

PEDRO GUILHERME DE LARA

**METODOLOGIA PROBABILÍSTICA DE PREVISÃO DE
BRECHA DE RUPTURA DE BARRAGENS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof^ª. Dr.^a Nadia Bernardi Bonumá

FLORIANÓPOLIS, SC
MARÇO/2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

de Lara, Pedro Guilherme
Metodologia probabilística de previsão de brecha de
ruptura de barragens / Pedro Guilherme de Lara ;
orientadora, Nadia Bernardi Bonumá ; coorientador,
Christopher Goodell. - Florianópolis, SC, 2016.
181 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. Método probabilístico. 3.
Ruptura de barragens. 4. Cota de inundação . 5. Segurança de
barragens. I. Bonumá, Nadia Bernardi. II. Goodell,
Christopher. III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.



“Metodologia Probabilística de Previsão de Brecha de Ruptura de Barragens”

PEDRO GUILHERME DE LARA

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Engenharia Ambiental.

Aprovado por:

Prof. Nadia Bernardi Bonumá, Dr.
(Orientadora)

Prof. Sebastião Roberto Soares, Dr.

Prof. Nilson Guiguer Junior, Dr.

Prof. Carlos Henrique Medeiros, Dr.

Prof. William Gerson Matias, Dr.
(Coordenador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora Nadia Bernardi Bonumá, pelo voto de confiança e pela valiosa orientação.

À Fractal Engenharia pelo apoio e suporte no desenvolvimento do trabalho.

À Eletronorte, pelo apoio e pelo voto de confiança, especialmente, ao Gilson e ao Waltinho.

Ao Chris, pelas discussões e alinhamentos a respeito do método probabilístico e pelo voto de confiança decisivo para a conclusão do presente projeto.

Ao Leonardo, pelo apoio no desenvolvimento do presente trabalho.

À Karine.

A minha família, pelo encorajamento.

RESUMO

O rompimento de barragens pode expor o vale à jusante a um risco significativo de danos e perdas de bens materiais e vidas humanas. Qual o risco de uma cota de inundação atingir uma determinada localidade para um evento de rompimento da barragem? O atual estado da arte em engenharia hidráulica requer o emprego da metodologia determinística e não responde a pergunta. E devido à incerteza associada à determinação dos parâmetros de formação da brecha, o presente trabalho propõe o emprego da metodologia probabilística na previsão desses parâmetros e cálculo do risco de cota de inundação atingir determinado local. O presente estudo empregou a metodologia na UHE Tucuruí, em Tucuruí/PA. Três cenários de brecha foram avaliados nas estruturas de terra e enrocamento, empregando a metodologia probabilística e comparando os resultados dos hidrogramas de saída e manchas de inundação com os resultados da metodologia determinística. O estudo de caso mostrou que com a metodologia probabilística é possível calcular o risco de cotas de inundação, referente uma brecha de ruptura, ao longo do vale à jusante. A determinação do risco não era possível utilizando a metodologia determinística, atualmente empregada em estudos de ruptura de barragens. Além disso, o emprego de equações empíricas e recomendações de engenharia isoladamente, se mostram insuficientes para desenvolver estudos de ruptura de barragens para empreendimentos com grandes volumes de reservação, maiores do que 600 hm^3 .

Palavras-Chave: Método probabilístico, brecha de ruptura de barragens, cota de inundação.

ABSTRACT

The dam failure could expose the valley downstream to a significant risk of damage and loss of material goods and human lives. So, what is the risk related with the dam breach outflow? The current state of practice for dam breach modeling requires a deterministic assumption of the breach parameters, so that a breach outflow hydrograph can be computed and hydraulically routed downstream. Because of the uncertainty associated with the breach parameters, the present work proposes the use of probabilistic approach to dam breach modeling. This study employed the probabilistic approach at the Tucuruí Dam, Tucuruí /PA. Three scenarios were evaluated for the earth and rock fill dams employing a probabilistic approach, and comparing its results with the deterministic approach. The case study showed the employment of the probabilistic approach allowed the calculation of the exceedance probability peak flows and floodplain, which was not possible using the deterministic approach for dam breach analysis. Also, only the use of empirical equations and engineering recommendations, according with deterministic approach, appears to be insufficient to develop reliable dam breach studies for dams with large stored volumes, more than 600 hm³.

Keywords: Probabilistic approach, dam breach, floodplain.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Causas para rompimentos de Barragens norte americanas. .	27
Figura 2 – Interface da ferramenta computacional MCBreach.	36
Figura 3 – Ilustração de modelo probabilístico Uniforme.....	39
Figura 4 – Ilustração de modelo probabilístico Normal.	39
Figura 5 – Conceito de aplicação par a o MCBreach.	41
Figura 6 – Ruptura de barragem por galgamento. USACE (2014).	45
Figura 7 – Ruptura de barragem por piping. USACE (2014).....	46
Figura 8 – Representação dos parâmetros de forma da brecha de ruptura.	48
Figura 9 – Interface LPI do HEC-RAS.	60
Figura 10 – Módulo de formação de brecha de ruptura do HEC-RAS.	61
Figura 11 – Exemplo de modelo HEC-RAS truncado. Cortesia: Christopher Goodell.	63
Figura 12 – Exemplo de modelo HEC-RAS completo.	63
Figura 13 – Modelo conceitual do reservatório.....	65
Figura 14 – Auscultação da UHE Tucuruí: (a) Extesômetros; e, (b) Piezômetros de Fundação.....	68
Figura 15 – Auscultação da UHE Tucuruí: (a) Pêndulo; e, (b) Medidor de vazão.....	69
Figura 16 – Seção geológica ao longo da barragem UHE Tucuruí.	70
Figura 17 – Arranjos das estruturas da UHE Tucuruí.	71
Figura 18 – Planta baixa da barragem da margem direita.	73
Figura 19 – Corte da barragem de terra e de enrocamento da margem direita.....	74
Figura 20 – Planta baixa do vertedor e das casas de força.	75
Figura 21 – Planta baixa da barragem da margem esquerda. Fonte: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.	77
Figura 22 – Corte da barragem da margem esquerda. Fonte: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.	78
Figura 23 – Mapa da Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins indicando a posição das estações fluviométricas.	80
Figura 24 – Balanço hídrico simplificado.	82
Figura 25 – Fluxograma do processo de estimação de parâmetros de formação de brecha para o método probabilístico.....	87
Figura 26 – Modelo probabilístico Uniforme associado à brecha de ruptura.	88
Figura 27 – Modelo probabilístico Normal associado à brecha de ruptura.	88
Figura 28 – Região de desenvolvimento do modelo truncado.	90

Figura 29 – Modelo conceitual truncado (HEC-RAS).....	91
Figura 30 – Região de desenvolvimento do modelo completo.	92
Figura 31 – Modelo conceitual completo (HEC-RAS).....	93
Figura 32. Perfil do rio no trecho represado.	96
Figura 33 – Topobatimetria à jusante da UHE Tucuruí.	98
Figura 34. Calibração do modelo hidrodinâmico completo.	103
Figura 35 – Validação do modelo HEC-RAS completo.	105
Figura 36 – Falha da Lagoa. Túnel de alívio de pressão sob a fundação do corpo de concreto da tomada d’água da Casa de Força 1.	108
Figura 37. Arranjo da barragem da margem direita.	110
Figura 38 – Vista da barragem de terra da margem esquerda.	111
Figura 39 – Vista da barragem de terra e enrocamento da margem direita.	111
Figura 40 – Barragem de terra da margem direita.	112
Figura 41 – Junção entre a barragem de enrocamento e terra da margem direita.	112
Figura 42 – Vista de jusante da barragem de terra da margem direita.	113
Figura 43 – Vista do cobrimento da face de jusante da barragem de terra da margem direita.	114
Figura 44 – Localização das brechas de ruptura. Adaptado: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.....	115
Figura 45 – Ilustração em perspectiva do posicionamento da Brecha 1.	117
Figura 46 – Corte em perfil da Brecha 1. Adaptado: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.....	117
Figura 47 – Amostragem de parâmetros de formação de brecha com Monte Carlo para a Brecha 1.	121
Figura 48 – Amostragem de parâmetros de formação de brecha com Monte Carlo para a Brecha 1.	122
Figura 49 – Índice ER/H_w – Brecha 1.....	123
Figura 50 – Ilustração em perspectiva do posicionamento da Brecha 2.	125
Figura 51 – Corte em perfil da Brecha 2. Adaptado: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.....	126
Figura 52 – Amostragem de parâmetros de formação de brecha com Monte Carlo para a Brecha 2.	127
Figura 53 – Amostragem de parâmetros de formação de brecha com Monte Carlo para a Brecha 2.	128
Figura 54 – Índice ER/H_w – Brecha 2.....	129
Figura 55 – Ilustração em perspectiva do posicionamento da Brecha 3.	131

Figura 56 – Corte em perfil da Brecha 2. Adaptado: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.	131
Figura 57 – Amostragem de parâmetros de formação de brecha com Monte Carlo para a Brecha 3.....	133
Figura 58 – Amostragem de parâmetros de formação de brecha com Monte Carlo para a Brecha 3.....	134
Figura 59 – Índice ER/H _w – Brecha 3.	135
Figura 60 – Hidrogramas de saída para o método determinístico e para o método probabilístico.	138
Figura 61 – Propagação dos hidrogramas de ruptura da Brecha 1.	143
Figura 62 – Variação de cota em função da propagação dos hidrograma da Brecha 1.....	144
Figura 63 – Localização dos pontos de controle para análise espacial dos resultados do método probabilístico em relação ao método determinístico.	145
Figura 64 – Ponto de controle A.	146
Figura 65 – Ponto de controle B.....	147
Figura 66 – Ponto de controle C e D.	148
Figura 67 – Propagação dos hidrogramas de ruptura da Brecha 2.	151
Figura 68 – Variação de cota em função da propagação dos hidrograma da Brecha 2.....	152
Figura 69 – Localização dos pontos de controle para análise espacial dos resultados do método probabilístico em relação ao método determinístico.	153
Figura 70 – Ponto de controle A.	154
Figura 71 – Ponto de controle B.....	155
Figura 72 – Ponto de controle C e D.	156
Figura 73 – Propagação dos hidrogramas de ruptura da Brecha 3.	159
Figura 74 – Variação de cota em função da propagação dos hidrograma da Brecha 3.....	160
Figura 75 – Localização dos pontos de controle para análise espacial dos resultados do método probabilístico em relação ao método determinístico.	161
Figura 76 – Ponto de controle A.	162
Figura 77 – Ponto de controle B.....	163
Figura 78 – Ponto de controle C e D.	164

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Categorias de formulações para modelagem de ruptura de barragens. Adaptado de Wahl (2010).....	25
Tabela 2 – Modos de ruptura. Adaptado de USACE (2014).....	30
Tabela 3 – Análise de formação de brecha de ruptura e diferentes níveis de esforço. Adaptado de FERC (2014a).....	30
Tabela 4 – Coeficientes de descarga. Adaptado de USACE (2014).	47
Tabela 5 – Faixas e possíveis valores para caracterização da brecha. Adaptado de USACE (2014).....	49
Tabela 6 – Estudos de caso para desenvolvimento dos modelos de regressão. Adaptado de USACE (2014).....	51
Tabela 7 – Emprego do modelo numérico HEC-RAS.	58
Tabela 8 – Cronograma da inspeção da UHE Tucuruí.....	67
Tabela 9 – Características do barramento da UHE Tucuruí.....	72
Tabela 10 – Balanço hídrico simplificado.....	81
Tabela 11 – Resumo informativo das fontes de informação da barragem.	94
Tabela 12. Cenários de formação da brecha de ruptura.	115
Tabela 13 – Parâmetros de formação da Brecha 1. Método probabilístico.....	118
Tabela 14 – Parâmetros de formação da Brecha 1. Método determinístico.....	123
Tabela 15 – Parâmetros de formação da Brecha 1. Método determinístico.....	124
Tabela 16 - Parâmetros de formação da Brecha 2.....	126
Tabela 17 – Parâmetros de formação da Brecha 2. Método determinístico.....	129
Tabela 18 – Parâmetros de formação da Brecha 2. Método determinístico.....	130
Tabela 19 - Parâmetros de formação da Brecha 3.....	131
Tabela 20 – Parâmetros de formação da Brecha 3. Método determinístico.....	135
Tabela 21 – Parâmetros de formação da Brecha 3. Método determinístico.....	136
Tabela 22 – Resumo dos hidrogramas de saída.....	139
Tabela 23 – Vazões de pico ao longo do vale à jusante.	142
Tabela 24 – Vazões de pico ao longo do vale à jusante.	150
Tabela 25 – Vazões de pico ao longo do vale à jusante.	157

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área da seção transversal	[m ²]
B_m	Largura média da brecha	[m]
C	Largura da crista do barramento	[m]
C_b	Fator de translação da equação de largura da brecha de Von Thun e Gillette	[adm]
C_D	Coefficiente de descarga (Piping e barragem)	
D_r	Profundidade média do reservatório	[m]
F	Número de Froude	[adm]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h	Altura da coluna d'água	[m]
H_b	Altura da brecha	[m]
H_w	Altura d'água a cima da geratriz inferior da brecha	[m]
K	Capacidade de transporte	[m ³ /s]
K_o	Coefficiente de galgamento	[adm]
L	Largura do rio	[m]
L_r	Comprimento do reservatório	[m]
m	Expoente da equação LPI	[adm]
O_{OBS}	Variável aleatória observada	[L]
O_{SIMU}	Variável aleatória simulada	[L]
P	Confiança do intervalo	[adm]
Q	Vazão	[m ³ /s]
q	Fluxo lateral	[m ³ /s/m]
R_h	Raio hidráulico	[m]
S	Declividade da linha de energia	[m/m]
t_f	Tempo de formação da brecha	[hr]
T_r	Tempo de ascensão do hidrograma afluente ao reservatório	[hr]
U	Variável randômica independente de uma distribuição uniforme	[L]
V	Velocidade média	[m/s]
V_{ero}	Volume de material erodido do corpo da barragem	[m ³]

V_s	Volume d'água que passa pela brecha	[m³]
V_w	Volume do reservatório a cima da geratriz inferior da brecha	[m³]
W_b	Largura média do aterro	[m]
x	Distância ao longo do rio	[m]
X	Variável randômica independente de uma distribuição qualquer	[L]
z	Declividade média (H:V) lateral da brecha	[adm]
Z_i	Declividade das faces do aterro da barragem	[adm]
α	Nível de significância	[adm]
β	Fator de distribuição do fluxo na seção transversal	[adm]
φ	Fator da equação LPI	[adm]
μ	Média da variável aleatória	[L]
σ	Desvio-padrão	[L]
σ^*	Desvio-padrão da amostra	[L]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS	23
1.1.1	Objetivo Geral.....	23
1.1.2	Objetivos Específicos.....	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	SEGURANÇA DE BARRAGENS.....	26
2.2	ANÁLISE DA BRECHA DE RUPTURA.....	28
2.3	ANÁLISE DE POTENCIAIS MODOS DE RUPTURA.....	31
2.4	MODELO DE BRECHA.....	34
2.4.1	Parâmetros de formação da brecha.....	43
2.4.2	Equações de regressão	50
2.5	MODELOS HIDRODINÂMICOS	56
2.5.1	HEC-RAS	57
3	ÁREA DE ESTUDO.....	67
3.1	CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS	71
3.2	ASPECTOS OPERACIONAIS	78
3.3	REGIME HIDROLÓGICO	79
3.4	BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO DA CABECEIRA DA BACIA HIDROGRÁFIC DO RIO TOCANTINS	81
4	METODOLOGIA.....	83
4.1	ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DA BRECHA	84
4.2	DOMÍNIO DE SIMULAÇÃO.....	89
4.3	DADOS DA BARRAGEM	94
4.4	DADOS TOPOBATIMÉTRICOS.....	95
4.5	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO COMPLETO.....	99
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	101

5.1	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS	101
5.2	AMPR – ANÁLISE DE POTENCIAIS MODOS DE RUPTURA	106
5.2.1	Brecha 1	116
5.2.2	Brecha 2	125
5.2.3	Brecha 3	130
5.3	MODELO HEC-RAS TRUNCADO	136
5.4	MODELO HEC-RAS COMPLETO	140
5.4.1	Brecha 1	141
5.4.2	Brecha 2	149
5.4.3	Brecha 3	157
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	167
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169
8	APÊNDICES	175
8.1	UHE TUCURUÍ	175
8.1.1	Piping/Erosão Brecha 1	176
8.1.2	Piping/Erosão Brecha 2	176
8.1.3	Piping/Erosão Brecha 3	177
9	ANEXOS	179

1 INTRODUÇÃO

Devido ao estabelecimento da Lei nº 12.334/2012, que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens, o presente trabalho propõe-se a testar uma metodologia do exército norte americano disponível para cálculo de brecha de ruptura hipotética de barragens. Barragens constituem parte importante na infraestrutura do Brasil, proporcionando controle de enchentes, abastecimento de água, irrigação, geração de energia, navegação e benefícios de recreação. Apesar de seus muitos usos, essas barragens também apresentam riscos para a propriedade e para a vida devido ao seu potencial de falha estrutural vir a causar inundações catastróficas por ocorrência de um rompimento.

Wahl (2010) preconiza que os dois principais objetivos na análise de rompimento de barragens são a previsão da onda de cheia da ruptura e a sua propagação hidráulica ao longo do vale à jusante da barragem, a fim de determinar as consequências do rompimento e quantificar os danos nas áreas atingidas. Wahl (2010) e Goodell (2012) argumentam que a propagação de grandes inundações é uma ciência já bem desenvolvida, embora algumas zonas de incerteza ainda existam na engenharia de segurança de barragens, tal como: parametrização do processo de formação da brecha de ruptura hipotética da barragem.

A brecha que se forma durante a ruptura de uma barragem, segundo Wahl (2010), é a maior fonte de incertezas nos estudos de rompimento de barragens, principalmente das construídas em terra e enrocamento. Com o presente trabalho busca-se calcular, através de técnicas estatísticas, os conjuntos dos principais parâmetros geométricos de formação da brecha de ruptura. Com isso é possível calcular o risco de uma determinada cota inundação ocorrer em cada região de interesse do vale à jusante. Tal metodologia está fundamentada no emprego de modelos probabilísticos e simulações com o uso de Monte Carlo, de forma a gerar inúmeras amostragens do cenário de rompimento da barragem, dada a ocorrência eminente da catástrofe, associando probabilidades de não excedência aos hidrogramas de saída.

Baseado nisso, Goodell (2012) defende o uso da metodologia probabilística na amostragem de conjuntos de parâmetros de formação de brecha de ruptura, a fim de calcular probabilidades de ocorrência de cotas de inundação para fins de mapeamentos de manchas de inundação e quantificação do nível de risco ao longo do vale à jusante da barragem.

Para o presente trabalho, a área de estudo compreende o reservatório, o barramento e parte do vale à jusante da barragem da UHE Tucuruí, entre Tucuruí/PA até aproximadamente São Joaquim do

Ituquara/PA. Desta forma, é desenvolvido o primeiro estudo de caso com a metodologia probabilística para uma barragem brasileira.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo avaliar uma metodologia para cálculo dos parâmetros de formação de brecha para rompimento hipotético de barragens.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Obter conjuntos de parâmetros de formação da brecha, usando método de Monte Carlo orientado por modelos de distribuição estatística;
- Melhorar o entendimento do risco das cotas de inundação pelo cálculo de probabilidades de não excedência; e,
- Comparar resultados das cotas de inundação referentes às probabilidades de não excedência com os resultados de inundação do método determinístico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica do presente trabalho busca trazer os elementos conceituais de trabalhos e pesquisas já desenvolvidas em segurança de barragens, mais especificamente sobre os processos e relações aplicadas no cálculo de formação da brecha de ruptura. Wahl (2010) coloca a existência de 5 categorias de formulações para modelagem numérica da brecha de ruptura de barragens, as quais possuem características em comum. Essas 5 categorias podem ser estruturadas através de três tópicos, conforme Pickert et al. (2011): 1) análises de eventos passados de formação de brecha; 2) modelagem numérica de formação de brecha; e, 3) estudos com modelos físicos em escala reduzida.

O presente trabalho estará focado em somente uma das cinco categorias, e embasado em estudos passados de formação de brecha e modelagem numérica. A Tabela 1 resume os tipos de formulações e suas respectivas características.

Tabela 1 – Categorias de formulações para modelagem de ruptura de barragens. Adaptado de Wahl (2010).

Tipo de formulação	Características
Modelos de regressão para determinação da vazão de pico	Tais modelos preveem o hidrograma de saída da ruptura, com a estimativa da vazão de pico e o formato do hidrograma.
Modelos analíticos para previsão de vazão de pico	
Modelos de regressão dos parâmetros da brecha	Geram os parâmetros de formação da brecha, para então determinar o hidrograma de saída com modelos numéricos embasados em conservação da massa e conservação do momento.
Modelos de erosão, orientados pela parametrização da brecha	Geram a brecha e o hidrograma de saída em conjunto, através da interação dos processos.
Modelos de brecha embasados em processo	

Segundo resultados e argumentações levantadas por Goodell (2012), Goodell & Froehlich (2012) e USACE (2014), a brecha possui um papel importante nos estudos de rompimento de barragens, pois determina o hidrograma de saída, o qual condiciona o dano ao longo do vale à jusante. Goodell (2012) coloca que a formação da brecha

incorpora incertezas nos estudos de rompimento de barragens, e investigações devem ser desenvolvidas para quantificar como a incerteza afeta o cálculo da brecha de ruptura. Logo, o conhecimento e a experiência em segurança de barragens do engenheiro e sua equipe são fatores importantes em estudos de ruptura de barragens.

2.1 SEGURANÇA DE BARRAGENS

Historicamente no Brasil e no mundo ocorreram diversos eventos que vieram a causar o rompimento de barragens, trazendo consigo prejuízos tanto financeiros como humanos, podendo-se citar o rompimento da Barragem de Algodões no Piauí que acarretou em pelo menos sete mortes, além das mundialmente conhecidas barragens de Malpasset no sul da França em 1959 e Teton no estado de Idaho em 1976 (ICOLD 1974, 1995). De acordo com Menescal (2007) no Brasil já se tem registros de pelo menos 400 acidentes envolvendo obras hídricas, com mais de 24 mortos entre os anos de 2003 e 2007, devido à ruptura de barragens. Recentemente o Brasil vivenciou um dos maiores desastres ambiental de sua história, com o rompimento de uma barragem de rejeitos minerais em Mariana/MG.

Por se tratar de um fenômeno complexo, diversos estudos já foram desenvolvidos, a fim de delimitar as condicionantes para o desenvolvimento de estudos de ruptura de barragens, que em sua grande maioria estão associados com a ocorrência de eventos hidrológicos extremos (Figura 1). No entanto, problemas geotécnicos em barragens de terra e enrocamento demandam especial atenção devido às dificuldades de identificação e remediação destes problemas.

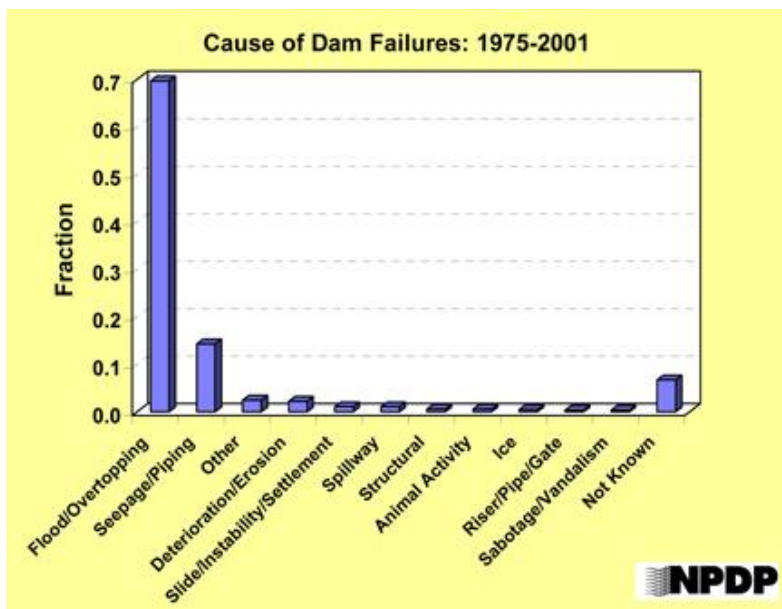


Figura 1 – Causas para rompimentos de Barragens norte americanas.

Fonte: <www.npd.com>

Atualmente os engenheiros hidráulicos, da área civil, estão numa zona de conforto, onde se apoiam no determinismo pragmático para a definição de coeficientes de rugosidades, parâmetros hidrológicos, coeficientes associados às estruturas hidráulicas, e principalmente parâmetros associados à formação da brecha de ruptura da barragem durante o desenvolvimento de um estudo de ruptura de barragens. É necessário o questionamento do uso de ábacos e do uso de generalizações, visto que as condições de cada projeto de barragem são únicas. Generalizações e extrapolações sem a devida fundamentação podem incorrer em problemas de execução e operação do projeto.

Goodell (2012) coloca que o desenvolvimento de análises de sensibilidade sobre os parâmetros de formação da brecha de ruptura possibilita o entendimento e a representação de uma faixa inundável mais realista e provável sobre o vale à jusante da barragem. Tal procedimento corrobora com a seguinte afirmação de que “As consequências do rompimento de qualquer barragem devem ser analisadas com o objetivo de determinar regras operacionais de reservatórios, planos de evacuação da população e critérios para a

ocupação das áreas que podem ser atingidas.” (COLLISHONN & TUCCI, 1997).

Como resultado prático, tal pragmatismo favorece a escolha conservadora de parâmetros de formação da brecha. Essa aproximação determinística pode incorrer em problemas práticos de engenharia. Parâmetros conservadores de formação de brecha de ruptura impactam de maneira importante o custo de infraestrutura necessária durante situações de emergência. O conservadorismo pode levar ao fechamento de rotas importantes de fuga e até alertas desnecessários. Uma análise conservadora pode incorrer em conclusões equivocadas, como indicação de projeto para aumento da capacidade de descarga das estruturas hidráulicas e até mesmo alteamento do barramento. Tais conclusões determinam custos diretos de projeto e execução de obras para o proprietário e administrador legal da barragem. Tal conservadorismo pode incorrer uma tomada de decisão pouco efetiva da parte de gestores e fiscalizadores.

Os estudos de ruptura de barragens focam no pior caso, no pior cenário de ruptura do barramento, por isso, Goodell (2012), Goodell & Froehlich (2012) e FERC (2014) preconizam o que foi exposto nos parágrafos anteriores. Devemos buscar sempre o melhor entendimento e conciliar custos e benefícios em alternativas exequíveis e realistas para a segurança da barragem e do meio socioambiental ao longo do vale à jusante. Estudos de Goodell & Froehlich (2012) indicaram diferenças de até 190%, na extensão da área inundada, entre estudos determinísticos e estudos embasados na abordagem probabilística. Cabe salientar que o cenário conservador da metodologia determinística gerou uma área atingida 190% superior. Onde a metodologia determinística nada mais é do que o emprego direto de equações empíricas e recomendações de engenharia para estimar os parâmetros geométricos da brecha de ruptura da barragem. Procedimento frágil pela tamanha subjetividade da escolha de tais parâmetros.

2.2 ANÁLISE DA BRECHA DE RUPTURA

Goodell (2012) e USACE (2014) preconizam que os parâmetros de formação da brecha afetam o hidrograma de saída da ruptura da barragem. Logo, a onda de cheia está condicionada ao cálculo da brecha, uma vez que esta é determinada com o uso de modelos matemáticos de regressão e do conhecimento de um engenheiro especialista em segurança de barragens.

USACE (2014) coloca que as dimensões geométricas e o tempo de formação da brecha devem ser avaliados numericamente para diferentes cenários e com diferentes equações de regressão, onde alguns procedimentos podem ser elencados:

- Realização de Análise de Potenciais Modos de Ruptura verificando o leiaute do barramento;
- Identificando os locais e/ou estruturas mais suscetíveis de problemas estruturais e/ou operacionais, que possam levar à ruptura;
- Análise dos possíveis tipos de problemas estruturais e operacionais condicionados à barragem.

No caso de representar a propagação de uma onda cheia proveniente de ruptura de barragem, o detalhamento topobatimétrico do vale à jusante é imprescindível. Mas o proprietário da barragem tem um desafio, junto com a equipe de engenharia, em definir a área e a extensão à jusante da barragem necessária de levantamento topobatimétrico. É um desafio determinar a extensão dessa área à jusante, bem como a largura de abrangência.

As causas de uma ruptura de barragem podem ser diversas, mas a engenharia de segurança de barragens ao longo do tempo identificou as principais formas e condicionantes de ruptura de barragens. Alguns dos mecanismos de ruptura podem ser listados como:

- Evento de inundação na área de drenagem afluyente ao reservatório da barragem;
- Piping e perda de finos no interior da barragem;
- Deslizamentos (do talude ou bloco de fundação);
- Terremotos (fraturamento do maciço com colapso do concreto ou formação de piping);
- Mau funcionamento de equipamentos mecânicos (válvulas, comportas, entre outros);
- Colapso estrutural;
- Rompimentos de barragens em cascata;
- Deplecionamento brusco do reservatório; e,
- Sabotagem.

Estes mecanismos ocorrem em barragens de concreto, terra e enrocamento. É pertinente classificar os mecanismos segundo os tipos

de estruturas empregadas na construção de barragens. A Tabela 2 resume os mecanismos de ruptura em relação a diferentes soluções construtivas.

Tabela 2 – Modos de ruptura. Adaptado de USACE (2014).

Modo de ruptura	Terra/ Enrocamento	Concreto em gravidade	Concreto em arco	Barragem em gravidade
Galgamento	X	X	X	X
Piping/infiltração	X	X	X	X
Problemas de fundação	X	X	X	X
Deslizamentos	X	X		X
Falha de equipamentos mecânicos	X	X	X	X
Colapso	X	X	X	X
Tombamento		X	X	

Autores como Schaefer (1992), Goodell (2012) e USACE (2014) argumentam que maior esforço é requerido na análise do rompimento hipotético de barragens de terra/enrocamento, devido à variabilidade da formação da brecha de ruptura condicionada pela variabilidade dos materiais de construção e de composição da fundação.

A FERC é uma instituição norte americana pioneira na normatização e regulação de estudos de segurança de barragens. Cabe salientar, que a Europa possui igualmente instituições de referência em segurança de barragens, no entanto, o presente trabalho foca na experiência norte americana, sem prejuízo sobre a geração dos resultados esperados. A Tabela 3 resume os tipos de análise de brecha de ruptura, segundo diferentes níveis de esforço.

Tabela 3 – Análise de formação de brecha de ruptura e diferentes níveis de esforço. Adaptado de FERC (2014a).

Nível de esforço	Aproximação dos parâmetros da brecha e do hidrograma de saída da ruptura.	Modelos numéricos ou métodos computacionais	Regime de simulação numérica
---------------------	---	--	------------------------------------

Nível de esforço	Aproximação dos parâmetros da brecha e do hidrograma de saída da ruptura.	Modelos numéricos ou métodos computacionais	Regime de simulação numérica
Simplificado	Equações empíricas	SMPDBRK, HEC-1, HEC-HMS, HEC-RAS 4.1.	Permanente
Típico	Equações empíricas ou modelos fisicamente embasados.	HEC-RAS 4.1., MIKE 11	Não-permanente
Avançado	Equações empíricas, modelos fisicamente embasados ou aproximações por modelos probabilísticos, usando Monte Carlo na determinação dos parâmetros da brecha.	Combinação ou exclusivamente FLO2D, Mike 21, HEC-RAS 4.1 e HEC-RAS 5.0 (beta). O emprego de modelos unidirecionais deve ser analisado segundo o grau de confinamento do escoamento ao longo do vale à jusante.	Não-permanente

2.3 ANÁLISE DE POTENCIAIS MODOS DE RUPTURA

A Análise de Potenciais Modos de Ruptura (APMR), do inglês *Potential Failure Mode Analysis* (PFMA), segundo FERC (2005), é um procedimento informal executado para levantamento das prováveis formas de ruptura de uma barragem. Esta análise deve ser realizada por um time de profissionais conhecedores da barragem e de engenharia de barragens, os quais devem fazer parte do órgão fiscalizador, de

consultores externos independentes, órgão de defesa civil e representantes legais do proprietário da barragem.

O desenvolvimento do estudo de APMR é fundamentado em levantamento de informações diversas existentes a respeito da barragem. Tais informações são compostas por histórico de operação hidráulica do reservatório e da barragem, monitoramento geotécnico da barragem, relatórios de inspeções regulares, plantas, croquis e memoriais de cálculo do projeto executivo, entre outros. O time de profissionais deve se munir destas informações e iniciar as reuniões, do tipo “*brainstorm*”, para desenvolvimento dos prováveis modos de ruptura que a barragem poderá sofrer numa situação catastrófica.

FERC (2005) salienta que a APMR se utiliza de intensa reflexão do time de profissionais, de onde parte-se de uma condição sem cenários pré-concebidos para que a investigação dos prováveis modos de ruptura da barragem possibilite:

- Melhorar as inspeções de segurança de barragens, ajudando a focar em áreas mais críticas da barragem de interesse;
- Identificar potenciais modos de ruptura relacionados a aspectos operacionais da barragem;
- Identificar potenciais modos de ruptura relacionados a aspectos estruturais, como formação de *piping* o qual não é considerado por métodos analíticos tradicionais de análise de estabilidade;
- Melhorar as atividades de inspeção visual e auscultação;
- Identificar falhas ou omissões de informações, a fim de avaliar a segurança da barragem, necessárias para o desenvolvimento da análise de potenciais modos de ruptura da barragem;
- Ajudar a identificar as principais medidas de segurança de barragens para redução de risco; e,
- Documentar os resultados do estudo para subsidiar as atividades futuras de inspeções de segurança de barragens, bem como o desenvolvimento do estudo de formação de brecha.

O desenvolvimento da APMR deve proporcionar a obtenção e a clarificação do entendimento a respeito da barragem. Este processo deve ir além de uma análise genérica de potenciais problemas da barragem. FERC (2005) preconiza claramente que a descrição, investigação e

identificação de potenciais modos de ruptura proporcionam informações adicionais sobre cargas, condições estruturais, circunstanciais e eventos em cada local da barragem, onde está sendo considerada a APMR.

A APMR basicamente consiste no levantamento de todas as informações possíveis disponíveis sobre a barragem e na visita do local do projeto para análise e registro através da inspeção visual. Tal levantamento de informações consiste em buscar:

- Análises de engenharia (estabilidade e outros esforços);
- Banco de dados da auscultação;
- DATUM vertical do projeto;
- Estudos hidrológicos;
- Projeto básico/executivo das estruturas da barragem;
- Ensaio de materiais do maciço e da fundação;
- Séries temporais de monitoramento pluviométricos e fluviométrico da área de drenagem da barragem, bem como da própria barragem;
- Imagens aéreas atualizadas ao longo do vale à jusante da barragem;
- Histórico operacional ou séries temporais da operação do reservatório e dispositivos de descarga;
- Registros de atividade sísmica recente;
- Relatório de acidentes; e,
- Caracterização demográfica ao longo do vale à jusante da barragem.

Outras informações, se justificadas como importantes, podem ser incorporadas na lista acima. Em relação à visita ao local do projeto do barramento, os seguintes procedimentos devem ser seguidos:

- Verificação visual direcionada para definição dos potenciais modos de ruptura;
- Verificação das condições estruturais e geológicas da barragem; e,
- Entrevistar proprietários/operadores, a fim de incorporar informações no processo de definição dos potenciais modos de ruptura.

FERC (2005) coloca a importância de ter em mente questões importantes durante a visita do local do projeto, tais como:

- Como a barragem poderia romper?
- O que acontece se a barragem romper?
- Estão identificados os potenciais modos de ruptura e estão sendo apropriadamente monitorados por inspeções visuais e auscultação?
- Quais ações poderiam ser tomadas para reduzir áreas atingidas pelo rompimento da barragem ou mitigar as consequências desse evento catastrófico?

Desta forma, a APMR caracteriza-se por um processo informal, o qual visa gerar um documento informativo que sirva de fonte de informação. Logo, o documento da APMR não é caracterizado como um documento de tomada de decisão.

2.4 MODELO DE BRECHA

A brecha de ruptura de uma barragem é mandatoriamente analisada para barragens de terra e enrocamento. USBR (1998), Wahl (2004) e Gee (2010) argumentam sobre a necessidade de maior entendimento e necessidade de rigor sobre estudos de ruptura para esse tipo de barragem. Goodell (2012) e Goodell (2013) discutem a existência e outras fontes de incerteza no desenvolvimento do modelo numérico hidráulico para propagação de ondas de cheia, proveniente de ruptura de barragem. No entanto, a formação da brecha determina maior incerteza, visto a impossibilidade de calibrar tal modelo, tanto para o processo de formação da brecha, quanto para a propagação de onda ao longo do vale à jusante.

Por isso, a APMR deve ser realizada para a barragem em questão, a fim de esclarecer possíveis situações e locais vulneráveis à ruptura ao longo do corpo do barramento. Isto subsidia o estudo estatístico para determinação dos conjuntos de parâmetros geométricos de formação da brecha de ruptura, partindo do pressuposto de que a situação de ruptura é eminente e ocorrerá. Por isso, o desenvolvimento do presente trabalho não depende da análise e criação de árvores de eventos. A análise probabilística proposta por Goodell (2012) e Goodell & Froehlich (2012) parte do princípio que a situação de ruptura é eminente e ocorrerá, e as probabilidades de não excedência estão associadas aos hidrogramas de saída da brecha e às cotas de inundação.

Através de modelos probabilísticos e da técnica de Monte Carlo, centenas de milhares de cenários podem ser gerados, de forma a

quantificar a probabilidade de ocorrência associada à vazão de pico de saída da brecha, em função dos conjuntos amostrados dos parâmetros de formação da brecha de ruptura.

Para chegar aos objetivos, o presente trabalho se utilizará da ferramenta computacional MCBreach, desenvolvida pela WEST Consultants. Esta técnica, envolvendo métodos estatísticos, visa aperfeiçoar os estudos de rompimento de barragens através de amostragens de parâmetros de formação da brecha, os quais estão associados a um modelo probabilístico de distribuição de frequências. Goodell & Froehlich (2012) colocam que o método probabilístico é mais realista do que o método determinístico, atualmente utilizado na engenharia de segurança de barragens, pois permite o cálculo da probabilidade de ocorrência de inundação, dada a condição de ruptura. Goodell (2013) coloca, corretamente, que empregando o método determinístico não é possível aferir o risco no qual o vela à jusante está exposto, pois o método determinístico possibilita simplesmente classificar se o indivíduo está ou não está dentro da inundação.

A ferramenta computacional de análise de brecha MCBreach é um controlador externo (*External Controller*) do modelo HEC-RAS e possui as seguintes características:

- Acoplamento com o modelo numérico hidrodinâmico e de formação da brecha de ruptura HEC-RAS 4.1., através de uma DLL (*Dynamic Link Library*) que funciona como um controlador externo;
- Amostragem de conjuntos de parâmetros de formação da brecha de ruptura da barragem baseado na técnica de Monte Carlo;
- Fundamentação em formulações de regressão empíricas de formação da brecha de ruptura;
- Emprego dos modelos probabilísticos Uniforme e Normal; e,
- Análise de probabilidade de ocorrência do cenário de rompimento orientado pela vazão de pico do hidrograma da brecha, em função da amostragem dos parâmetros de formação de brecha.

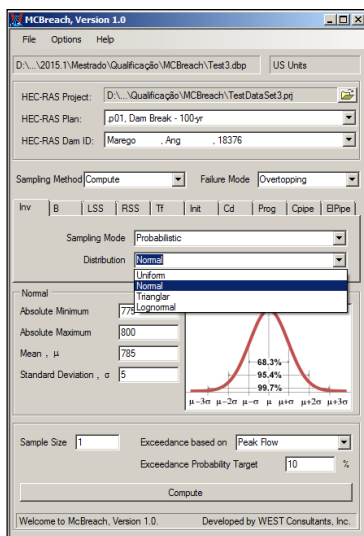
Atualmente, não há documentação técnica sobre a ferramenta MCBreach, no entanto Goodell (2012) e Goodell & Froehlich (2012) já documentaram estudos técnicos sobre a metodologia probabilística com o uso da ferramenta MCBreach. O presente trabalho visa servir como material técnico da ferramenta computacional, bem como gerar subsídio

técnico para desenvolvimento de um estudo de caso em condições brasileiras da engenharia de segurança de barragens.

Numericamente, o MCBreach gera amostragens de conjuntos de parâmetros de formação de brecha de ruptura, os quais constituem os parâmetros de entrada para o modelo de brecha do HEC-RAS. Por isso, o MCBreach roda somente acoplado com o modelo HEC-RAS, para a versão 4.1. Cabe salientar que os parâmetros de formação da brecha amostrados pelo MCBreach dependem de formulações empíricas para cálculo dos parâmetros de formação da brecha, análises de projeto da barragem, inspeções visuais da barragem e julgamento técnico do engenheiro ou equipe especialista em segurança de barragens.

Tais parâmetros de formação da brecha podem ser inicialmente estimados através das formulações de MacDonal et al. (1984), Froehlich (1995), Froehlich (2008), Von Thun & Gillete (1990), Xu & Zhang (2009), entre outros. Mas a APMR acaba sendo determinante na determinação das faixas de ocorrência dos parâmetros geométricos de formação da brecha, necessários ao MCBreach.

A Figura 2 ilustra a interface da ferramenta computacional MCBreach.



**Figura 2 – Interface da ferramenta computacional MCBreach.
Desenvolvedor: WEST Consultants.**

Cada parâmetro geométrico da brecha pode ser amostrado segundo dois modelos probabilísticos: Uniforme e Normal. A distribuição Uniforme é dada pelas seguintes relações:

$$f(x) = \frac{1}{b-a}, a \leq x \leq b$$

$$\therefore F(x) = \int_a^x \frac{1}{b-a} du = \frac{x}{b-a} - \frac{a}{b-a} \quad (1)$$

Onde $f(x)$ é a função de densidade de probabilidades e $F(x)$ é a função de probabilidades acumuladas do modelo probabilístico Uniforme. A média desse modelo é calculada segundo a integração:

$$\mu = E(X) = \int_a^b \frac{x}{b-a} dx = \frac{(b+a)}{2} \quad (2)$$

A variância do modelo Uniforme é determinada pela seguinte integração:

$$\sigma^2 = V(X) = \int_a^b \frac{\left[x - \left(\frac{b+a}{2} \right) \right]^2}{b-a} dx = \frac{(b-a)^2}{12} \quad (3)$$

Onde a e b não os extremos do parâmetro de interesse, caso esteja associado ao modelo probabilístico Uniforme.

O modelo probabilístico Normal também pode ser empregado para descrever a variabilidade dos parâmetros de formação da brecha. Este modelo é representado pelas seguintes relações:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, -\infty < x < \infty$$

$$\therefore F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{u-\mu}{\sigma}\right)^2} du \quad (4)$$

Onde $f(x)$ é a função de densidade de probabilidades e $F(x)$ é a função de probabilidades acumuladas do modelo probabilístico Normal. A média desse modelo é definida como:

$$E(X) = \mu \quad (5)$$

A variância do modelo Normal é igual a:

$$V(X) = \sigma^2 \quad (6)$$

Conforme Goodell (2012), a intuição e a experiência do engenheiro definirão qual modelo probabilístico empregar na representação da função densidade de cada parâmetro de formação da brecha de ruptura. O autor salienta o esforço de pesquisas no desenvolvimento de métodos de previsão de parâmetros da brecha, tal como o trabalho de Wahl (1998). Por isso, é necessário determinar as hipóteses de formação da brecha de ruptura, utilizando da APMR, e associando cada parâmetro a um dos modelos probabilísticos, segundo justificativas técnicas e conhecimento da engenharia e dos projetos da barragem.

O emprego das equações empíricas para parametrização do processo de formação da brecha ajuda a determinar a faixa de mínimo e máximo do parâmetro em questão. No entanto, o julgamento do engenheiro ou da equipe de segurança, junto da análise do projeto da barragem e das condições de campo, pode levar a estimativas diferentes do que o esperado pelas equações empíricas.

Para o mínimo e para o máximo identificados para cada um dos parâmetros de formação da brecha, é definido que eles representam (+) e (-) 3 desvios-padrão e a média deles determina o centro da distribuição, no caso do emprego do modelo probabilístico Normal. O emprego de 3 desvios-padrão engloba, em termos práticos, 99,70 % da área da distribuição Normal, segundo MONTGOMERY & RUNGER (1991). A seguinte relação se aplica caso o modelo probabilístico seja aplicado para amostrar o parâmetro de formação de brecha:

$$P \left(-z_{\frac{\alpha}{2}} \leq \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \leq z_{\frac{\alpha}{2}} \right) = 1 - \alpha \quad (6)$$

$$P\left(-z_{\frac{\alpha}{2}} \leq \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma^*} \leq z_{\frac{\alpha}{2}}\right) = 1 - \alpha \quad (7)$$

Onde z é o número de desvio-padrão da tabela normal, σ^* é o desvio-padrão da amostra, α é o nível de significância e P é a confiança do intervalo. Tal procedimento tem o objetivo de forçar a geração de uma amostra normal. A amostragem gera rodadas com mais de 10000 elementos, e fixando o nível de significância aumenta-se a precisão da média.

A Figura 3 e a Figura 4 ilustram conceitualmente os modelos probabilísticos Uniforme e Normal, respectivamente.

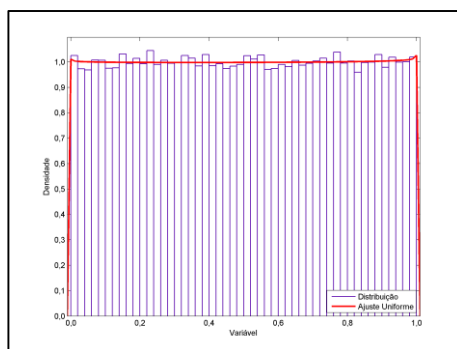


Figura 3 – Ilustração de modelo probabilístico Uniforme.

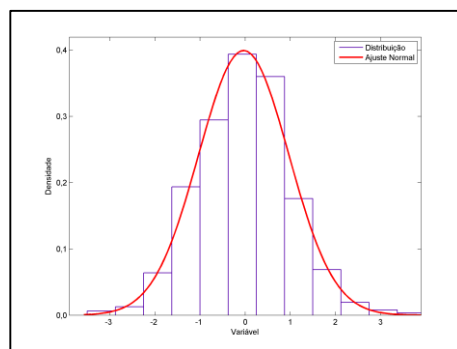


Figura 4 – Ilustração de modelo probabilístico Normal.

O método de Monte Carlo é aplicado na determinação do espaço amostral dos parâmetros de formação da brecha, segundo cada

um dos modelos probabilísticos supracitados. O algoritmo primeiramente realiza amostragens segundo o modelo probabilístico Uniforme. Para a geração das amostragens por Monte Carlo com o uso do modelo probabilístico Normal, o MCBreach emprega a transformação de Box-Muller (Box, 1958), conforme a seguinte formulação:

$$X = \sqrt{-2 \ln(U_1)} * \cos(2\pi U_2) \quad (8)$$

Onde X é a variável randômica independente de uma distribuição Normal com média zero e variância unitária. U1 e U2 são as variáveis randômicas independentes de uma distribuição Uniforme para o intervalo (0,1). Para uma variável randômica independente Y de uma distribuição Normal, para média e desvio padrão conhecidos, tem-se:

$$Y = X\sigma + \mu \quad (9)$$

Onde σ é o desvio-padrão e μ é a média para o parâmetro de formação da brecha, os quais devem ser determinados pelo engenheiro através do empregado das equações empíricas supracitadas.

Goodell (2012) argumenta que a criação de um conjunto suficientemente grande de dados com distribuição de frequência normal, tende a verdadeira distribuição normal populacional do conjunto de dados com média e desvio-padrão determinados pelo engenheiro. Tem-se como suficientemente grande uma população com mais de 10.000 elementos, a fim de garantir convergência estatística da amostra.

O método de Monte Carlo parte do princípio que a incerteza da variável de interesse é amostrada randomicamente quando atinge-se uma amostra suficientemente grande.

A Figura 5 ilustra, conceitualmente o fluxograma dos procedimentos de aplicação da ferramenta MCBreach, acoplada no modelo hidrodinâmico HEC-RAS.

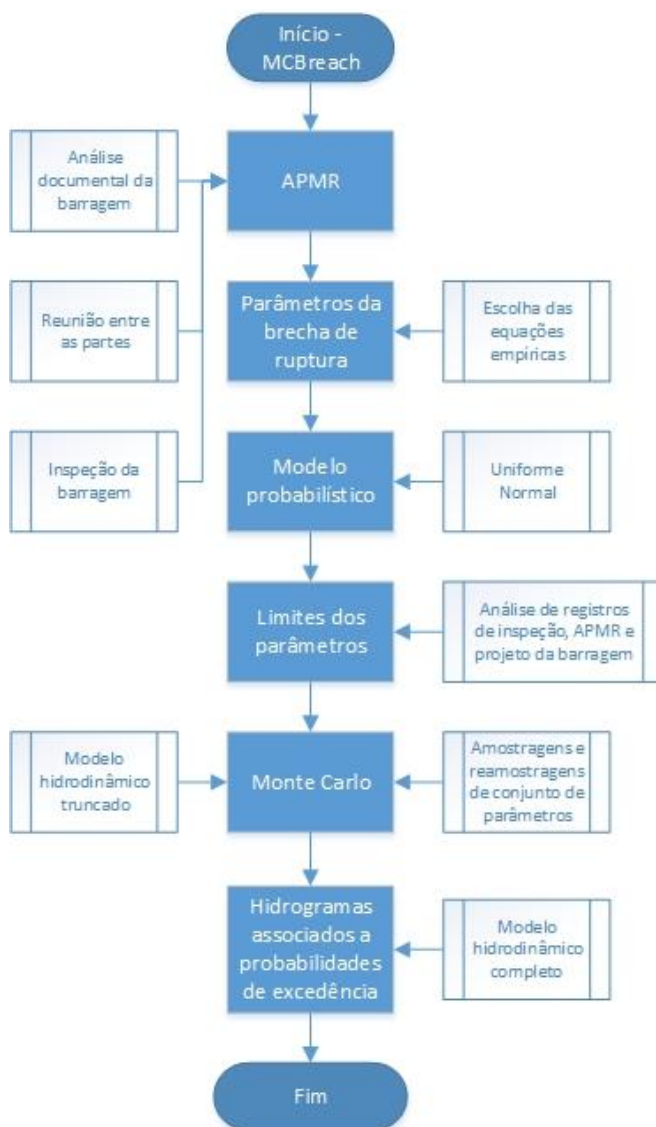


Figura 5 – Conceito de aplicação par a o MCBreach.

O devido ao emprego esta ferramenta computacional estar fundamentado em conhecimentos e procedimentos de engenharia, portanto, os resultados do MCBreach não possuem valor sem que haja

um parecer ou atestado de um engenheiro especialista em segurança de barragens, em dia com suas obrigações no Sistema CONFEA/CREA.

O MCBreach visa melhorar e aperfeiçoar os estudos de formação da brecha de ruptura de rompimento de uma barragem. Através do método probabilístico é possível associar uma probabilidade de ocorrência à mancha de inundação causada pela ruptura da barragem. Ao passo, que o método determinístico atualmente permite somente dizer que as propriedades estão dentro ou fora da mancha de inundação, não possibilitando uma análise efetiva do risco. Além disso, a prática atual leva o uso da metodologia determinística à seleção do cenário mais conservador.

O desenvolvimento da APMR é o primeiro passo. A partir do conhecimento da barragem e dos prováveis pontos mais favoráveis para o desenvolvimento de uma brecha de ruptura no corpo da barragem, o engenheiro e sua equipe devem buscar aproximações para parametrizar a ocorrência de formação de uma possível brecha. Neste caso, os parâmetros representarão, diretamente ou indiretamente, suas características geotécnicas, estruturais, forma e tempo de formação.

Com os modelos probabilísticos parametrizados iniciam-se as simulações de Monte Carlo, empregando um modelo HEC-RAS truncado, onde milhares de amostragens de conjuntos dos parâmetros de formação da brecha de ruptura serão criadas, segundo o padrão de distribuição de frequências do modelo probabilístico escolhido. A criação das amostragens, segundo Goodell (2012), é necessária, bem como a realização de reamostragens dos conjuntos de parâmetros, a fim de verificar a convergência dos cálculos de estimativa dos parâmetros de formação da brecha de ruptura da barragem para o nível de probabilidade desejado.

Com a amostragem dos conjuntos de parâmetros, o MCBreach ativa o modelo HEC-RAS truncado e calcula a brecha com os parâmetros amostrados e simula a vazão de pico. As vazões de pico de saída da brecha são armazenadas numa matriz para posterior cálculo das probabilidades de excedência das vazões em relação ao cenário de ruptura da barragem. Desta forma, o engenheiro tem em mãos resultados que relacionam hidrogramas de saída, função dos conjuntos amostrados dos parâmetros de formação da brecha, através de Monte Carlo, com uma probabilidade de ocorrência. Logo, para um cenário catastrófico e hipotético, o engenheiro ainda consegue determinar o quão provável será cada possível “tamanho de brecha” de ocorrer e de atingir o vale à jusante da barragem.

2.4.1 Parâmetros de formação da brecha

Parâmetros de formação da brecha analisados estatisticamente pelo modelo MCBreach são os mesmo empregados no modelo HEC-RAS, para o desenvolvimento da análise hidráulica de formação da brecha de ruptura da barragem.

Segundo USACE (2014), os parâmetros de formação da brecha de ruptura podem ser definidos, de forma determinística, pelo emprego das equações de MacDonald et al., Froehlich (1995), Froehlich (2008), Von Thun & Gillete (1990), Xu & Zhang (2009), entre outros. FEMA (2013) salienta que a escolha das equações ou das recomendações de faixas de valores aplicados nos parâmetros de formação da brecha deve estar correlacionada com o tipo de material do aterro da barragem, com as dimensões da barragem e com o histórico de infiltração ou problemas de fundação da barragem.

A ferramenta MCBreach necessita ser orientada através da determinação dos limites e faixas aplicáveis aos parâmetros de formação da brecha de ruptura para representar a variabilidade destes parâmetros. A seguir estão descritos os parâmetros de formação de brecha parametrizados no modelo HEC-RAS e no MCBreach, segundo os modelos empíricos de regressão (WAHL, 2010) e recomendações de engenharia (USACE, 2014):

- Posição: local ao longo do eixo longitudinal da estrutura do barramento onde estará o centroide da brecha;
- Modo de ruptura: definição da ruptura hipotética segundo galgamento ou formação de piping;
- Forma: largura da base e declividade do primas de abertura (H:V), pois a brecha é representada sempre através de uma forma prismática;
- Tempo de formação: tempo de desenvolvimento da brecha de ruptura;
- Mecanismo de ruptura: pode ser definido como um tempo específico ou a partir de uma elevação do nível d'água do reservatório;
- Coeficientes de descarga: coeficientes de descarga associados à brecha, a qual pode ocorrer por galgamento ou por piping.

HEC (2010) e USACE (2014) colocam que o módulo de formação de brecha de ruptura do HEC-RAS permite a determinação de dois modos de ruptura: por galgamento, ou por formação de piping (Figura 6 e Figura 7). Tal conceitualização numérica não impede que outras formas de ruptura sejam representadas pelo modelo HEC-RAS. FEMA (2013) expõe que mesmo que uma ruptura de uma barragem possa ocorrer por diferentes razões, a modelagem numérica conceitualmente parte do princípio de que o fenômeno é definido por galgamento ou piping.

É importante que o engenheiro tenha este esclarecimento em mente, pois numericamente as possibilidades de representação de um determinado fenômeno são mais versáteis do que preconizado pelo arranjo matemático de determinada formulação. Por isso, Goodell (2012) e FERC (2014a) salientam a importância do conhecimento, especialização e experiência do engenheiro, o qual estará desenvolvendo o estudo de modelagem numérica de formação de brecha e de rompimento de barragens.

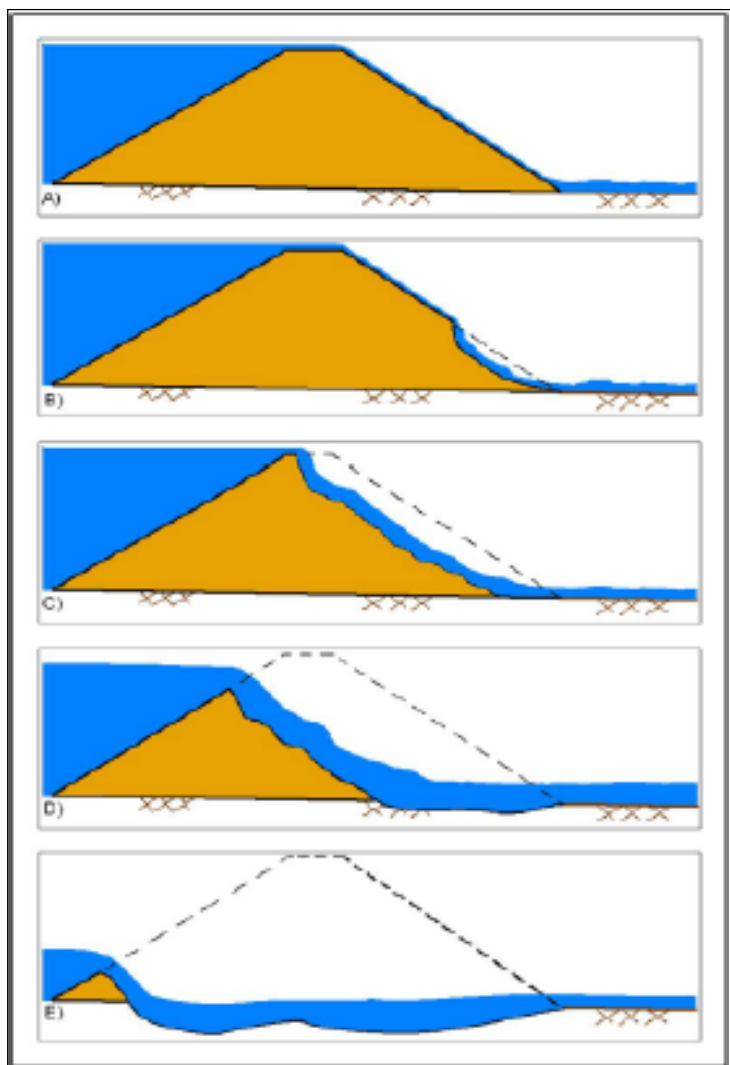


Figura 6 – Ruptura de barragem por galgamento. USACE (2014).

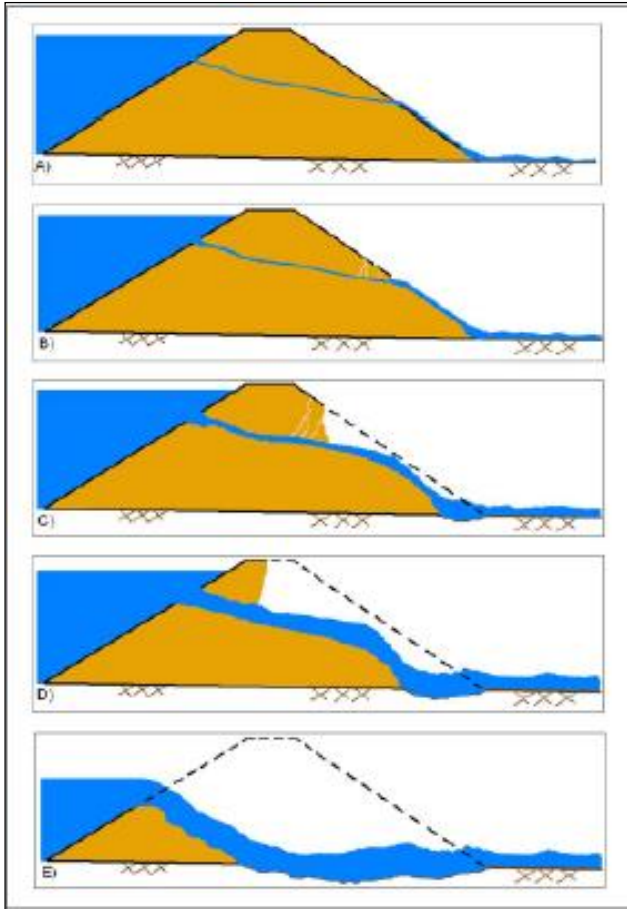


Figura 7 – Ruptura de barragem por piping. USACE (2014)

Dentre os parâmetros de representação do processo de formação da brecha de ruptura da barragem, USACE (2014) coloca que os coeficientes hidráulicos de descarga associados ao corpo da barragem e ao orifício formado pelo processo de piping caracterizam incertezas para o rompimento hipotético de uma barragem. USACE (2014) discorre sobre dois processos de formação de brecha, fundamentados no modo de ruptura por galgamento e no modo de ruptura por formação de piping, respectivamente.

No caso de um galgamento de uma barragem de terra, o processo de erosão do talude iniciará na face de jusante do corpo da barragem. A passagem da água fará com que o talude eroda

regressivamente em direção ao centro do corpo da barragem. Segundo USACE (2014), este processo erosivo desagrega a crista da barragem, progressivamente, passando de um escoamento tipo vertedor soleira espessa para vertedor soleira delgada. Este processo, conceitualmente, é representado numericamente pela variação do valor adotado no coeficiente de descarga associado ao barramento. Mas a evolução do processo erosivo do talude progredirá em direção à face de montante do barramento e até atingir o nível do leito do rio, alargando a brecha de ruptura. Assim, o coeficiente de descarga associado ao barramento volta a se aproximar da faixa para escoamento tipo vertedor soleira espessa.

Para o caso de ruptura por formação de piping, novamente para uma barragem de terra, a fuga d'água pelo macroporo formado pelo escoamento preferencial erode o interior do corpo da barragem e transporta o material do núcleo do corpo da barragem em direção à jusante. Este processo gera uma progressão do tamanho do buraco formado pelo piping, aumentando a vazão e o transporte de material do interior da barragem. Inicialmente, tal processo pode ser representado numericamente por um orifício pressurizado. Com o aumento da erosão do interior da barragem, que evolui para a face de jusante do talude, progredindo em direção à face de montante do talude, num determinado momento, a massa remanescente do corpo da barragem na parte superior do piping colapsará, mudando o escoamento pressurizado para escoamento livre. A partir deste momento, a brecha passa a evoluir lateralmente ganhando largura, se comportando como descrito no parágrafo anterior.

Baseado no tipo de material de construção da barragem, USACE (2014) sugere o emprego da seguinte tabela de valores como norteador para adoção dos valores dos coeficientes de descargas associados ao corpo do barramento e ao piping.

Tabela 4 – Coeficientes de descarga. Adaptado de USACE (2014).

Tipo de barragem	Coeficiente de descarga para o galgamento	Coeficiente de descarga para o piping
Barragem de argila ou núcleo de argila	1,44 – 1,82	0,5 – 0,6
Barragem de enrocamento	1,44 – 1,66	0,5 – 0,6
Concreto em arco	1,71 – 1,82	0,5 – 0,6
Concreto (gravidade)	1,44 – 1,66	0,5 – 0,6

O presente trabalho considera a representação da brecha através dos parâmetros de largura, altura e declividade do prima de abertura (H:V). Este conceito, de tratar a brecha como uma forma prismática, é uma simplificação imposta para representá-la numericamente em modelos como MCBreach e HEC-RAS. A Figura 8 ilustra os parâmetros de forma da brecha de ruptura, bem como a brecha é representada numericamente.

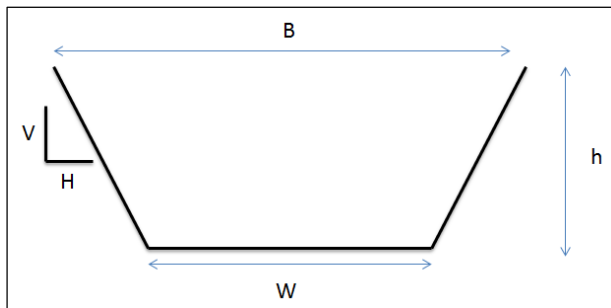


Figura 8 – Representação dos parâmetros de forma da brecha de ruptura.

Salienta-se que a determinação desses parâmetros deve ser realizada fora do modelo HEC-RAS, empregando equações empíricas de formação da brecha de ruptura. USACE (2014) argumenta que muitos estudos já foram desenvolvidos analisando dados históricos de casos de ruptura de barragens para criação de normativas, desenvolvimento de equações de regressão e desenvolvimento de metodologias de modelagem numérica para estimativa de tamanho da brecha de ruptura e tempo de formação da brecha. Os trabalhos de Wahl (1998, 2004) são uma referência para estimativa dos parâmetros de formação da brecha de ruptura.

USACE (2014) argumenta que o procedimento de determinação de parâmetros de formação de brecha de ruptura de barragens é mais complicado tecnicamente no caso de barragens de terra e enrocamento. A heterogeneidade junto do controle de qualidade dos materiais, conforme o tipo de barragem, demanda maior perícia nos procedimentos arrojados em normas. As incertezas envolvidas no processo de ruptura de uma barragem de terra/enrocamento são maiores do que em concreto, pois o controle de qualidade do concreto é mais facilmente manipulado..

Por isso, a maioria das equações de regressão para estimativa dos parâmetros de formação da brecha de ruptura de uma barragem é embasada em estudos de caso de barragens de terra/enrocamento. Estas

equações de regressão foram desenvolvidas estatisticamente, a fim de estimar, principalmente, os parâmetros de largura média da brecha e tempo de formação da brecha.

Um ponto importante a respeito do uso de equações de regressão empíricas está ligado à escala do processo de formação da brecha. USACE (2014) coloca que os casos avaliados para embasar estas equações contemplam reservatórios com volumes da ordem de 123.000.000 m³ e barramentos com alturas da ordem de 30 m. Isto pode limitar o uso das equações para grandes barragens, como a UHE Tucuruí. Wahl (1998, 2004) argumentam a existência de falta de dados a respeito de eventos reais de rompimento de grandes barragens, sendo que 75% dos casos reportados estão associados a barragens com altura menor do que 15 m.

Tal questão foi a motivação para Goodell (2012) aplicar o algoritmo de Monte Carlo, através do MCBreach, de forma a buscar maior entendimento das incertezas a respeito da representação numérica de formação da brecha de ruptura de uma barragem. Através do emprego desta metodologia, Goodell & Froehlich (2012) já mostraram resultados promissores e interessantes a respeito da estimativa dos parâmetros de formação da brecha de ruptura. A Tabela 5 resume as faixas de possíveis valores para os parâmetros de largura média e tempo de formação de brechas de ruptura para cada tipo de barragem.

Tabela 5 – Faixas e possíveis valores para caracterização da brecha. Adaptado de USACE (2014).

Tipo de barragem	Largura média da brecha (B_m)	Componente horizontal da declividade lateral da brecha (H:V)	Tempo de formação da brecha t_f [horas]
Terra/Enrocamento	(0,5 até 3,0) x h_d		
	(1,0 até 5,0) x h_d	0 até 1,0	0,5 até 4,0
	(2,0 até 5,0) x h_d	0 até 1,0	0,1 até 1,0
	(2,0 até 5,0) x h_d	0 até 1,0 (maior)	0,1 até 1,0
	(0,5 até 5,0) x h_d^*	0 até 1,0	0,1 até 4,0*
Concreto (Gravidade)	Múltiplos blocos	Vertical	0,1 até 0,5
		Vertical	0,1 até 0,3

Tipo de barragem	Largura média da brecha (B_m)	Componente horizontal da declividade lateral da brecha (H:V)	Tempo de formação da brecha t_f [horas]
	Típico < 0,5 L	Vertical	0,1 até 0,2
	Típico < 0,5 L	Vertical	0,1 até 0,5
	Múltiplos blocos		
		Declividade do vale	
	Toda o barramento	0 até a declividade do vale	<0,1
Concreto em arco	Toda o barramento	0 até a declividade do vale	<0,1
	(0,8 x L) até L	0 até a declividade do vale	<0,1
	(0,8 x L) até L	0 até a declividade do vale	<0,1
	(0,8 x L) até L	1,0 até 2,0	0,1 até 0,3
Escombros	(0,8 x L) até L		<0,1

*Nota: Barragens com grande volume de água armazenado, e que tenham grande extensão de crista, continuarão erodindo por longos períodos, bem como poderão apresentar maiores larguras e maiores tempos de formação do que mostrado na Tabela 5. h_d = altura da barragem; L = largura de crista da barragem.

2.4.2 Equações de regressão

O presente estudo está fundamentado no emprego de equações empíricas, bem como nas recomendações da Tabela 5, para estimativa das dimensões das prováveis das brechas de ruptura da barragem, tanto para a metodologia determinística, quanto para a metodologia probabilística. Conforme Wahl (1998, 2004) tais equações foram determinadas estatisticamente através estudos de regressão e composição de grupos, segundo o tamanho e o tipo de barragem, empregando 108 casos reportados de rompimentos de barragens.

As recomendações de USACE (1980), FEMA (2013) e FERC (2014a), bem como as seguintes equações de regressão serão empregadas na presente pesquisa:

- Bureau of Reclamation (1988);
- Froehlich (1995);
- Froehlich (2008);
- MacDonald & Langridge-Monopolis (1984); e,
- Von Thun & Gillette (1990).

A escolha destas equações está embasada nos argumentos de USACE (2014), o qual coloca que estas equações têm sido amplamente empregadas em estudos de rompimento hipotético de barragens. Wahl (2004) realizou um estudo a respeito das incertezas associadas a cada uma das equações para estimativas dos parâmetros de largura da brecha e tempo de formação da brecha, o qual enfatiza e discute a faixa de aplicação e limitações de cada equação.

A Tabela 6 resume as principais referências sobre o emprego de equações empíricas em estudos de rompimento hipotético de barragens para estimativa de parâmetros geométricos.

Tabela 6 – Estudos de caso para desenvolvimento dos modelos de regressão. Adaptado de USACE (2014).

Referência	Número de estudos de caso
Singh & Snorrason (1982, 1984)	20
MacDonald & Langridge-Monopolis (1984)	42
Froehlich (1987)	43
Singh & Scarlatos (1988)	52
Von Thun & Gillette (1990)	57
Dewey & Gillette (1993)	57
Froehlich (1995)	63

Ao longo deste item estão descritas em maiores detalhes as formulações matemáticas das equações de regressão supracitadas.

2.4.2.1 Bureau of reclamation (1988)

As equações de regressão do modelo de Bureau of Reclamation (1988) são representadas pelas seguintes relações

$$B_m = 3H_w \quad (10)$$

$$t_f = 0,011B_m \quad (11)$$

Onde B_m representa a largura média da brecha [m], H_w representa a altura d'água [m] a cima da geratriz inferior da brecha, no momento do rompimento e t_f representa o tempo de formação da brecha [hr].

2.4.2.2 Froehlich (1995)

Froehlich (1995) empregou 63 casos de rompimentos de barragens, compostos por barragens de terra e enrocamento. Os dados característicos das barragens empregados pelo autor variaram entre 3,66 m até 92,96 m de altura do barramento, e volume armazenado no reservatório no momento de rompimento entre 0,013 até 660,000³ x 106 m³.

As equações de regressão do modelo de Froehlich são representadas pelas seguintes relações:

$$B_m = 0,1803K_o V_w^{0,32} H_b^{0,19} \quad (12)$$

$$t_f = 0,00254 V_w^{0,53} H_b^{-0,90} \quad (13)$$

Onde B_m representa a largura média da brecha [m]; K_o representa uma constante na equação (1,4 para rompimentos por galgante e 1,0 para rompimentos por piping); V_w representa o volume do reservatório no momento do rompimento [m³]; H_b representa a altura final da brecha [m]; e, t_f representa o tempo de formação da brecha [hr].

Froehlich preconiza que os valores médios de declividade lateral da brecha devam ser:

- 1,4H:1V para rompimentos por galgamento; e,
- 0,9H:1V para os demais casos.

USACE (2014) argumenta que Froehlich (1995a) não deixou claro como calcular a altura da brecha, por isso é assumido que a altura da brecha, caso não haja outro argumento ou justificativa, inicia no topo da barragem e vai até a interface com o nível da superfície do solo.

2.4.2.3 Froehlich (2008)

É uma equação indicada para pequenas e grandes barragens, a qual gera resultados conservadores, e segundo SEO (2010), coerentes. A equação anterior foi atualizada, empregando 74 casos de barragens de terra e enrocamento. Os mesmos parâmetros de largura média da brecha, tempo de formação da brecha e as declividades laterais da brecha foram empregados no desenvolvimento desta atualização. Os dados característicos das barragens empregados pelo autor variaram entre 3,05 m até 92,96 m de altura do barramento, e volume armazenado no reservatório no momento de rompimento entre 0,0139 até 660,000 x 106 m³.

As equações de regressão do modelo de Froehlich atualizado são representadas pelas seguintes relações:

$$B_m = 0,27K_o V_w^{0,32} H_b^{0,04} \quad (14)$$

$$t_f = 63,2 \sqrt{\frac{V_w}{gH_b^2}} \quad (15)$$

Onde K_o representa uma constante na equação (1,4 para rompimentos por galgante e 1,0 para rompimentos por piping); e, g representa a aceleração de gravidade (9,80665 m/s²).

Na publicação do artigo, Froehlich (2008) colocou que a declividade lateral da brecha deve ser:

- 1,0H:1V para rompimento por galgamento; e,
- 0,7H:1V para os demais casos.

Da mesma forma, o procedimento de determinação da altura da brecha não foi especificado no artigo do autor, no entanto, USACE (2014) preconiza a adoção do critério de determinar a altura entre o topo da barragem e o nível da superfície do solo com interface com o barramento.

2.4.2.4 MacDonald & Langridge-Monopolis (1984)

Este modelo de regressão foi desenvolvido empregando 42 estudos de caso de rompimentos de barragens, predominantemente de barragens de terra e enrocamento. Para este modelo de regressão, os autores desenvolveram o Fator de Formação da Brecha, o qual

representa o produto entre o volume de água saindo pela barragem e a altura d'água sobre a barragem.

Segundo USACE (2014), os autores MacDonald & Langridge-Monopolis relacionaram o Fator de Formação da Brecha com o volume de material erodido do corpo do barramento. Os dados característicos das barragens empregados pelos autores variaram entre 4,27 m até 92,96 m de altura do barramento, e volume armazenado no reservatório no momento de rompimento entre 0,0037 até 660,000 $^3 \times 10^6 \text{ m}^3$.

As equações de regressão do modelo de MacDonald & Langridge-Monopolis representadas pelas seguintes relações:

Para barragens de terra:

$$V_{\text{ero}} = 0,0261(V_s * H_w)^{0,769} \quad (16)$$

$$t_f = 0,0179(V_s)^{0,364} \quad (17)$$

Para barragens de terra com núcleo de argila ou barragens de enrocamento:

$$V_{\text{ero}} = 0,00348(V_s * H_w)^{0,852} \quad (18)$$

Onde V_{ero} representa o volume de material erodido do corpo do barramento [m^3]; V_s representa o volume de água que passa pela brecha [m^3]; hw representa a profundidade de água acima da geratriz inferior da brecha [m]; e, t_f representa o tempo de formação da brecha [hr].

O parâmetro V_s não é conhecido sem antes realizar a análise da brecha, diferente do volume de água que passa através da brecha, não incluindo a defluência por comportas, vertedores, outros tipos de dispositivos de descarga ou pela área de escoamento do galgamento fora no domínio da brecha. Segundo USACE (2014), uma primeira aproximação é a estimativa de volume de água armazenado no reservatório no momento do início da formação da brecha.

Para o modelo de regressão de MacDonald & Langridge-Monopolis (1984), após a definição dos parâmetros, a análise da brecha é realizada de maneira iterativa, buscando melhorar a aproximação do volume de d'água que passa através da área de brecha. Então, os parâmetros devem ser recalculados em função daquele volume. De acordo com USACE (1984), os parâmetros reais de formação da brecha são função do modelo erodido. Para o modelo de MacDonald & Langridge-Monopolis (1984), a brecha sempre possui uma forma

prismática trapezoidal com declividades laterais igual a 0,50H:1V. O tamanho da brecha é calculado assumindo que a brecha erode verticalmente até a fundação da barragem, e erode horizontalmente até que o máximo montante de material tenha sido erodido ou as ombreiras da barragem tenham sido alcançadas.

A largura da base da brecha pode ser calculada a partir da geometria da barragem, através da seguinte relação (Schaefer, 1992):

$$W_b = \frac{V_{\text{ero}} - h_b^2(CZ_b + h_b Z_b Z_3 / 3)}{h_b(C + h_b Z_3 / 2)} \quad (19)$$

Onde W_b representa a largura da base ou da geratriz inferior da brecha [m]; h_b representa a altura desde a crista da barragem até a base da brecha [m]; C representa a largura da crista da barragem [m]; Z_3 é igual a $Z_1 + Z_2$; Z_1 representa a declividade ($Z_1:1$) da face de montante do corpo do barramento; Z_2 representa a declividade ($Z_2:1$) da face de jusante do corpo do barramento; e, Z_b representa a declividade lateral 0,5H:1V preconizada por MacDonald & Langridge-Monopolis.

2.4.2.5 Von Thun & Gillette (1990)

Este modelo de regressão foi desenvolvido empregando 57 estudos de casos de rompimentos reais de barragens, os mesmos casos utilizados nos trabalhos de MacDonald & Langridge-Monopolis (1984) e de Froehlich (1987). O método proposto utiliza a declividade lateral da brecha igual a 1,0H:1V, exceto para casos que o corpo da barragem é composto por solos coesivos, onde as declividades laterais deve ficar entorno de 0,5H:1V até 0,33H:1V. Os dados característicos das barragens empregados pelos autores variaram entre 3,66 m até 92,96 m de altura do barramento, e volume armazenado no reservatório no momento de rompimento entre 0,0027 até 660,00 x 10⁶ m³.

As equações de regressão do modelo de Von Thun & Gillette são representadas pelas seguintes relações:

$$B_m = 2,5H_w + C_b \quad (20)$$

Onde C_b representa um coeficiente, o qual é função do tamanho do reservatório.

Tamanho do reservatório [m ³]	C _b [m]
<1,23*10 ⁶	6,1
1,23*10 ⁶ – 6,17*10 ⁶	18,3
6,17*10 ⁶ – 1,23*10 ⁷	42,7
>1,23*10 ⁷	54,9

Von Thun & Gillette (1990) desenvolveram dois conjuntos de equações para o tempo de formação da brecha. Um deles em função da profundidade d'água sobre a geratriz inferior da brecha, conforme a seguinte relação:

$$t_f = 0,02H_w + 0,25 \text{ [barragens resistentes à erosão]} \quad (21)$$

$$t_f = 0,015H_w \text{ [barragens facilmente erodíveis]} \quad (22)$$

O segundo conjunto de equações são para o tempo de formação da brecha em função da profundidade d'água sobre a geratriz inferior da brecha e da largura média da brecha, conforme as seguintes relações:

$$t_f = \frac{B_m}{4H_w} \text{ [barragens resistentes à erosão]} \quad (23)$$

$$t_f = \frac{B_m}{4H_w + 61,0} \text{ [barragens facilmente erodíveis]} \quad (24)$$

USACE (2014) salienta, conforme o trabalho de Von Thun & Gillette (1990), que os termos “barragens resistentes à erosão” e “barragens facilmente erodíveis” estejam associados ao controle de qualidade do método construtivo aplicado.

2.5 MODELOS HIDRODINÂMICOS

Os modelos hidrodinâmicos são empregados para investigar e representar os processos de escoamento em rios, lagos, estuários e sobre estruturas hidráulicas. As formulações hidrodinâmicas são baseadas nas equações da conservação da massa e do momento de Navier-Stokes. A capacidade de transporte das formulações hidrodinâmicas ainda é baseada em experimentos de cunho unidirecional. Isto quer dizer que

todos os modelos hidráulicos comerciais ainda dependem da fórmula de Gauckler-Manning ou de Chezy.

O pesquisador e/ou engenheiro são responsáveis pela escolha da melhor ferramenta computacional para representação e simulação dos fenômenos hidráulicos. Modelos numéricos como HEC-HMS, HEC-RAS 4.1, HEC-RAS2D 5.0, FLO-2D, MIKE 11 HD, MIKE 21 HD são recomendados pela FERC (2014) no desenvolvimento de estudo de rompimento de barragens. Os modelos DAMBRK e FLDWAV não possuem mais apoio financeiro da NWS (*National Weather Service* do EUA), e a FERC (2014) passou a não mais recomendar, a partir de 2014, estes modelos para estudos de rompimento de barragens.

Os próximos tópicos há uma descrição do modelo numérico hidrodinâmico empregado no presente trabalho. A formação da brecha e a propagação da onda de cheia serão realizadas com o modelo HEC-RAS 4.1., pois este modelo possui interface de comunicação com o modelo probabilístico MCBreach.

2.5.1 HEC-RAS

O HEC-RAS (HEC, 2010) é um modelo unidimensional, de fundo fixo, capaz de efetuar os cálculos dos perfis de superfície da água em escoamento permanente e não permanente, em canais com superfície livre. Esses perfis podem ser calculados em regimes subcríticos, supercrítico e misto, onde poderão ocorrer mudanças de regime supercrítico para subcrítico ou de subcrítico para supercrítico. O procedimento de cálculo baseia-se na solução da equação da conservação do momento unidimensional. O modelo também utiliza as equações de momento em situações onde o perfil da superfície de água varia rapidamente. Essas situações incluem, dentre outras, os ressaltos hidráulicos, as pontes e as confluências de rios. Permite, ainda, a avaliação do efeito de estruturas hidráulicas – pontes, galerias, barragens, etc.

O modelo possui um módulo dedicado para análise de rompimento de barragens, onde é possível determinar os parâmetros de formação da brecha. A formação da brecha no HEC-RAS é tratada segundo embasamento empírico através de parametrização de largura, altura, tempo de formação e tipo de deflagração. Na presente pesquisa, o modelo HEC-RAS é utilizado por possibilitar interação com o modelo MCBreach. A brecha é definida no MCBreach e então simulada no HEC-RAS para geração do hidrograma de saída e propagação da onda ao longo do vale à jusante.

O modelo HEC-RAS vem sendo utilizado para determinar a propagação de onda de cheia em canais naturais e artificiais. Diversos autores já reportaram o uso do HEC-RAS para estudos de inundação, como Calçada et al. (2004) que realizaram análise de cheias e delimitação de zonas inundáveis em Timor-Leste. HEC (2010) coloca que o modelo é bastante empregado para análises de rompimento de barragens. Tabela 7 resume alguns trabalhos referência empregando o modelo numérico HEC-RAS em análises hidrodinâmicas, de rompimento de barragem e análises avançadas de rompimento de barragem.

Tabela 7 – Emprego do modelo numérico HEC-RAS.

Tipo de estudo	Autores
Inundação e hidrodinâmica	Ackerman (2000), Calçada et al. (2004), Marfai (2003)
DAM BREAK	Ackerman & Brunner (2006), Xiong (2011), Asnaashari et al. (2014) e USACE (2014)
DAM BREAK com uso de modelos probabilísticos	Goodell (2012) e Goodell & Froehlich (2012)

Sua formulação matemática é baseada nas equações da conservação do momento de St. Venant.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + A \frac{|Q|Q}{K^2} + q \frac{Q}{A} = 0 \quad (25)$$

$$L \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

Onde Q é a vazão [m³/s]; h é a altura da coluna d'água [m]; x é a distância ao longo do rio [m]; t é o tempo [s]; A é a área da seção de escoamento [m²]; L é a largura da superfície de água [m]; K é capacidade de transporte [m³/s]; g é a aceleração da gravidade [m/s²]; q é o fluxo lateral [m³/s/m]; β é o fator de distribuição do fluxo [adim]. O HEC-RAS e outros modelos comerciais são baseados na eq.(1) para obtenção de sua solução hidráulica. A capacidade de transporte das formulações hidráulicas ainda é baseada em experimentos de cunho unidirecional 1D, segundo a fórmula de Gauckler-Manning:

$$V = \frac{1}{n} S^{\frac{1}{2}} R^{\frac{2}{3}}_h \quad (26)$$

Onde V é a velocidade [m/s]; n é o coeficiente de rugosidade de Manning; S é a declividade do escoamento [m/m]; Rh raio hidráulico [m].

De acordo com Miroslaw-Swiatek (2012) a formulação hidráulica 1D ainda é mais confiável, pois já é validada e aplicada com resultados consistentes, sendo capaz de gerar aproximações 2D, tais como: distribuição de fluxo, distribuição da rugosidade e escoamento por áreas de armazenamento laterais à calha principal do curso d'água.

Goodell (2012) argumenta que o modelo HEC-RAS, para estudos de rompimento de barragens, pode apresentar instabilidades numéricas. Isso é comum, pois a complexidade hidráulica de um estudo de rompimento é grande, onda a variação da vazão no tempo e no espaço atinge o escoamento rapidamente variado. Para este tipo de simulação o engenheiro deve utilizar, no HEC-RAS, a opção de regime misturado (do inglês “mixed flow regime”) para estabilizar a solução numérica em casos de mudanças de regime hidráulico entre subcrítico e supercrítico. Para tal, o modelo HEC-RAS é estabilizado empregando a técnica de inércia local parcial (Local Partial Inertia – LPI), discutida por Fread et al. (1996). Com esta técnica é possível estabilizar a solução numérica para escoamentos não permanentes e não uniformes do modelo HEC-RAS, principalmente, para eventos de rompimento de barragens.

A seguinte simplificação é empregada na formulação do modelo HEC-RAS como fator de redução nos termos inerciais da equação do momentum, tal como:

$$\phi \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)}{\partial x} \right] + Ag \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (27)$$

Segundo as condições:

$$\sigma = F_T - F_r^m (F_r \leq F_T; m \geq 1)$$

$$\sigma = 0 (F_r > F_T)$$
(28)

Onde φ representa o fator LPI multiplicador dos termos inerciais; F_T é o número de Froude, o qual determina o coeficiente φ igual a zero para valores de 1 até 2; F_r representa o número de Froude; m representa o expoente da equação, o qual altera o formato da curva da equação e varia entre 1 e 128.

O engenheiro deve ajustar os valores de F_T e m durante a simulação numérica, pois estes parâmetros determinarão, segundo HEC (2010), a estabilização da solução do HEC-RAS. Importante salientar que o aumento de ambos os parâmetros implicaria na diminuição da estabilidade da solução numérica, no entanto, aumentaria a acurácia da solução numérica. Baseado nisto, o engenheiro deve avaliar constantemente os resultados de saída do modelo numérico, verificando a coerência hidrodinâmica.

A Figura 9 ilustra a interface onde o engenheiro pode ajustar os parâmetros supracitados.

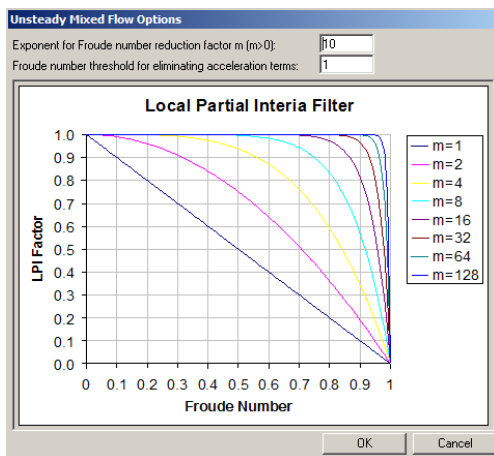


Figura 9 – Interface LPI do HEC-RAS.

Para estudos de rompimento de barragens, o HEC-RAS é capaz de simular a formação da brecha de rompimento hipotético do barramento para o regime não permanente e não uniforme.

O engenheiro pode inserir, após o cálculo com equações empíricas, os parâmetros de formação da brecha no módulo de formação de brecha para simulações em regime não permanente e não uniforme (Figura 10). Cabe salientar que para simulações em regime permanente, a representação de um rompimento de barragem somente é possível através da simulação da vazão de pico, não sendo possível o cálculo da formação da brecha no modelo HEC-RAS.

Com o emprego do MCBreach, o preenchimento ou alteração dos parâmetros de formação de brecha de ruptura é realizado automaticamente, através da orientação de modelos probabilísticos, neste caso Uniforme ou Normal. O algoritmo de Monte Carlo orienta a ação realizando centenas de milhares de simulações do HEC-RAS, a fim de buscar a convergência do conjunto amostrado de parâmetros de formação da brecha de ruptura hipotética da barragem.

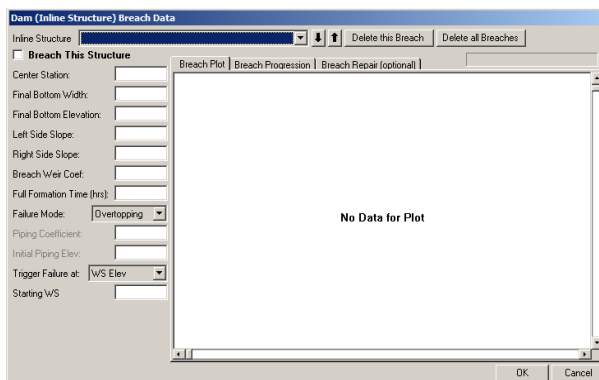


Figura 10 – Módulo de formação de brecha de ruptura do HEC-RAS.

2.5.1.1 Rompimento no HEC-RAS

Para o modelo HEC-RAS, os seguintes parâmetros de formação da brecha de ruptura, conforme representado na Figura 10, devem ser inseridos para o desenvolvimento de uma simulação de ruptura hipotética de barragens:

- Largura da geratriz inferior da brecha;
- Altura da brecha;
- Declividades laterais da brecha (H:V);
- Coeficiente de descarga da brecha;

- Tempo de formação;
- Modo de ruptura;
- Coeficiente de descarga do piping;
- Elevação d'água de formação do piping;
- Mecanismos de ruptura; e,
- Nível d'água da ruptura.

Tais parâmetros devem ser determinados através do emprego de relações empíricas e conhecimento do engenheiro responsável pelo estudo de rompimento hipotético da barragem. Atualmente, Goodell (2012) propôs o MCBreach, empregando o algoritmo de Monte Carlo e distribuições probabilísticas, ferramenta que proporciona a geração de centenas de milhares conjuntos amostrados dos parâmetros de formação da brecha de ruptura.

O MCBreach se comunica com o modelo HEC-RAS e gera, com cada conjunto de parâmetros amostrados, um hidrograma de saída da brecha, o qual é propagado ao longo do vale à jusante do barramento. Como a técnica de Monte Carlo gera muitas simulações e os domínios de simulação do HEC-RAS para estudos de rompimento de barragens costumam ser extensos e complexos, tal procedimento computacional de simulações pode levar semanas até meses para ser concluído. Por isso, Goodell (2012) sugeriu a criação de dois modelos de simulação de rompimento hipotético da barragem para o HEC-RAS. O primeiro modelo HEC-RAS, chamado por Goodell (2012) de modelo truncado (Figura 11), compreende somente o reservatório e a estrutura da barragem. Este modelo truncado estará acoplado com o MCBreach para a realização das centenas de milhares de simulações de formação da brecha de ruptura hipotética da barragem. Este artifício visa otimizar computacional o processo de simulação, uma vez que este primeiro modelo serve para a geração dos conjuntos mais prováveis de parâmetros de formação da brecha de ruptura, para cada nível desejado de probabilidade.

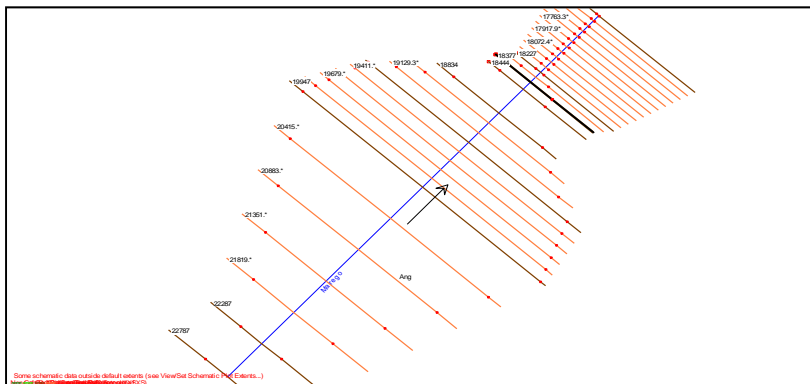


Figura 11 – Exemplo de modelo HEC-RAS truncado. Cortesia: Christopher Goodell.

O outro modelo, contemplando todo o domínio de simulação (Figura 12), é empregado após a determinação dos hidrogramas associados a cada nível de probabilidade, gerados através dos conjuntos de parâmetros de formação da brecha de ruptura. O primeiro modelo simulará centenas de milhares de conjuntos de parâmetros de formação da brecha de ruptura, buscando a convergência do método para cada nível de probabilidade desejado, numa interação entre o modelo truncado do HEC-RAS e o MCBreach. Já o segundo modelo HEC-RAS simulará os cenários gerados para cada nível de probabilidade, os quais representam os cenários de convergência dos conjuntos de parâmetros de formação da brecha, para cada nível de probabilidade de ocorrência desejado.

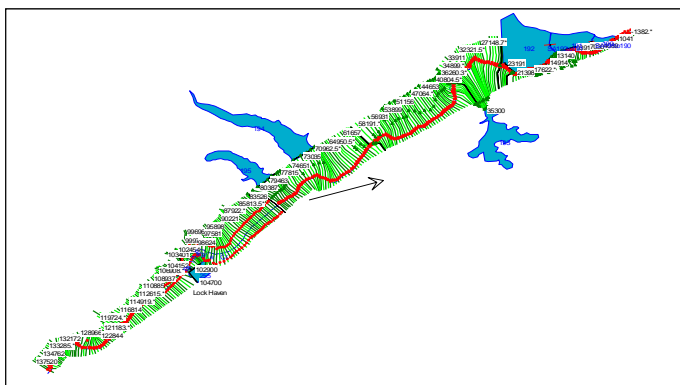


Figura 12 – Exemplo de modelo HEC-RAS completo.

Fonte: HEC (2010).

Segundo estudos de Goodell & Froehlich (2012) e USACE (2014) as simulações de rompimento de barragens devem ser realizadas em regime não permanente e não uniforme, empregando a representação do reservatório da barragem em linha (do inglês inline). Este tipo de concepção numérica, o reservatório da barragem é representado através de seções transversais ao longo do domínio de simulação e o barramento está alinhado ao fluxo do rio. Para isso, a simulação emprega as equações de Saint Venant para a solução de todo o problema, considerando a quantidade de movimento no escoamento da onda de cheia natural ou devido ao rompimento da barragem.

USACE (2014) argumenta que a representação do reservatório em linha gera resultados numéricos mais precisos e realistas, em termos do processo de formação da brecha, da formação do hidrograma de cheia e da propagação da onda de cheia ao longo do vale à jusante do barramento. Desta forma, o engenheiro deve construir o modelo numérico hidráulico considerando uma região à montante do barramento, a qual englobe os principais tributários afluentes ao reservatório e toda a extensão inundável do reservatório.

Cabe salientar, conforme discutido por Goodell & Froehlich (2012), que existe a possibilidade de construir o modelo numérico hidráulico, representando o reservatório do barramento através de uma área de armazenamento, definida por uma rotina hidrológica de balanço de massa, onde aspectos da quantidade de movimento não são consideradas na formação e propagação do hidrograma de cheia. Fread (2006) desenvolveu experimentos numéricos para quantificar as diferenças entre empregar uma área de armazenamento ou as equações de Saint Venant em problemas de simulação numérica de rompimento de barragens. Goodell & Froehlich (2012) desenvolveram experimentos numéricos semelhantes, empregando o modelo numérico HEC-RAS. Fread (2006) conclui que a análise do engenheiro, na escolha de um modelo hidráulico empregando uma área de armazenamento ou as equações de Saint Venant com o reservatório em linha, é fundamentada por três parâmetros, tais como: D_r representa a profundidade média do reservatório e pode ser aproximadamente $D_{\max}/2$; L_r representa o comprimento do reservatório; e, T_r é o tempo de ascensão do hidrograma afluente ao reservatório, onde o tempo é medido em horas.

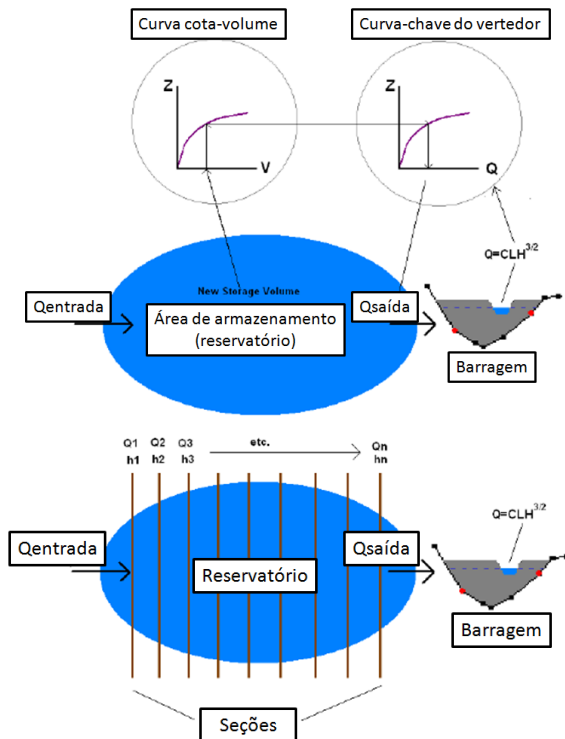


Figura 13 – Modelo conceitual do reservatório.

Adaptado de Goodell (2012).

É importante que fique claro que as duas formas de representar o reservatório, numericamente, altera o conceito do modelo hidráulico na fração do domínio à montante do barramento. Matematicamente a área de armazenamento não considera o cálculo da quantidade de movimento do escoamento, mas somente o balanço de massa do reservatório, segundo sua curva cota-área-volume, tanto para o hidrograma de cheia, quanto para a formação da brecha de ruptura. Já a representação dinâmica, através das equações de Saint Venant, considera a quantidade do movimento do escoamento da onda de cheia ao longo do reservatório, calculando os efeitos dinâmicos e energéticos da afluência do hidrograma de cheia, bem como os efeitos dinâmicos da formação da brecha de ruptura da barragem.

3 ÁREA DE ESTUDO

No presente tópico são apresentadas as principais informações do projeto da barragem UHE Tucuruí, as quais foram levantadas em reuniões de alinhamento com a equipe da Eletronorte de Brasília/DF e durante a inspeção visual da usina em Tucuruí/PA.

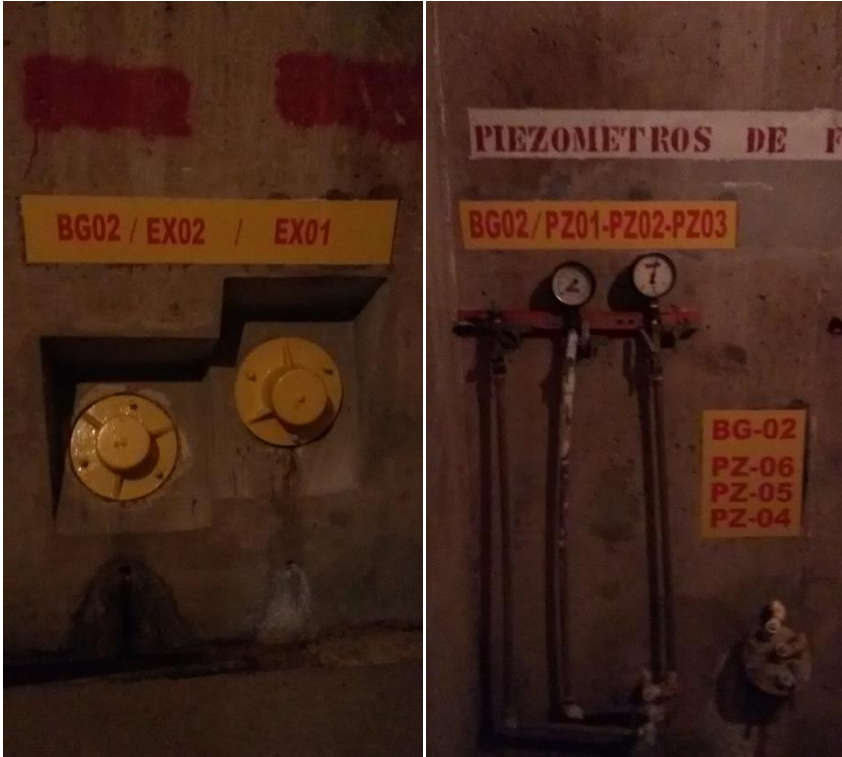
A inspeção visual ocorreu entre os dias 06/07/2015 e 10/07/2015. Tal inspeção faz parte das diretrizes da FERC (2005), a respeito da Análise de Potenciais Modos de Ruptura (APMR) da barragem em questão. A Tabela 8 resume o cronograma de atividades executadas durante a inspeção da UHE Tucuruí, pelo autor da presente pesquisa.

Tabela 8 – Cronograma da inspeção da UHE Tucuruí.

Dia	Atividade
06/07/2015	Alinhamento de escopo entre as partes
07/07/2015	Visita das estruturas de concreto da casa de força 1, casa de força 2 e vertedor.
08/07/2015	Visita dos diques laterais.
09/07/2015	Visita da barragem de terra e da barragem de enrocamento da margem direita e da barragem de terra da margem esquerda.
10/07/2015	Levantamento de documentação de projeto, do Sistema de Gestão e da operação da usina.

O sistema de auscultação da usina foi inspecionado, bem como as estruturas das barragens. O intuito da inspeção visual é identificar pontos críticos das estruturas do barramento, onde há possibilidade de formação de uma brecha de ruptura.

A Figura 14 e a Figura 15 ilustram alguns dos equipamentos de auscultação da barragem.



(a)

(b)

Figura 14 – Auscultação da UHE Tucuruí: (a) Extensômetros; e, (b) Piezômetros de Fundação.



Figura 15 – Auscultação da UHE Tucuruí: (a) Pêndulo; e, (b) Medidor de vazão.

Segundo a equipe de manutenção, maior atenção é dada às barragens de terra e de enrocamento da margem direita, pois é onde se encontrava o leito do rio Tocantins. Estes trechos da barragem da UHE Tucuruí exigiram maior esforço de escavação, pois havia maior presença de solos colúvias e alúvias sobre o embasamento rochoso, caracterizado pela dominância de filito.

A presença de falhas geológicas na região do leito do rio Tocantins e da margem direita chama a atenção a respeito da manutenção das estruturas, bem como do sistema de monitoramento da barragem de terra e de enrocamento da margem direita. Maior esforço deve ser colocado neste trecho da barragem para determinação de potenciais modos de ruptura.

A Figura 16 ilustra a seção transversal geológica da barragem da UHE Tucuruí. Há presença de filito, diabásio, quartzito, metabasito,

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS

A Figura 17 ilustra o arranjo das estruturas da UHE Tucuruí, alinhadas com o leito principal do rio Tocantins. A margem direita para a margem esquerda no sentido norte para sul da figura e o sentido do fluxo do rio Tocantins de leste para oeste.

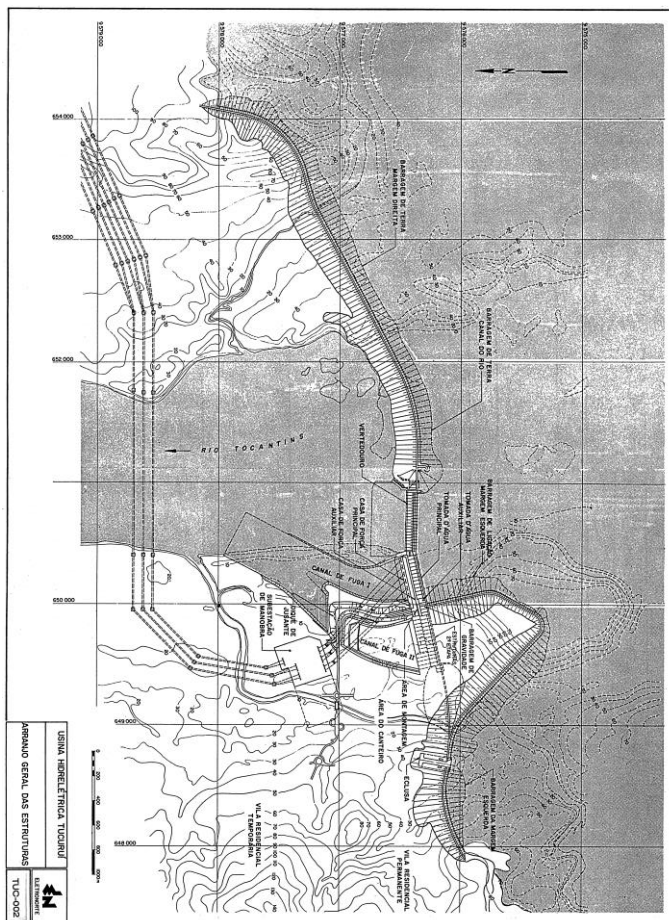


Figura 17 – Arranjos das estruturas da UHE Tucuruí.

Fonte: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.

A Tabela 9 resume informações das principais dimensões de uma das estruturas que compõem o barramento da UHE Tucuruí.

Tabela 9 – Características do barramento da UHE Tucuruí.

Característica	Valor
Comprimento da barragem de concreto [m]	1.744 m
Altura máxima da barragem de concreto [m]	92 m
Comprimento das barragens de Terra e Enrocamento [m]	5.308 m
Altura máxima [m]	95 m

A primeira estrutura é a barragem de terra da margem direita, a qual é composta com um trecho de terra homogênea e outro trecho de enrocamento, o qual está sobre o leito antigo do rio Tocantins e faz ligação à estrutura de concreto do vertedor. Segundo as inspeções, esta estrutura é a com maior risco de rompimento, pois é o aterro de maior altura e comprimento e está localizado no trecho de maior fragilidade geológica do empreendimento.

O corpo da barragem de terra homogênea à montante do filtro vertical é composto por areia argilosa compactada (D1) e areia pouco argilosa compactada (C) com os filtros vertical e horizontal compostos por areia natural limpa. À jusante do filtro vertical o corpo da barragem é composto por areia pouco argilosa compactada e cascalho areno-argiloso compactado (B1). A proteção da face de montante foi realizada em enrocamento (A2) e enrocamento compactado (A3). Já a proteção do talude à jusante foi realizada com gramíneas locais.

Em relação ao corpo da barragem de enrocamento, à montante do filtro vertical inclinado há camadas de enrocamento compactado com transição de enrocamento fino (ER/GR) (0,20m) para silte argiloso compactado (M). À jusante do filtro vertical inclinado trechos da barragem de enrocamento são formados por enrocamento compactado e composição com cascalho areno-argiloso compactado.

A interpretação e entendimento do perfil do eixo do empreendimento são subsidiados pelas análises do projeto básico/executivo da barragem e pela realização de inspeções visuais, regulares ou rotineiras das estruturas. A coerência do estudo de ruptura da barragem é determinada por essas atividades de levantamento documental e de reconhecimento em campo.

A Figura 18 e a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustram a planta baixa da barragem de terra da margem direita.

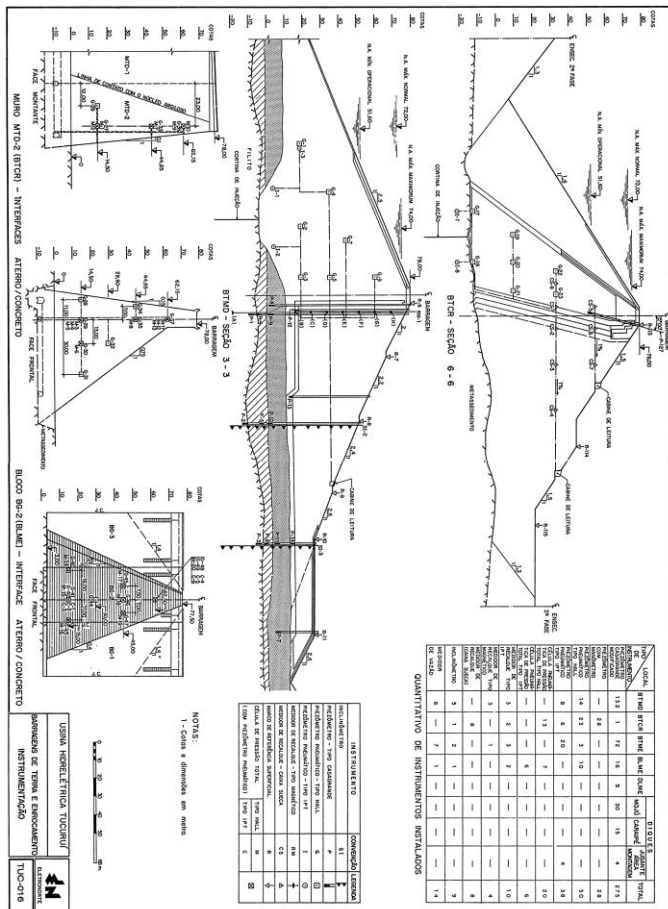


Figura 19 – Corte da barragem de terra e de enrocamento da margem direita.

Fonte: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.

A segunda estrutura é a barragem de concreto, composta pelo vertedor, pela casa de força 1 e pela casa de força 2. Esta estrutura foi construída em concreto em gravidade e possui um comprimento de 1.321 e altura de 77 m. Pela margem direita, à montante, na junção entre o vertedor e a barragem de enrocamento da margem direita, existe um defletor de fluxo, o qual direciona a contração das linhas de fluxo para a região central do vertedor. A função do defletor é evitar a criação de pontos de tensão na junta do vertedor com a barragem de enrocamento. À jusante do vertedor também existem defletores de fluxo, os quais tem

função de direcionar o fluxo da vazão defluente e evitar processos erosivos nos pés dos taludes das barragens de terra homogênea e enrocamento da margem direita.

A Figura 20 ilustra a planta baixa do vertedor e das casas de força (casa de força I e II).

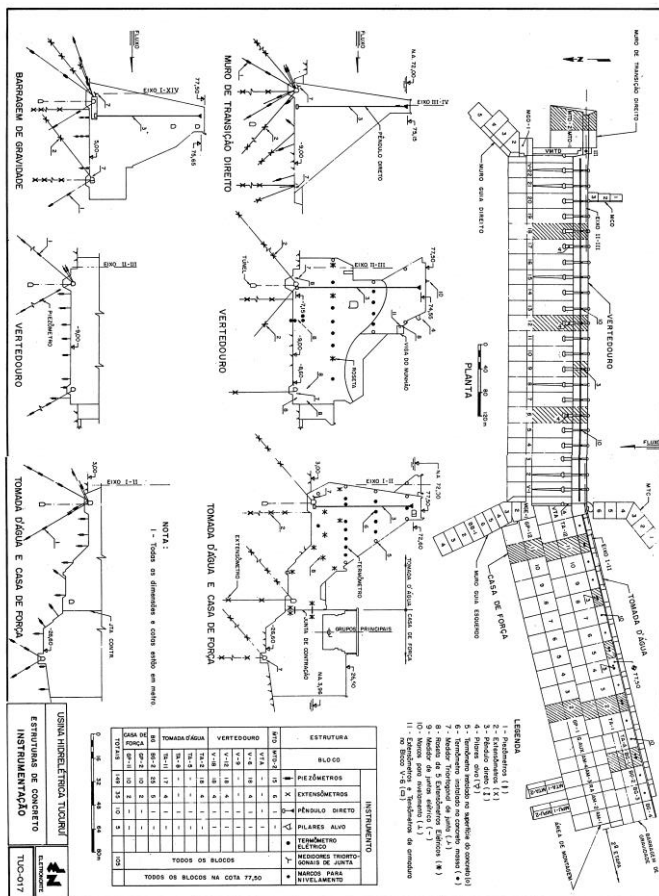


Figura 20 – Planta baixa do vertedor e das casas de força.

Fonte: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.

Já pela margem esquerda, a barragem é de terra homogênea. Tal barragem é considerada entre a junção da barragem de terra com a casa de força 2 até a estrutura da eclusa.

A composição do corpo da barragem de terra da margem esquerda é formada por silte argiloso compactado, tanto à montante quanto à jusante do filtro vertical. Nos trechos de menor altura, menor do que 30 metros, a composição é de argila siltosa ou silte argiloso compactado. Maior incerteza existe sobre o conhecimento da composição e detalhes construtivos da barragem de terra da margem esquerda após a construção da segunda fase do projeto da UHE Tucuruí.

A Figura 21 e a Figura 22 ilustram a planta baixa e o corte da barragem de terra da margem esquerda. O arranjo da barragem de terra da margem esquerda passou por modificações ao longo do projeto, visto que a casa de força 2 foi construída no segundo horizonte de projeto. Logo, a estrutura é recente e está localizada numa região mais favorável geotecnica e geologicamente em relação à barragem da margem direita.

O acesso às instalações da UHE Tucuruí é realizado passando pela barragem de terra da margem esquerda, e, qualquer provável problema na barragem da margem esquerda seria visto com maior agilidade pelos colaboradores da usina.

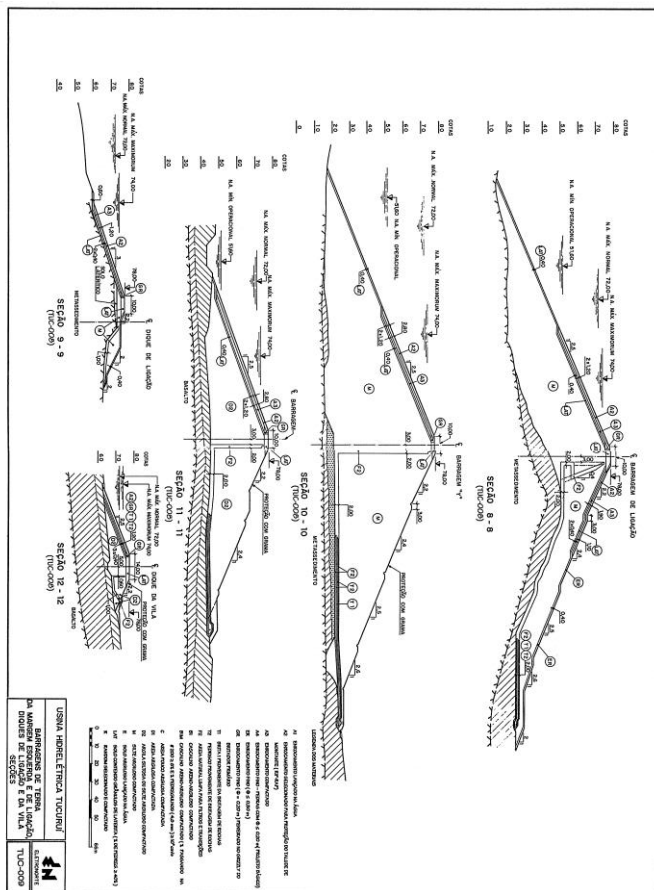


Figura 22 – Corte da barragem da margem esquerda. Fonte: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.

As informações geotécnicas das estruturas do barramento da UHE Tucuruí subsidiam a fundamentação técnica sobre a parametrização da geometria da brecha de ruptura nos tópicos seguintes.

3.2 ASPECTOS OPERACIONAIS

A UHE Tucuruí, conforme premissas de projeto e verificado por Lara et al. (2014), não possui volume de espera para controle de cheias. A barragem foi dimensionada para manter o regime de regulação natural das cheias do rio Tocantins. Conforme as regras de operação do

reservatório da UHE Tucuruí procura-se operar o reservatório nos seguintes níveis:

- Período de Cheia – entre dezembro e maio → NA em torno de 73,80 [m – IBGE];
- Final de Cheia – entre junho e julho → NA 74,00 [m – IBGE]; e,
- Período de Seca – entre agosto e novembro → NA entre 74,00 e 58,00 [m – IBGE].

A faixa operativa estabelecida para o reservatório da UHE Tucuruí está fixada entre 58,00 até 74,00 [m – IBGE]. Além disso, a barragem é operada segunda três faixas operativas: Operação Normal; Operação Normal de Atenção; e, Operação de Emergência.

3.3 REGIME HIDROLÓGICO

A distribuição sazonal da precipitação é determinante em toda a extensão da bacia do Rio Tocantins. Nota-se que as chuvas aumentam de dezembro a janeiro, a precipitação apresenta-se mais acentuada no setor ocidental, no qual a quantidade de chuvas analisadas ficou entre 350 e 400 mm. Em janeiro os efeitos da Zona de Convergência Intertropical são mais percebidos no setor nordeste da área de estudo, caracterizando também os sistemas de tempo que adentram pela linha da Costa do Pará-Maranhão. A partir de maio, ocorre desintensificação dos sistemas sinóticos e as chuvas diminuem para intervalos entre 150 e 50 mm. A partir de outubro no setor sul-sudoeste as chuvas amplificam-se atingindo a faixa entre 200 e 250 mm e mais ao norte entre 150 e 200 mm. Este efeito também está associado aos efeitos da ZCAS (Zona de Cobertura do Atlântico Sul).

Há indicativos de que o rio Araguaia contribui com mais vazão por área do que o rio Tocantins. Na Figura 23 é possível verificar a localização de cada estação aplicada na análise fluviométrica da bacia do Rio Tocantins.

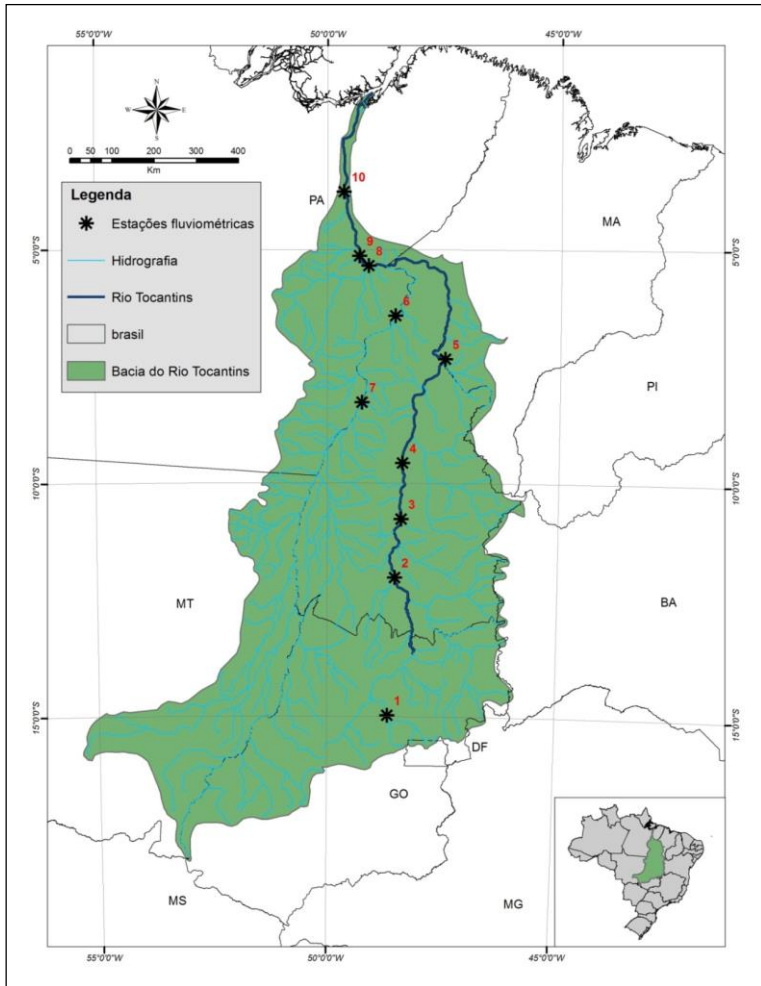


Figura 23 – Mapa da Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins indicando a posição das estações fluviométricas.

A estação de Itupiranga (29200000), montante para ao reservatório da UHE Tucuruí, mostrou estacionariedade e padrão de reposa fluvial estável com o período entre janeiro de 1979 até dezembro de 2006. Logo, pode-se afirmar que o regime de vazões em Itupiranga possui características naturais.

3.4 BALANÇO HÍDRICO SIMPLIFICADO DA CABECEIRA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TOCANTINS

O balanço hídrico simplificado na cabeceira da bacia do Rio Tocantins mostra um ciclo bem marcado com um período chuvoso, de outubro até abril, e um período seco entre maio e setembro. O mesmo padrão climatológico é observado no exutório da bacia, entretanto os volumes de precipitação são maiores no exutório do que na cabeceira. O padrão da resposta hidrológica sazonal é o mesmo, no entanto, há uma transição de biomas da cabeceira até o exutório, do cerrado até a Amazônia, respectivamente. Na Tabela 10 estão resumidos os valores do balanço hídrico simplificado para médias mensais de longo período.

Tabela 10 – Balanço hídrico simplificado.

Mês	Cabeceira		Exutório	
	P [mm]	ETR [mm]	P [mm]	ETR [mm]
Janeiro	317	100	294	125
Fevereiro	246	95	357	94
Março	196	102	387	128
Abril	136	92	299	129
Maio	38	72	89	127
Junho	17	41	34	72
Julho	11	28	21	37
Agosto	12	25	22	27
Setembro	62	66	56	57
Outubro	158	109	119	119
Novembro	249	102	153	135
Dezembro	325	104	250	131
Acumulado	1767	936	2081	1181

A mesma informação está representada em forma de gráficos (Figura 24).

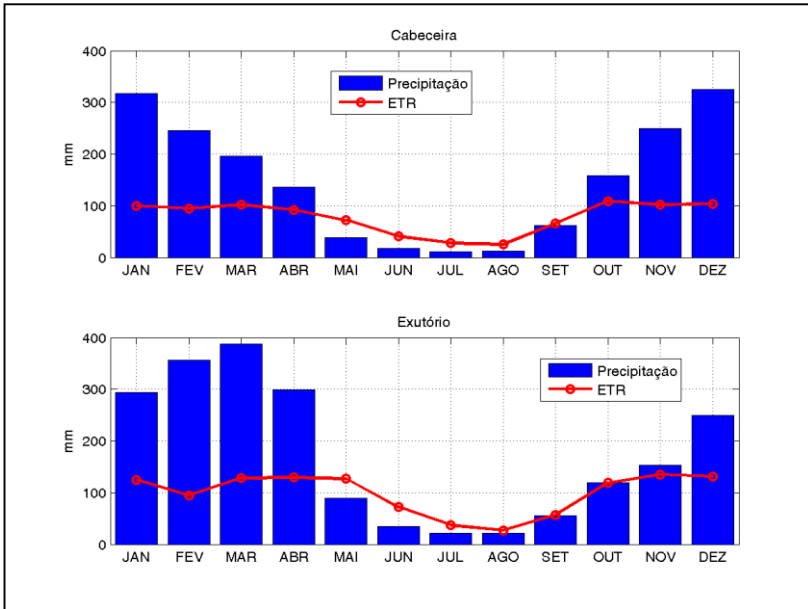


Figura 24 – Balanço hídrico simplificado.

Sempre que a evapotranspiração (linha vermelha) está acima da precipitação (barra azul), ocorre deficiência hídrica na bacia, e para o inverso, tem-se excedente hídrico. Sazonalmente, a bacia do Rio Tocantins apresenta uma resultante positiva de disponibilidade hídrica ao longo de um ano hidrológico.

4 METODOLOGIA

O presente trabalho se apoia nos métodos de estudo de caso e estatístico, respectivamente. A metodologia para emprego da metodologia probabilística atende uma série de procedimentos ilustrados no fluxograma a cima, tais como:

- Reunião de alinhamento entre as partes interessadas;
- Revisão documental da barragem;
- Inspeção da barragem;
- Processamento dados operacionais do reservatório e dispositivos de descarga da barragem;
- Caracterização da área afetada à jusante;
- Desenvolvimento da APMR;
- Definição dos cenários das brechas de ruptura da barragem, em função da APMR;
- Desenvolvimento das amostragens estatísticas dos parâmetros de formação da brecha com Monte Carlo através do modelo MCBreach e do modelo HEC-RAS truncado;
- Desenvolvimento do modelo HEC-RAS completo; e,
- Confecção dos mapas de inundação para as probabilidades de excedência desejadas, associadas às amostragens de Monte Carlo.

O engenheiro ou a equipe de segurança deve realizar pelo menos uma reunião de alinhamento com o proprietário da barragem e sua equipe de operação e manutenção. As partes interessadas devem estar em comunhão sobre as atividades que serão desenvolvidas no preparo do estudo para identificação dos pontos vulneráveis da barragem para então cálculo da geometria da brecha da ruptura.

A inspeção visual é realizada pelo engenheiro ou a equipe de segurança, junto de representantes da equipe de operação e manutenção da barragem, todos sendo especialistas com experiência comprovada em segurança de barragens. As inspeções rotineiras realizadas periodicamente pela equipe de manutenção da barragem, e quando feito por agente externo como inspeção especial, funcionam como uma auditoria de terceira parte. A inspeção visual, seguida de registros fotográficos e anotações em prancheta ou meio digital, visa reconhecer

as estruturas e suas condições estruturais, bem como para avaliar as condições dos instrumentos de auscultação da barragem.

A APMR e a caracterização da área afetada são realizadas em paralelo e logo posterior a inspeção visual, onde uma atividade alimenta a outra, sendo que a APMR tem maior dominância no processo. A APMR deve ser realizada buscando desenhar cenários de possíveis modos de ruptura da barragem, conforme supracitado. Os cenários são compostos cruzando informações documentais com as informações levantadas em campo. Assim, o engenheiro ou a equipe de segurança, junto com a equipe de operação e manutenção, traçam cenários nos quais a barragem poderia romper, usando perguntas tipo “como?” e “onde?”. Neste caso, informações sobre a maior altura do maciço, bem como o conhecimento das condições da fundação e da composição de materiais do corpo do maciço determinam onde será considerada a formação da brecha. Neste procedimento não importa o quanto pareça absurdo o cenário de ruptura, todos os possíveis modos de ruptura devem ser elencados.

A APMR é um procedimento livre, informal, o qual deve avaliar a barragem e criar os cenários favoráveis ao desenvolvimento de brechas de ruptura, podendo definir mais de um ponto de formação de brecha. Cabe salientar que a APMR é o início do estudo de formação de brecha de ruptura de qualquer barragem, e não caracteriza uma ação de tomada de decisão.

Wahl (2004) coloca que existe incerteza na estimativa dos parâmetros de formação de brecha pelo uso direto de equações empíricas e recomendações de engenharia. Logo, o engenheiro e sua equipe não deveriam ficar exclusivamente amparados por esses resultados, de forma a evitar cenários determinísticos. Por isso, a proposição de Goodell (2012), um o uso de Monte Carlo, bem como justificativas técnicas embasadas nas condições de projeto e local da barragem, visa aprimorar os estudos de formação de brecha de ruptura em barragens com uma aproximação probabilística do problema.

4.1 ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DA BRECHA

A estimativa dos parâmetros de formação de brecha é o ponto de maior incerteza. Wahl (2004) e Froehlich (2008) já apresentaram estudos estatísticos sobre as equações discutidas no presente trabalho. Os autores estimam intervalos de variação dos parâmetros de largura e tempo de formação em relação aos eventos históricos de ruptura de barragem, dos quais se tem informações quantitativas.

O processo determinístico é fundamentado no emprego direto de equações empíricas e de recomendações de engenharia. Nesse processo o engenheiro ou a equipe técnica deve escolher, segundo critérios ou por sorteio, os parâmetros de formação da brecha de ruptura pelo método determinístico, onde, segundo Goodell (2013), se presa pelo cenário mais conservador ou de maior impacto e dano ao longo do vale à jusante. Tal prática de empregar o cenário mais conservador, o cenário que gera a maior brecha de ruptura da barragem, é comumente usado em estudos de ruptura de barragens na realidade brasileira. Tal procedimento determinístico é feito visto a atual impossibilidade de calcular o risco de uma determinada cota de inundação ocorrer pela cheia induzida do rompimento da barragem.

Já o método probabilístico engloba mais atividades no processo de estimação dos parâmetros de formação da brecha. Neste caso, a análise do projeto da barragem, dos registros de inspeções, do uso de equações empíricas e das recomendações de engenharia auxilia na determinação das faixas de amostragem dos parâmetros. O processo, segundo Goodell (2012), deve ser participativo devido a questão da subjetividade, por isso a experiência e o nível de especialização da equipe de segurança de barragens são fundamentais.

A Figura 25 ilustra um fluxograma do procedimento de estimação dos parâmetros de formação de brecha pelo método probabilístico. As seguintes etapas podem ser descritas como cruciais:

- Revisão e aplicação das equações e recomendações disponíveis para a barragem em questão;
- Revisão do projeto da barragem, a fim de verificar as características da fundação e das ombreiras do maciço;
- Inspeção da barragem para confirmar informações de projeto e relacioná-las com condições de campo, tais como topografia e controles geológicos;
- Amostragem preliminar de tempo de formação da brecha e largura média da brecha;
- Cálculo da estatística do índice ER/H_w para o conjunto amostrado;
- Verificação da estatística do índice ER/H_w para garantir que esteja no intervalo de 1,6 até 21; e,
- Início das amostragens dos conjuntos de formação da brecha com o modelo MCBreach.

O índice ER/H_w representa a taxa de erosão linear do corpo do barramento dividido pela altura d'água a cima da geratriz inferior da

brecha. Essa taxa de erosão representa como será a evolução da perda de massa do corpo do maciço durante a ocorrência da ruptura da barragem. Tal índice é recomendado por Von Thun & Gillette (1990) para verificar se os parâmetros empregados para representar o processo de formação da brecha estão adequados fisicamente. O intervalo entre 1,6 e 21 é uma recomendação, a qual é indicada por órgãos fiscalizadores norte-americanos, como no estado do Colorado. Von Thun & Gillette (1990) colocam que o intervalo pode ter seu extremo superior ampliado até $200 + 4H_w$, no entanto, o engenheiro ou a equipe técnica devem estar atentos aos valores do extremo inferior. Valores abaixo de 1,6 indicam um tempo de formação da brecha muito longo ou uma largura média pequena.

Segundo Wahl (2004), as equações para estimar os valores de largura média da brecha são precisas e aderentes aos eventos passados de ruptura de barragens, apresentando maior assertividade do que as equações para estimar o tempo de formação da brecha. O tempo de formação da brecha é um parâmetro complicador, pois não se sabe o exato momento que a brecha de ruptura se inicia (USACE, 2014), por isso as equações tendem a minorar esse parâmetro por questões de conservadorismo.

Usando o índice ER/H_w como balizador das amostragens e para definição dos extremos do tempo de formação e da largura média da brecha de ruptura, indicam-se valores de formação de brecha da ordem de 2 horas como valores médios em grandes barramentos. Podem-se considerar grandes barramentos estruturas com altura superior a 15 m. No entanto, cada caso é um caso e o engenheiro ou a equipe técnica devem avaliar as amostragens e discuti-las. Valores de ER/H_w maiores do que 21 são considerados suspeitos, e o tempo de formação da brecha e a largura média da brecha devem ser reavaliados.

O índice ER/H_w pode ser definido matematicamente como:

$$ER = \frac{B_m}{t_f} \quad (28)$$

Onde ER é a taxa de erosão linear do corpo da barragem durante um evento de ruptura.

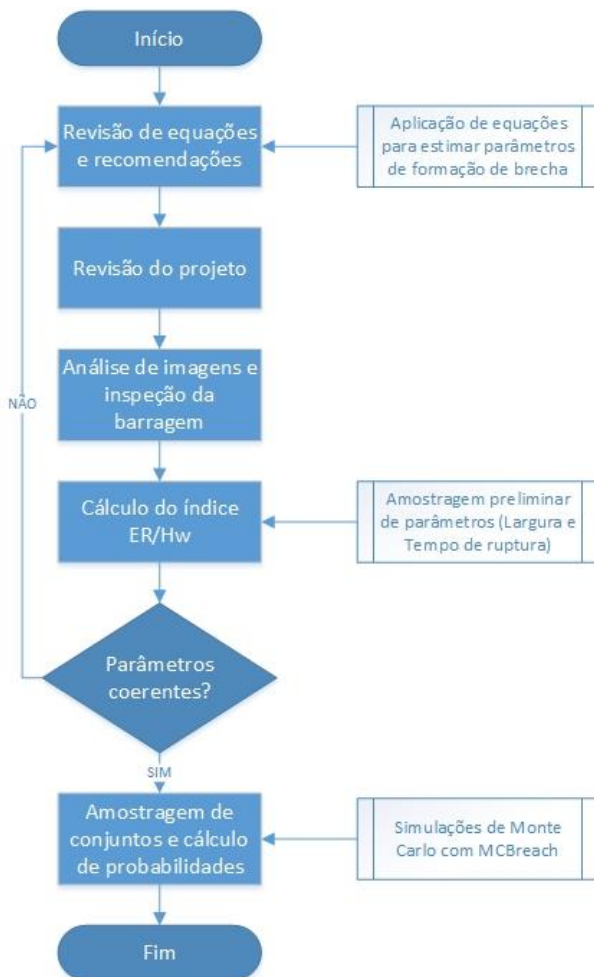


Figura 25 – Fluxograma do processo de estimação de parâmetros de formação de brecha para o método probabilístico.

Os parâmetros são estimados para representar uma determinada distribuição probabilística, que neste caso pode ser uma distribuição Uniforme ou uma distribuição Normal. A distribuição Uniforme requer dois parâmetros, um mínimo e um máximo, representando a faixa onde o parâmetro desejado poderá variar aleatoriamente. A distribuição Normal requer a estimativa da média e do desvio-padrão da amostra.

A Figura 27 e a Figura 27 ilustram como os modelos probabilísticos podem ser associados aos parâmetros de formação da

brecha. Após o estudo das equações empíricas, a análise dos registros da inspeção da barragem e do projeto da barragem e do desenvolvimento da APMR, se afere os limites geométricos da brecha. Com limites da brecha definidos, relacionam-se os parâmetros geométricos de formação com os modelos probabilísticos. A cota d'água para início da brecha pode ser amostrada pela distribuição Uniforme, já a largura média e o tempo de formação da brecha podem ser amostrados pela distribuição Normal. Tais escolhas sempre dependem do engenheiro ou da equipe técnica, e conforme Goodell (2012), pesquisas neste assunto são necessárias, visto a escassez de informações e discussões.

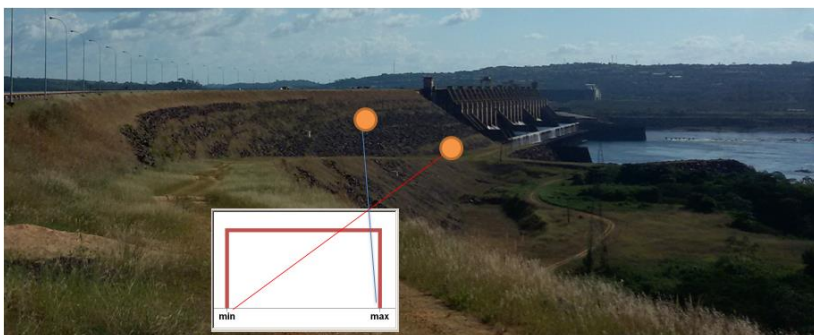


Figura 26 – Modelo probabilístico Uniforme associado à brecha de ruptura.

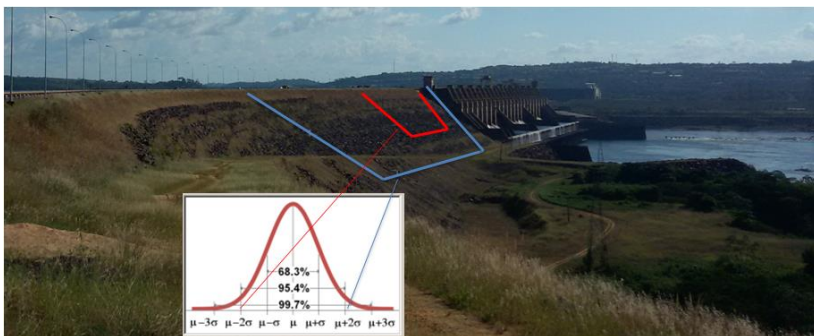


Figura 27 – Modelo probabilístico Normal associado à brecha de ruptura.

A definição estatística dos conjuntos de formação da brecha, com o modelo MCBreach, é realizada concomitante à rodada do modelo HEC-RAS truncado, para cálculo do hidrograma de saída associado para cada conjunto de parâmetros de formação da brecha amostrado. Após

todos os hidrogramas de saídas já tiverem sido calculados com o MCBreach em conjunto o modelo HEC-RAS truncado, um modelo HEC-RAS completo deve ser simulado para toda a extensão disponível ao longo do vale à jusante, a fim de gerar resultados para confeccionar as manchas de inundação, as quais estarão associadas a uma probabilidade de ocorrência do conjunto de parâmetros e do hidrograma de saída calculados no MCBreach e rodados no modelo HEC-RAS truncado.

O modelo MCBreach é o modelo numérico estatístico responsável por amostrar os conjuntos de parâmetros de formação da brecha, através da técnica de Monte Carlo. No final da simulação probabilística, os conjuntos de parâmetros são organizados estatisticamente segundo probabilidades de ocorrência aferidas através das vazões de pico. Assim, para os níveis de 1%, 10%, 50%, 90% e 99% de probabilidade de ocorrência, junto de seus respectivos hidrogramas de saída, são confeccionados os mapas de inundação.

4.2 DOMÍNIO DE SIMULAÇÃO

O presente estudo se fundamenta no desenvolvimento de dois modelos conceituais hidrodinâmicos. O modelo truncado, o qual é empregado para as simulações hidrodinâmicas para definição dos hidrogramas de saída das brechas de ruptura. O modelo completo, o qual é empregado para a propagação dos hidrogramas de saída ao longo do vale à jusante. O intuito de trabalhar com dois modelos hidrodinâmicos está no fato de otimizar o tempo de simulação.

Goodell (2012) preconiza que o uso de um modelo truncado possibilita o desenvolvimento de simulações com Monte Carlo, através de um controle externo com o MCBreach, utilizando a formação hidrodinâmica, com até 12 horas de dispêndio computacional. O engenheiro pode rodar seus cenários de um dia para o outro, aproveitando o período da noite e madrugada para o desenvolvimento das simulações. Uma simulação com Monte Carlo, empregando o modelo completo levaria uma semana ou mais.

O modelo truncado compreende o reservatório da usina e algumas seções transversais, pelo menos duas, à jusante. O modelo completo compreende toda a extensão à jusante do barramento, podendo inclusive contemplar o reservatório e suas estruturas. Essa estratégia de modelagem numérica tem mostrado ser consistente segundo resultados apresentados por Goodell (2012) e Goodell (2013).

A Figura 28 e a Figura 29 ilustram a região de desenvolvimento do modelo truncado e as seções transversais do modelo conceitual do HEC-RAS, respectivamente.

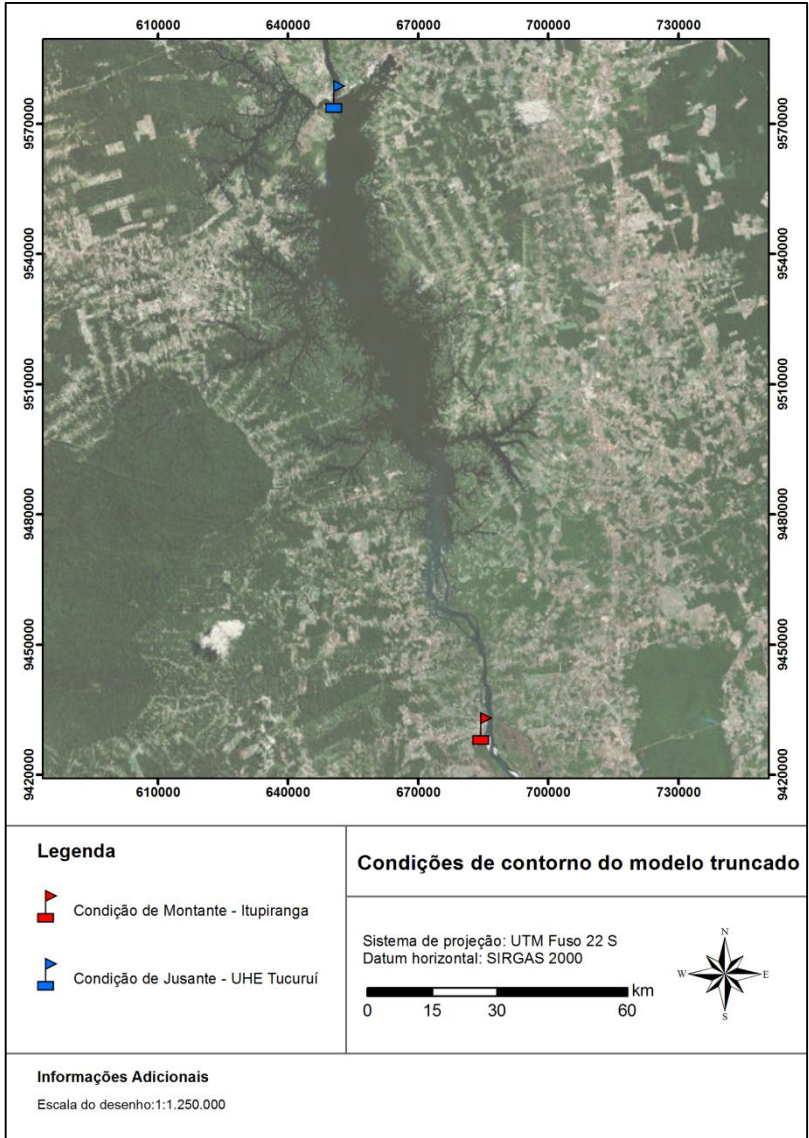


Figura 28 – Região de desenvolvimento do modelo truncado.

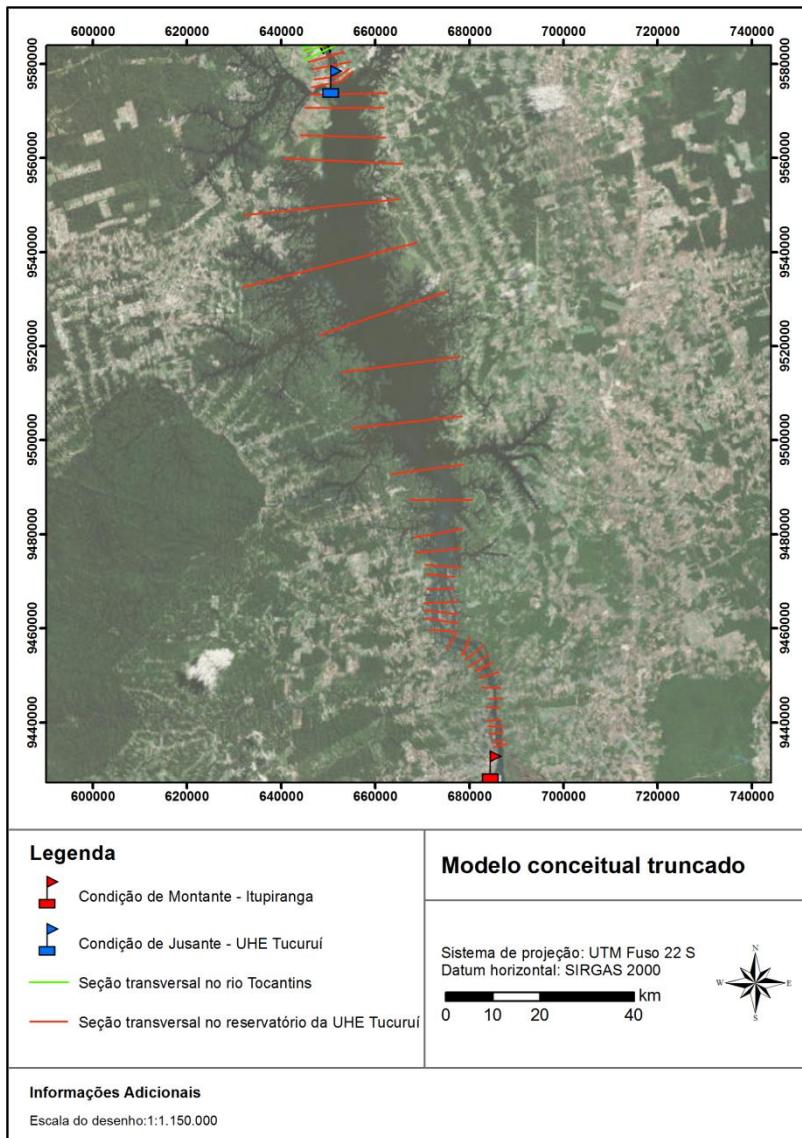


Figura 29 – Modelo conceitual truncado (HEC-RAS).

A Figura 30 e a Figura 31 ilustram a região de desenvolvimento do modelo completo e as seções transversais e as áreas de armazenamento do modelo conceitual do HEC-RAS, respectivamente.

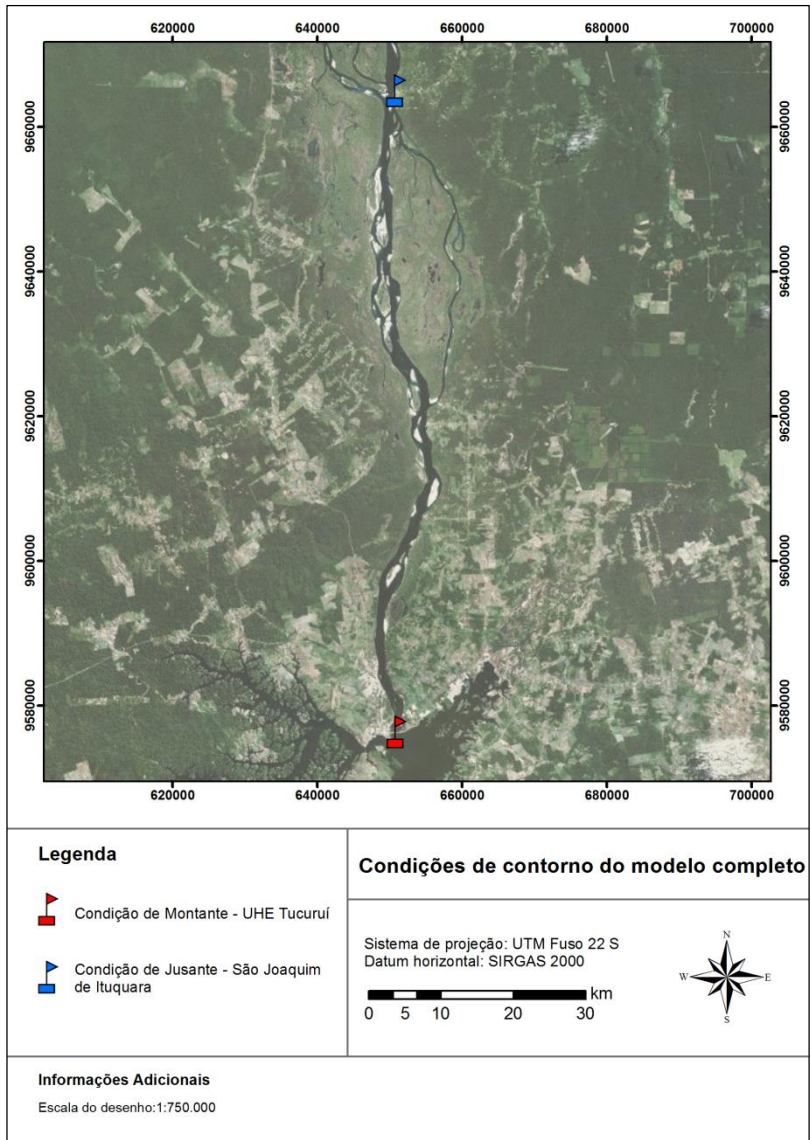


Figura 30 – Região de desenvolvimento do modelo completo.

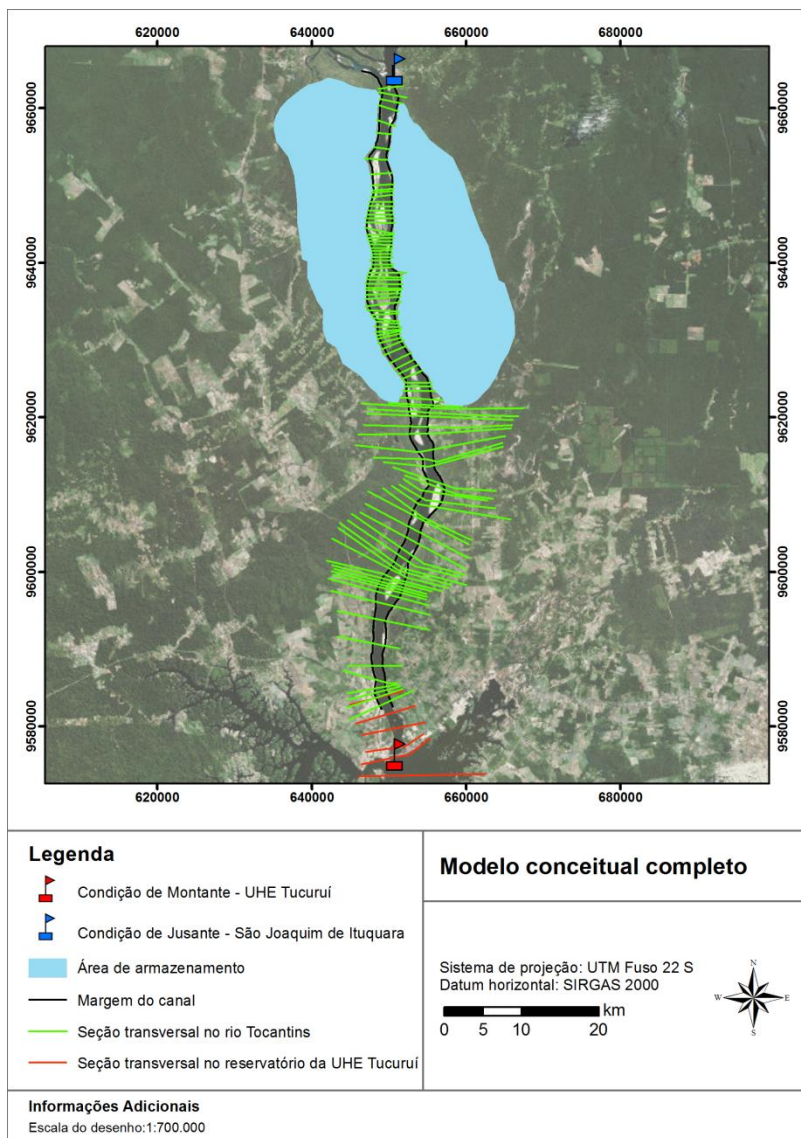


Figura 31 – Modelo conceitual completo (HEC-RAS).

4.3 DADOS DA BARRAGEM

O levantamento documental da barragem foi realizado em saída de campo em Brasília/DF e Tucuruí/PA entre o período de novembro de 2014 e inspeção da UHE Tucuruí em de julho de 2015, respectivamente. As seguintes informações foram compiladas e empregadas como desenvolvimento das atividades da presente pesquisa:

- Relatos dos operadores;
- Plantas e croquis das estruturas do barramento;
- Histórico da operação hidráulica do reservatório e das estruturas de descarga;
- Dados fluviométricos empregados para auxílio da operação do reservatório da usina;
- Curva cota-área-volume do reservatório; e,
- Manual de operação.

As informações críticas do projeto da barragem e dos aspectos operacionais já foram apresentadas na descrição do empreendimento. As demais informações serão empregadas ao longo dos próximos tópicos. A Tabela 11 resume o tipo de informação e como ela é empregada no desenvolvimento da APMR e dos modelos de formação de brecha de ruptura e propagação da onda de cheia ao longo do vale à jusante.

Tabela 11 – Resumo informativo das fontes de informação da barragem.

Fonte de informação	Utilidade
Relatos dos operadores	Análise de períodos críticos do ano para a operação e definição de locais críticos de infiltração, locais de ocorrência de recalques.
Plantas e croquis	Análise das dimensões e condições da fundação da barragem, localização da seção de maior altura.
Histórico da operação	Ajuste dos modelos numéricos, conforme operação do reservatório
Dados fluviométricos	Entendimento da reposta hidrológica da bacia hidrográfica e calibração e validação dos modelos numéricos hidrodinâmicos.

Fonte de informação	Utilidade
Curva cota-área-volume	Ajuste do modelo numérico do reservatório e conhecimento da variação do volume armazenado em função da cota de operação.
Manual de operação	Refinamento dos modelos numéricos de hidrodinâmicos em relação à operação hidráulica dos dispositivos de descarga do barramento.

4.4 DADOS TOPOBATIMÉTRICOS

O desenvolvimento dos modelos HEC-RAS, truncado e completo, empregou dados batimétricos do rio Tocantins e o reservatório da UHE Tucuruí e dados topográficos das imagens do modelo digital de superfície SRTM. Os dados topobatimétricos cobrem uma extensão entre o município de Itupiranga até São Joaquim de Itaquara, no estado do Pará. A extensão de rio contemplada no presente estudo é da ordem de 230 km, incluindo o reservatório da UHE Tucuruí.

Devido às limitações de informações na parte do reservatório da UHE Tucuruí, parte do reservatório representado por uma seção prismática, ajustando o volume deste modelo numérico de terreno à curva cota-área-volume do reservatório, conforme recomendações de USACE (2014).

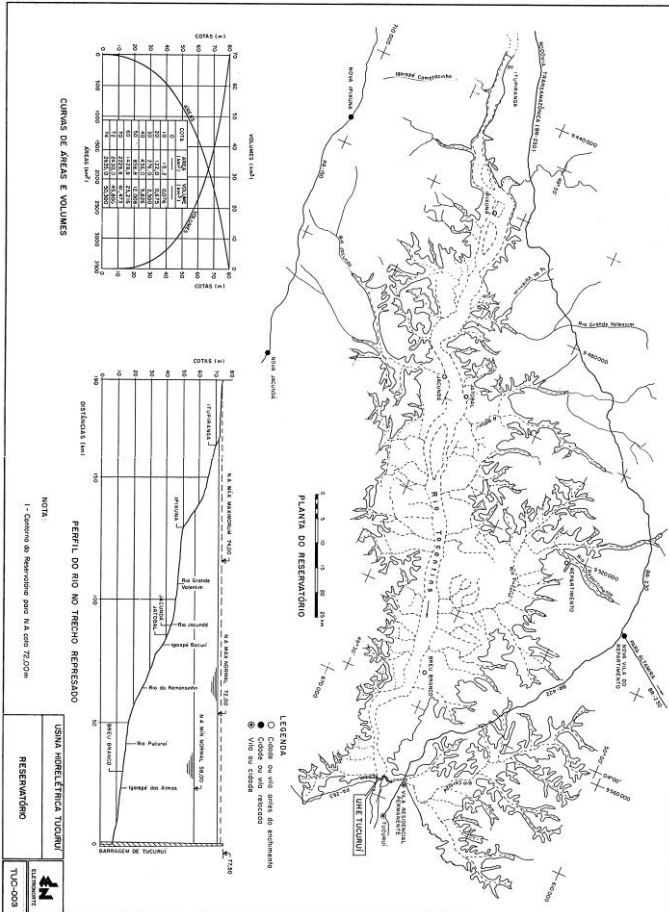


Figura 32. Perfil do rio no trecho represado.

Fonte: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.

O trecho à jusante do reservatório da usina, dados batimétricos e do modelo digital de superfície ASTER foram empregados para compor a base topobatimétrica. Os dados batimétricos da calha do rio Tocantins foram levantados através da tecnologia de sensoriamento por multifeixe, o que determina para os dados batimétricos alta resolução espacial e altimétrica. Já os dados topográficos apresentam limitação altimétrica, pois representam o modelo digital de superfície com uma resolução espacial e altimétrica inferior. No entanto, a base de dados ASTER é suficiente para embasar as discussões da presente pesquisa.

Com o emprego da batimetria multifeixe do rio Tocantins, a calibração e validação do modelo numérico HEC-RAS completo, ao longo do vale à jusante, garante confiabilidade aos resultados da propagação da onda de cheia enquanto confinada na calha primária do rio Tocantins.

A área afetada está quase toda contemplada no trecho de jusante de presente estudo. A topobatimetria à jusante da usina subsidiou o desenvolvimento do modelo hidrodinâmico HEC-RAS completo, o qual é empregado para propagar os hidrogramas de cheia resultados da análise probabilística e determinística de ruptura da UHE Tucuruí.

A Figura 33 ilustra o mapa temático da topobatimetria do trecho à jusante da UHE Tucuruí referente ao domínio de simulação do modelo HEC-RAS completo.

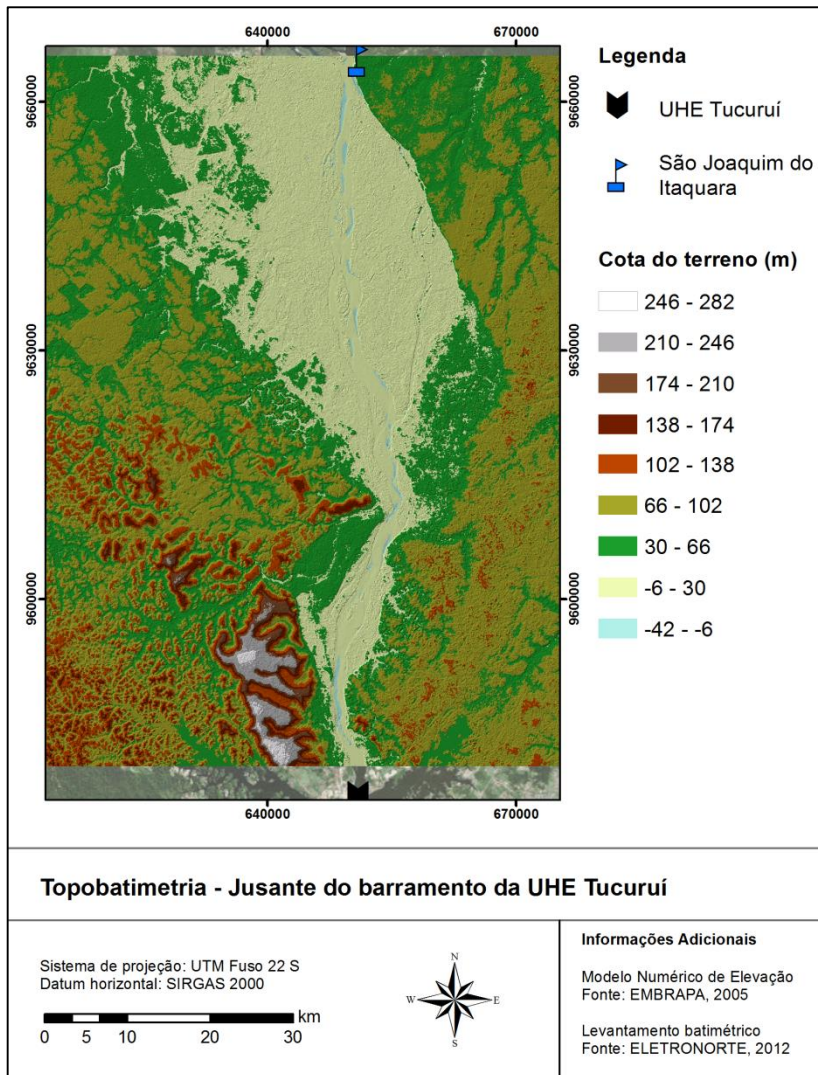


Figura 33 – Topobatimetria à jusante da UHE Tucuruí.

4.5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO COMPLETO

O desempenho da calibração e a consolidação da validação do modelo numérico HEC-RAS, completo, será verificado baseado nas seguintes funções objetivo: NSE (Coeficiente de Nash) e ERRO (erro no volume).

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_i (O_{\text{obs}} - O_{\text{simu}})^2}{\sum_i (O_{\text{obs}} - \bar{O}_{\text{obs}})^2} \quad (29)$$

$$\text{ERRO} = \frac{\sum_i O_{\text{simu}} - \sum_i O_{\text{obs}}}{\sum_i O_{\text{obs}}} \cdot 100 \quad (30)$$

A função NSE determina a qualidade dos ajustes para os extremos inferiores e superiores da variável, em termos do desvio da média, e a função ERRO determina a eficiência em porcentagem do erro médio. Valores NSE próximos de 1 (um), mas sempre menores do 1 (um), indicam ajustes de calibração e validação excelentes, pois o modelo numérico está representando os processos hidrodinâmicos, bem como a variância inerente ao fenômeno.

O modelo hidrodinâmico completo, empregado para a propagação da onda de cheia ao longo do vale à jusante, é calibrado e validado para um período da série temporal do monitoramento fluviométrico na estação Tucuruí - 27900000. Segundo Goodell e Froehlich (2012), um modelo numérico para a propagação de uma onda cheia por ruptura de barragens não é calibrável, devido à magnitude do evento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados e discutido na seguinte ordem:

- Calibração e validação dos modelos numéricos HEC-RAS
- APMR;
- Estimativa das dimensões das brechas;
- Amostragem e ranqueamento das brechas por de acordo com a probabilidade de excedência, com o modelo HEC-RAS truncado;
- Comparação dos cenários probabilísticos com os cenários determinísticos; e,
- Confeção dos mapas de inundação relacionados a cada probabilidade de ocorrência e aos cenários determinísticos, com o modelo HEC-RAS completo.

São esclarecidos os procedimentos executados e seus respectivos resultados, desde o desenvolvimento da APMR até a criação dos mapas de inundação para cada probabilidade de excedência, os caminhos críticos para a aplicação da metodologia probabilística para análise de formação de brechas de ruptura em barragens de terra para fins acumulação d'água.

5.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS

Os modelos hidrodinâmicos truncado e completo foram ajustados para representar o comportamento operacional de UHE Tucuruí e o regime fluviométrico do rio Tocantins, respectivamente.

O modelo HEC-RAS truncado compreende somente o reservatório e as estruturas de vertimento da UHE, o qual está ajustado às características das estruturas de vertimento da usina e às características físicas do reservatório. Logo, o modelo HEC-RAS truncado aplica da solução hidrodinâmica, o qual é resolvido com as equações de Saint-Venant.

O modelo completo, o qual representa o vale à jusante da UHE Tucuruí, foi calibrado e validado com informações fluviométricas monitoradas na estação Tucuruí – 29700000. A variável de calibração foi cota do nível d'água, representada pela cota da superfície d'água reduzida ao nível altimétrico do IBGE.

O modelo HEC-RAS completo possui considerável complexidade conceitual, pois foi concebido empregando seções transversais, para a representação do fluxo unidirecional, e áreas de armazenamento, para representação dos fluxos laterais sobre a área de inundação. A Figura 34 ilustra a série temporal de cota d'água, observada e simulada com o modelo HEC-RAS completo, entre janeiro de 2000 e dezembro de 2002.

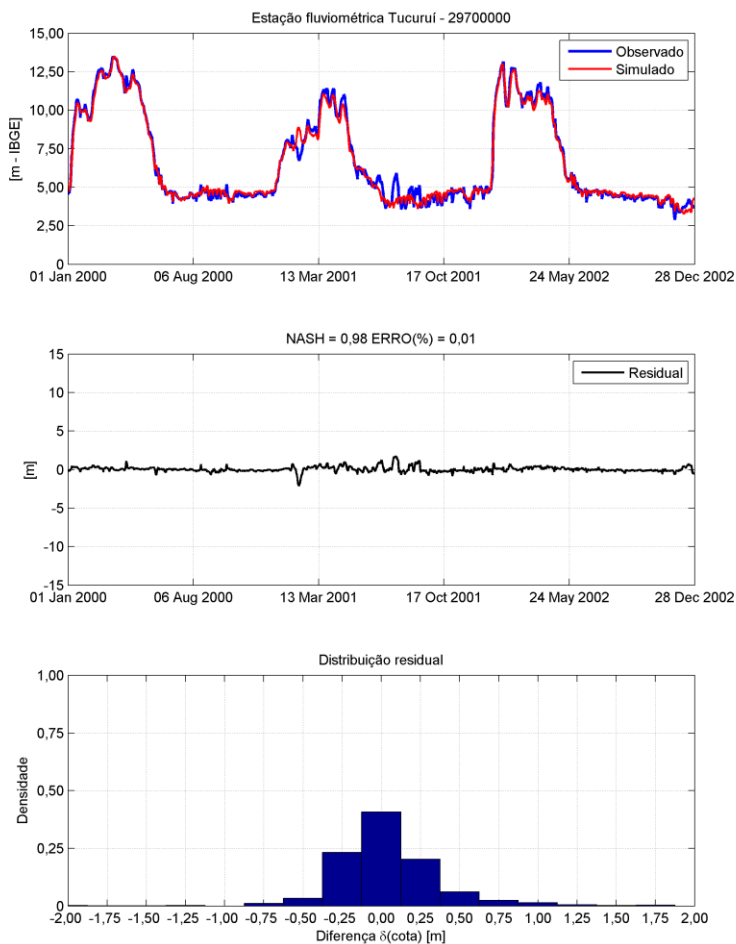


Figura 34. Calibração do modelo hidrodinâmico completo.

O modelo hidrodinâmico HEC-RAS completo, para o trecho à jusante do barramento, representou adequadamente os processos de escoamento do rio Tocantins em relação à seção transversal de controle do monitoramento hidrométrico. Os valores de Manning variaram na faixa de 0,02 até 0,03, valores condizentes às características do rio, em acordo com análises de CHOW (1959) sobre a morfologia de diferentes

tipos de canais naturais e artificiais. Mesmo o modelo completo sendo complexo, não foi necessário ajustar os coeficientes LPI para estabilizar o modelo numérico para as propagações dos hidrogramas de saída das brechas de ruptura. A região de estudo favoreceu tal condição devido ao relevo plano do vale à jusante e a ocorrência de vazões de grande porte. USACE (2014) coloca que o modelo HEC-RAS tende a apresentar instabilidades quando o domínio de simulação apresenta características fisiográficas de declividade acentuada associado a vazões de pequena magnitude.

Goodell (2013) discute o problema da calibração do modelo numérico hidrodinâmico para representar a propagação de uma onda de cheia de ruptura de uma barragem. O autor coloca que a calibração não é possível devido à magnitude de tal evento. No entanto, a fim de reduzir incertezas, o modelo HEC-RAS completo foi avaliado para o maior evento registrado no exutório da bacia hidrográfica do Rio Tocantins, na estação fluviométrica Tucuruí – 27900000. O evento hidrológico ocorreu durante a construção da barragem da UHE Tucuruí entre os anos de 1979 e 1980.

O modelo HEC-RAS completo foi avaliado para o maior evento hidrológico registrado, a fim de aferir maior credibilidade à calibração realizada para o período de operação da UHE Tucuruí. Cabe salientar que o período de validação remete a uma época que as obras da UHE Tucuruí ainda não estavam finalizadas. Logo, diferenças podem ser observadas baseadas no fato de os dados batimétricos do rio Tocantins terem sido levantados em 2012 na aplicação da presente pesquisa.

A Figura 35 ilustra graficamente os resultados obtidos com o modelo HEC-RAS completo para a representação da maior cheia registrada no rio Tocantins na seção transversal de Tucuruí – 27900000.

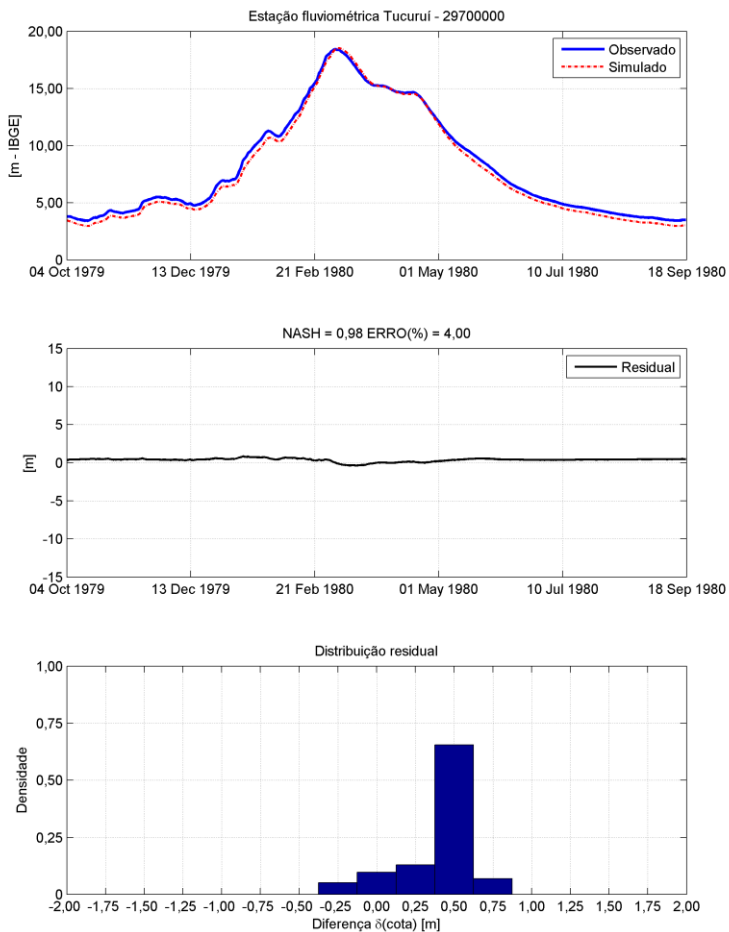


Figura 35 – Validação do modelo HEC-RAS completo.

O erro médio para a calibração do modelo completo, para a representação da cota da superfície d'água, é de aproximadamente 0,01% ou 0,10 m da variação da coluna d'água do rio Tocantins, na seção transversal da estação fluviométrica Tucuruí – 29700000. O coeficiente de NASH indica que o modelo completo está bem ajustado para a representação do regime fluviométrico do rio Tocantins, para o

trecho desejado. A validação apresentou erro médio de 4,00% ou 0,50 m da variação da coluna d'água do rio Tocantins. O coeficiente de NASH também indica que o modelo está ajustado para a apresentação do regime fluviométrico local, mesmo considerando dois períodos distintos de épocas da construção da barragem e do período recente de operação. O erro na cota está no limite do erro altimétrico do IBGE (MAPGEO), logo os resultados de cota do modelo HEC-RAS completo podem ser considerados condizentes e confiáveis para representar o regime fluviométrico do rio Tocantins no trecho de interesse.

Goodell & Froehlich (2012) afirmam que a ocorrência de uma ruptura sai da normalidade do regime fluviométrico anual do rio Tocantins, logo, assume-se que o modelo completo é adequado para a propagação das ondas de cheia de ruptura. Desta forma, as incertezas em relação ao coeficiente de rugosidade e aos coeficientes de escoamento das áreas de armazenamento lateral do vale à jusante não são abordadas no presente trabalho. Tais incertezas não fragilizam a presente pesquisa, a qual foca no cálculo das probabilidades de ocorrência de determinado conjunto de parâmetros de formação de brecha que determinarão o hidrograma de saída. O hidrograma de saída controla o processo de inundação ao longo do vale à jusante devido a uma ruptura de barragem.

O modelo designado completo foi utilizado para representar as manchas de inundação ao longo do vale à jusante da UHE Tucuruí. Através do modelo completo, os resultados probabilísticos e determinísticos dos hidrogramas de saídas foram comparados e analisados espacialmente entre a metodologia determinística e probabilística.

5.2 AMPR – ANÁLISE DE POTENCIAIS MODOS DE RUPTURA

A APMR foi realizada seguindo recomendações de FERC (2005), tendo como diretriz as seguintes perguntas:

- Como a barragem poderia romper?
- O que acontece se a barragem romper?
- Estão identificados os potenciais modos de ruptura e estão sendo apropriadamente monitorados por inspeções visuais e auscultação?
- Quais ações poderiam ser tomadas para reduzir áreas atingidas pelo rompimento da barragem ou mitigar as consequências desse evento catastrófico?

Reuniões de alinhamento entre as partes, autor do presente trabalho e corpo técnico da Eletronorte, foram realizadas antes e durante a realização da inspeção das estruturas. Com isso, foi possível listar os principais fatores mais prováveis e os menos prováveis sobre o rompimento do barramento da UHE Tucuruí. Procurou-se identificar e salientar os fatores chave, que justifiquem e/ou afetem o julgamento de determinado modo de ruptura.

Através das reuniões buscou se iniciar o entendimento sobre o empreendimento da UHE Tucuruí, sua importância nacional e local, bem como sobre os aspectos operacionais da barragem. A construção da UHE Tucuruí é marcada pelo desafio de erguer um empreendimento de tamanha dimensão numa região de difícil acesso e de pobre infraestrutura, principalmente na época das obras no início da década de 1980.

A UHE Tucuruí foi construída dentro de normas técnicas e com rigoroso controle de qualidade. Logo, a barragem pode ser considerada como “barragem feita com engenharia”. Tal informação é importante, pois baliza o estudo de formação de prováveis brechas de ruptura.

A revisão documental iniciou-se em paralelo à inspeção da barragem. Com o auxílio da equipe do setor de manutenção civil da UHE Tucuruí, identificaram-se os pontos de maior preocupação estrutural da barragem. A análise das plantas do arranjo da UHE Tucuruí trouxe considerável suporte sobre a localização e características das diferentes estruturas da barragem.

A barragem de terra homogênea, da margem direita, desperta maiores preocupações. As informações geológicas e topográficas, supracitadas, confirmam que o leito antigo do rio Tocantins cruza o trecho da barragem de terra da margem direita, bem como a existência de antigos rios de pequeno porte chamados de igarapés.

Na região da margem direita houve maior esforço na movimentação de solo neste trecho devido à presença de solos coluviais, aluviais e residuais. A presença de falhas geológicas também torna o trecho susceptível a problemas de instabilidade do maciço por infiltração, bem como recalque diferencial. Durante as fases de construção foi dado o devido tratamento de fundação no entorno das falhas, bem como a caracterização geomecânica do embasamento ao longo de todo o barramento da usina. Até os dias atuais, as falhas são monitoradas pela equipe de manutenção da Eletronorte. A falha da Lagoa está ilustrada na Figura 36.



(a) Falha da Lagoa (b) Túnel ao sob a fundação (c)
Motobombas do sistema de drenagem do túnel.

Figura 36 – Falha da Lagoa. Túnel de alívio de pressão sob a fundação do corpo de concreto da tomada d’água da Casa de Força 1.

Como o leito antigo do rio cruza a seção transversal da barragem de terra e enrocamento da margem direita, sua altura máxima é a maior em relação às demais estruturas da barragem. Logo, está condicionada ao maior carregamento, bem como à possibilidade de ocorrência de recalques diferenciais, os quais podem deflagrar a formação de piping. Outro problema é a idade da barragem, os drenos do maciço podem estar sofrendo colmatagem e isso pode provocar a ocorrência de fluxos preferenciais no corpo do maciço, gerando piping.

Com o desenvolvimento da APMR, a barragem da margem direita está susceptível estruturalmente a falhas, principalmente em relação ao risco de ocorrência de piping. Após 30 anos da sua construção, mesmo não havendo problemas aparentes no maciço, o funcionamento dos drenos verticais e horizontais passa a ser um elemento estrutural de risco, o qual pode propiciar condições à formação de piping. A formação de piping é o fato iniciador mais provável de uma brecha de ruptura da barragem da UHE Tucuruí.

Locais prováveis elencados para início da formação da brecha para a barragem da margem direita foram definidos como no ponto de maior elevação da barragem de terra e o ponto de maior altura da barragem de enrocamento. Em tais locais o gatilho para deflagração do início de uma brecha seria a formação de piping, tanto em condições normais de operação, quanto em condições de operação de emergência.

A ocorrência de galgamento é pouco provável, pois as características hidráulicas dos dispositivos de descarga garantem considerável capacidade de vertimento da barragem. Análises desenvolvidas por Lara et al. (2014) e testes numéricos indicam que mesmo com a ocorrência de um evento extremo, da ordem da decamilenar, considerando a falha de até duas comportas, não seria o suficiente para galgar a barragem da UHE Tucuruí. Por isso, o cenário de galgamento foi considerado como pouco provável, uma vez que os procedimentos operacionais da usina são testados e validos anualmente, atendendo o Sistema de Gestão da Eletronorte.

Na pior das hipóteses, caso mais conjuntos de comportas parassem de funcionar durante uma operação de emergência, ações extremas teriam tempo suficiente para intervir na abertura dos conjuntos de comporta, bem como utilizar as casas de força, e garantir o escoamento da vazão de cheia.

Na Figura 37 está ilustrado arranjo da barragem da margem direita e suas estruturas. Ficam evidentes os dois tipos de barramento que compõem da barragem da margem direita, terra homogênea e enrocamento, respectivamente.

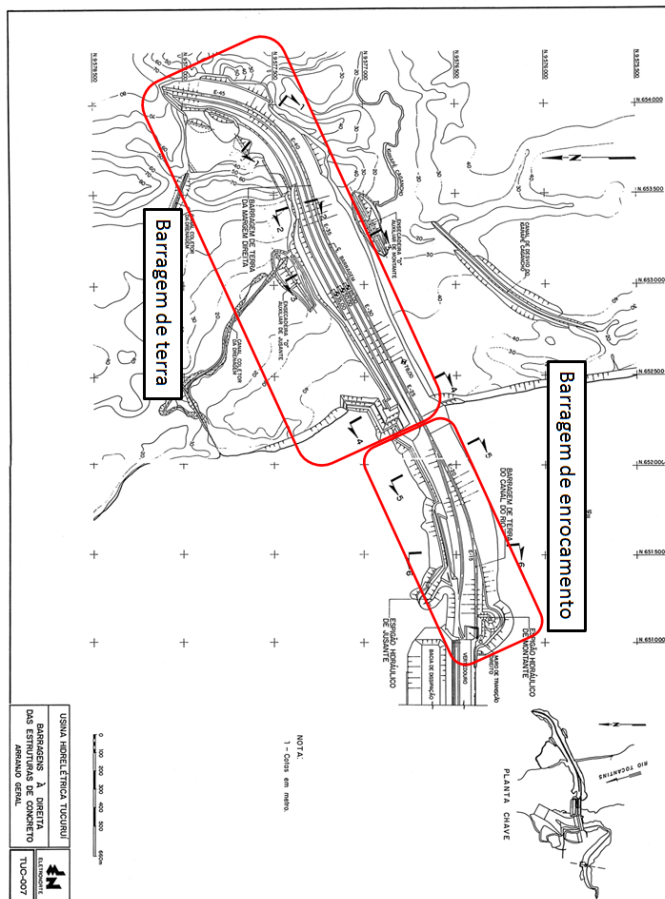


Figura 37. Arranjo da barragem da margem direita.

Adaptado: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.

As estruturas da barragem da margem esquerda não apresentam riscos identificados. A barragem de terra da margem esquerda está construída sobre um maciço geologicamente favorável. Segundo a equipe de manutenção, a barragem de terra da margem esquerda não apresenta risco aparente, sendo que os registros da auscultação indicam comportamento adequado da estrutura. A barragem da margem esquerda é considerada na APMR e compõe um cenário de formação da brecha de ruptura por piping.

A inspeção visual para a APMR foi realizada durante o período de estiagem, e nenhum sinal de surgência foi verificado nas barragens

de terra e enrocamento da margem direita e margem esquerda. Os dispositivos de drenagem estavam secos durante a inspeção, não apresentando qualquer anormalidade. As condições de proteção das faces de jusantes das barragens de terra e enrocamento, na margem direita e esquerda foram verificadas em boas condições de proteção.



Figura 38 – Vista da barragem de terra da margem esquerda.



Figura 39 – Vista da barragem de terra e enrocamento da margem direita.



Figura 40 – Barragem de terra da margem direita.



Figura 41 – Junção entre a barragem de enrocamento e terra da margem direita.



Figura 42 – Vista de jusante da barragem de terra da margem direita.



Figura 43 – Vista do cobrimento da face de jusante da barragem de terra da margem direita.

O Apêndice I trata dos modos de ruptura identificados no desenvolvimento da APMR, o fato iniciador e os mecanismos de falha. A APMR traz alguns modos de ruptura da UHE Tucuruí somente para as estruturas de terra e enrocamento, considerando somente o fato iniciador por piping ou erosão interna.

Ao longo do barramento da UHE Tucuruí, três pontos prováveis de formação de brecha de ruptura foram identificados nos aterramentos do maciço de terra e enrocamento, onde estão definidos os cenários Brecha 1, Brecha 2 e Brecha 3 para aplicação e desenvolvimento do estudo de caso da metodologia probabilística para análise de formação de brecha.

A Figura 44 ilustra a localização ao longo do arranjo da barragem. O cenário Brecha 1 na barragem de terra da margem direita, o cenário Brecha 2 na barragem de enrocamento da margem direita e o cenário Brecha 3 na barragem de terra da margem esquerda.

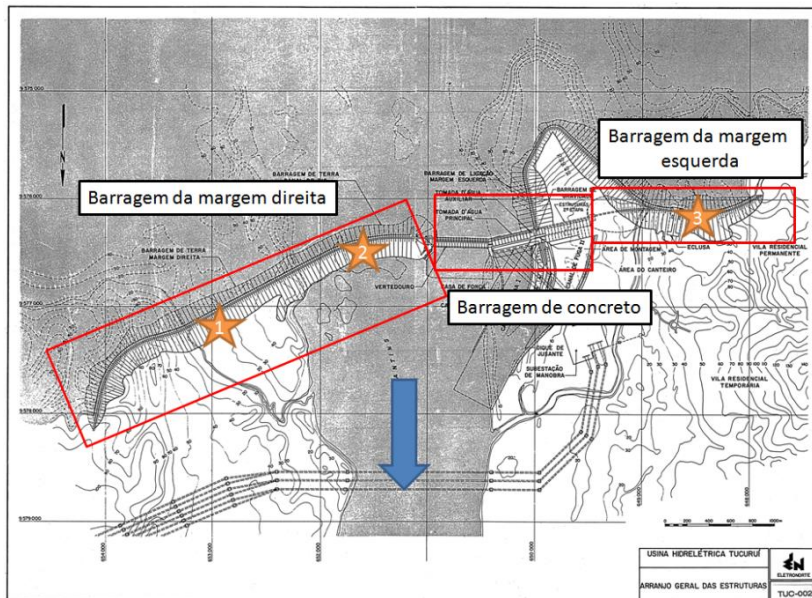


Figura 44 – Localização das brechas de ruptura. Adaptado: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.

A partir da localização dos locais prováveis de formação de brecha de ruptura, a Tabela 12 resume os cenários de formação de brecha a serem representados nos modelos numéricos MCBreach e HEC-RAS.

Tabela 12. Cenários de formação da brecha de ruptura.

Cenário	Fato iniciador mais provável	Local
Brecha 1	Piping/Erosão	Centro de maior altura da barragem de terra da margem direita.
Brecha 2	Piping/Erosão	Junta entre a barragem de terra e a barragem de enrocamento da margem direita.
Brecha 3	Piping/Erosão	Centro de maior altura da barragem de

Cenário	Fato iniciador mais provável	Local
		enrocamento da margem direita.

Os três cenários elencados compreendem as estruturas de terra e enrocamento. As estruturas de concreto não foram trabalhadas na presente pesquisa, pois conforme Froehlich (2008) e Goodell (2013), a análise probabilística ainda se aplica em barragens de aterramento, onde a incerteza sobre a formação da brecha de ruptura é um elemento de maior preocupação e relevância. Estudos de ruptura de barragens de concreto são consideravelmente mais simples de execução.

Os próximos tópicos discutem os fatores e mecanismos de formação das brechas, trazendo os resultados das amostragens dos parâmetros de formação de brecha através da técnica de Monte Carlo com a ferramenta MCBreach.

5.2.1 Brecha 1

A Brecha 1 está localizada na margem direita e compreende a barragem de terra. O fato iniciador da ruptura, o mais provável pela APMR, é erosão interna por piping. As dimensões da brecha foram estimadas para o desenvolvimento da análise probabilística através da análise do projeto da barragem, dos registros de inspeção e empregando as equações empíricas e as recomendações de engenharia de USACE (2014).

O local da brecha foi escolhido na seção de maior altura, por onde passava o curso d'água do Igarapé Cagancho. A fundação neste trecho está apoiada sobre solo de alteração, e durante a construção da barragem, foi o local de maior esforço de escavação e movimento de solo.

A ocorrência de piping pode ocorrer principalmente devido a colmatagem dos filtros e drenos, verticais e horizontais. O recalque diferencial é um fator determinante na formação do piping e pode ter seu mecanismo de formação através de sismos e do aumento da tensão de cisalhamento. A questão é sensível, pois mesmo a auscultação da barragem mostrando um bom comportamento, a ocorrência de erosão interna do maciço é provável e de difícil identificação e pode gerar sérios problemas na estabilidade do maciço.

Tabela 13 – Parâmetros de formação da Brecha 1. Método probabilístico.

Parâmetro	MP	Média	D.P.	Mín.	Máx.
El. Inferior [m - IBGE]	N	17,50	0,83	15,00	20,00
Largura [m]	N	789	236	79	1500
Decliv. (H:V) - Direita	U			0,00	1,00
Decliv. (H:V) - Esquerda	U			0,00	1,00
Tempo de ruptura [hr]	N	2,15	0,62	0,30	4,00
Cd - Barragem	U			1,44	1,82
Cd - Piping	U			0,50	0,60
El. Piping [m - IBGE]	N	41,00	7,00	20,00	62,00

O significado de MP da tabela a cima é “modelo probabilístico”, o qual está associado ao tipo de distribuição estatística empregada na amostragem do parâmetro de formação de brecha. El. Inferior representa a elevação da geratriz inferior da brecha definida através da análise das plantas do projeto da barragem, tal parâmetro deve representar a cota mais baixa que a brecha pode atingir. Uma distribuição Normal está associada ao parâmetro, pois seu comportamento segue o padrão do parâmetro da largura média da brecha durante o colapso da estrutura. Logo, a brecha do cenário Brecha 1 pode apresentar uma altura máxima de 63 m, entre a crista o ponto de toque com o embasamento.

A largura média (B_m) da brecha foi estimada empregando as equações empíricas de USBR (1988), Von Thun & Gillette (1990), Froehlich (1995), Froehlich (2008) e recomendações de USACE (2014). A análise do perfil da fundação e a verificação dos controles topográficos balizou a determinação do limite máximo da largura média da brecha. Parte-se do princípio de que a brecha não abrirá mais do que os limites dos controles topográficos indicados.

As declividades laterais (H:V) do prisma de abertura da brecha foram determinados empregando as recomendações de USACE (2014). O mínimo de 0 (vertical) e máximo de 1 (leve inclinação) foram associados a um modelo probabilístico Uniforme. O comportamento da ruptura do maciço na formação do prisma de abertura é tido como imprevisível logo qualquer combinação possui igual probabilidade de ocorrência. A conformação do prisma depende da ligação da barragem com a fundação, bem como com o grau e qualidade da compactação do maciço. No trecho de ruptura não se verifica a possibilidade de controle

lateral da fundação sobre a abertura da brecha, logo a recomendação da USACE (2014) é plausível e condizente.

O tempo de ruptura (t_r) foi estimado através de amostragens preliminares, a fim de calcular o índice ER/H_w dentro do intervalo de 1,6 até 21,0. Desta forma, chegou-se a valores de mínimo igual a 0,30 hr e de máximo igual a 4,00 hr. Para a amostragem deste parâmetro empregou-se o modelo probabilístico Normal. O tempo de formação da brecha é a maior fonte de incerteza, e não se espera valores superiores a 2 hr. Os valores históricos apresentados por Wahl (2004) indicam tal faixa de valores.

Os coeficientes de descarga do prisma da brecha e do orifício do piping foram amostrados segundo o modelo probabilístico Uniforme. Os limites de mínimo e máximo foram embasados nas recomendações de USACE (2014). Tais parâmetros pouco influenciam na sensibilidade da resposta hidráulica da brecha, no entanto fazem parte da formulação e necessitam ser amostrados.

A elevação do piping foi associada a um modelo probabilístico Normal. Seus limites de mínimo e de máximo foram determinados através da análise do projeto da barragem e dos históricos operacionais do reservatório da UHE Tucuruí. Futuramente, tal parâmetro poderá ser associado a um modelo Lognormal, conforme a distribuição probabilística da série dos níveis operacionais de um reservatório, conforme comportamento na UHE Tucuruí.

A Figura 47 e a Figura 48 ilustram os plotes das distribuições de frequência de cada um dos parâmetros de formação de brecha amostrados com a ferramenta MCBreach através do método de Monte Carlo.

A Figura 49 ilustra a distribuição de frequência do índice ER/H_w . O índice ER/H_w foi calculado, com as amostras de largura média e tempo de formação da brecha, para determinar os limites amostrais a serem determinados no MCBreach dos parâmetros de largura média da brecha e tempo de formação da brecha. Há maior investigação sobre os dois parâmetros, e o índice ER/H_w indica a existência de uma proporcionalidade de coerência para a ocorrência da largura da brecha e do tempo de formação. Esses dois parâmetros de formação da brecha, conforme discutido por Wahl (2004), são os mais importantes na caracterização do hidrograma de saída da brecha de ruptura.

Segundo Von Thun & Gillete (1990), o atendimento do índice ER/H_w no intervalo de 1,6 até 21, garante que a brecha está sendo representada coerentemente. Tal referência é uma recomendação,

inclusive adotada por órgãos fiscalizadores norte-americanos, a qual é empregada na presente pesquisa em caráter de critério de projeto para o desenvolvimento do estudo de formação de brecha de ruptura.

Após a definição dos limites amostrais do parâmetro de tempo de formação da brecha, o MCBreach pôde ser empregado para amostragem e cálculo da vazão de saída associado a cada conjunto de parâmetros amostrados.

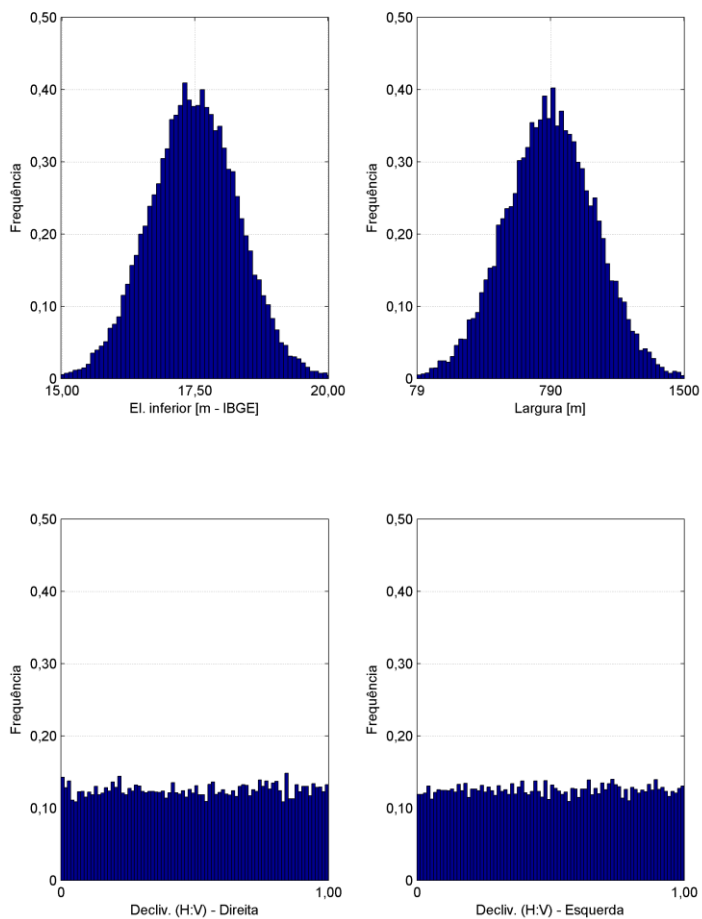


Figura 47 – Amostragem de parâmetros de formação de brecha com Monte Carlo para a Brecha 1.

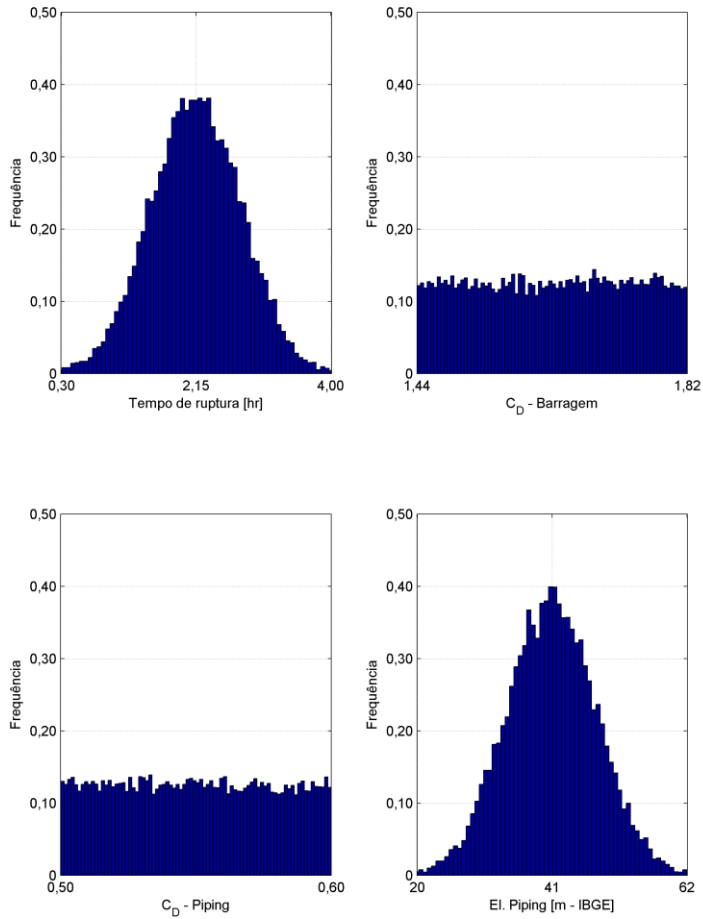


Figura 48 – Amostragem de parâmetros de formação de brecha com Monte Carlo para a Brecha 1.

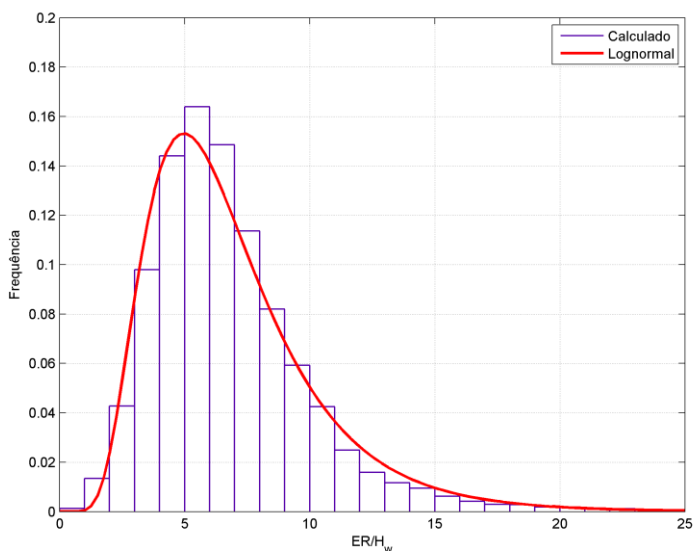


Figura 49 – Índice ER/H_w – Brecha 1.

Para cada amostragem de parâmetros de formação de brecha feita no MCBreach, o modelo HEC-RAS truncado é rodado para calcular a formação da brecha e calcular a vazão de pico de saída da brecha de ruptura. Tal rodada do modelo HEC-RAS truncado é realizada automaticamente através da comunicação entre o MCBreach e o HEC-RAS, através de uma DLL.

A fim de comparar os resultados do método probabilístico com o método determinístico, a brecha de ruptura do cenário Brecha 1 foi calculada para o pior caso e para um caso “normal”, conforme resumido na Tabela 14 e na Tabela 15, respectivamente. O determinismo está no fato do engenheiro empregar diretamente as equações e estimar a geometria da brecha de ruptura a sorte, sem ter noção do risco proporcionado pelo resultado obtido.

Tabela 14 – Parâmetros de formação da Brecha 1. Método determinístico.

Parâmetros	Valor	Equações/Recomendações
El. Inferior [m - IBGE]	15,00	Mínimo definido em planta
Largura [m]	1039	Froehlich (2008)
Decliv. (H:V) - Direita	1	USACE (2014)

Parâmetros	Valor	Equações/Recomendações
Decliv. (H:V) - Esquerda	1	USACE (2014)
Tempo de ruptura [hr]	0,90	Von Thun & Gillette (1990)
Cd - Barragem	1,82	USACE (2014)
Cd - Piping	0,60	USACE (2014)
El. Piping [m - IBGE]	21,00	Mínimo definido por planta

Tabela 15 – Parâmetros de formação da Brecha 1. Método determinístico.

Parâmetros	Valor	Equações/Recomendações
El. Inferior [m - IBGE]	15,00	Mínimo definido em planta
Largura [m]	177	USBR (1988)
Decliv. (H:V) - Direita	1	USACE (2014)
Decliv. (H:V) - Esquerda	1	USACE (2014)
Tempo de ruptura [hr]	1,90	USBR (1988)
Cd - Barragem	1,82	USACE (2014)
Cd - Piping	0,60	USACE (2014)
El. Piping [m - IBGE]	21,00	Mínimo definido em planta

O emprego das equações empíricas para a UHE Tucuruí pode gerar resultados estranhos ou incondizentes segundo recomendações de Von Thun & Gillette (1990). O emprego das equações de tempo de formação da brecha de Froehlich (1995) e Froehlich (2008) geram resultados improváveis, onde a brecha se formaria com mais de 10 horas. As equações de MacDonald & Langridge-Monopolis (1984), tanto para a determinação da largura média da brecha, quanto para o tempo de formação, não se mostraram adequadas.

O tamanho do reservatório da UHE Tucuruí é um fator que dificulta o uso direto das equações, e conforme discutido por Wahl (2004) e USACE (2014), as equações empíricas foram geradas através de métodos de regressão os quais não consideraram todas as ocorrências históricas de ruptura, concomitantemente. Além disso, segundo USACE (2014), os volumes de reservação das barragens dos rompimentos históricos não são da magnitude da UHE Tucuruí. Logo, o uso da metodologia probabilística vem corroborar com estudos de formação de

brecha para grandes barragens com grandes reservatórios, segundo USACE (2014), com volume de reservação maiores do que $600 \times 10^6 \text{ m}^3$.

5.2.2 Brecha 2

A Brecha 2 está localizada na margem direita, entre a barragem de terra e a estrutura do vertedor. A formação de piping é o fato iniciador mais provável de formação de uma brecha de ruptura. Tal ocorrência pode iniciar entre as junções entre a barragem de terra e de enrocamento e de enrocamento e a estrutura de concreto do vertedor.

As dimensões da brecha foram estimadas para o desenvolvimento da análise probabilística através da análise do projeto da barragem, dos registros de inspeção e empregando as equações empíricas e as recomendações de engenharia. O local da brecha foi escolhido na seção de maior altura, por onde passava o curso d'água antigo do rio Tocantins. A fundação neste trecho está apoiada sobre o embasamento rochoso.

A mesma discussão sobre a Brecha 1 aplica-se ao cenário da Brecha 2 em relação aos fatos e argumentos apresentados para a Brecha 1. No entanto, o que difere é que a barragem da Brecha 2 é uma estrutura de enrocamento.



Figura 50 – Ilustração em perspectiva do posicionamento da Brecha 2.

A Figura 51 ilustra o corte transversal da barragem de enrocamento da margem direita. A barragem está apoiada no embasamento rochoso, e há a presença de cortina de injeções para tratamento da fundação, bem como a presença de tapete de concreto para garantir a vedação do contato maciço e fundação.

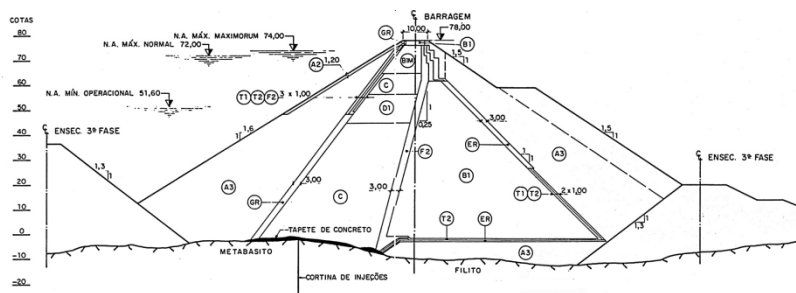


Figura 51 – Corte em perfil da Brecha 2. Adaptado: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.

Tabela 16 - Parâmetros de formação da Brecha 2.

Parâmetro	MP	Méd	D.P.	Mín.	Máx.
El. Inferior [m - IBGE]	N	2,50	0,83	0,00	5,00
Largura [m]	N	799	200	98	1300
Decliv. (H:V) - Direita	U			0,00	1,00
Decliv. (H:V) - Esquerda	U			0,00	1,00
Tempo de ruptura [hr]	N	2,15	0,62	0,30	4,00
Cd – Barragem	U			1,44	1,82
Cd – Piping	U			0,50	0,60
El. Piping [m - IBGE]	N	33,50	9,50	5,00	62,00

Para o cenário da Brecha 2, o emprego das equações empíricas para a UHE Tucuruí também gerou resultados estranhos ou incondizentes segundo recomendações de Von Thun & Gillette (1990) sobre o índice ER/H_w . O emprego das equações de tempo de formação da brecha de Froehlich (1995) e Froehlich (2008) geram resultados improváveis, onde a brecha se formaria com mais de 10 horas. As equações de MacDonald & Langridge-Monopolis (1984), tanto para a

determinação da largura média da brecha, quanto para o tempo de formação, não se mostraram adequadas.

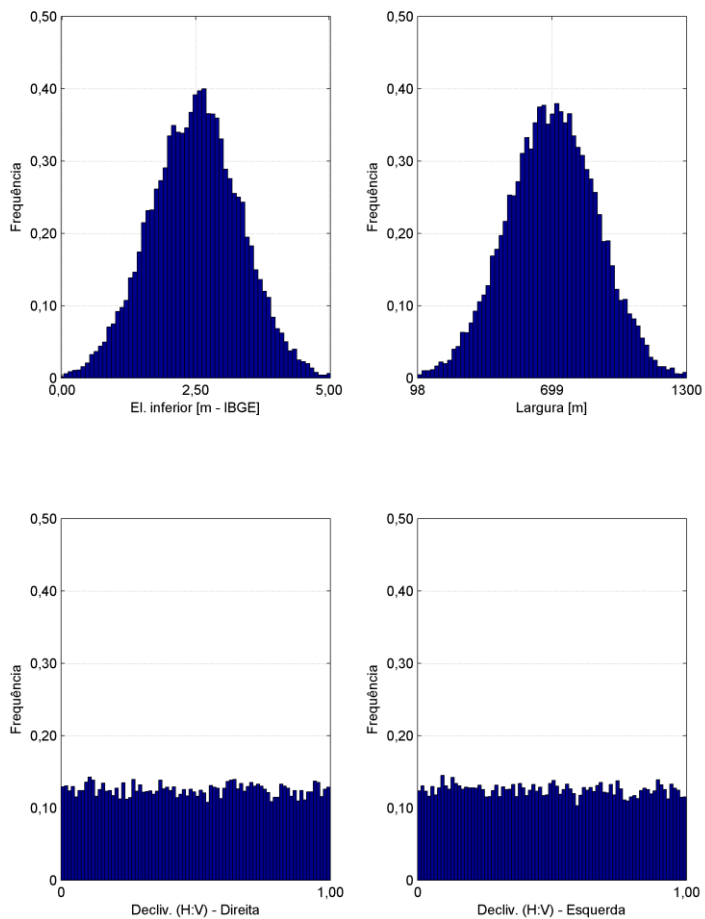


Figura 52 – Amostragem de parâmetros de formação de brecha com Monte Carlo para a Brecha 2.

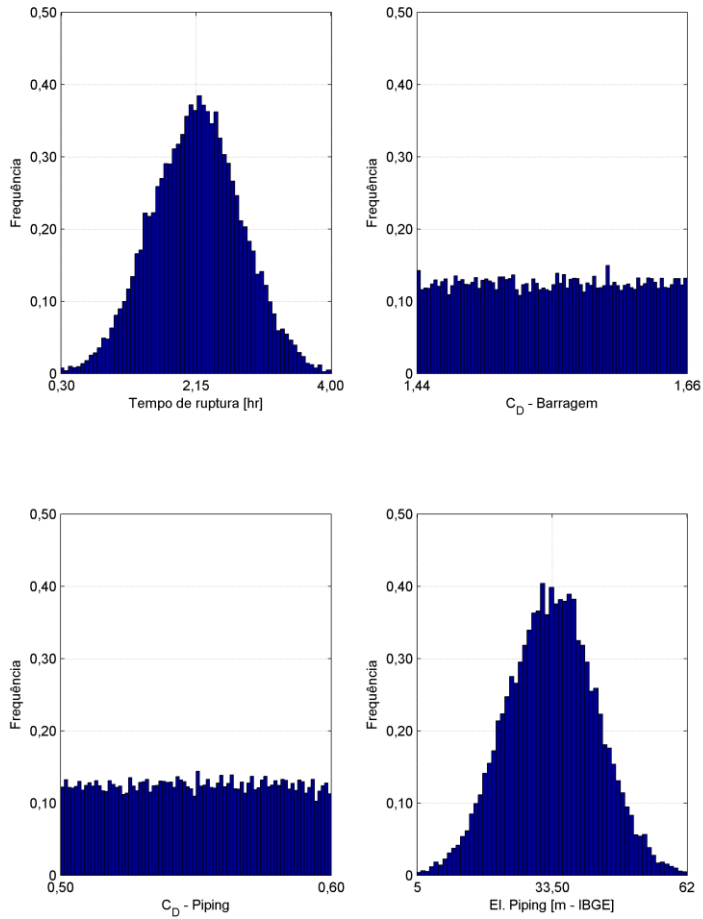


Figura 53 – Amostragem de parâmetros de formação de brecha com Monte Carlo para a Brecha 2.

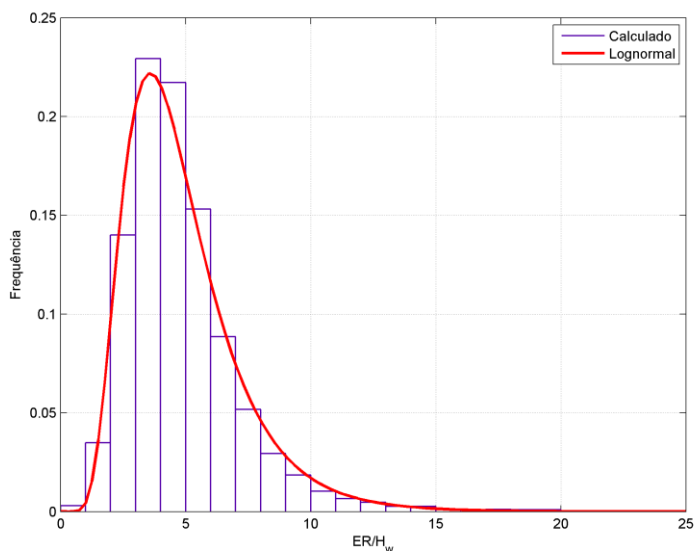


Figura 54 – Índice ER/H_w – Brecha 2.

A brecha de ruptura da Brecha 2 foi calculada para o pior caso e para um caso “normal”, conforme resumido na Tabela 17 e na Tabela 18, respectivamente.

Tabela 17 – Parâmetros de formação da Brecha 2. Método determinístico.

Parâmetros	Valor	Equações/Recomendações
El. Inferior [m - IBGE]	0,00	Mínimo definido em planta
Largura [m]	1085	USBR (1988)
Decliv. (H:V) - Direita	1	USACE (2014)
Decliv. (H:V) - Esquerda	1	USACE (2014)
Tempo de ruptura [hr]	0,80	USBR (1988)
Cd - Barragem	1,66	USACE (2014)
Cd - Piping	0,60	USACE (2014)
El. Piping [m - IBGE]	5,00	Mínimo definido em planta

Tabela 18 – Parâmetros de formação da Brecha 2. Método determinístico.

Parâmetros	Valor	Equações/Recomendações
El. Inferior [m - IBGE]	0,00	Mínimo definido em planta
Largura [m]	222	USBR (1988)
Decliv. (H:V) – Direita	1	USACE (2014)
Decliv. (H:V) – Esquerda	1	USACE (2014)
Tempo de ruptura [hr]	2,40	USBR (1988)
Cd – Barragem	1,66	USACE (2014)
Cd – Piping	0,60	USACE (2014)
El. Piping [m - IBGE]	5,00	Mínimo definido em planta

5.2.3 Brecha 3

A Brecha 3 está localizada na margem esquerda, entre a estrutura da casa de força 2 e a estrutura da eclusa. A formação de piping é o fato iniciador mais provável de formação de uma brecha de ruptura. Tal ocorrência pode iniciar entre os encontros das estruturas de concreto com a barragem de terra.

As dimensões da brecha foram estimadas para o desenvolvimento da análise probabilística através da análise do projeto da barragem, dos registros de inspeção e empregando as equações empíricas e as recomendações de engenharia. O local da brecha foi escolhido na seção de maior altura. A fundação neste trecho está apoiada sobre o embasamento rochoso.

A mesma discussão é apresentada para a Brecha 3 em relação aos fatos e argumentos apresentados para a Brecha 1 e Brecha 2. No entanto, o que difere é que a barragem da Brecha 3 é a barragem de terra da margem esquerda.

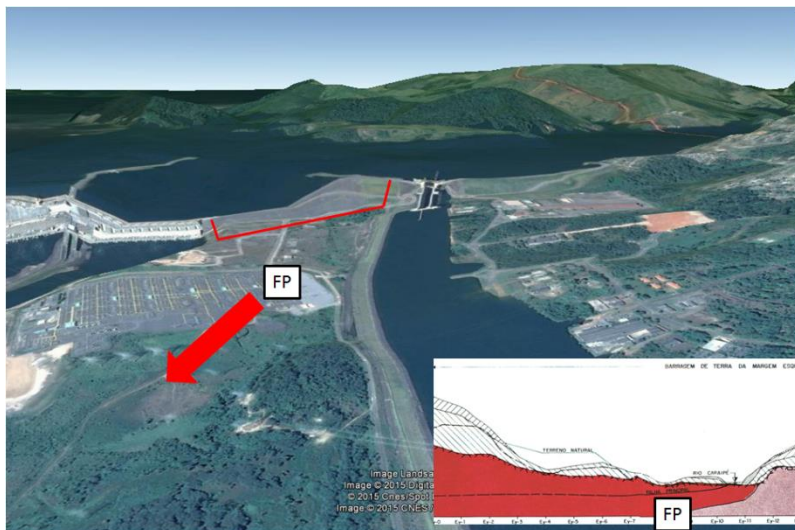


Figura 55 – Ilustração em perspectiva do posicionamento da Brecha 3.

A Figura 56 ilustra o corte transversal da barragem de terra da margem esquerda. A barragem está apoiada no embasamento rochoso não havendo, segundo o projeto executivo, a presença de cortina de injeções ou tapete de concreto no contato entre maciço e fundação.

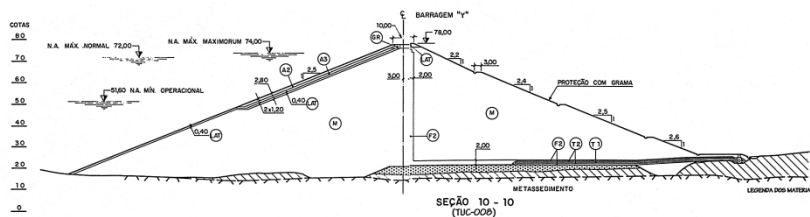


Figura 56 – Corte em perfil da Brecha 2. Adaptado: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.

Tabela 19 - Parâmetros de formação da Brecha 3.

Parâmetro	MP	Méd	D.P.	Mín.	Máx.
El. Inferior [m - IBGE]	N	27,50	0,83	25,00	30,00
Largura [m]	N	310	80	70	550
Decliv. (H:V) - Direita	U			0,00	1,00
Decliv. (H:V) - Esquerda	U			0,00	1,00

Parâmetro	MP	Méd	D.P.	Mín.	Máx.
Tempo de ruptura [hr]	N	2,15	0,62	0,30	4,00
Cd – Barragem	U			1,44	1,82
Cd – Piping	U			0,50	0,60
El. Piping [m - IBGE]	N	46,00	5,33	30,00	62,00

Igualmente para o cenário da Brecha 3, em relação ao cenário Brecha 1 e Brecha 2, o emprego das equações empíricas geraram resultados estranhos ou incondizentes segundo recomendações de Von Thun & Gillette (1990) sobre o índice ER/H_w .

A análise do projeto foi fundamental para a estimação dos parâmetros geométricos da brecha da barragem da margem esquerda. O cenário da Brecha 3 foi determinado, pois a barragem da margem esquerda foi construída na segunda fase, e seu projeto não apresenta os mesmos elementos estruturais verificados na barragem da margem direita.

A formação da brecha da margem esquerda possui uma geometria menor, no entanto, é tão provável sua ocorrência, quanto a ocorrência de formação da brecha de ruptura na barragem da margem direita.

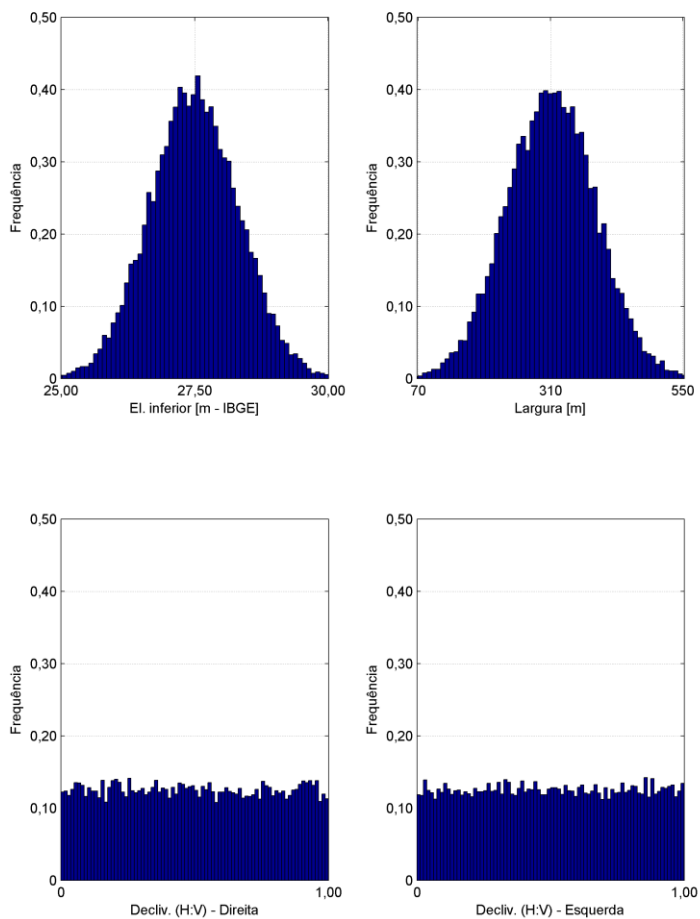


Figura 57 – Amostragem de parâmetros de formação de brecha com Monte Carlo para a Brecha 3.

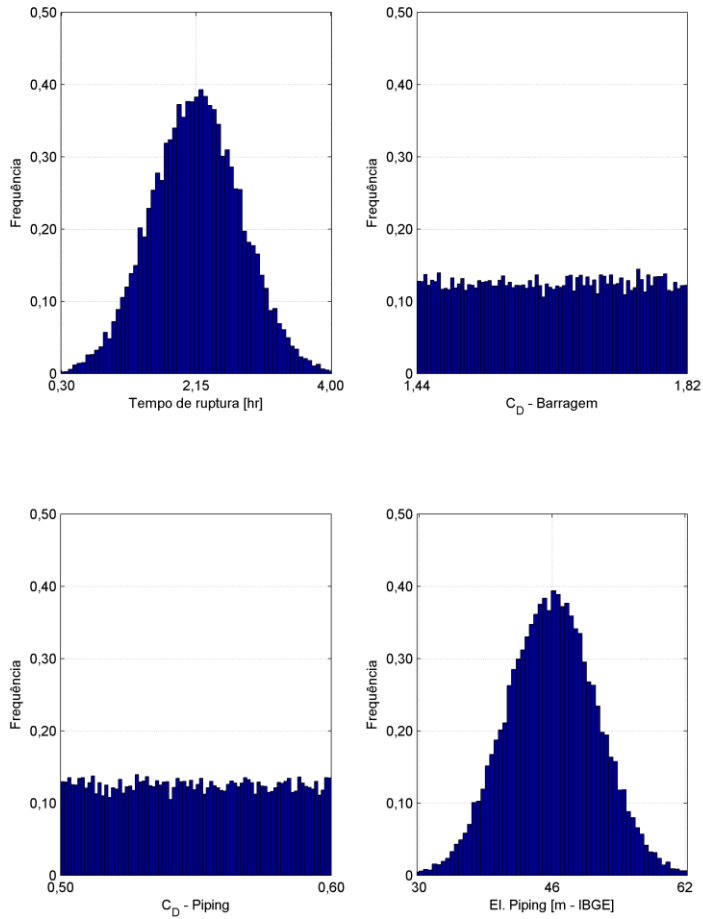


Figura 58 – Amostragem de parâmetros de formação de brecha com Monte Carlo para a Brecha 3.

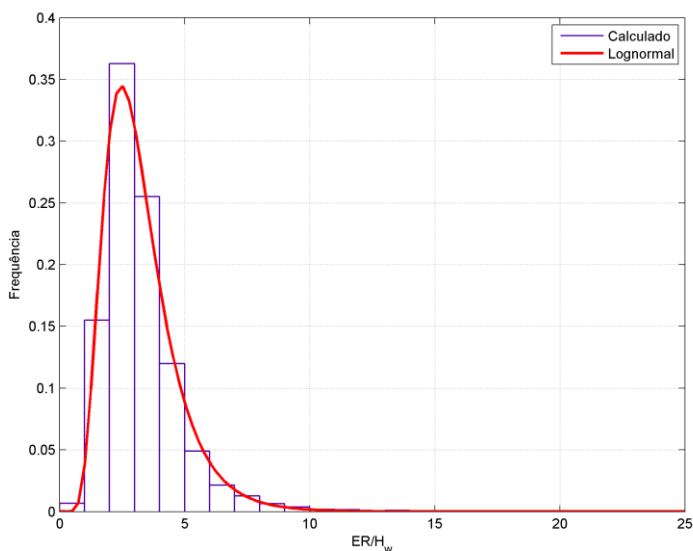


Figura 59 – Índice ER/H_w – Brecha 3.

A brecha de ruptura da Brecha 3 foi calculada para o pior caso e para um caso “normal”, conforme resumido na Tabela 20 e na Tabela 21, respectivamente.

Tabela 20 – Parâmetros de formação da Brecha 3. Método determinístico.

Parâmetros	Valor	Equações/Recomendações
El. Inferior [m - IBGE]	25,00	Mínimo definido em planta
Largura [m]	800	USBR (1988)
Decliv. (H:V) – Direita	1	USACE (2014)
Decliv. (H:V) – Esquerda	1	USACE (2014)
Tempo de ruptura [hr]	0,90	USBR (1988)
Cd – Barragem	1,82	USACE (2014)
Cd – Piping	0,60	USACE (2014)
El. Piping [m - IBGE]	30,00	Mínimo definido em planta

Tabela 21 – Parâmetros de formação da Brecha 3. Método determinístico.

Parâmetros	Valor	Equações/Recomendações
El. Inferior [m - IBGE]	25,00	Mínimo definido em planta
Largura [m]	147	USBR (1988)
Decliv. (H:V) – Direita	1	USACE (2014)
Decliv. (H:V) – Esquerda	1	USACE (2014)
Tempo de ruptura [hr]	1,60	USBR (1988)
Cd – Barragem	1,82	USACE (2014)
Cd – Piping	0,60	USACE (2014)
El. Piping [m - IBGE]	30,00	Mínimo definido em planta

5.3 MODELO HEC-RAS TRUNCADO

Os resultados do modelo HEC-RAS truncado foram obtidos através do controle externo do MCBreach. O tamanho das amostragens, para cada cenário de brecha, foi de 20000 elementos para cada parâmetro de formação de brecha. O conjunto de 20000 rodadas garantiu a convergência estatística das amostras dos conjuntos de formação de brecha.

Segundo Goodell (2012) a convergência estatística é verificada reamostrando os conjuntos de parâmetros, a fim de comparar as médias obtidas para a vazão de pico. Variações menores do que 1% da média em relação à faixa de variação das vazões entre mínimo e máximo amostrado, garantem a convergência estatística do método probabilístico. Para o presente trabalho, a convergência estatística foi garantida para uma variação menor do que 1% para todos os cenários de brecha de ruptura, considerando cenário Brecha 1, Brecha 2 e Brecha 3.

O tempo de simulação para cada rodada do MCBreach e do modelo HEC-RAS truncado foi de aproximadamente 11 horas, demandando de uma noite para cada cenário de brecha. Com as rodadas probabilísticas realizadas, dois cenários determinísticos foram definidos, a fim de estabelecer um mínimo e um máximo para a abordagem determinística, segundo o emprego das equações empíricas de USBR (1988), Von Thun & Gillette (1990) e Froehlich (2008), além das recomendações de USACE (2014).

A largura média da brecha para o cenário determinístico máximo foi calculada pela equação de Froehlich (2008) e para o cenário normal/mínimo pela equação de USBR (1988). As equações de USBR

(1988) e Von Thun & Gillette (1990) geraram resultados semelhantes para a UHE Tucuruí para o tempo de formação da brecha.

A Figura 60 ilustra os hidrogramas de saída das brechas calculadas para cada cenário: Brecha 1, Brecha 2 e Brecha 3. Estão representados os resultados da metodologia probabilística e da metodologia determinística, para mínimo e máximo, conforme legenda dos gráficos. Os hidrogramas extraídos do processo de amostragem de Monte Carlo estão associados a probabilidades de não excedência de 1%, 10%, 50%, 90% e 99%. Tais probabilidades podem ser chamadas de risco, o qual estará associado ao risco da cota de inundação gerada pela propagação hidráulica do hidrograma.

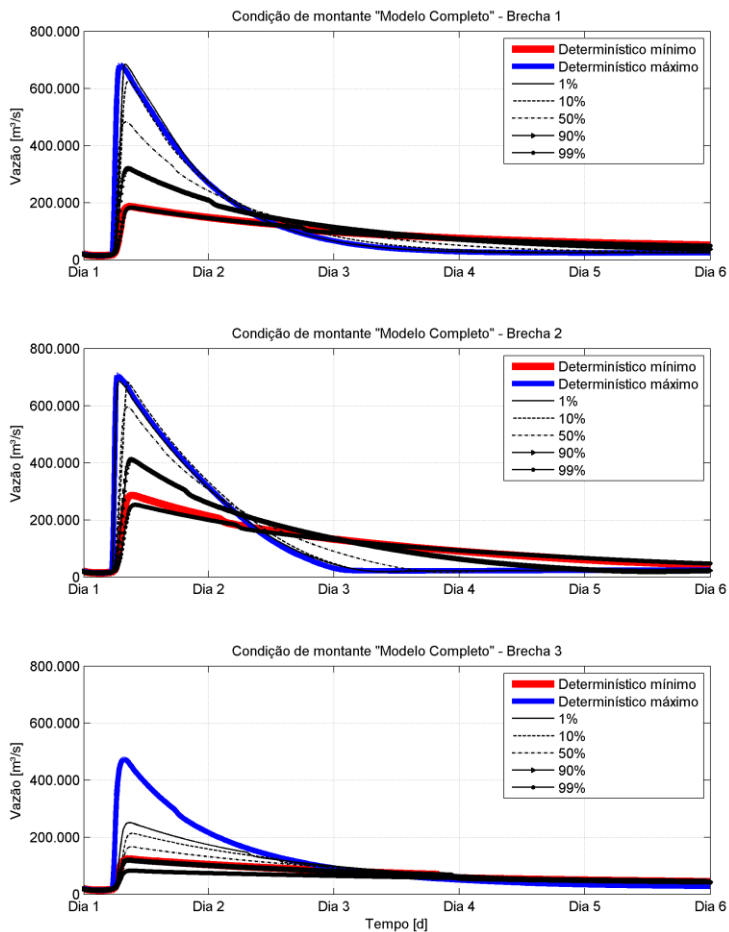


Figura 60 – Hidrogramas de saída para o método determinístico e para o método probabilístico.

O emprego da metodologia probabilística possibilita o cálculo de brechas associadas a probabilidades de não excedência, o que não é possível empregando a metodologia determinística, a qual é baseada estritamente no uso de equações empíricas e algumas recomendações práticas.

Na Tabela 22 estão resumidos numericamente os resultados apresentados graficamente para as vazões de pico. Em relação à metodologia probabilística estão apresentados os limites mínimo e máximo, bem como o desvio-padrão, das vazões de pico calculadas pelo processo de amostragem probabilística da ferramenta MCBreach.

Tabela 22 – Resumo dos hidrogramas de saída.

Q_p [m³/s]	Brecha 1	Brecha 2	Brecha 3
1%	773.108	854.954	257.481
5%	708.292	792.091	232.773
10%	664.153	761.482	217.799
50%	500.785	625.386	169.738
90%	327.661	420.849	121.273
95%	277.645	362.217	108.017
99%	186.761	257.105	84.064
Máximo	899.546	997.075	300.416
Mínimo	77.952	117.943	50.602
Média	497.657	606.932	169.625
Desvio-padrão	129.333	133.939	37.481
Análise determinística – Emprego de Froehlich (2008), USBR (1988), Von Thun & Gillette (1990) e recomendações USACE (2014)			
Determinístico (Max)	797.757	993.024	492.754
Determinístico (Min)	189.989	293.078	125.740

Sabendo qual a probabilidade de não excedência da brecha em questão, é possível calcular o risco da cota de inundação ao longo de todo o vale à jusante. O empreendedor, bem como terceiros, tem como calcular e planejar com maior precisão investimentos em infraestrutura, como ampliação da capacidade de vertimento da barragem, sistemas de comunicação específicos às áreas com maior probabilidade de serem atingidas pela onda de cheia induzida da ruptura da barragem.

Goodell (2013) coloca que o cálculo de cenários através da metodologia determinística não tem uma probabilidade de ocorrência associados, logo, isso dificulta a tomada de decisão e dificulta o planejamento sobre investimentos em ações preventivas e emergenciais. Com o uso da metodologia determinística, o engenheiro ou a equipe técnica acabam por escolher o “pior” cenário, achando que tal decisão está a favor da segurança. No entanto, o pior cenário pode incorrer no fechamento de importantes vias de acesso, as quais podem não ser atingidas, bem como pode dificultar e encarecer ações emergenciais na Zona de Autossalvamento (ZAS).

O pior caso determinístico, conforme já mostrado por Goodell (2012), Goodell & Froehlich (2012) e Goodell (2013), apresenta maior magnitude do que o cenário de menor probabilidade de ocorrência de ruptura, para a probabilidade de não excedência de 1%. Para os três cenários de brecha avaliados para a UHE Tucuruí, o mesmo resultado foi encontrado, sendo que para o cenário da Brecha 3, o máximo determinístico ficou consideravelmente superior à probabilidade de não excedência de 1%.

Os hidrogramas gerados com a aplicação do modelo HEC-RAS truncado, para as brechas especificadas para cada cenário, foram propagadas com o modelo HEC-RAS completo, a fim de avaliar a extensão da área atingida e as diferenças espaciais entre cada metodologia, determinística e probabilística, respectivamente.

5.4 MODELO HEC-RAS COMPLETO

É evidente a importância de saber a probabilidade de ocorrência de cotas de inundação induzidas por uma cheia de ruptura de barragens, a fim inclusive de melhor zonear áreas críticas. O cálculo das probabilidades torna a análise de risco, sobre as áreas atingidas pela onda de ruptura, mais robusta e pode agregar elementos econômicos, visto que através da metodologia probabilística um economista e um grupo gestor podem aferir custos e graus de importância de investimentos ao longo de toda a área atingida, baseado no conhecimento do risco de determinada cota de inundação ocorrer no tempo e no espaço.

Até o momento, o conhecimento existente agregado pelos estudos de ruptura de barragens simplesmente expõem o fato de a área atingida estar “dentro” ou “fora” da mancha de inundação. Com tal informação é difícil determinar o que é mais importante, ou qual estrutura ou comunidade deve receber maior investimento e assistência,

pois não é possível associar o risco à cota de inundação. Questões pairam nessa discussão “quanto custaria a efetivação do PAE?”, “por onde começar?”, “medidas estruturais seriam realmente necessárias na barragem?”, entre outros questionamentos.

Os resultados das manchas, apresentados nos próximos subtópicos, indicam que a escolha do pior caso de brecha apresenta probabilidade de não excedência menor do que 1%, o que torna o pior caso bastante conservador. Goodell (2013) já apresentou tais resultados para barragens com reservatórios de pequeno e médio porte. Para a UHE Tucuruí, com um reservatório maior do que a faixa de aplicação das equações empíricas de formação de brecha, o mesmo padrão de resultados foi observado. Isto é um indicativo de robustez do método probabilístico.

Outro fato importante nos resultados do estudo de formação de brecha para a UHE Tucuruí foi o fato de as três principais estruturas de aterramento apresentar respostas hidráulicas distintas para cada probabilidade de não excedência, bem como para o cenário determinístico máximo. Para o caso da UHE Tucuruí, o desenvolvimento da APMR mostrou-se de relevante importância, principalmente com a definição de critérios de formação da brecha embasados nas análises do projeto da barragem e dos registros de inspeção.

Nos próximos subtópicos estão ilustrados os resultados das propagações das ondas de cheia para cada um dos cenários de brecha. Pontos de controle foram escolhidos, ao longo do vale à jusante da UHE Tucuruí, para discutir e ilustrar objetivamente a contribuição de empregar o método probabilístico em relação ao método determinístico no cálculo da brecha de ruptura, além de avaliar o grau de atenuação da onda de cheia ao longo do vale à jusante.

Para cada cenário de brecha, os pontos A, B, C e D ilustram, nos mapas temáticos, os resultados espacializados para cada uma das metodologias, determinística e probabilística, respectivamente.

5.4.1 Brecha 1

Ao longo de 92 km do vale à jusante a onda de cheia atenua cerca de 70% da vazão de pico da onda de saída, no entanto, a energia específica se preserva com maior permanência. De Tucuruí até São Joaquim do Itaquara, a perda de carga da onda é da ordem de 10 metros ou 21% da onda de saída, segundo o modelo hidráulico conceitual desenvolvido.

Na Tabela 23 estão resumidos os valores de vazão de pico para o cenário Brecha 1 nas localidades de Tucuruí, Moru, Nova Jutáí e São Joaquim do Itaquara.

Tabela 23 – Vazões de pico ao longo do vale à jusante.

Probabilidade	Tucuruí	Moru	Nova Jutáí	São Joaquim do Itaquara
1%	682.436	563.171	522.135	138.094
10%	625.802	519.661	483.349	129.294
50%	481.386	402.090	373.474	117.703
90%	317.149	270.079	251.541	101.398
99%	183.113	158.647	151.711	79.560
Determinístico	679.604	559.847	520.208	137.465

Para o cenário Brecha 1, o cenário determinístico do pior caso apresenta uma resposta hidráulica semelhante para a probabilidade de excedência de 1%. Conforme discussões apresentadas por Goodell (2012) e Goodell (2013) tal resultado é esperado, ainda sendo possível que o pior caso do método determinístico esteja associado a uma probabilidade de excedência ainda menor. Observa-se uma importante atenuação da onda de cheia ao longo do vale à jusante entre a cidade de Tucuruí e a cidade de São Joaquim do Itaquara, no estado do Pará.

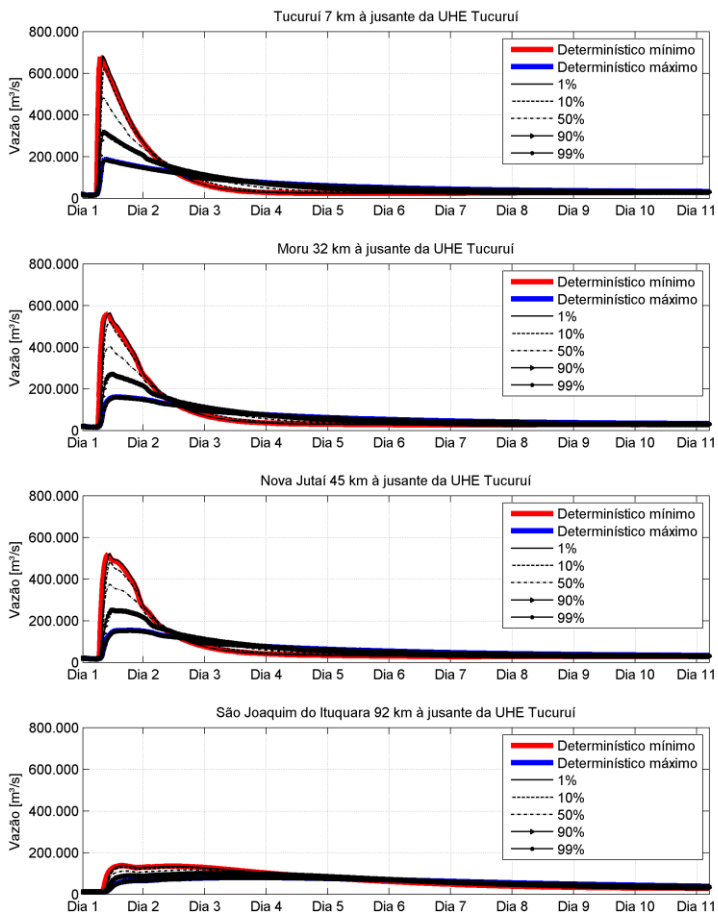


Figura 61 – Propagação dos hidrogramas de ruptura da Brecha 1.

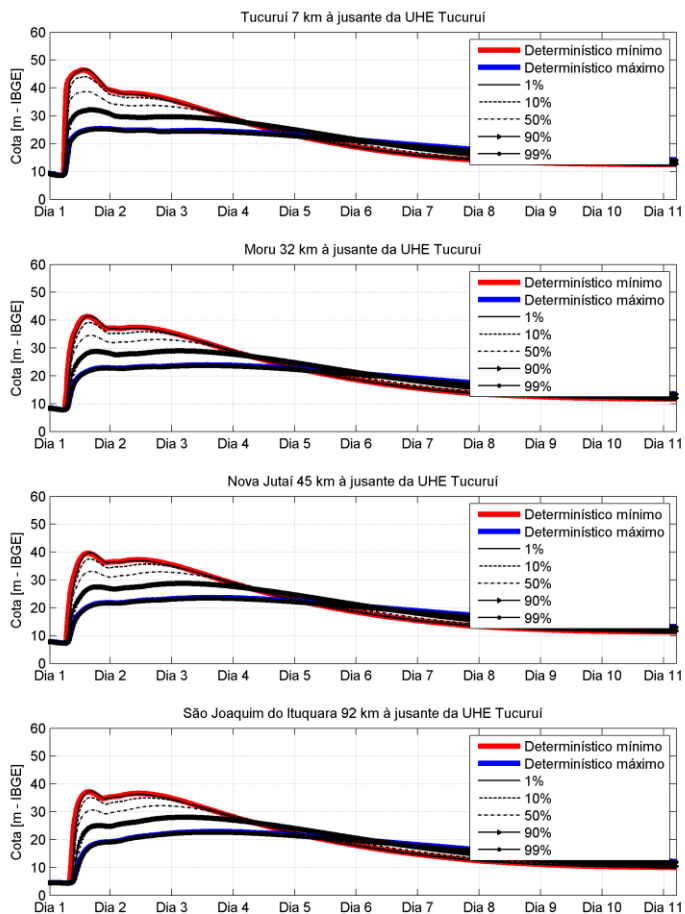


Figura 62 – Variação de cota em função da propagação dos hidrograma da Brecha 1.

A mancha de inundação é avaliada em quatro pontos de interesse A e B em Moru, e C e D em Nova Jutai. Nestes pontos verifica-se como interpretar a metodologia probabilística em relação aos resultados das manchas de inundação. As manchas gerais e em detalhes estão ilustradas na Figura 63, Figura 64, Figura 65 e Figura 66.

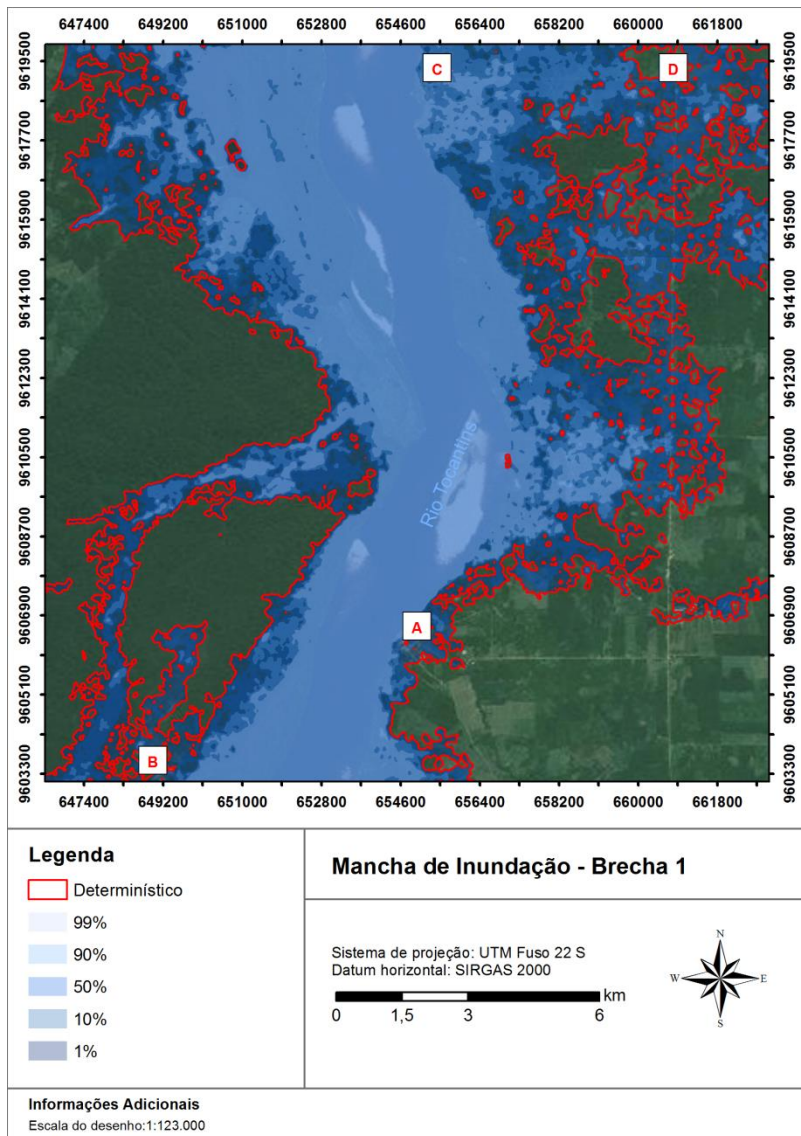


Figura 63 – Localização dos pontos de controle para análise espacial dos resultados do método probabilístico em relação ao método determinístico.

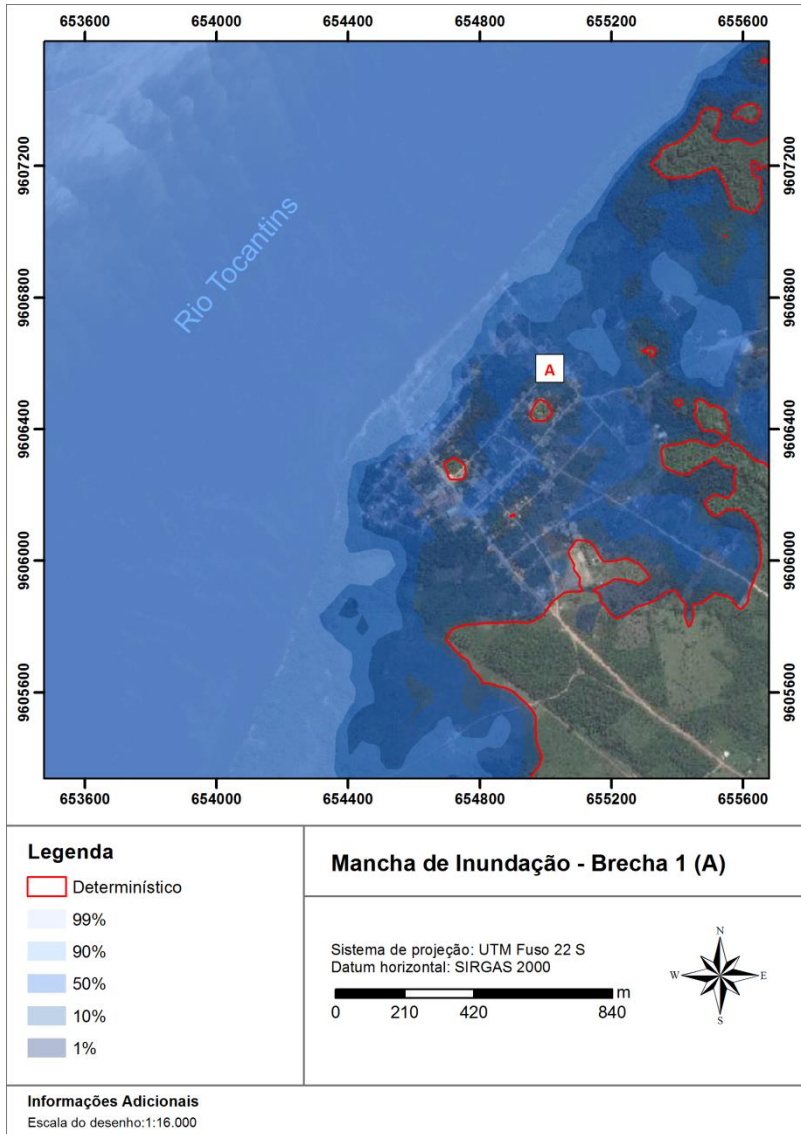


Figura 64 – Ponto de controle A.

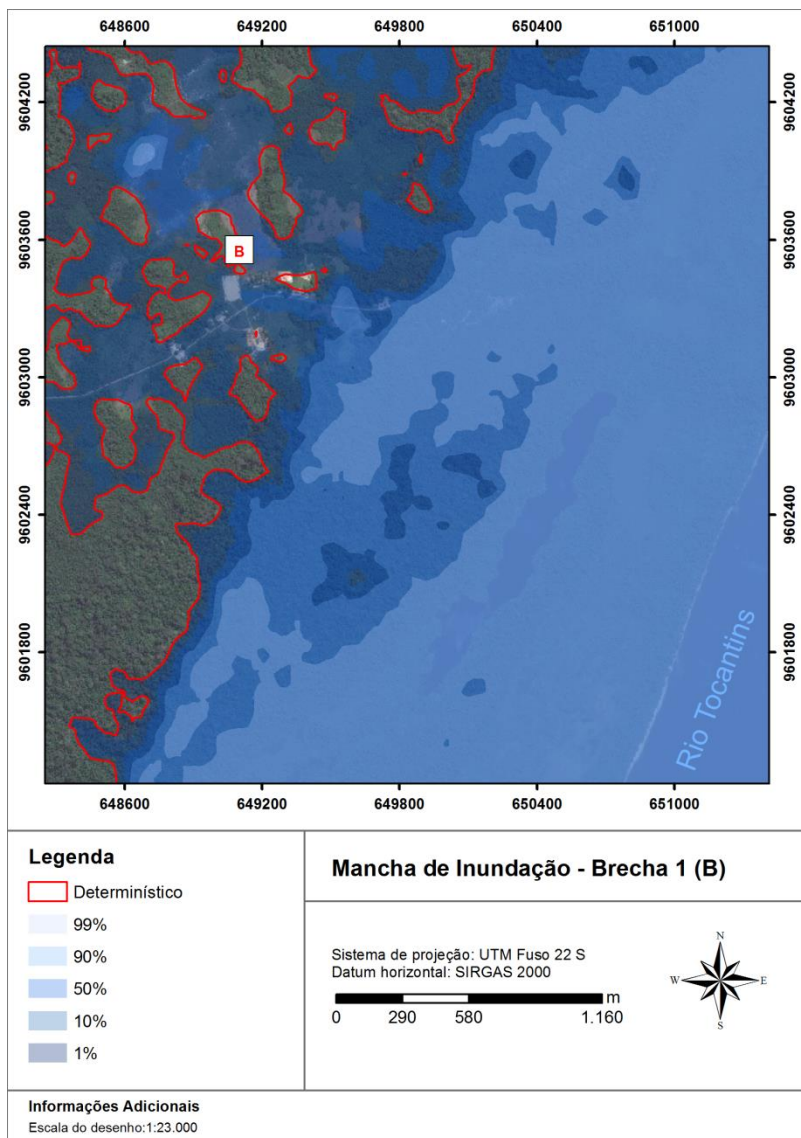


Figura 65 – Ponto de controle B.

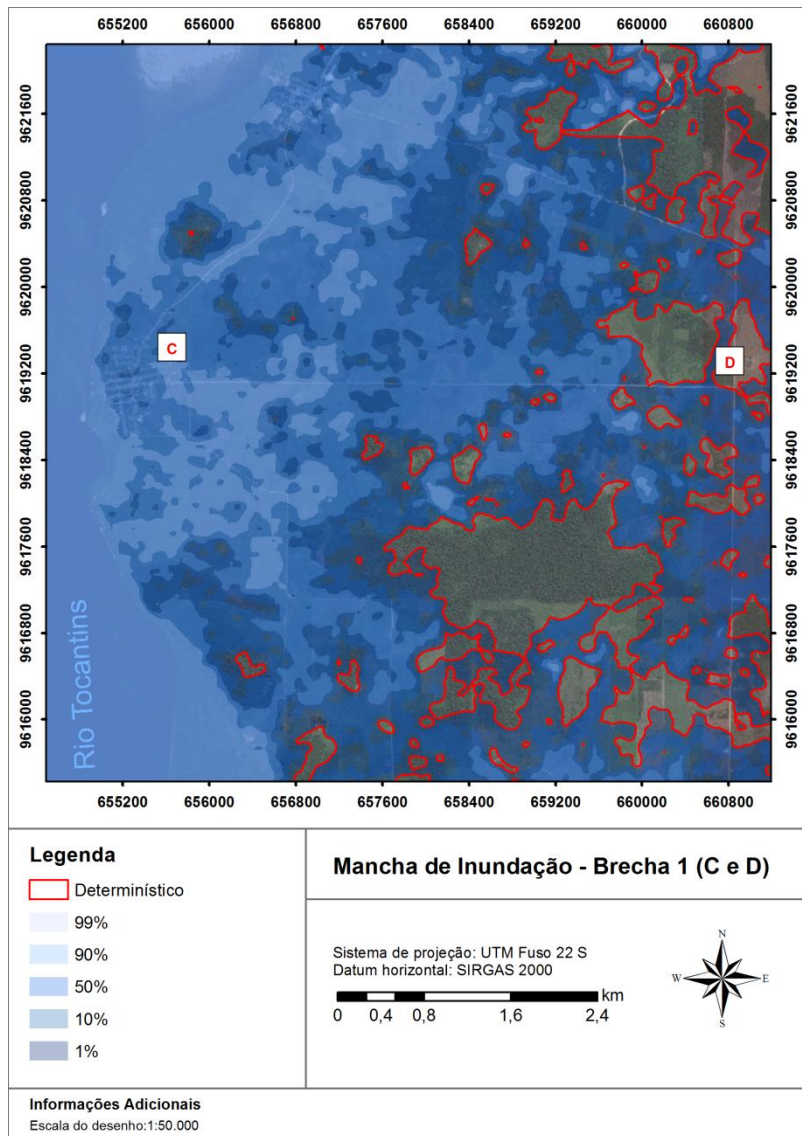


Figura 66 – Ponto de controle C e D.

Se for analisada a probabilidade de ocorrência de inundação no ponto C e no ponto D, percebe-se que a probabilidade de ocorrência de inundação no ponto C é de 99% e no ponto D é de 1%. Logo, o

investimento em ações emergenciais deveria ser maior no ponto C. No entanto, o emprego da metodologia determinística coloca os dois pontos na mesma zona de ocorrência, o que pode gerar interpretações equivocadas sobre o risco que o ponto C e D estariam expostos durante um evento de ruptura.

A mesma análise pode ser empregada para os pontos A e B, onde se verifica que o cenário determinístico mais conservador abrange todos os pontos, no entanto, não associa uma probabilidade de ocorrência daquela mancha de inundação. O ponto A, que pode englobar Moru, tem toda a comunidade atingida pela onda de cheia no caso da metodologia determinística, sem poder associar uma probabilidade de ocorrência de tal dano. Já empregando a metodologia probabilística, a comunidade de Moru, para níveis de probabilidade de ocorrência, consegue se planejar para ações de emergência de 1% até 99% de chances de ocorrência.

Tais resultados da metodologia probabilística podem ser efetivamente empregados em análise de risco na confecção de Planos de Ação Emergencial. Resultados para o cenário Brecha 2 e cenário Brecha 3 são semelhantes, seguindo o mesmo padrão, no entanto, abrangendo uma área atingida diferente.

5.4.2 Brecha 2

Ao longo de 92 km do vale à jusante a onda de cheia atenua cerca de 70% da vazão de pico da onda de saída de Tucuruí até São Joaquim do Itaquara.

Os resultados do cenário Brecha 1 e do cenário Brecha 2 são semelhantes, mas as barragens são estruturas distintas de terra homogênea e enrocamento, respectivamente. As condições geométricas das brechas para a barragem de terra e para a barragem de enrocamento diferente na largura média e na altura. A brecha do cenário Brecha 2 é potencialmente menos larga, no entanto é mais alta do que a brecha do cenário Brecha 1.

Tais diferenças geométricas entre as brechas de cada cenário determinam o formato do hidrograma de saída da ruptura, o qual interage de maneira não linear hidrodinamicamente ao longo do vale à jusante.

Na Tabela 24 estão resumidos os valores de vazão de pico para o cenário Brecha 2 nas localidades de Tucuruí, Moru, Nova Jutá e São Joaquim do Itaquara.

Tabela 24 – Vazões de pico ao longo do vale à jusante.

Probabilidade	Tucuruí	Moru	Nova Jutai	São Joaquim do Itaquara
1%	682.426	564.650	522.331	144.114
10%	682.245	566.895	524.594	144.807
50%	594.654	501.031	463.305	137.806
90%	410.594	352.077	326.076	122.357
99%	253.061	220.911	209.708	100.908
Determinístico	705.090	577.329	536.245	146.022

Para o cenário Brecha 2, o cenário determinístico do pior caso apresenta uma resposta hidráulica semelhante para a probabilidade de excedência de 1%. Devida à atenuação da onda de cheia ao longo do vale à jusante, a onda do método determinístico se aproxima da onda de probabilidade de excedência de 1%.

A ruptura do cenário Brecha 2 é a mais catastrófica em relação aos demais cenários. Neste cenário de ruptura, as probabilidades de excedência de 1% e 10% se aproximam em magnitude de vazão de pico com a propagação ao longo do vale à jusante.

Através da análise estatística ranquearam-se de forma crescente os hidrogramas de saída, no entanto, as interações não lineares determinadas pelas simulações hidrodinâmicas com o modelo HEC-RAS completo condicionam deformações na onda de cheia, as quais por sua vez não são idênticas entre si.

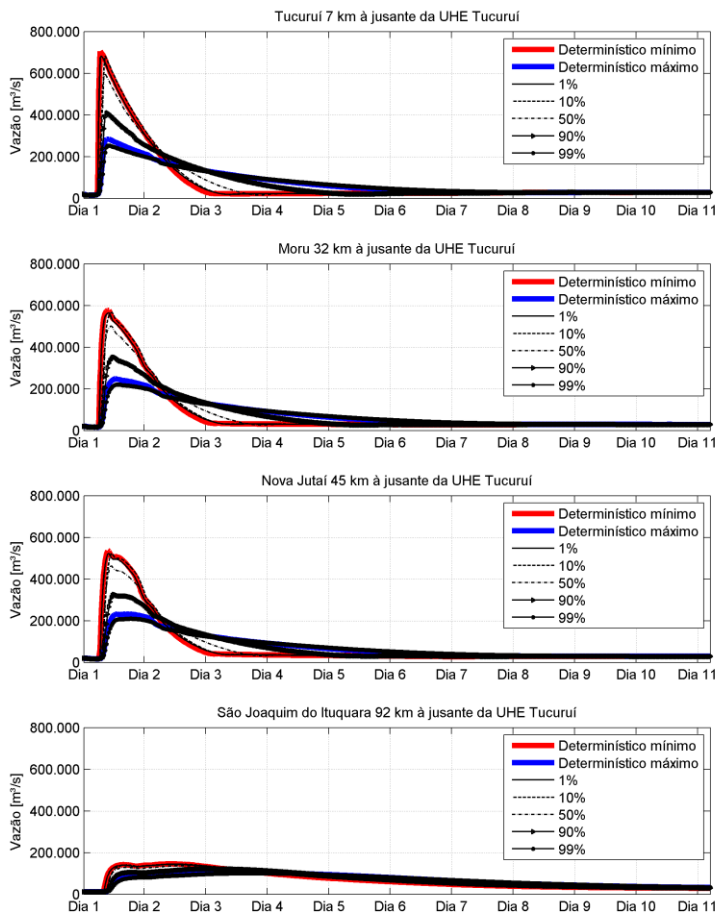


Figura 67 – Propagação dos hidrogramas de ruptura da Brecha 2.

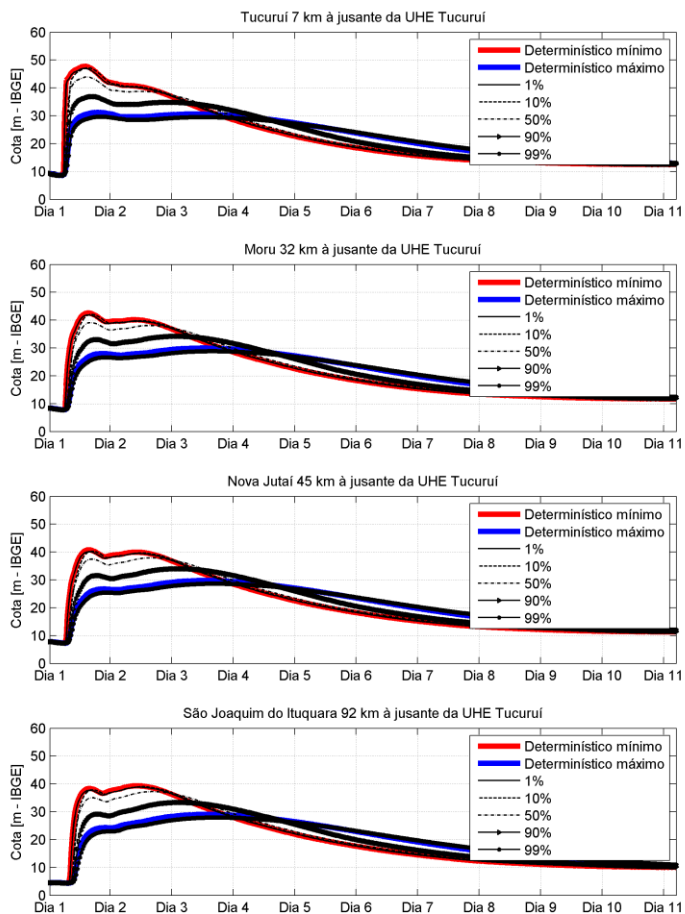


Figura 68 – Variação de cota em função da propagação dos hidrograma da Brecha 2.

A mancha de inundação é avaliada em quatro pontos de interesse A e B em Moru, e C e D em Nova Jutai. As manchas gerais e em detalhes estão ilustradas na Figura 69, Figura 70, Figura 71 e Figura 72.

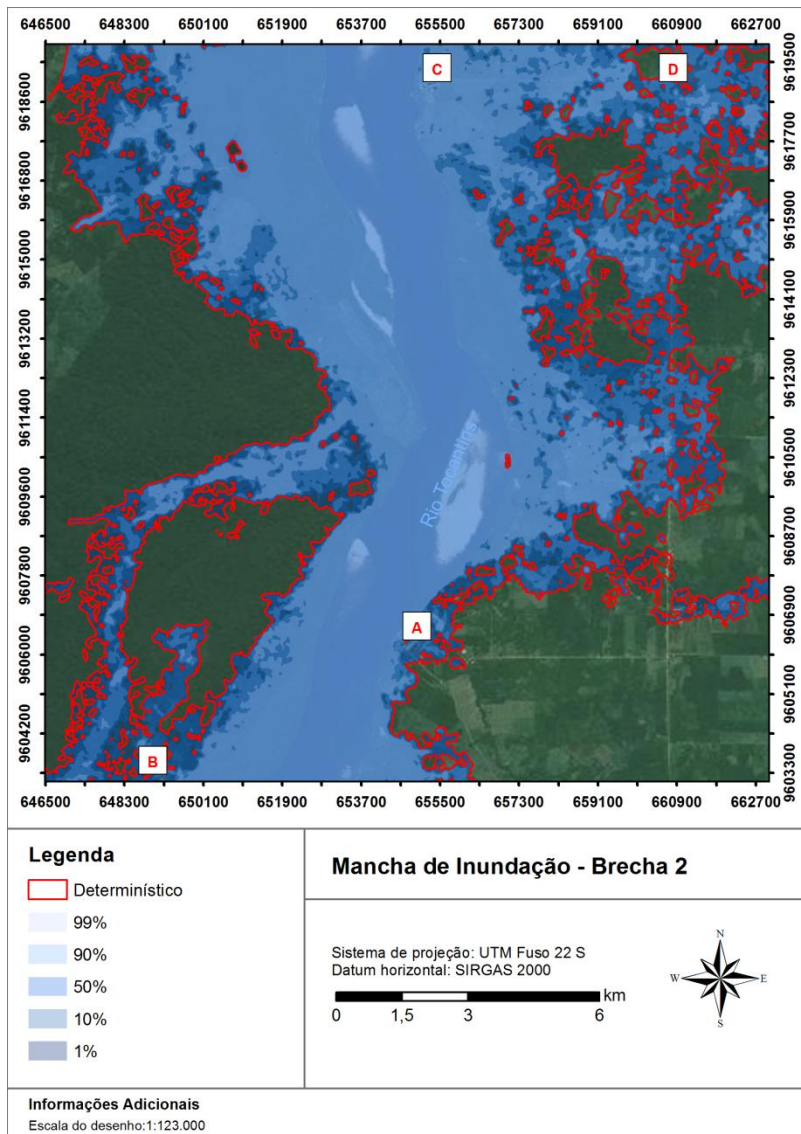


Figura 69 – Localização dos pontos de controle para análise espacial dos resultados do método probabilístico em relação ao método determinístico.

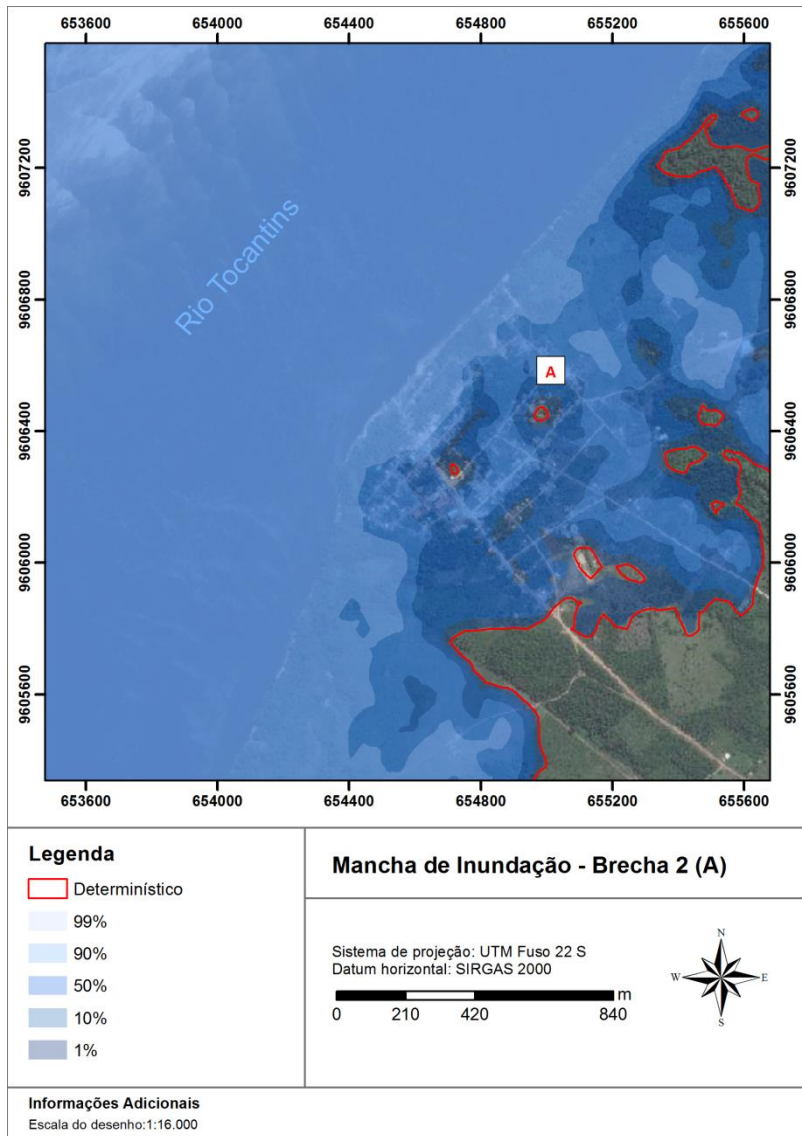


Figura 70 – Ponto de controle A.

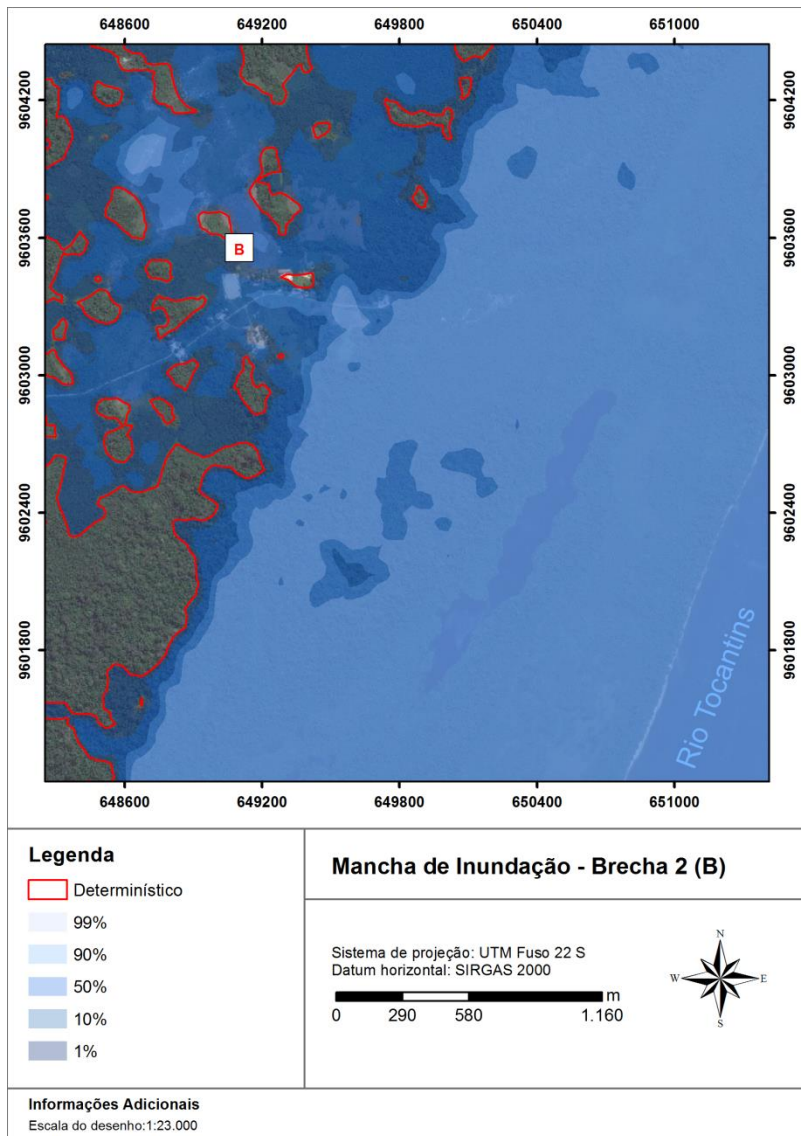


Figura 71 – Ponto de controle B.

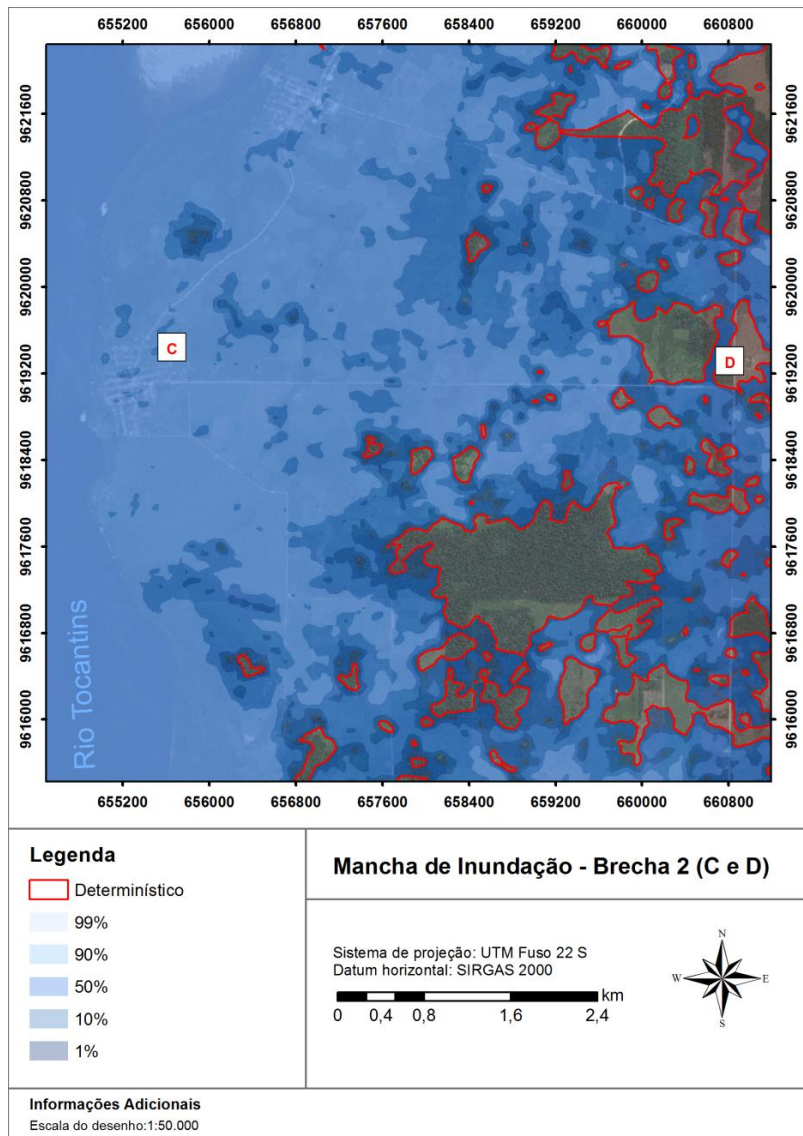


Figura 72 – Ponto de controle C e D.

Analisando o pico de vazão, o cenário Brecha 1 e cenário Brecha 2 são semelhantes, no entanto, a vazão de pico relacionada à probabilidade de ocorrência de 50% no ponto C e no ponto D é superior, comparando o cenário Brecha 1 e Brecha 2. Tal análise é importante,

pois os cenários Brecha 1 e Brecha 2 apresentam resultados determinísticos semelhantes, no entanto, as probabilidades de ocorrência mostraram-se diferentes devido a diferenças nos limites geométricos de largura e altura de cada uma das brechas. Partindo do princípio da metodologia determinística, os cenários Brecha 1 e Brecha 2 poderiam até ser considerados como um só, mas o emprego da metodologia probabilística indica que os dois cenários devem ser avaliados independentemente. Fica evidente que o emprego da metodologia probabilística torna o desenvolvimento da APMR mais importante e abrangente para o estudo de ruptura e para análise de risco do vale à jusante.

A mesma análise pode ser empregada para os pontos A e B, onde se verifica que o cenário determinístico mais conservador abrange todos os pontos, no entanto, não associa uma probabilidade de ocorrência daquela mancha de inundação.

5.4.3 Brecha 3

Ao longo de 92 km do vale à jusante a onda de cheia atenua certa de 80% da vazão de pico da onda de saída, no entanto, a energia específica ainda se preserva com mais permanência. De Tucuruí até São Joaquim do Itaquara.

O cenário Brecha 3 apresenta uma vazão de pico menor em relação aos cenários anteriores, pois a brecha de ruptura apresenta restrições nos controles geométricos devido ao fato do trecho da barragem da margem esquerda estar confinado entre duas estruturas de concreto, casa de força 2 e eclusa.

Neste cenário observou-se maior diferença entre a mancha do método determinístico e a mancha de probabilidade de excedência de 1%. Para o cenário Brecha 3, conforme para o cenário Brecha 1 e Brecha 2, as probabilidades de 1% e 10% se aproximaram na magnitude da vazão de pico ao longo da propagação da onda.

Na Tabela 25 estão resumidos os valores de vazão de pico para o cenário Brecha 2 nas localidades de Tucuruí, Moru, Nova Jutá e São Joaquim do Itaquara.

Tabela 25 – Vazões de pico ao longo do vale à jusante.

Probabilidade	Tucuruí	Moru	Nova Jutá	São Joaquim do Itaquara
1%	251.026	213.552	199.948	87.464

Probabilidade	Tucuruí	Moru	Nova Jutai	São Joaquim do Itaquara
10%	213.402	183.033	172.100	82.065
50%	166.331	142.463	137.014	73.186
90%	119.755	104.478	101.976	64.633
99%	83.142	74.309	73.352	53.685
Determinístico	470.060	388.575	363.200	110.236

Para o cenário Brecha 3, o cenário determinístico do pior caso apresenta uma resposta hidráulica mais catastrófica em relação à probabilidade de excedência de 1%. Mesmo ocorrendo a atenuação da onda de cheia ao longo do vale à jusante, a onda do método determinístico persiste com maior magnitude em relação à probabilidade de excedência de 1%.

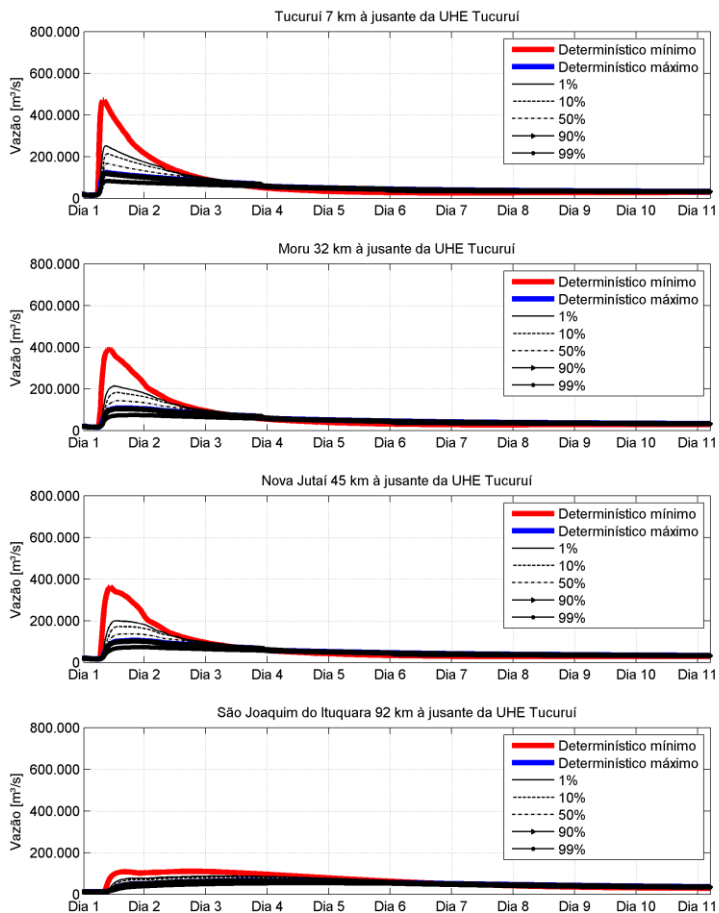


Figura 73 – Propagação dos hidrogramas de ruptura da Brecha 3.

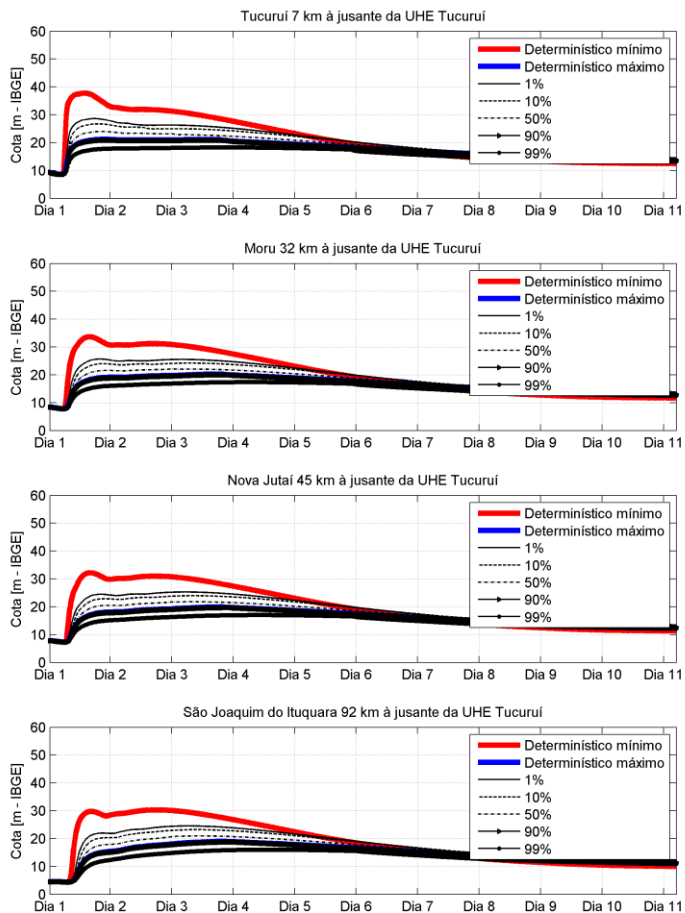


Figura 74 – Variação de cota em função da propagação dos hidrograma da Brecha 3.

A mancha de inundação é avaliada em quatro pontos de interesse A, B em Moru, e C e D em Nova Jutai. As manchas gerais e em detalhes estão ilustradas na Figura 75, Figura 76, Figura 77 e Figura 78.

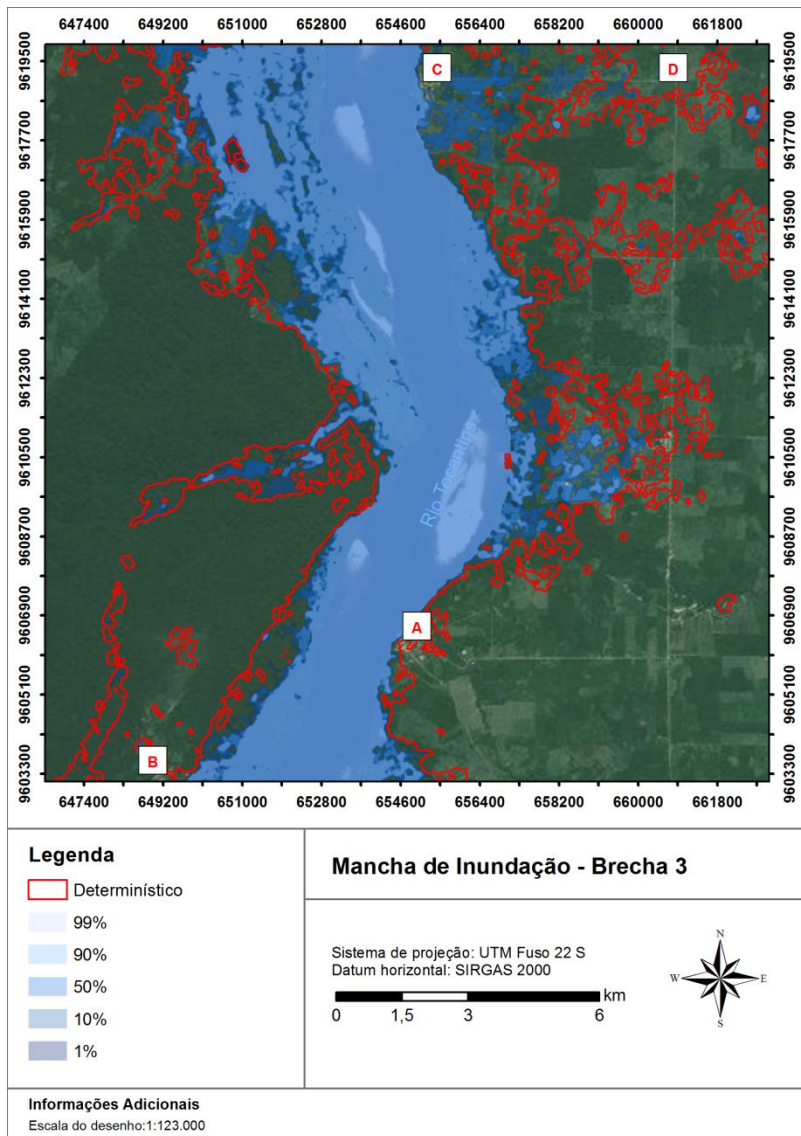


Figura 75 – Localização dos pontos de controle para análise espacial dos resultados do método probabilístico em relação ao método determinístico.

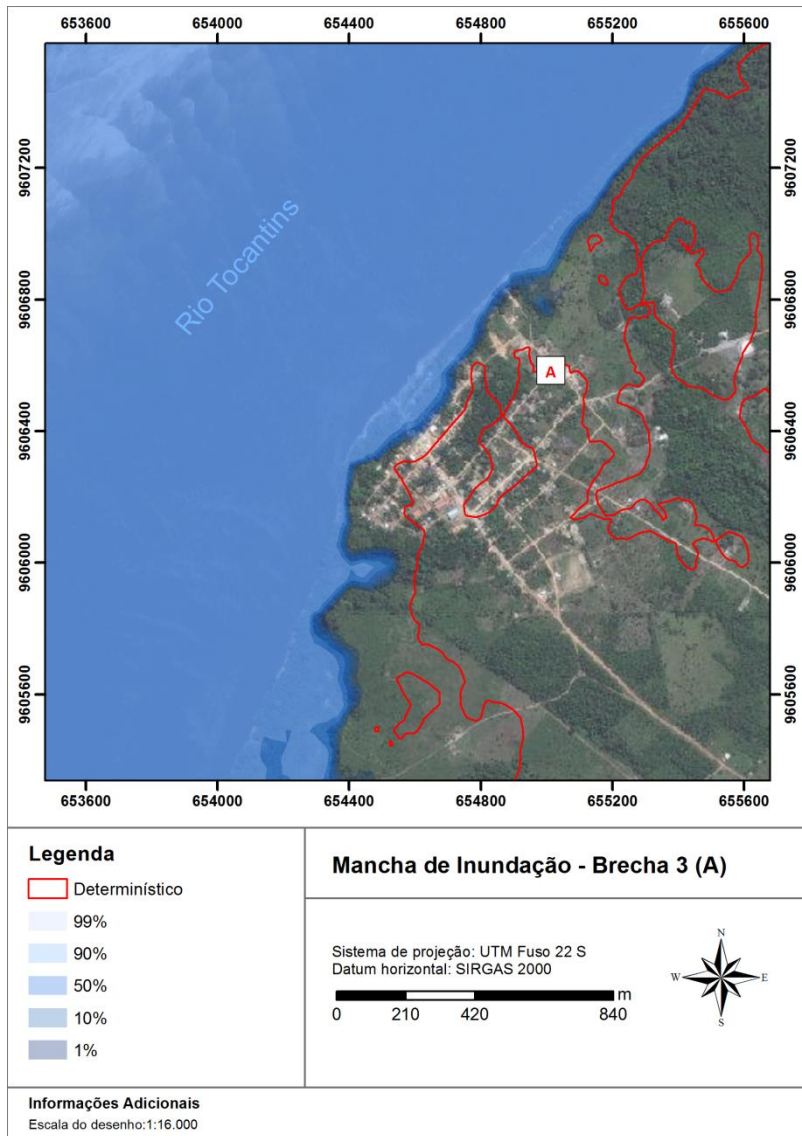


Figura 76 – Ponto de controle A.

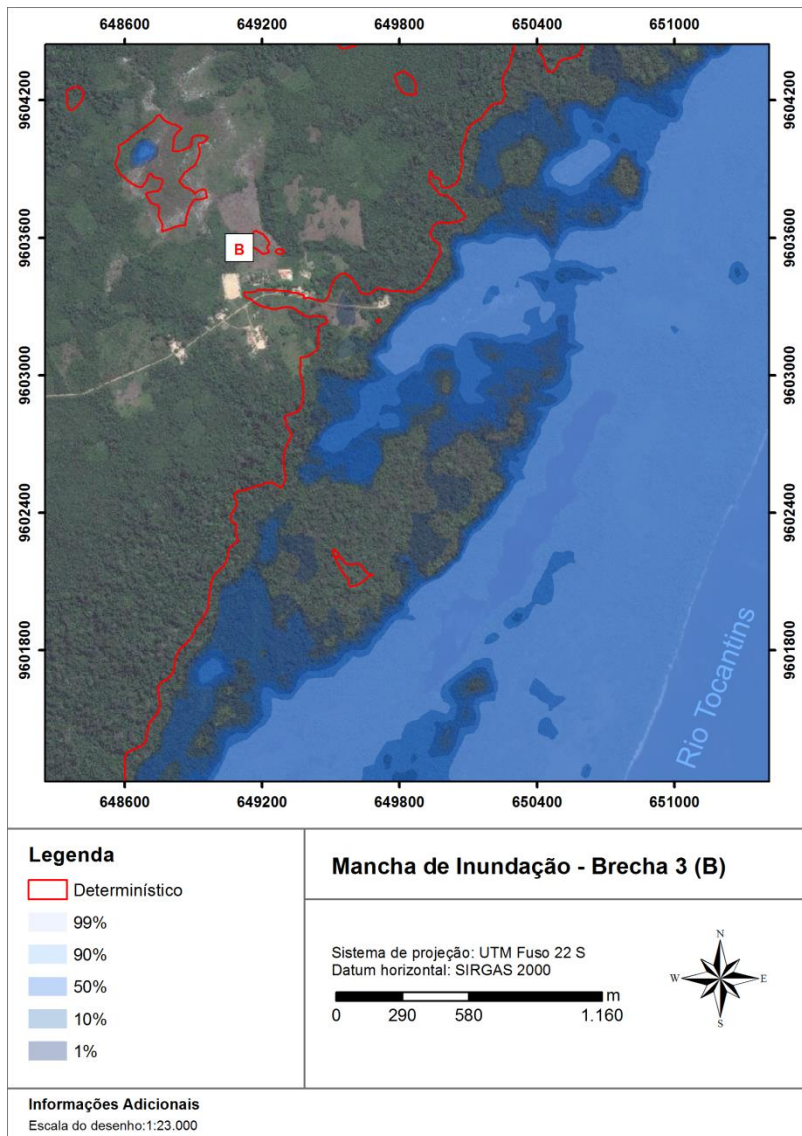


Figura 77 – Ponto de controle B.

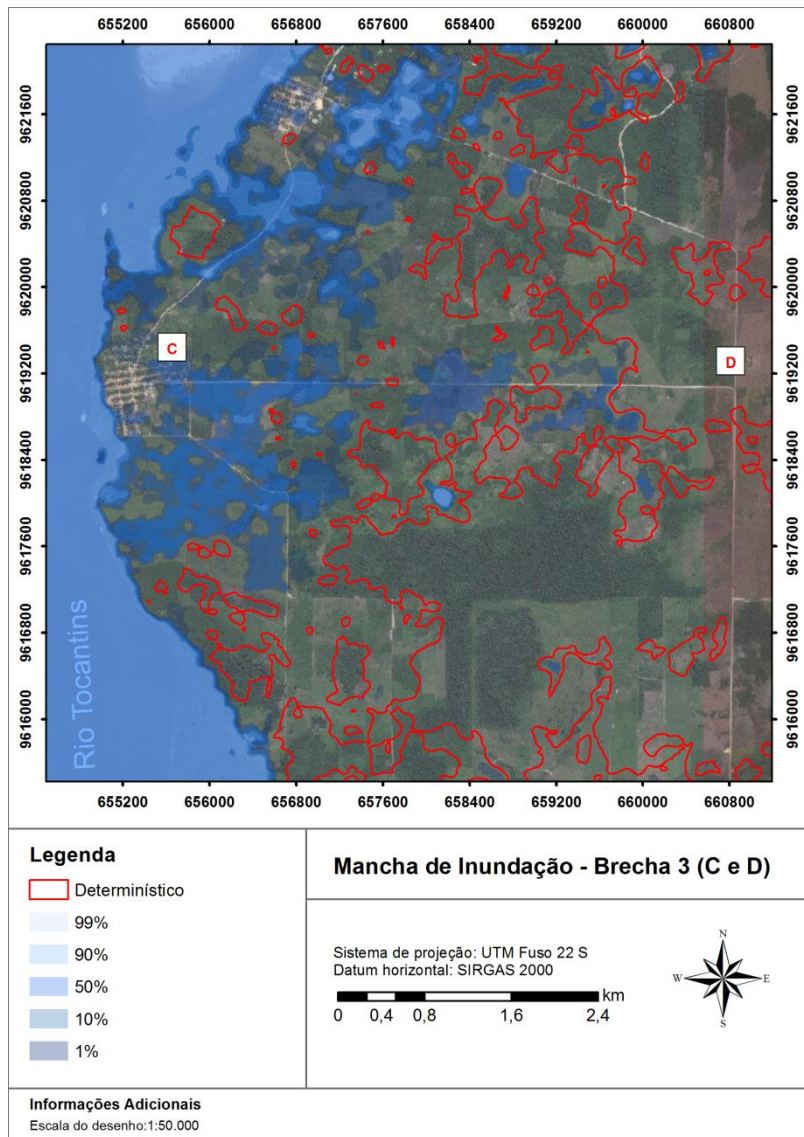


Figura 78 – Ponto de controle C e D.

Analisando o pico de vazão a probabilidade de ocorrência de inundação no ponto C e no ponto D, percebe-se que a probabilidade de ocorrência de inundação no ponto C é de 10%. O ponto D não é atingido pela mancha de inundação do método probabilístico, somente

pela mancha do método determinístico. O cenário Brecha 3 já condiciona uma condição de risco diferente ao observado para os cenários Brecha 1 e Brecha 2.

Para o cenário Brecha 3, o método determinístico gerou um resultado bastante superior em relação à probabilidade de ocorrência de 1%. Tendo o ponto A como referência, que pode englobar Moru, a comunidade é atingida, para níveis de probabilidade de ocorrência entre 1% e 99%, de maneira mais branda em relação à metodologia determinística.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho de pesquisa apresentou a metodologia probabilística para o desenvolvimento de estudos de formação de brecha de ruptura em barragens de acumulação d'água. A metodologia foi testada para o estudo de caso da UHE Tucuruí, comparando os resultados obtidos com os resultados obtidos com o emprego da tradicional metodologia determinística.

O uso da metodologia probabilística proporcionou o cálculo o risco de cotas de inundação induzidas pelo rompimento da barragem da UHE Tucuruí, para níveis de probabilidade de não excedência de 1%, 10%, 50%, 90% e 99%. A metodologia determinística até então mostrava apenas que a área atingida estaria dentro ou fora da inundação, segundo um “palpite” conservador. Conhecendo o risco, a probabilidade de não excedência, da cota de inundação induzida pela ruptura da barragem, o planejamento de ações emergenciais e a previsão de investimentos em segurança de barragens podem ser mais assertivos. Seguradoras podem se utilizar da metodologia probabilística para melhor calcular prêmios, segundo o dano associado de cada cenário. Gestores, defesa civil e fiscalizadores podem se munir com melhor entendimento do risco e sua espacialização ao longo do vale à jusante para dimensionar esforços assertivos e estratégias efetivas para momentos de crise sobre um evento de ruptura de barragens.

O emprego da metodologia probabilística propôs uma quebra de paradigma nos estudos de ruptura de barragens e proporciona uma forma objetiva e clara para cálculo do risco, dada a condição de ruptura eminente da barragem.

Por fim, recomendações são feitas para que a proposta do emprego da metodologia probabilística seja desenvolvida em trabalhos futuros:

- Análise de sensibilidade da vazão de pico de saída da brecha de inundação para cada um dos parâmetros de formação da brecha de ruptura da barragem;
- Avaliação da necessidade de dados topográficos de alta precisão altimétrica; e,
- Desenvolvimento de estudos de caso em outras barragens, considerando diferentes volumes de reservação.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMAN, C. T. Application of HEC-GeoRAS to the Tres Rios, Arizona Feasibility Study. **Water Resources**, n. 104, p. 181-190, 2000.

ACKERMAN, C.T. & BRUNNER, G.W. Dam failure analysis using HEC-RAS and HEC-GeoRAS. **In:** Third Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference in Reno, NV, 2006.

ASNAASHARI, A.; MEREDITH, D.; SCRUTON, M. Dam Breach Inundation Analysis Using HEC-RAS and GIS Two Case Studies in British Columbia, Canada. **In:** CDA 2014 Annual Conference Banff, Alberta October 4 – October 9, 2014.

BRASIL. **Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010.** 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, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial da União. Brasília, DF. 2010.

CALÇADA, M. C.; PORTELA, M. M.; MATOS, J. Análise de cheias e delimitação de zonas inundáveis no Timor Leste. **In:** Anais do 7º Congresso da Água. Lisboa: 2004.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Análise de Rompimento Hipotético da Barragem de Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 2, n.2, pp. 191-206, 1997.

DEWEY, R. & GILLETTE, D. Prediction of Embankment Dam Breaching for Hazard Assessment. **In:** ASCE Specialty Conference on Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation, Raleigh, North Carolina, 25-28, April 1993.

FEMA. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY, Federal **Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures - FEMA P-946.** 2013.

FERC. FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. **Dam Safety Performance Monitoring Program**. 2005.

FERC. FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION. **Dam Breach Analysis – DRAFT**, 2014.

FREAD, D.L., JIN, M., LEWIS, J. M. An LPI Numerical Implicit Solution for Unsteady Mixed-Flow Simulation. **In:** “Proceedings of North American Water and Environment Congress ‘96, ASCE”, Anaheim, California, June, 1996, pp. 22-28.

FROEHLICH, D. Embankment-Dam Breach Parameters. **In:** Hydraulic Engineering, Proceedings of the 1987 National Conference, ASCE, Williamsburg, VA, pp. 570-575, 1987.

FROEHLICH, D. Embankment-Dam Breach Parameters Revisited. **In:** First International Conference, Water Resources Engineering, Environmental and Water Resources Institute (EWRI), ASCE, Water Resources Engineering Proceeding, pp. 887-891, 1995.

FROEHLICH, D. Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. ASCE, **Journal of Hydraulic Engineering**, Vol. 134, No. 12. Pp. 1708-1721. 2008.

GEE, M. Use of Breach Process Models to Estimate HEC-RAS Dam Breach Parameters. **In:** 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 2010

GOODELL, C.R. “A Probabilistic Approach to Dam Breach Modeling”. **In:** Proceedings, FloodRisk 2012 Conference, Rotterdam, The Netherlands, November, 2012.

GOODELL, C.R. Moving Towards Risk-Informed Dam Breach Modeling. **In:** Dam Safety 2013 Conference, At Providence, RI USA. 2013.

GOODELL, C.R. & FROEHLICH, D.C. “Comparison of Dam Breach Flood Uncertainty Calculations”. **In:** Presentation, United States Society on Dams 2012, New Orleans, Louisiana, April, 2012.

HEC - HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. **HEC-RAS River Analysis System, User's Manual, Version 4.1.** US Army Corps of Engineers, Davis, USA, 2010, 747p.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Lessons from dam incidents.** Paris, 1974, 1069 p.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Dam failures statistical analysis.** Bulletin 99. Paris, 1995, 63 p.

LARA, P.G.; LOPES, J.D.; LUZ, G.M.; BONUMÁ, N.B. Reservoir operation employing HEC-ResSim: Case study of Tucuruí Dam, Brazil. **In:** ICFM6, 2014, São Paulo/SP, Reservoir operation employing HEC-ResSim: Case study of Tucuruí Dam, Brazil, 2014.

MARFAI, M. A. **GIS Modelling of River and Tidal Flood Hazards in a Waterfront City. Case study: Semarang City, Central Java, Indonesia.** 123 p. MSc Dissertation. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands, 2003.

MACDONALD, T.C & LANGRIDGE-MONOPOLIS, J. Breaching characteristics of dam failure. **Journal of Hydraulic Engineering.** 110(5), pp. 567-586. 1984.

MENESCAL, R. A. **Risco e Segurança em Engenharia – Problemas Enfrentados pelo Ministério da Integração com Obras de Infra-estrutura Hídrica.** Debate: O Momento Atual da Engenharia Brasileira. Instituto de Engenharia. São Paulo, 7 mar. 2007.

MIROSLAW-SWIATEK, D. **Unsteady 1D Flow Model of Natural Rivers with Vegetated Floodplain – An Application to Analysis of Influence of Land Use on Flood Wave Propagation in the Lower Biebrza Basin.** Water Resources Management and Modeling. Purna Nayak (Ed.), InTech. 2012.

MONTGOMERY, D.C. & RUNGER, G.C. **Applied Statistics and Probability for Engineers,** John Wiley & Sons, Inc., New York. 1991.

PICKERT, G.; WEITBRECHT, V.; BIEBERSTEIN, A. Breaching of overtopped river embankments controlled by apparent cohesion. **Journal of Hydraulic Research**, Vol. 49, No. 2, pp. 143-156, 2011.

SCHAEFER, M.G. **Dam Safety Guidelines, Technical Note 1: Dam Breach Inundation Analysis and Downstream Hazard Classification**. Washington State Department of Ecology Publication No. 92-55E, July 1992.

SEO. STATE OF COLORADO DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES, Division of Water Resources Office of the State Engineer . “**Guidelines for Dam Breach Analysis**”, February 2010.

SINGH, V.P.; SCARLATOS, P.D.; COLLINS, J.G.; JOURDAN, M.R. Breach Erosion of Earthfill Dams (BEED) Model. **Natural Hazards**, Volume 1, pp. 161-180. 1988.

SINGH, K.P. & SNORRASON, A. Sensitivity of outflow peaks and flood stages to the selection of dam parameters and simulation models. **Journal of Hydrology**, Vol 68, pp. 295-310. 1984.

USACE – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydrologic Engineering Center. Training Documents – **Using HEC-RAS for Dam Break Studies**. TD-39, August 2014.

U.S. BUREAU OF RECLAMATION. **Downstream hazard classification guidelines**. ACER Technical Memorandum. No. 11, Denver. 1988.

VON THUN J.L. & GILLETE, D.R. **Guidance on breach parameters**. Unpublished internal document, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, CO, 1990, p. 17.

WAHL, T.L. “Uncertainty of Prediction of Embankment Dam Breach Parameters”, **ASCE Journal of Hydraulic Engineering**, Vol 130, No. 5, pp 389-397. 2004.

WAHL, T.L. DAM BREACH MODELING – AN OVERVIEW OF ANALYSIS METHODS. **In:** Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling, June 27 - July 1, Las Vegas, NV, 2010.

XIONG, Y. A Dam Break analysis using HEC-RAS. **Journal of Water Resource and Protection**, Vol. 3, pp. 370-379, 2011.

XU, Y. & ZHANG, L.M. Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams. **ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Volume 135, No. 12, p. 1957-1970, December, 2009.

8 APÊNDICES

Desta forma, a APMR um processo informal, o qual visa gerar um documento informativo que sirva de fontes informação. Logo, o documento da APMR não é caracterizado como um documento de tomada de decisão.

O resumo da APMR da UHE Tucuruí é apresentado de forma resumida, somente para os modos considerados para a aplicação da metodologia probabilística. É fato incontestável que a APMR, a qual fará parte dos documentos exigidos pela Lei 12.334/2010, deverá ser realizada levando em conta outros modos de ruptura, bem como todas as estruturas do barramento. A presente pesquisa emprega dois modos de ruptura necessários à discussão da aplicação da metodologia probabilística.

8.1 UHE TUCURUÍ

Como a barragem poderia romper? Três brechas foram identificadas ao longo do barramento, entre a margem direita e a margem esquerda. Análises preliminares indicaram que a ocorrência de galgamento é remota, por isso, para efeitos de objetividade, os modos de ruptura estão associados ao fator iniciador erosão/piping. O local de cada uma das brechas foi definido através da análise do projeto da barragem, bem como através dos registros da inspeção visual.

Devido ao volume de reservação do reservatório da UHE Tucuruí, as simulações de formação de brecha foram desenvolvidas somente para o Modo 1 de cada cenário de brecha. O Modo 1 representa o reservatório sendo operado em condições normais, uma vez que em condição de emergência do Modo 2, o volume incremental não é significativo para o desenvolvimento e obtenção dos resultados críticos do presente trabalho, o qual foca na apresentação e discussão da metodologia probabilística.

Um fator crítico para avaliar movimentos no corpo do maciço da barragem é determinar que o movimento é normal, contínuo ou acelerado a ponto de gerar uma condição de ruptura. Logo, o monitoramento e manutenção da auscultação da barragem são fundamentais, visto que o transporte de material do núcleo ocorre rapidamente num processo de ruptura. Devido à magnitude da barragem de Tucuruí e à magnitude da resposta hidrológico do rio Tocantins o rebaixamento do reservatório pode não ser possível.

A formação do piping é de difícil previsibilidade, logo a identificação de locais é um problema significante. Além disso, o aparecimento dos efeitos visíveis do piping pode levar certo tempo até ser notado. As inspeções rotineiras são procedimentos de fundamental importância, bem como uma boa auscultação das estruturas de maior incerteza quanto à confiabilidade construtiva.

8.1.1 Piping/Erosão Brecha 1

Modo 1: Rompimento por erosão interna em condição normal de operação:

- Surgência, com transporte de material do núcleo do maciço de terra/enrocamento e formação de piping;
- Sismos ou adensamentos que causariam um fraturamento e a possibilidade de passagem de água e transporte de material do núcleo da barragem;
- Problemas na junção entre a barragem de terra e a barragem de enrocamento. Diferentes materiais podem desencadear um processo de recalque diferencial.

Modo 2: Rompimento por erosão interna em condição emergencial de operação:

- Surgência, com transporte de material do núcleo do maciço de terra/enrocamento e formação de piping;
- Sismos ou adensamentos que causariam um fraturamento e a possibilidade de passagem de água e transporte de material do núcleo da barragem;
- Problemas na junção entre a barragem de terra e a barragem de enrocamento. Diferentes materiais podem desencadear um processo de recalque diferencial.

8.1.2 Piping/Erosão Brecha 2

Modo 1: Rompimento por erosão interna em condição normal de operação:

- Surgência, com transporte de material do núcleo do maciço de terra/enrocamento e formação de piping;
- Sismos ou adensamentos que causariam um fraturamento e a possibilidade de passagem de água e transporte de material do núcleo da barragem;

- Problemas no abraço, na junção entre a barragem de concreto e a barragem enrocamento, pois não há informações precisas sobre o encontro das estruturas.

Modo 2: Rompimento por erosão interna em condição emergencial de operação:

- Surgência, com transporte de material do núcleo do maciço de terra/enrocamento e formação de piping;
- Sismos ou adensamentos que causariam um fraturamento e a possibilidade de passagem de água e transporte de material do núcleo da barragem;
- Problemas no abraço, na junção entre a barragem de concreto e a barragem enrocamento, pois não há informações precisas sobre o encontro das estruturas.

8.1.3 Piping/Erosão Brecha 3

Modo 1: Rompimento por erosão interna em condição normal de operação:

- Surgência, com transporte de material do núcleo do maciço de terra/enrocamento e formação de piping;
- Surgência, com transporte de material do núcleo do maciço de terra e formação de piping, devido a problemas de fundação;
- Sismos ou adensamentos que causariam um fraturamento e a possibilidade de passagem de água e transporte de material do núcleo da barragem;
- Problemas no abraço, na junção entre a Casa de Força 2 e a barragem de terra e entre a Eclusa e a barragem de terra. Não há informações precisas sobre as condições do encontro entre a barragem de terra e as estruturas de concreto.

Modo 2: Rompimento por erosão interna em condição emergencial de projeto:

- Surgência, com transporte de material do núcleo do maciço de terra/enrocamento e formação de piping;
- Surgência, com transporte de material do núcleo do maciço de terra e formação de piping, devido a problemas de fundação;

- Sismos ou adensamentos que causariam um fraturamento e a possibilidade de passagem de água e transporte de material do núcleo da barragem;
- Problemas no abraço, na junção entre a Casa de Força 2 e a barragem de terra e entre a Eclusa e a barragem de terra. Não há informações precisas sobre as condições do encontro entre a barragem de terra e as estruturas de concreto.

9 ANEXOS

DADOS CADASTRAIS DO EMPREENDIMENTO

Ofício Circular nº 414/2011-SFG/ANEEL (14/04/2011)



a-	Nome da Usina:	Uhe Tucuruí
b-	Concessionário:	Eletrobras Eletronorte
c.1-	Rio:	Tocantins
c.2-	Bacia:	Rio Amazonas
c.3-	Sub bacia:	Tocantins / Araguaia
d.1-	Coordenadas da Barragem:	Latitude: 03°45'00"S ; Longitude: 49°41'00"W
d.2-	Margem Esquerda	
d.3-	Margem Direita	
e.1-	Estado:	Pará
e.2-	Município:	Tucuruí
f-	Vazão Média Longo Termo:	11.107 m ³ /s
g.1-	Vazão do Vertedouro:	110.000 m ³ /s
g.2-	Tempo de Recorrência:	10.000 anos
h.1-	Área Inundada:	
h.1.1-	No NA máximo	3007 Km ²
h.1.2-	No NA máximo maximorum	3007 Km ²
h.2-	Volume Útil:	
h.2.1-	No NA máximo	38.970 x 10 ⁶ m ³
h.2.2-	No NA máximo maximorum	38.970 x 10 ⁶ m ³
h.3-	Volume Total:	
h.3.1-	No NA máximo	50.280 x 10 ⁶ m ³
h.3.2-	No NA máximo maximorum	50.280 x 10 ⁶ m ³
i-	Área de Drenagem:	758.000 Km ²
j-	NA de Montante:	
j.1-	Máximo Normal	74,0 m
j.2-	Máximo Maximorum	74,0 m
k-	NA de Jusante Max. Normal:	8,99 m
l-	Volume de Amortec. de Cheias?	Não
m-	Barragem	
m.1-	Forma:	Trapezoidal

m.2- Tipo:	Gravidade
m.3- Material:	Concreto, Terra e Enrocamento
n- Altura da Barragem:	95,00 m
o- Comprimento da Crista:	Concreto: 1.744,0m; Terra e Enrocamento: 5.308,0 m; Total: 7.052,0 m
p- Cota da Crista:	78,00 m
q. Instrumentação	
q.1- Instrumentação Utilizada:	
q.1.1- Concreto 1ª Etapa	Drenos de Fundação, Drenos de Juntas, Drenos de Paramento, Drenos da Linha de Contato, Medidores de Vazão, Piezômetros de Contato, Piezômetros de Fundação, Medidores Triortogonais de Junta, Pêndulos, Extensômetros de Haste, Rosetas de deformação, Medidores Elétricos de Juntas, Strain Meter simples, Strain Meter com corretor, Termômetros de Superfície, Termômetros de Massa, Termômetros de Rocha, Acelerômetro Digital.
q.1.2- Concreto 2ª Etapa	Drenos de Fundação, Drenos de Juntas, Drenos de Paramento, Medidores de Vazão, Piezômetros de Fundação, Medidores Triortogonais de Junta, Pêndulos, Extensômetros de haste
q.1.3- Terra e Enrocamento 1ª Etapa	Piezômetros Casagrande, Piezômetros Pneumático, Medidores de Recalque Magnético, Medidores de Vazão, Caixa Sueca, Inclínômetros, Célula de Pressão Total, Marcos de Referência Superficial, Sismômetro Digital.
q.1.4- Terra e Enrocamento 2ª Etapa	Piezômetros Casagrande, Piezômetros Pneumático
q.2- Tipo de Monitoramento:	Periódico e sistematizado, com inspeções rotineiras, regulares e especiais, executadas por equipes qualificadas em Segurança de Barragens
r- Permite Galgamento?	NÃO
s- Vertedouro	
s.1- Tipo:	De Superfície, controlado por Comporta de Segmento
s.2- Número de Vãos:	23 (vinte três)
t- Comportas	
t.1- Acionamento:	Cilindros Oleodinâmicos de Acionamento Hidráulico através de dois servomotores com contato individual, local ou à distância.
t.2- Tempo de Abertura/Fechamento:	0,30 m/min
t.3- Sist. Serv. Auxil. Emerg. Exclusivo:	Sim, exclusivo e fixo no local
u.1- Faz Teste Anual do Vertedouro?	SIM
u.2- Qual o procedimento utilizado?	No período de nível baixo do reservatório, bloqueia-se o vão com a inserção dos stop-logs, abre-se e fecha-se totalmente a comporta, parando-se em cada um dos passos estabelecidos na Instrução de Operação, ITO-23TU/03, inspeciona-se o sistema de vedação, a superfície das comportas, o acionamento hidráulico,

bem como todo o sistema eletromecânico de alimentação e controle.

v-	Segurança de Barragens	
v.1-	Procedimento Sistemático?	SIM
v.2-	Equipe Treinada efetuar inspeção?	SIM
v.3-	Existe Responsável Técnico?	SIM
v.4-	Existe ART no CREA?	SIM