades das curvas, uma vez que estas apresentavam a elevação apenas na forma de legenda, não podendo ser reconhecida na formação automática de uma superfície.

Nas curvas de nível do restante da região não foram necessárias as modificações citadas anteriormente, apenas a exclusão das curvas que se apresentavam contidas na região onde já se possuíam dados mais detalhados.

De posse das curvas de nível manipuladas e organizadas para a região de interesse (Figura 10), foi gerada uma superfície fiel às elevações atribuídas às curvas, com o auxílio de uma ferramenta específica do AutoCAD Civil 3D. Esta superfície encontra-se exposta na Figura 11, onde é possível a observação da diferença entre a região da barragem (curvas obtidas no projeto da PCH) e o restante da área.

Figura 10. Dados topográficos organizados e manipulados.

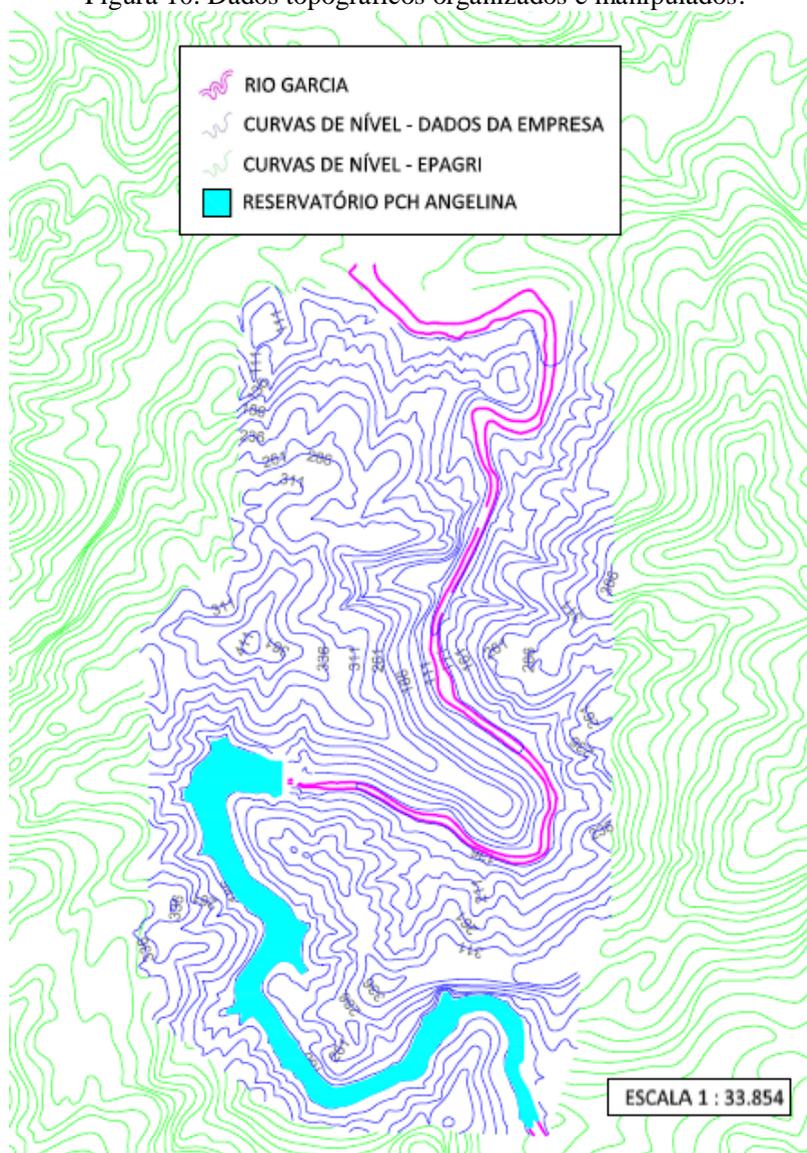
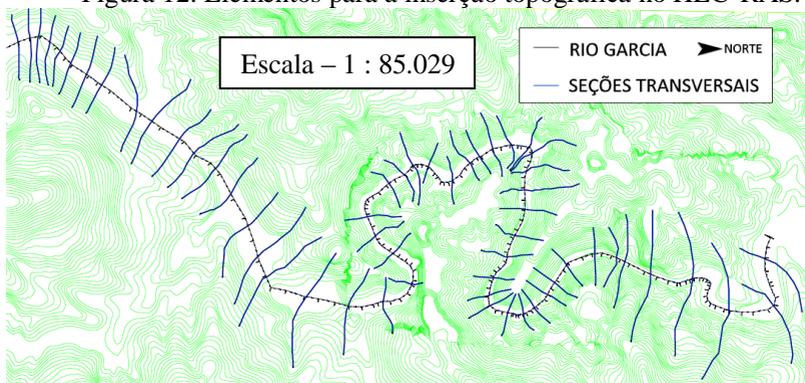


Figura 11. Superfície na região da PCH Angelina.



O HEC-RAS trabalha a topografia em seu programa na forma de seções de interesse para a região dos cursos d'água, e o método utilizado pelo AutoCAD Civil 3D para a criação destas seções a partir da superfície são as *simple lines*, atreladas ao rio (na forma de *alignment*) e à superfície. Estes componentes (Figura 12) foram traçados de modo que pudessem representar corretamente no modelo hidrodinâmico o Rio Garcia e as seções a serem trabalhadas.

Figura 12. Elementos para a inserção topográfica no HEC-RAS.



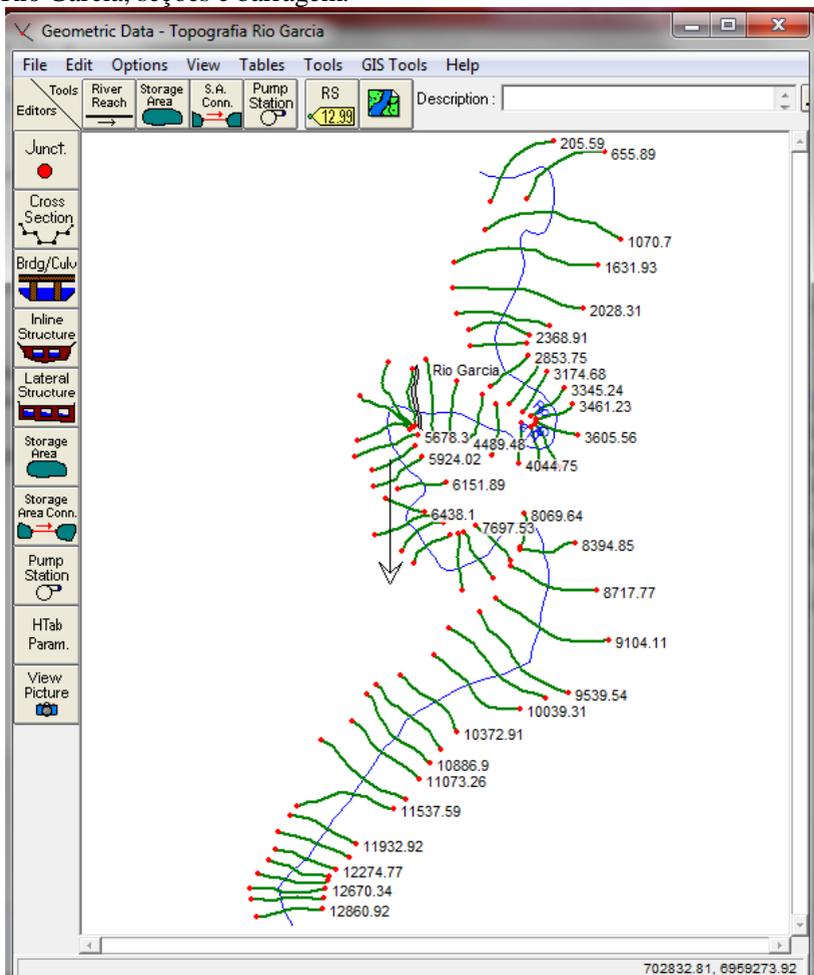
Com o auxílio da ferramenta própria para exportação de dados do AutoCAD Civil 3D para o HEC-RAS, selecionando os elementos específicos, foi criado um arquivo em formato SIG possibilitando a leitura da topografia pelo software de modelagem hidrodinâmica.

#### 4.6. APLICAÇÃO DO MODELO HEC-RAS

Foi realizada a modelagem hidrodinâmica por meio do software HEC-RAS 4.1, obtido gratuitamente no site da organização desenvolvedora (U.S. Army Corps of Engineers).

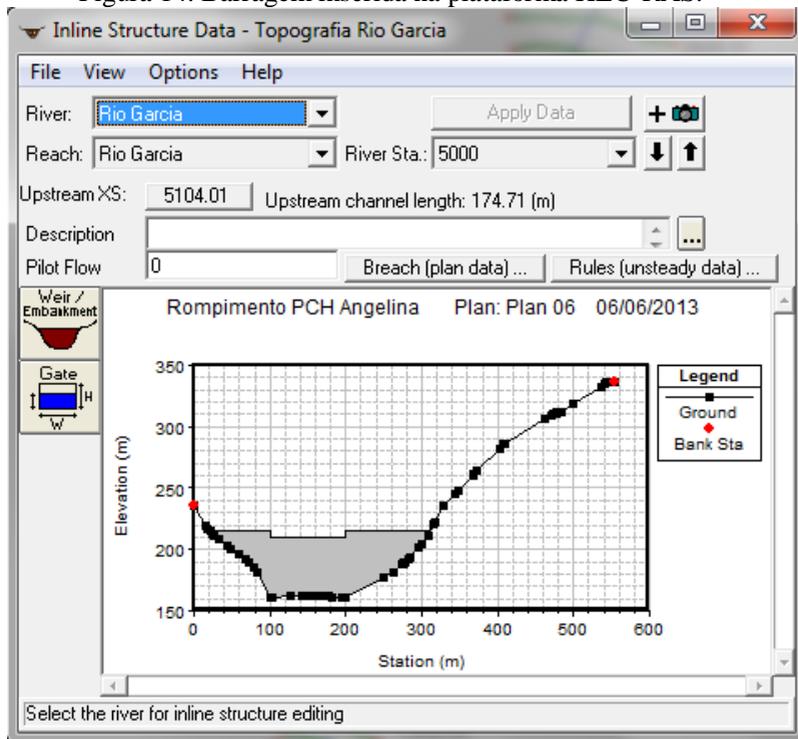
No presente estudo, todos os cálculos tiveram por base o escoamento com regime não permanente, com o qual o software oferece a opção da modelagem do rompimento de estruturas hidráulicas. A perda de energia é calculada pela equação de Manning. Por meio da equação de conservação da energia são determinadas as velocidades e profundidades do escoamento para cada uma das seções transversais.

Figura 13. Seção de dados de relevo e estruturas no HEC-RAS – Rio Garcia, seções e barragem.



O primeiro passo na utilização do software foi a importação dos dados topográficos na seção *Geometry Data* (Figura 13), seguido da inserção da barragem em seu devido ponto no rio Garcia, de forma fiel a seus atributos observados nos projetos estruturais, e utilizando-se das modificações necessárias na seção para isso, como pode ser observado na Figura 14.

Figura 14. Barragem inserida na plataforma HEC-RAS.

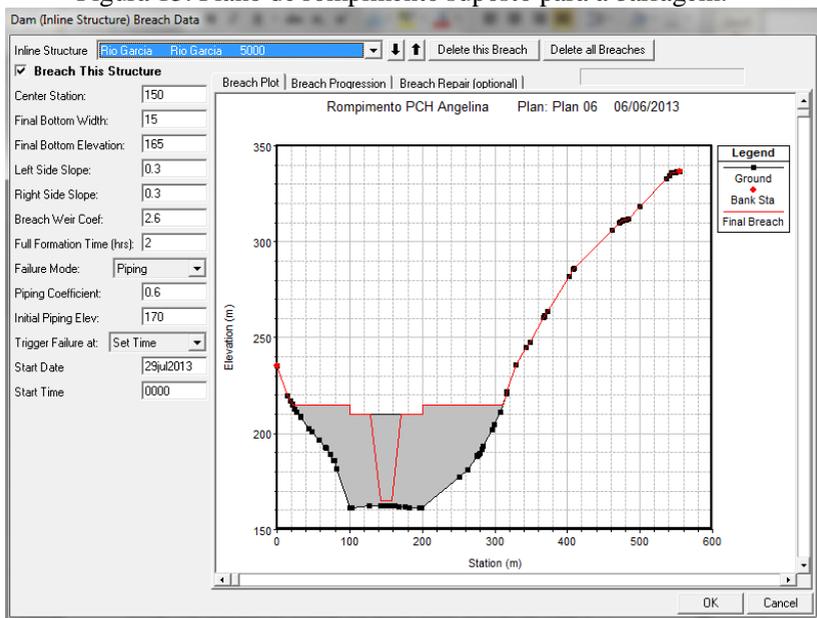


Com base nas vazões máximas determinadas, foi criado um cenário de cheia para o momento do rompimento hipotético da barragem. Para a simulação em regime não-permanente foi utilizada a seção *unsteady flow* do software, atribuindo valores iniciais de escoamento e condições para as seções limite do modelo, na forma de hidrograma projetado para o período em que ocorreria a simulação do rompimento da barragem. A condição inicial para o escoamento foi a de total preenchimento do reservatório.

Com todo o cenário topográfico e hidrológico inserido no modelo, foi suposto um plano de rompimento para a estrutura, levando em conta recomendações do *User's Manual* (USACE, 2010b). Na plataforma do HEC-RAS *Dam Breach Data* (Figura 15), foram inseridos dados como forma e dimensões do rompimento proposto e

quando e de que forma este se daria. Foi suposto um rompimento de progressão linear ao longo de sua duração, e não foi considerado o reparo dos danos à barragem.

Figura 15. Plano de rompimento suposto para a barragem.



#### 4.7. ELABORAÇÃO DO MAPA PARA ANÁLISE DE RISCO

A mancha de inundação foi trabalhada no software com o auxílio da extensão HEC-geoRAS, dentro do *software* ArcGIS 9.3, onde foi possível a preparação de dados geométricos para importação e processamento dos resultados obtidos em simulação do HEC-RAS.

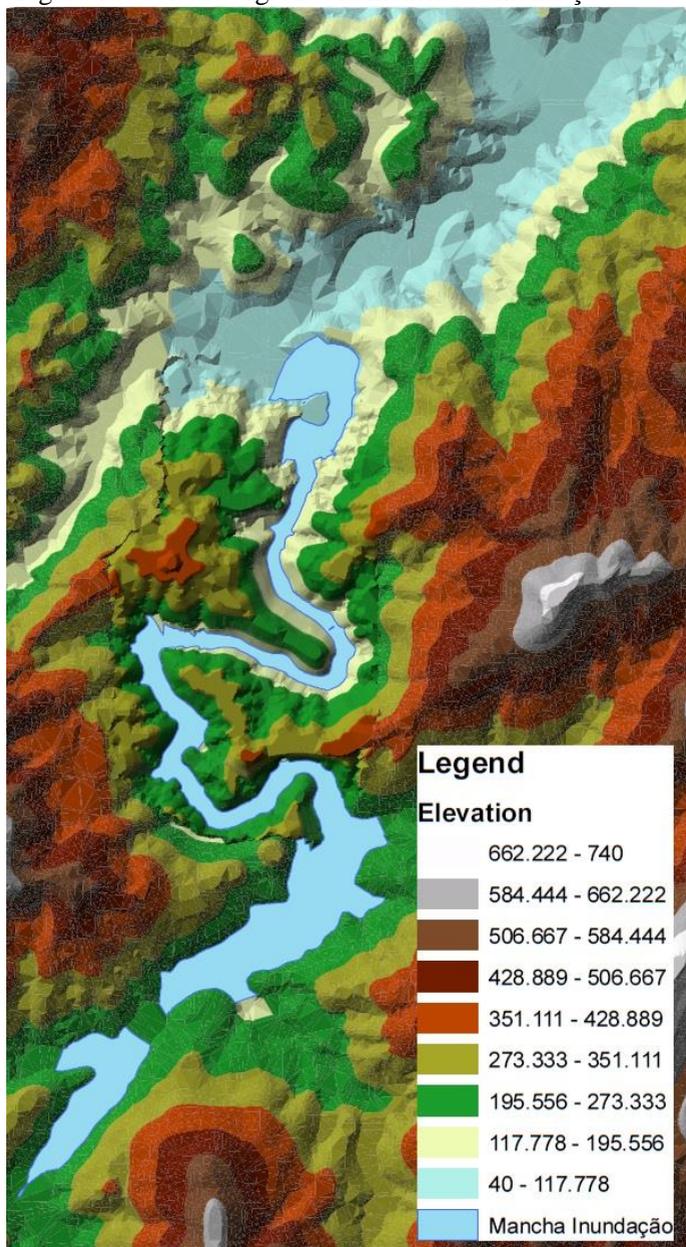
Foi escolhida a exportação da mancha de inundação em um momento três horas após o rompimento da barragem, onde o alagamento de áreas ocupadas à jusante foi mais expressivo (Figura 20), sendo possível a opção também por outros momentos da simulação se fosse esse o interesse.

A exportação foi feita por ferramenta específica do HEC-RAS que permite serem selecionados os momentos da simulação, variáveis e trechos do rio (no caso, apenas uma variável – superfície de água,

apenas um momento da simulação e apenas um trecho do rio – o rio principal). O arquivo de exportação pôde ser trabalhado dentro do ArcGIS, com o auxílio da extensão HEC-geoRAS, que realizou a conversão do resultado para formato apto a ser reconhecido pelo programa.

Foi também importado no ArcGIS a mesma topografia utilizada para inserção no HEC-RAS, possibilitando o processamento da mancha de inundação em terreno digital (Figura 16). Dentro do próprio ArcGIS, também com o auxílio da extensão HEC-geoRAS, foi realizada a conversão de formato da mancha de inundação, visando sua visualização no software livre Google Earth, para sobreposição da mancha de inundação em imagem de satélite. Não foi realizada nenhuma conversão de Datum, uma vez que tanto o levantamento topográfico utilizado para a região da barragem quanto o Google Earth trabalham com a projeção WGS84.

Figura 16. Terreno digital com mancha de inundação.





## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados fornecidos pelo modelo hidrodinâmico HEC-RAS foram expressos de diferentes formas, nos mais diversos pontos do trecho trabalhado do Rio Garcia. Após a realização da simulação programada para os fatores estabelecidos de vazões e rompimento da estrutura, foi possível visualizar o nível d'água em cada seção, a cada momento do cenário imposto.

Na Figura 17 é possível observar o perfil do nível de água e sua linha de energia no início da simulação, antes do rompimento da barragem, com o reservatório cheio, e na Figura 19 a área de inundação do reservatório e o leito do rio à jusante da barragem, no mesmo instante da figura anterior.

Com o rompimento da barragem, parte do volume de água contido no reservatório foi liberado, gerando a propagação de uma onda de cheia na região à jusante. No perfil (Figura 18) e mapa de inundação (Figura 20) fornecidos pela simulação, em um momento 4 horas após o rompimento da barragem, é possível de se observar o deslocamento do volume de água ao longo do Rio Garcia. Em uma imagem do Rio Garcia 22 horas após o rompimento da barragem – Figura 21 - é evidente o esvaziamento do reservatório da PCH Angelina. Outros momentos da inundação após o rompimento da barragem encontram-se na seção 8.ANEXOS.

A inundação de certas regiões é observada com o rompimento da barragem, principalmente nas de menor declividade. Foi utilizada como exemplo a seção localizada mais a jusante da barragem no trecho estudado (Figura 22), onde ocorre a inundação do leito de cheia devido ao deslocamento do volume de água antes contido no reservatório da PCH Angelina. A primeira imagem representa a seção em um momento da simulação anterior ao rompimento da barragem, e a segunda imagem se refere ao momento de maior inundação no local, 3 horas após o rompimento.

O mapa de inundação, elaborado com a sobreposição do resultado da simulação no momento crítico em imagem do software Google Earth, pode ser observado na Figura 23. A inundação mostrada representa o momento de maior cheia a jusante do rompimento – 3 horas após – onde é possível observar quais ocupações seriam atingidas em situação de acidente, em detalhe na Figura 24.

Figura 17. Perfil d'água no Rio Garcia antes do rompimento.

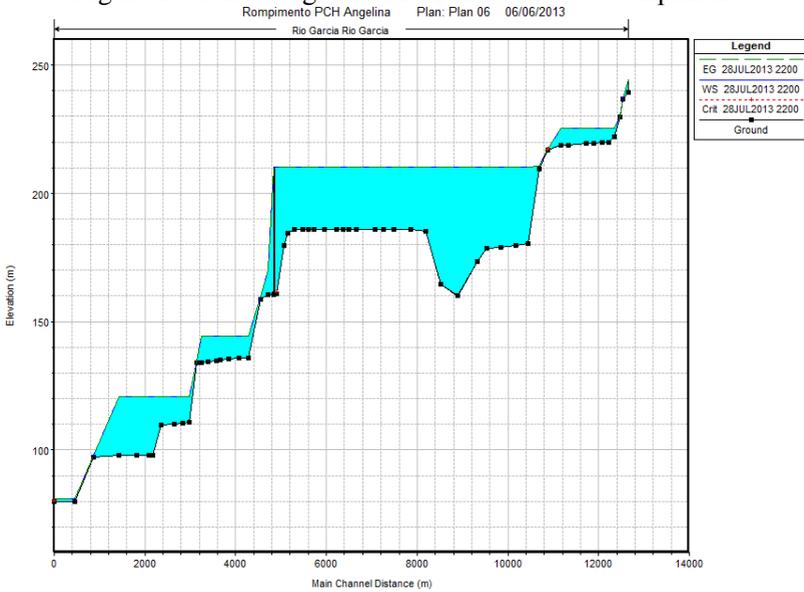


Figura 18. Perfil d'água no Rio Garcia após o rompimento.

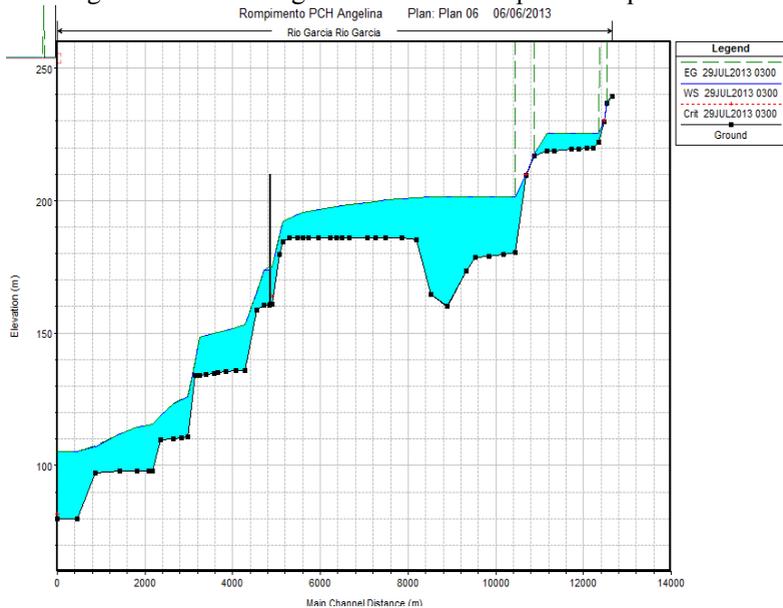


Figura 19. Rio Garcia antes do rompimento.  
Rompimento PCH Angelina Plan: Plan 06 06/06/2013

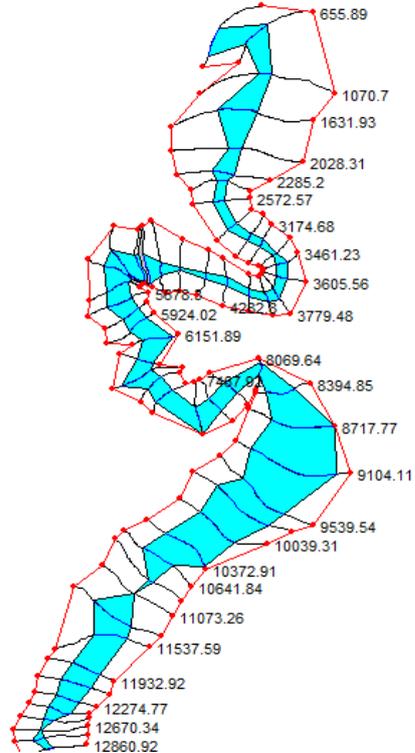


Figura 20. Rio Garcia 4 horas após o rompimento.  
Rompimento PCH Angelina Plan: Plan 06 06/06/2013

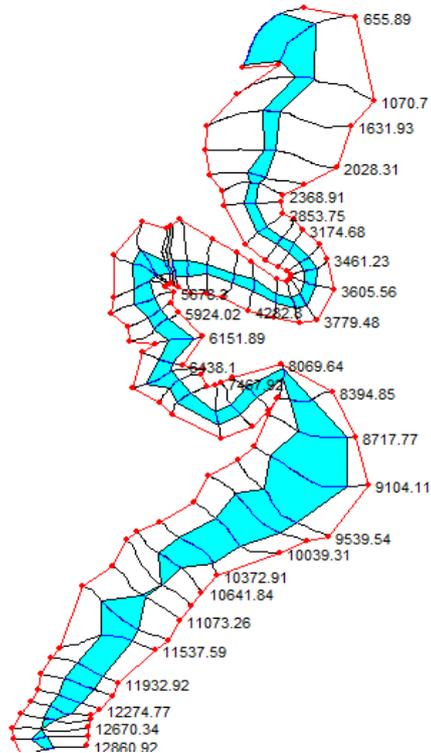


Figura 21. Rio Garcia 22 horas após o rompimento.  
 Rompimento PCH Angelina Plan: Plan 06 06/06/2013

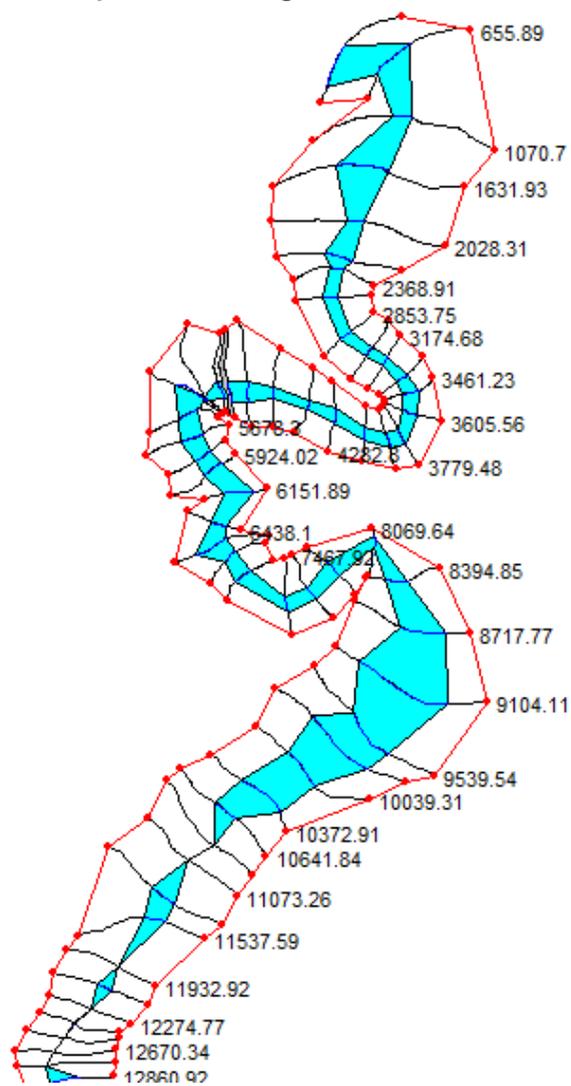
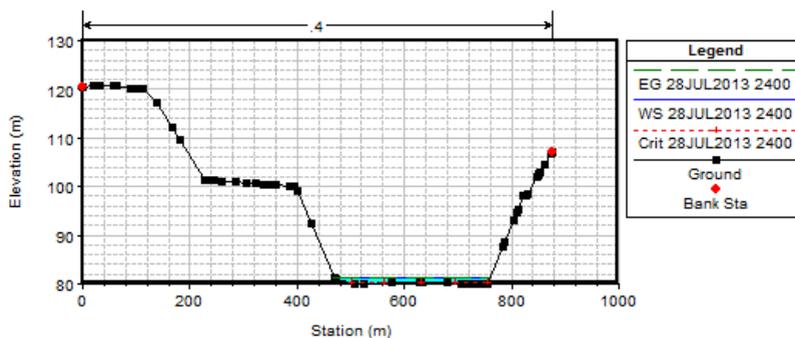
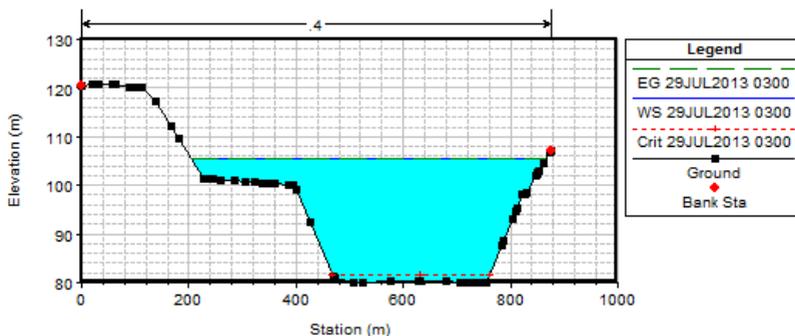


Figura 22. Simulação em seção a jusante da barragem.

Rompimento PCH Angelina Plan: Plan 06 06/06/2013



Rompimento PCH Angelina Plan: Plan 06 06/06/2013



Na análise da sessão apresentada na Figura 22, a ocupação da planície de inundação pela onda de ruptura evidencia que, nesse ponto, é possível a existência de habitações e conseqüentes riscos humanos. Figuras de outros momentos após o rompimento são apresentadas na seção 8.ANEXOS.

O cruzamento da inundação com o mapa de ocupação do local é certamente a forma mais clara de estabelecer o real risco apresentado pela situação hipotética estudada.

Figura 23. Mapa de inundação.



Fonte: Google Earth (2011)

Figura 24. Detalhe mapa de inundação - Região da casa de força



Fonte: Google Earth (2011)

Um ponto que pode ser observado claramente na Figura 23 é a muito provável continuação da inundação além do terreno inserido na simulação, evidenciando que por mais que a modelagem realizada possa descrever a inundação na região estudada, não compreende o total alcance da onda de ruptura sobre o trecho a jusante.

O mapa de inundação (Figura 23) mostra – até o ponto em que foi desenvolvido – as ocupações em risco no caso de rompimento. Também fica claro, ao analisar o mapa de inundação na região da casa de força

(Figura 24), que as ocupações imediatamente a jusante do trecho estudado também estarão em ameaça, considerando a simulação realizada. Foi apresentado certo desvio entre a mancha de inundação (exportado do HEC-RAS) e a imagem de satélite (Google Earth).

Ao analisar a seção exposta na Figura 22, é possível apontar que a inundação ocorrida se refere a uma cheia de período de retorno de 17.615 anos. Para tal conclusão foi utilizada a fórmula de manning [6], adaptada de U.S. Army Corps of Engineers (2010), aplicada ao Rio Garcia para obtenção da vazão, e a mesma metodologia utilizada na Tabela 10 – método de Gumbel – para obtenção do período de retorno da cheia.

$$Q = \frac{A * R_h^{\frac{2}{3}} * \sqrt{I}}{n} \quad [6]$$

Onde:  $A$  é a área molhada da seção,  $R_h$  é o raio hidráulico,  $I$  é a inclinação e  $n$  o coeficiente de manning.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos e apresentados, foi possível realizar uma análise e chegar a conclusões de quais seriam alguns dos efeitos de um rompimento da barragem nos moldes projetados. A simulação retratou como seria o comportamento da inundação a jusante da barragem se viesse a ocorrer o seu rompimento, considerando o volume de água liberado no caso do reservatório em seu nível máximo.

Para a elaboração de um Plano de Ações Emergenciais, o desenvolvimento de um mapa de inundação do possível rompimento da barragem é fundamental, visando a identificação das áreas que possam vir a ser atingidas em caso de acidente e as medidas que devem ser tomadas para notificação e retirada de pessoas que estejam em ameaça.

Na elaboração do Plano de Ações Emergenciais é solicitada, de acordo com Ministério da Integração Nacional (2002), uma interpretação da simulação de inundação realizada, constando o número e descrição das propriedades na região de inundação a jusante da barragem e o tempo que as primeiras construções viriam a ser atingidas. Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia avaliada neste trabalho devem servir para auxiliar o preenchimento dessas informações.

O Google Earth é uma excelente ferramenta de visualização de localidades e avaliações preliminares, mas a aquisição de imagens de satélite mais precisas seria indicada para um melhor georreferenciamento do mapa. Outro possível motivo para o desvio entre a superposição da mancha de inundação na imagem de satélite são as diferentes fontes de dados, uma vez que foi utilizado um levantamento topográfico realizado por uma empresa para auxílio nos projetos da PCH Angelina.

Inicialmente foi planejada para este estudo a utilização de imagens de satélite que viriam a ser disponibilizadas pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável – SDS, referentes ao programa de Levantamento Aerofotogramétrico do Estado, iniciado em 2008, mas estes dados não foram adquiridos em tempo hábil para inserção no trabalho.

São indicadas também algumas sugestões de melhoria em uma complementação do presente trabalho ou em um estudo futuro:

- A simulação deveria se estender até o próximo núcleo urbano ou mancha significativa de ocupação, no caso, o município de Major Gercino. A delimitação do trecho

estudado em 5 km a jusante da barragem não abrange o total efeito do hipotético rompimento, como pode ser observado nos resultados obtidos;

- A topografia obtida e manipulada deveria ser complementada por batimetria realizada no Rio Garcia, ou na falta de dados batimétricos, a inserção de uma calha estimada para o rio deveria ser realizada. No estudo aqui desenvolvido, as cotas da barragem foram adaptadas às cotas do terreno utilizado, quando o oposto seria o mais indicado neste caso, com a adaptação da calha do rio às cotas já conhecidas da barragem;
- Para a correta utilização das vazões obtidas, deveria ter sido aplicado um procedimento de calibração do modelo, com a aplicação das vazões conhecidas na entrada de regime permanente no software HEC-RAS, ajustando o coeficiente de rugosidade do trecho até serem encontradas as cotas desejadas para o nível de água;
- A ruptura projetada é normalmente utilizada para barragens de enrocamento, onde o rompimento se dá basicamente de forma trapezoidal no eixo da barragem. A barragem da PCH Angelina é construída em Concreto Compactado a Rolo – CCR, e neste caso a ruptura normalmente se dá nas ombreiras da barragem. Esta avaliação deve ser feita por um especialista nas estruturas e que conheça bem o projeto estrutural, de forma que possa indicar os pontos vulneráveis da barragem e qual seria a forma de rompimento mais provável em caso de acidente.

Não seria recomendada a utilização dos resultados obtidos como base para a elaboração de um Plano de Ações Emergenciais, por conta da baixa precisão oferecida devido a simplificações topográficas e hidrológicas já apontadas anteriormente.

Apesar dos vários pontos apontados como melhorias para o estudo, foram alcançados importantes objetivos, descritos no capítulo 3 deste trabalho. A avaliação de uma metodologia para estudo hidráulico do rompimento de uma barragem foi o mais significativo deles, propiciando a um futuro trabalho embasamento suficiente para ser desenvolvido um bom estudo acerca da simulação do rompimento de uma barragem.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **HidroWeb – Séries Históricas**. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 01 abril 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Plano de Segurança da Barragem**. Disponível em: <<http://tinyurl.com/d2zuyhz>>. Acesso em: 15 dez. 2012.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Política nacional de segurança de barragens. Brasília, 2010.

COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS. **Barragens no Brasil**. São Paulo: Técnica Ltda., 1982. 279 p.

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. **Guia Prático para Projetos de Pequenas Obras Hidráulicas**. São Paulo, 2005. 116 p.

GARCEZ, Lucas Nogueira. **Construções Hidráulicas**. São Paulo: Edgar Blücher, 1962. 276 p.

GOERL, Roberto Fabris. **Estudo de inundações em Rio Negrinho - SC sob a ótica dos desastres naturais**. 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

GOLZÉ, Alfred R. **Handbook of Dam Engineering**. Nova York: Van Nostrand Reinhold Ltd, 1977. 793 p.

GRACIOSA, Melissa Cristina Pereira. **Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão do risco de inundações**. 2010. 163 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GUIMARÃES, Solange T. de Lima et al. (Org.). **Gestão de Áreas de Riscos e Desastres Ambientais**. Rio Claro: IGCE / UNESP, 2012. 406 p.

LAURIANO, André William. et al. **Modelagem da Onda de Cheia Proveniente de Ruptura Hipotética de Barragem: Comparação Entre os Modelos HEC-RAS e FLDWAV**. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA PUNTA DEL ESTE, XXIV, 2010, Punta Del Leste.

MENESCAL, Rogério de Abreu (Org.). **A Segurança de Barragens e a Gestão de Recursos Hídricos no Brasil**. 2ª Edição Brasília: Proágua, 2005. 316 p.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília, 2002. 148 p.

NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José De Andrade. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: Cprm, 2007. 552 p.

NATURAL HAZARDS. **List of Large Dam Failures**. Disponível em: <<http://tinyurl.com/c7qlc3z>>. Acesso em: 27 nov. 2012.

PORTUGAL. **Decreto nº 344, de 15 de outubro de 1997**. Regulamento de segurança de barragens. Lisboa, 1997.

SINGH, V.P. **Dam Breach Modeling Technology**. Norwell: Kluwer Academic Publishers, 1996. 256 p.

UNDP – United Nations **Development Program. Reducing disaster risk: a challenge for development**. New York: UNDP, 2004. 130p.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-GeoRAS – GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS – User’s Manual**. Davis, CA – EUA, 2011. 244 p.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS – River Analysis Sistem – Hydraulic Reference Manual**. Davis, CA – EUA, 2010. 417 p.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS – River Analysis Sistem – User’s Manual**. Davis, CA – EUA, 2010b. 790 p.

VISCHER, D. L.; HAGER, W. H. **Dam Hydraulics**. Zürich: John Wiley E Sons Ltd, 1997. 316 p.



## 8. ANEXOS

Figura 20.1. Rio Garcia no momento do rompimento.

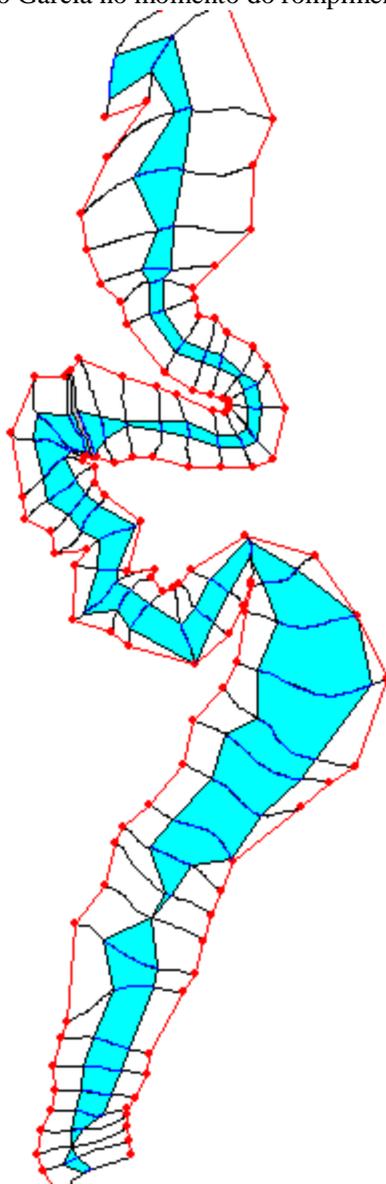


Figura 20.2. Rio Garcia 1 hora após o rompimento.

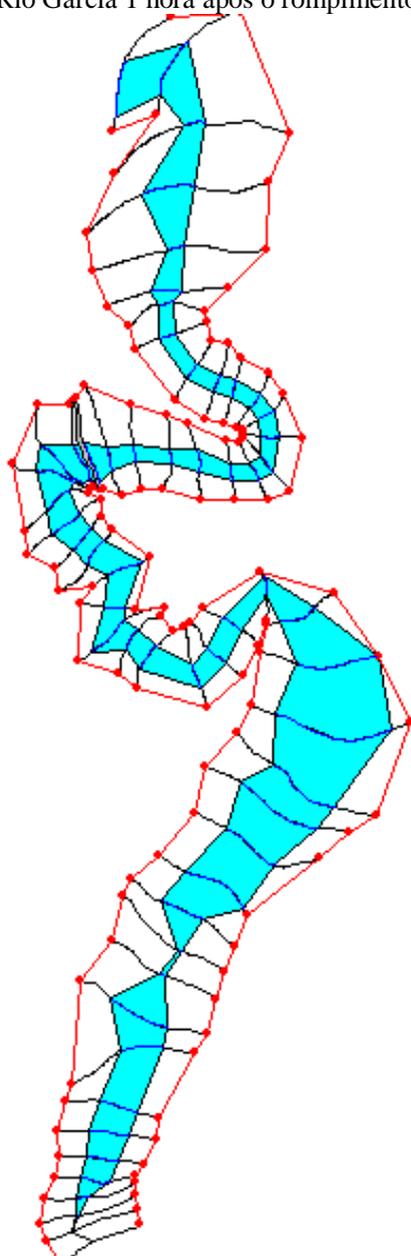


Figura 20.3. Rio Garcia 2 horas após o rompimento.

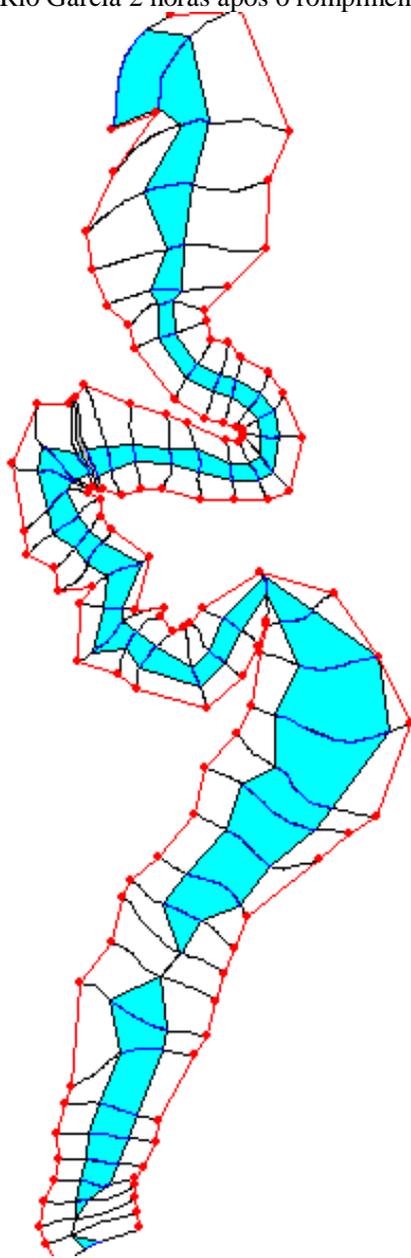


Figura 20.4. Rio Garcia 3 horas após o rompimento.

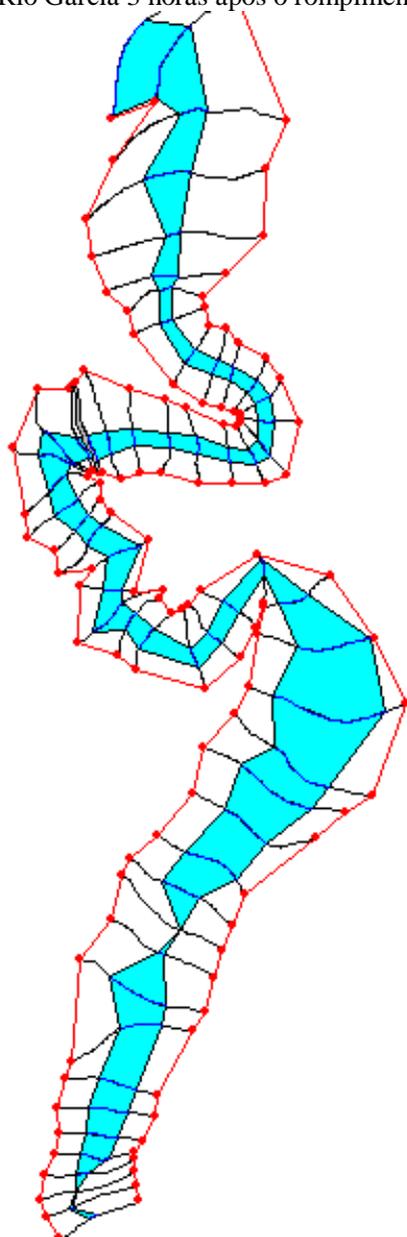


Figura 20.5. Rio Garcia 5 horas após o rompimento.

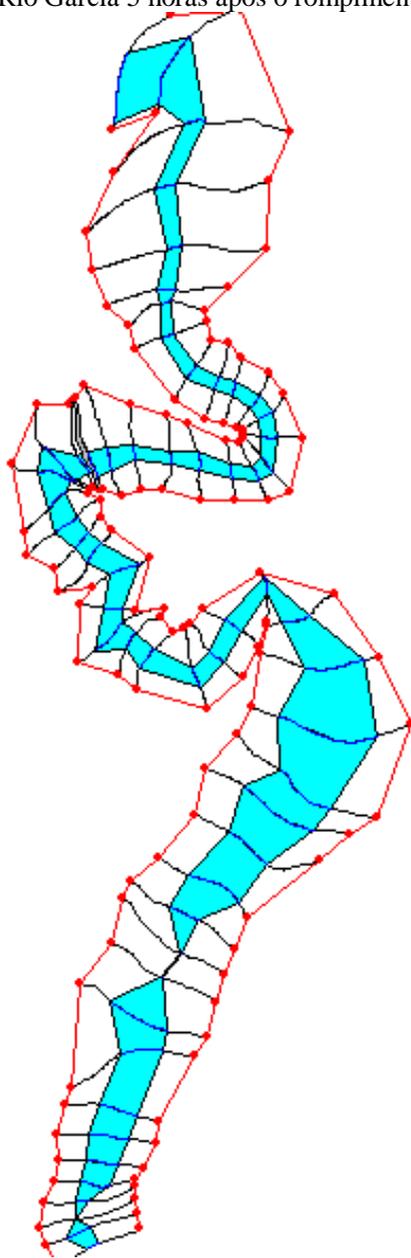


Figura 20.6. Rio Garcia 6 horas após o rompimento.

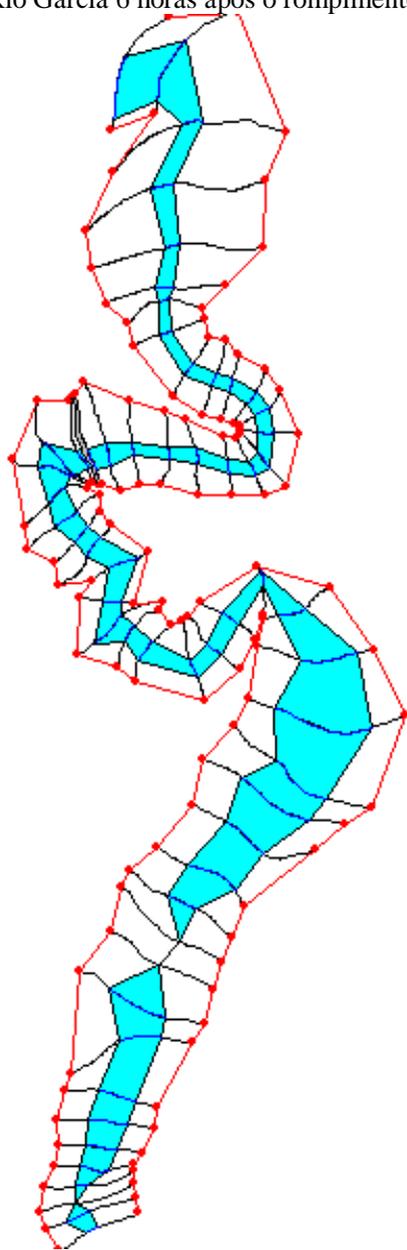


Figura 22.1. Seção a jusante no momento do rompimento.

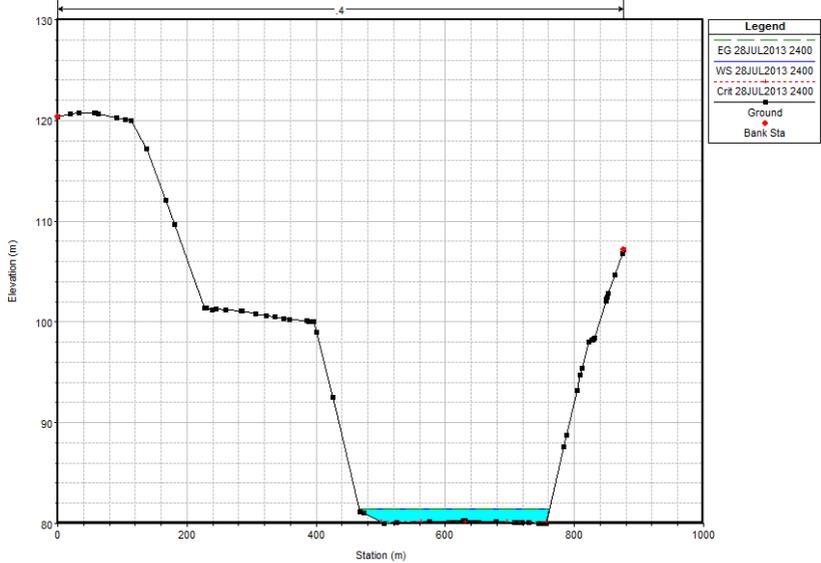


Figura 22.2. Seção a jusante 1 hora após o rompimento.

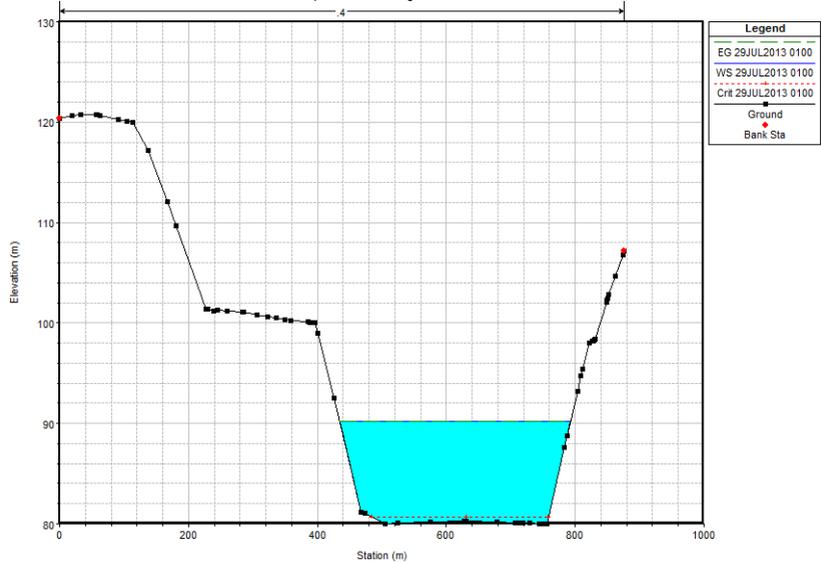


Figura 22.3. Seção a jusante 2 horas após o rompimento.

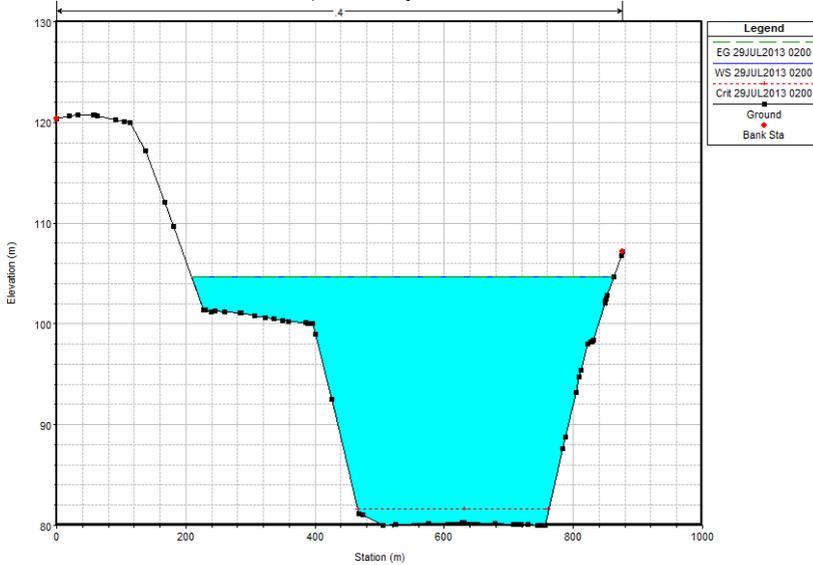


Figura 22.4. Seção a jusante 4 horas após o rompimento.

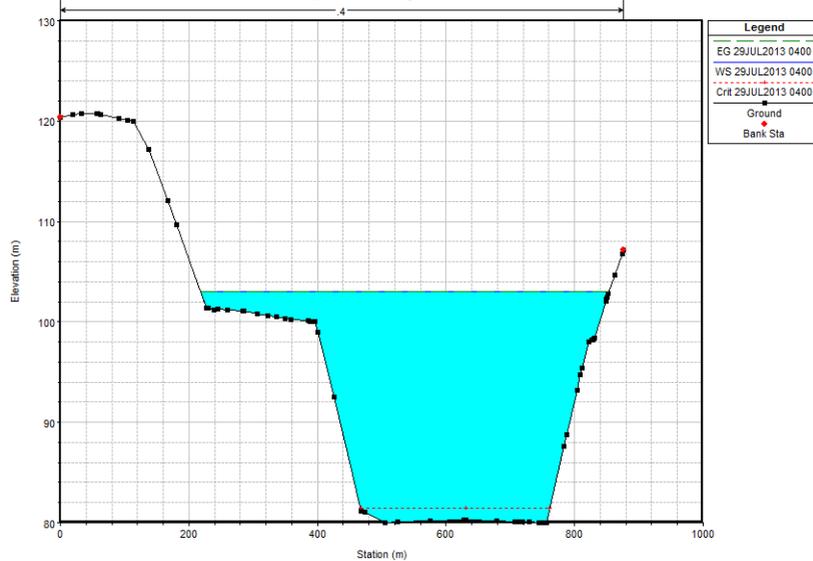


Figura 22.5. Seção a jusante 5 horas após o rompimento.

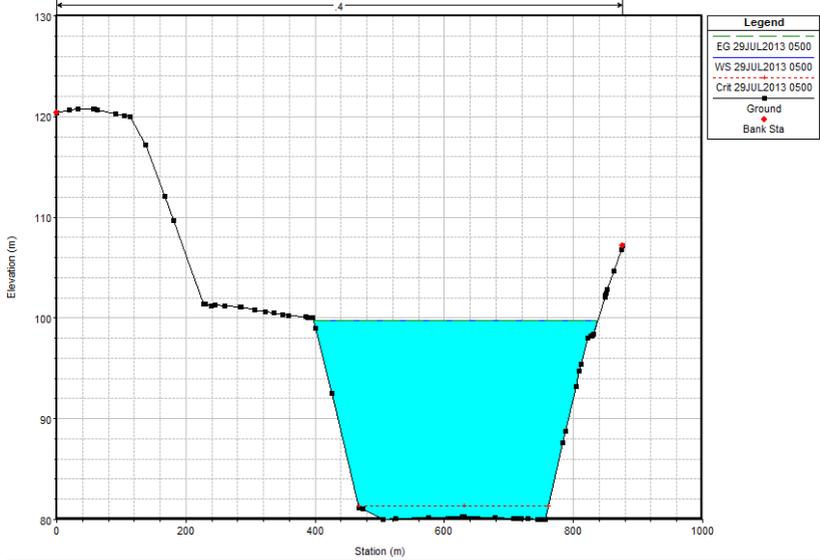


Figura 22.6. Seção a jusante 6 horas após o rompimento.

