



ESTUDO DE ROMPIMENTO DE BARRAGEM

CGH CORREGO

Rio Indaiá Grande – MS

MARÇO / 2023

ESTUDO DE ROMPIMENTO DE BARRAGEM

1

INDICE

ESTUDO DE ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DA BARRAGEM DA CGH CÓRREGO	3
1. INTRODUÇÃO	3
2. IDENTIFICAÇÃO DO EMPREENDEDOR	3
3. OBJETIVO	4
4. MAPEAMENTO	4
5. ÁREA DE INFLUÊNCIA A JUSANTE DA BARRAGEM DA CGH CORREGO	5
6. MANIPULAÇÃO DE DADOS TOPOGRÁFICOS	7
7. VAZÕES DE CHEIA (MÁXIMAS)	9
8. APLICAÇÃO DO MODELO HEC-RAS	12
9. ELABORAÇÃO DO MAPA PARA ANÁLISE DE RISCO (MANCHA INUNDAÇÃO) 14	
10. RESULTADOS	15
11. CONCLUSÕES	17

ESTUDO DE ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DA BARRAGEM DA CGH CÓRREGO

1. INTRODUÇÃO

A empresa HIDROELÉTRICA CORREGO LTDA., contratou a empresa TRSUL Engenharia Ltda., para elaboração do plano de segurança da barragem (PSB) contendo ações periódicas e de emergência (PAE), com o objetivo de estabelecer parâmetros e um roteiro básico para orientar os procedimentos a serem adotados visando garantir a qualidade da energia produzida, bem como a segurança das estruturas envolvidas e da comunidade adjacente.

O programa visa atender as exigências dos órgãos fiscalizadores (IMASUL/MS, ANEEL, SINDEC, SNISB, entre outros) bem como formar um banco de dados para poder ter o controle e o histórico da CGH. Este programa segue todas as recomendações contidas na Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.

Sendo agora realizado neste relatório o estudo de rompimento e propagação de cheia a jusante do barramento, sendo este documento integrante do PAE – Plano de Ações de Emergência.

2. IDENTIFICAÇÃO DO EMPREENDEDOR

Razão Social : HIDROELÉTRICA CORREGO LTDA

CNPJ n.º 23.244.469/0001-71

CEG: CGH.PH.MS.044877-0.01		
Nome do empreendimento: CGH Corrego Ger	Potência Outorgada (kw): 4.176,00	Corpo d'água: Rio Indaia Grande
Data entrada em operação: 01/05/2019	Fonte: Potencial hidráulico	Fase: Operação
Município(s): - Chapadão do Sul(MS)		
Proprietário(s):		
- HIDROELÉTRICA CÓRREGO LTDA		CNPJ/CPF: 23.244.469/0001-71

Diretor Presidente: Paul Illich

Telefone contato: (42) 3632-1022 / 99977-0866

e-mail: alessandro@illich.com

Endereço Administrativo: Av. Alemanha, 512 – Distrito Entre Rios – CEP 85.138-600 – Guarapuva – PR

Fones: (42) 3632-1022 / 99977-0866

Endereço Operacional: Estrada MS229 S/Número, km 42, Zona Rural, 79.560-000 – Chapadão do Sul – MS

3. OBJETIVO

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

São objetivos específicos deste trabalho:

- Estudo hidráulico e hidrodinâmicos simplificados do rompimento de uma barragem;
- Estimar as vazões máximas do rio em que se localiza a barragem;
- Aplicar um modelo hidráulico para a situação do rompimento da barragem;
- Elaborar um mapa da área de influência no trecho à jusante da barragem, para avaliar se benfeitorias serão atingidas.
- Focar as ações de emergência nos pontos mais críticos e vulneráveis e onde houver risco de pessoas a serem atingidas na hipótese de acidente com o barramento.

4. MAPEAMENTO

Os trabalhos de campo se iniciaram com um levantamento expedito da área de estudo, visando identificar com a ajuda do Google earth benfeitorias (casa de moradores, galpões), pontes, localizados a jusante da barragem, com o objetivo de verificar se estas benfeitorias seriam atingidas ou não numa simulação hipotética de rompimento de barragem com a onda de propagação das águas contidas no reservatório.

O resultado da etapa inicial de campo foi a identificação e cadastro das benfeitorias que chamamos de área de influência a jusante da barragem da CGH Córrego.

5. ÁREA DE INFLUÊNCIA A JUSANTE DA BARRAGEM DA CGH CORREGO

Foram cadastradas as seguintes benfeitorias localizadas próximas ao rio Indaia Grande e localizadas a jusante do barramento, que estão próximas as áreas influenciadas pelas águas oriundas da onda de rompimento. Foi percorrido o leito do rio, sendo obtidas as seguintes distâncias:

- da barragem da CGH Córrego até a ponte municipal existente são 3,50 km;
- da barragem da CGH Córrego até duas propriedades existentes são 4,75 km (benfeitorias localizadas na margem direita do rio);
- da barragem da CGH Córrego até a barragem da PCH Lajeado são 25,72 km.



Figura 01 - Área de influência a jusante da barragem – a ponte municipal fica distante 3,50 km da Barragem da CGH Córrego



Figura 02 - Ponte municipal



Figura 03 - Área de influência a jusante da Barragem – as duas casas de moradores ficam distante 4,75 km da barragem da CGH Córrego



Figura 04 - Área de influência a jusante da Barragem – as duas casas de moradores



Figura 05 - Área de influência a jusante da CGH Córrego – a Barragem da PCH Lajeado fica distante 25,72 km da barragem da CGH Córrego.

6. MANIPULAÇÃO DE DADOS TOPOGRÁFICOS

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

Para a região da barragem foram utilizadas curvas de nível do projeto executivo da CGH Córrego.

Para a região entre a barragem e a jusante do barramento foi utilizada a restituição estereofotogramétrica digital na escala 1:5.000 elaborada com curvas de nível eqüidistantes de 5 em 5 metros, executada por Joaquim Antonio Duran Salomão, este material foi utilizado para a elaboração do estudo de inventário hidrelétrico apresentado para a ANEEL do rio Indaiá Grande.

Como na época da elaboração dos estudos, as diretrizes para elaboração de serviços de cartografia e topografia vigentes previam como obrigatório para inventários hidrelétricos simplificados a elaboração de restituição com fotos aéreas disponíveis, com escalas não inferiores a 1:60.000, foram usadas as fotos disponíveis.

Para a execução dos trabalhos foram utilizadas fotografias aéreas da cobertura aerofotogramétrica na escala de 1:60.000 do ano de 1965 da AST/USAF, com seus pares de fotos 39858 à 39861, 38125 à 38129, 43050 à 43054, 43173 à 43176 e 36277 à 36280.

Dados técnicos da cobertura aerofotogramétrica utilizada:

- Escala aproximada das fotos: 1: 60.000;
- Superposição longitudinal: 60%;
- Superposição lateral: 20%;
- Distância focal nominal: 152 mm.

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

nível manipuladas e organizadas para a região de interesse, foi gerada uma superfície fiel às elevações atribuídas às curvas, com o auxílio de uma ferramenta específica do AutoCAD Civil 3D.

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

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

7. VAZÕES DE CHEIA (MÁXIMAS)

O conhecimento e modelagem dos estudos de eventos máximos são de fundamental importância para subsidiar os dimensionamentos hidráulicos de tal forma a dotar o aproveitamento das condições de segurança exigidas para obras desta natureza.

Este tipo de avaliação, considerando que as cheias estão associadas a uma probabilidade de ocorrência, depende diretamente de técnicas estatísticas nas quais deve se identificar um tipo de distribuição que melhor se ajuste às variáveis selecionadas.

É sabido que existem vários métodos para o cálculo de previsão de enchente. Diante disso, utilizou-se a Distribuição de Gumbel para modelar o fenômeno, a qual julga-se levar os valores a favor da segurança, além da larga recomendação nas bibliografias que tratam do assunto e sua grande utilização nos escritórios de engenharia.

Estimaram-se os eventos máximos a partir dos dados de vazões diárias observados no posto base Indaiá Grande e transferidos por relação direta de áreas para o eixo do barramento em estudo.

A tabela a seguir apresenta os valores obtidos na amostragem para a seção no posto Indaiá Grande e no barramento da CGH Córrego, para cálculo dos eventos de cheia utilizando o método de Gumbel.

Local	Posto Base - INDAIÁ GRANDE	CGH CÓRREGO
Area Drenagem (km ²)	794,00	840,00
Ano	Q _{max} (m ³ /s)	Q _{max} (m ³ /s)
1996	38,40	40,62
1997	41,80	44,22
1998	37,30	39,46
1999	45,00	47,61
2000	46,20	48,88
2001	41,50	43,90
2002	46,40	49,09
2003	39,10	41,37
2004	38,10	40,31
2005	37,30	39,46
2006	49,20	52,05
2007	57,00	60,30
2008	45,90	48,56
2009	47,40	50,15
2010	58,90	62,31
2011	55,70	58,93
2012	41,50	43,90
2013	50,10	53,00
2014	69,70	73,74
2015	34,50	36,50
2016	48,90	51,73
2017	43,90	46,44
2018	40,80	43,16
2019	45,20	47,82
2020	43,30	45,81
2021	27,20	28,78

Figura 06 – Base de dados utilizada para o cálculo de vazões de cheia na seção contribuinte a CGH Córrego

MÉTODO DE GUMBEL

Vazões Máximas	Assimetria
AD USINA= 840,00 km ²	n= 26
Q _{med} = 47,62 m ³ /s	Assimetria= 0,82
σ= 9,12 m ³ /s	Usar Gumbel

Ano	Qmax	Ano	X ₁ - média
1996	40,62	1996	-342,2
1997	44,22	1997	-39,2
1998	39,46	1998	-543,0
1999	47,61	1999	0,0
2000	48,88	2000	2,0
2001	43,90	2001	-51,3
2002	49,09	2002	3,2
2003	41,37	2003	-244,6
2004	40,31	2004	-390,9
2005	39,46	2005	-543,0
2006	52,05	2006	87,0
2007	60,30	2007	2040,2
2008	48,56	2008	0,8
2009	50,15	2009	16,1
2010	62,31	2010	3172,0
2011	58,93	2011	1445,8
2012	43,90	2012	-51,3
2013	53,00	2013	156,0
2014	73,74	2014	17818,0
2015	36,50	2015	-1375,2
2016	51,73	2016	69,6
2017	46,44	2017	-1,6
2018	43,16	2018	-88,5
2019	47,82	2019	0,0
2020	45,81	2020	-5,9
2021	28,78	2021	-6690,8

Considerando que as vazões máximas registradas representam um dado médio diário e não o pico máximo instantâneo, os resultados serão majorados pelo Coeficiente de Fuller (λ).

O coeficiente de Fuller leva em consideração a área de drenagem do aproveitamento. A seguir é apresentada a fórmula para o cálculo do coeficiente.

$$Q_{INST} = \lambda Q_{MED}$$

$$\lambda = 1 + (2,6/A^{0,3})$$

A figura a seguir fornece os resultados obtidos através do método de Gumbel para as vazões máximas na seção contribuinte ao barramento da CGH Córrego.

Vazões de Cheia CGH CÓRREGO

MÉTODO DE GUMBEL					
TR	1/T	α	μ	Vazão	Vazão Inst
2	0,5000	7,12	43,51	46,12	62,03
10	0,1000	7,12	43,51	59,53	80,06
50	0,0200	7,12	43,51	71,28	95,86
100	0,0100	7,12	43,51	76,25	102,54
500	0,0020	7,12	43,51	87,73	117,98
1.000	0,0010	7,12	43,51	92,66	124,62
10.000	0,0001	7,12	43,51	109,05	146,66

Vazões de Cheia CGH CÓRREGO		
MÉTODO DE GUMBEL		
TR	Q (m ³ /s)	Q _{inst} (m ³ /s)
2	46,12	62,03
10	59,53	80,06
50	71,28	95,86
100	76,25	102,54
500	87,73	117,98
1.000	92,66	124,62
10.000	109,05	146,66

Figura 07– Vazões de cheia para a seção contribuinte ao barramento da CGH Córrego.

8. APLICAÇÃO DO MODELO HEC-RAS

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

componentes de análise hidráulica, armazenamento de dados, ferramentas de gerenciamento, gráficos e formas de apresentação (USACE, 2010). O software contém quatro componentes de análise unidimensional, sendo eles (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2010):

- cálculo de perfis e superfícies de água em regime permanente;
- simulação em regime não permanente;
- cálculo de limites móveis de transporte de sedimentos;
- e análise de qualidade da água.

Os tipos de escoamento simulados, por sua vez, são (GRACIOSA, 2010): permanente uniforme, permanente gradualmente variado e não permanente. Segundo Lauriano, et al (2010), “atualmente, o HEC-RAS vem sendo empregado em casos práticos, já que sua versão mais atual possui um módulo que permite a simulação de ruptura e a modelagem de escoamento não-permanente”. Este módulo citado é possível de ser empregado apenas com escoamento simulado em regime não permanente, o qual é regido pelas leis da conservação de massa e o princípio da conservação do momento (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2010). Para uma abordagem unidimensional, as equações de Saint-Venant para equação da conservação de massa e conservação 37 da quantidade de movimento podem ser representadas pelas equações matemáticas [2] e [3], respectivamente (LAURIANO, 2010). [2] [3] Onde: t é a variável independente relativa ao tempo [s]; x é a variável independente relativa à direção do escoamento [m]; V é a velocidade média do escoamento [m/s]; g é a aceleração da gravidade [m/s²]; h é a espessura da lâmina líquida [m]; S_0 é a declividade média da calha fluvial ou do fundo do canal [m/m]; e S_f é a declividade da linha de energia [m/m].

Foi realizada a modelagem hidrodinâmica por meio do software HEC-RAS versão 6.0. No presente estudo, todos os cálculos tiveram por base o escoamento com regime não permanente, com o qual o software oferece a opção da modelagem do rompimento de estruturas hidráulicas. A perda de energia é calculada pela equação de Manning. Por meio da equação de conservação da energia são determinadas as velocidades e profundidades do escoamento para cada uma das seções transversais.

O primeiro passo na utilização do software foi a importação dos dados topográficos na seção Geometry Data, seguido da inserção da barragem em seu devido ponto no rio, de

forma fiel a seus atributos observados nos projetos estruturais, e utilizando-se das modificações necessárias na seção para isso.

Com base nas vazões máximas determinadas, foi criado um cenário de cheia para o momento do rompimento hipotético da barragem. Para a simulação em regime não-permanente foi utilizada a seção “unsteady flow” do software, atribuindo valores iniciais de escoamento e condições para as seções limite do modelo, na forma de hidrograma projetado para o período em que ocorreria a simulação do rompimento da barragem. A condição inicial para o escoamento foi a de total preenchimento do reservatório. Com todo o cenário topográfico e hidrológico inserido no modelo, foi suposto um plano de rompimento para a estrutura, levando em conta recomendações do User’s Manual (USACE, 2010b). Na plataforma do HEC-RAS Dam Breach Data, foram inseridos dados como forma e dimensões do rompimento proposto e quando e de que forma este se daria. Foi suposto um rompimento de progressão linear ao longo de sua duração, e não foi considerado o reparo dos danos à barragem.

9. ELABORAÇÃO DO MAPA PARA ANÁLISE DE RISCO (MANCHA INUNDAÇÃO)

A mancha de inundação foi trabalhada em conjunto nos softwares HEC-RAS com o autocad Civil 3D, onde foi possível a preparação de dados geométricos para importação e processamento dos resultados obtidos em simulação do HEC-RAS. Foi escolhida a exportação da mancha de inundação em um momento mais crítico após o rompimento da barragem, onde o alagamento de áreas ocupadas à jusante foi mais expressivo, sendo possível a opção também por outros momentos da simulação se fosse esse o interesse. A exportação foi feita por ferramenta específica do HEC-RAS que permite serem selecionados os momentos da simulação, variáveis e trechos do rio (no caso, apenas uma variável – superfície de água, apenas um momento da simulação e apenas um trecho do rio – o rio principal). Foi também importado no Autocad Civil 3D a mesma topografia utilizada para inserção no HEC-RAS, possibilitando o processamento da mancha de inundação em terreno digital. Exportação da mancha gerado no HEC-RAS na extensão “shape file”, para o autocad Civil 3D, com geração de um polígono da mancha de inundação num momento mais crítico, visando sua visualização no software livre Google Earth, para sobreposição da mancha de inundação em imagem de satélite.

Para a simulação de rompimento hipotética será adotada a recorrência de 10.000 anos considerando o pico instantâneo.

10. RESULTADOS

Os resultados fornecidos pelo modelo hidrodinâmico HEC-RAS foram expressos de diferentes formas, nos mais diversos pontos do trecho trabalhado do rio. Após a realização da simulação programada para os fatores estabelecidos de vazões e rompimento da estrutura, foi possível visualizar o nível d'água nos pontos vulneráveis, considerando o rompimento na ocorrência da máxima vazão de cheia TR-10.000 anos instantânea e no momento mais crítico. A vazão máxima no rio Indaiá Grande transposta para o eixo da CGH Córrego registrada no ano 2014 foi 73,74 m³/s, e segundo moradores não afetou as casas e a vazão na TR-10.000 anos instantânea simulada foi igual a 146,66 m³/s.

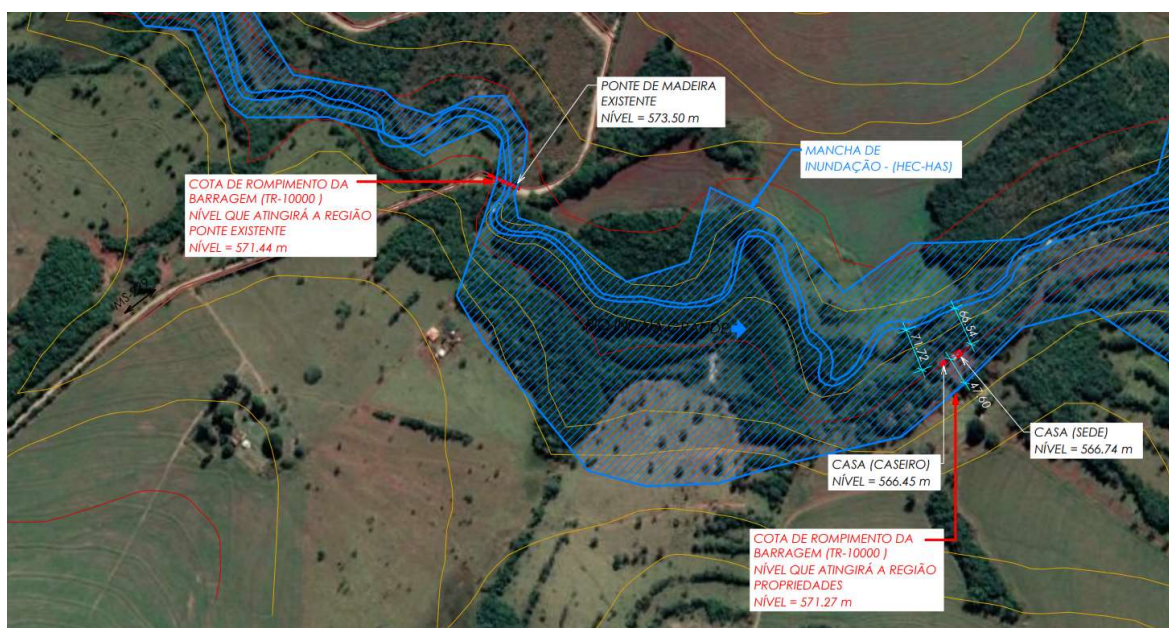


Figura 08 – Mancha de inundação nos pontos mais críticos e vulneráveis (extraído da simulação)

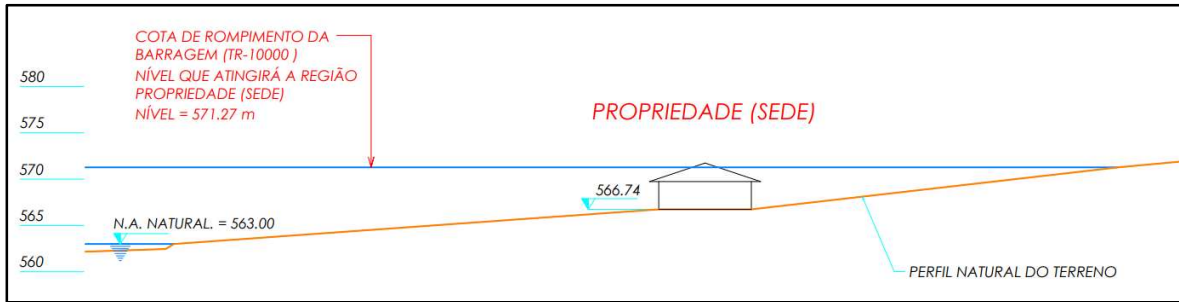


Figura 09 – Nível de água atingido na região de moradia (extraído da simulação)

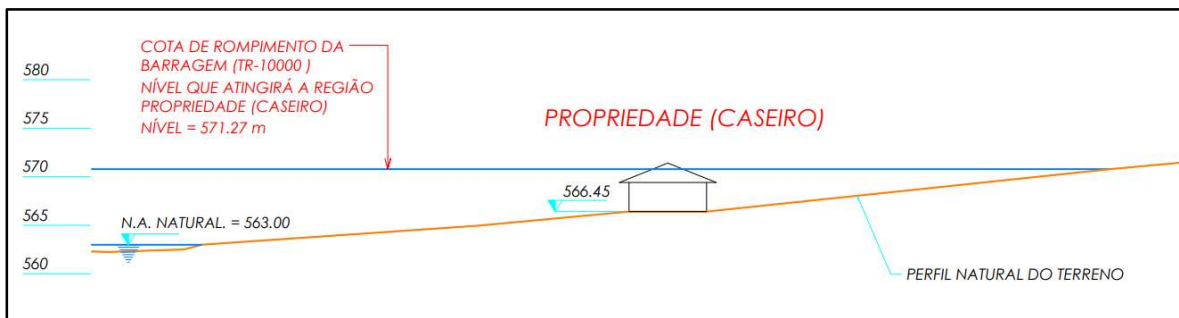


Figura 10 – Nível de água atingido na região de moradia (extraído da simulação)

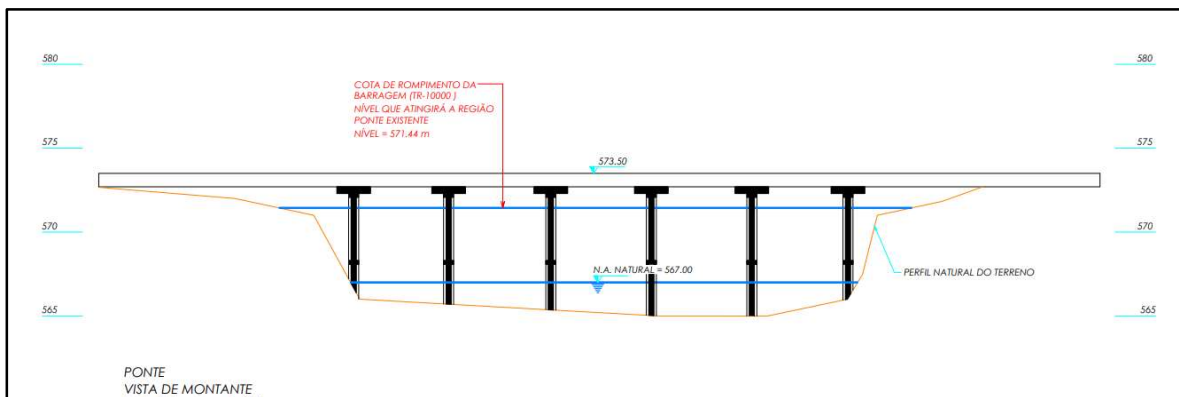


Figura 11 – Nível de água atingido na ponte municipal (extraído da simulação)

Nas Figuras 08, 09, 10 e 11 é possível observar o perfil do nível de água e sua linha de energia no momento mais crítico da simulação de rompimento hipotético da barragem, com o reservatório cheio. Com o rompimento da barragem, parte do volume de água contido no reservatório foi liberado, gerando a propagação de uma onda de cheia na região à jusante. A inundação de certas regiões é observada com o rompimento da barragem, principalmente nas de menor declividade. O mapa de inundação, elaborado com a sobreposição do resultado da simulação no momento crítico em imagem do software Google Earth, pode ser observado no desenho 01. A inundação mostrada representa o

momento de maior cheia a jusante do rompimento onde é possível observar quais ocupações seriam atingidas em situação de acidente.

11. CONCLUSÕES

A simulação hipotética considerou a ocorrência da ruptura no momento de uma cheia extraordinária que a considerada na TR-10.000 anos, e consideramos no ponto considerado mais fraco da barragem que seria na ombreira direita no trecho construído em solo com enrocamento de pedra.

Consideramos que a topografia obtida e manipulada é de boa qualidade pois foram utilizadas as curvas de nível do estudo de inventário aprovado pela ANEEL e complementados com seções topobatimétricas realizados nos pontos mais vulneráveis.

Com base nos resultados obtidos e apresentados, foi possível realizar uma análise e chegar a conclusões de quais seriam alguns dos efeitos de um rompimento da barragem nos moldes projetados. A simulação retratou como seria o comportamento da inundação a jusante da barragem se viesse a ocorrer o seu rompimento, considerando o volume de água liberado no caso do reservatório em seu nível máximo. O Plano de Ações Emergenciais, com o mapa de inundação do possível rompimento da barragem é fundamental, visando a identificação das áreas que possam vir a ser atingidas em caso de acidente e as medidas que devem ser tomadas para notificação e retirada de pessoas que estejam em ameaça.

O Google Earth é uma excelente ferramenta de visualização de localidades e avaliações preliminares.

Em anexo enviamos os desenhos que compõe do estudo de rompimento e a respectiva mancha de inundação no momento mais crítico.

Este material deverá fazer parte do PAE – Plano de Ações de Emergência com o objetivo de dar a máxima atenção as áreas com potencial de atingimento quando da ocorrência de grandes cheias.

Chapadão do Sul, março de 2023.

ER.

Eng. Elizeu Riba
CREA/SC nº 050559-2
CREA/MS nº PR26079

ER.