

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

**RETROANÁLISE DA PROPAGAÇÃO
DECORRENTE DA RUPTURA DA BARRAGEM
DO FUNDÃO COM DIFERENTES MODELOS
NUMÉRICOS E HIPÓTESES DE SIMULAÇÃO**

Nathália Couto Machado

Belo Horizonte

2017

Nathália Couto Machado

RETROANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DECORRENTE DA RUPTURA DA BARRAGEM DO FUNDÃO COM DIFERENTES MODELOS NUMÉRICOS E HIPÓTESES DE SIMULAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Hidráulica e Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem hidráulica

Orientador: Prof. Márcio Benedito Baptista

Coorientador: Prof. Aloysio Portugal Saliba

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2017

M149r

Machado, Nathália Couto.

Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação [manuscrito] / Nathália Couto Machado– 2017.
xvi, 159 f.: il.

Orientador: Márcio Benedito Baptista.

Coorientador: Aloysio Portugal Saliba.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndice: f. 159.

Bibliografia: f. 147-158.

1. Engenharia sanitária- Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Barragem - Teses. 4. Resíduos - Teses. 5. Reologia - Teses. I. Baptista, Márcio Benedito. II. Saliba, Aloysio Portugal Maia. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte – BRASIL

Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br

http://www.smarh.eng.ufmg.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da Barragem do Fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação

NATHÁLIA COUTO MACHADO

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:


Prof. MÁRCIO BENEDITO BAPTISTA - Orientador


Prof. ALOYSIO PORTUGAL SALIBA - Coorientador


Prof. FRANCISCO EUSTÁQUIO OLIVEIRA E SILVA


Prof. JOSÉ RODOLFO SCARATI MARTINS

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Prof. Nilo de Oliveira Nascimento
Coordenador

Prof. Márcio Benedito Baptista
Orientador

Belo Horizonte, 07 de julho de 2017.

AGRADECIMENTOS

A princípio, agradeço a Deus pela oportunidade, saúde e força para lutar por este meu objetivo.

Agradeço especialmente à minha família, que me acolheu docemente, após todas as minhas incontáveis ausências, e ao seu incondicional apoio, sofrendo juntamente comigo às minhas dificuldades e vibrando a cada pequena conquista, nas batalhas diárias, que culminaram nesta trajetória vitoriosa.

Ao meu orientador, Professor Márcio Benedito Baptista, por acreditar, apoiar-me e orientar-me com muita sabedoria e uma firmeza inigualável.

Ao meu coorientador, Professor Aloysio Portugal Saliba, que, com suas ideias, conhecimento e principalmente sua energia, colocou-me sempre adiante com perspectivas desafiadoras a cada momento.

Agradeço a todos os meus colegas de profissão e, sobretudo, amigos da equipe de Hidrotecnia da Pimenta de Ávila Consultoria: Carol, Mariana, Lorêdo, Joel, Alexandre, Cristiano, Stone, Ana Júlia e especialmente ao Lucas Lucena, por ser meu leal companheiro também de mestrado. Da mesma forma, ao André Lauriano pelo apoio ao tema, ensinamentos e amizade. Congratulo-me ao Felipe Rocha por todos os ensinamentos, desde a época de estágio, e espelho de um excelente profissional. À Pimenta de Ávila Consultoria pela oportunidade de crescimento profissional que muito me agregou tecnicamente.

Obrigada ao Ministério Público de Minas Gerais (MPMG) pelo fornecimento dos dados, bem como aos moradores de Bento Rodrigues entrevistados, que permitiram a justaposição da cronologia do evento.

Minha gratidão aos meus professores do Departamento de Recursos Hídricos da UFMG (SMARH) pelos enormes aprendizados e oportunidades de desenvolvimento na área.

O meu agradecimento às minhas companheiras de estudo nas longas tardes de sábado: Tainá, Sarah e Lorena, como também à Ausenco, ao Neemias Dias, ao Professor Patrício e à Bárbara Santos pelas parcerias nos ensaios de reologia.

Por fim e eminentemente, agradeço ao Luiz Biagini, que me trouxe muito carinho, amor e companheirismo nesta fase final e conturbada da defesa.

RESUMO

A mineração é uma importante atividade econômica, no Brasil, que agrega uma receita considerável ao PIB nacional. Os processamentos do minério geram os rejeitos que são dispostos, na maioria das vezes, em barragens, por se tratar de uma alternativa economicamente atrativa. As barragens de rejeitos possuem diversos métodos construtivos, entre eles, alteamentos por montante, podendo ser utilizado parte do próprio rejeito, como o caso da Barragem do Fundão da mineradora Samarco. No dia 05 de novembro de 2015, a Barragem do Fundão entrou em colapso. Aproximadamente, 32 Mm³ de rejeitos foram propagados para o vale a jusante, causando mortes, destruição do Distrito de Bento Rodrigues, além de afetar os corpos de água e outras áreas urbanas a jusante até a foz do Rio Doce. Neste trabalho, foram realizadas simulações hidráulicas referentes a esse evento, totalizando 7 (sete) cenários, que variam entre fluidos aquosos e hiperconcentrados, modelagens hidráulicas uni e bidimensionais, bem como os programas HEC-RAS e FLO-2D. Para a inserção das características da propagação de fluidos hiperconcentrados, no programa HEC-RAS, foram adotados ajustes, conforme metodologia do Pseudo-Manning (VENTURA, 2011). No programa FLO-2D, foram realizadas simulações de fluidos aquosos e fluidos não-Newtonianos, adicionando as curvas reológicas do material desprendido da Barragem do Fundão. Essas curvas reológicas foram obtidas através de ensaios realizados com reômetros e teste de *slump*. A alteração das velocidades, profundidades máximas atingidas e tempo de chegada de onda, que são parâmetros importantes no planejamento das ações emergenciais e de evacuação, foi analisada para as diferentes premissas utilizadas nas simulações. Nesse sentido, fatores de desempenho foram utilizados para avaliar os resultados das diferentes simulações, ponderando o esforço computacional intrínseco a simulações com maior grau de complexidade, a necessidade de dados de entradas e saídas obtidos com essas modelagens.

ABSTRACT

Mining is an important economic activity in Brazil, which aggregates value into the National Gross Domestic Product. Ore processing generates tailings that are disposed, most often in reservoirs, which usually are considered the cheapest structures for tailings dewatering. The tailings dams have several construction methods, among them the upstream method, which uses part of the tailings to build the dam. This was the case of Fundão dam, a tailings dam owned and operated by Samarco. On November 5, 2015, the Fundão Dam collapsed. Approximately 32 Mm³ of tailings conveyed to the downstream valley, causing deaths, destruction of Bento Rodrigues district, aside to affecting the water bodies and other urban areas downstream to the mouth of the River Doce. The hydraulic simulation of this event was done with the incorporation of the characteristics of the tailings deposited in Fundão, totaling 7 (seven) scenarios ranging from aqueous and hyperconcentrated fluids, uni and bidimensional hydraulic modeling, and HEC-RAS and FLO-2D. When Using HEC-RAS, hyperconcentrated fluid propagation characteristics were set up by adjusting Manning and expansion/contraction coefficients according to the Pseudo-Manning methodology (VENTURA, 2011). Using FLO-2D, simulations were performed of aqueous fluids and non-Newtonian fluids, adding the rheological curves of the material released from the Fundão Dam. These rheological curves were obtained through tests performed with rheometers and slump tests. The changes in velocities, maximum depths reached and wave arrival time, which are important parameters in the planning of emergency actions and evacuation, were analyzed for the different assumptions used in the simulations. In this way, the different simulations were evaluated through performance factors, weighting the intrinsic computational effort to simulations with a greater degree of complexity, the need for input data and the outputs obtained with these models.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	XV
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2 OBJETIVOS E ETAPAS METODOLÓGICAS	7
2.1 OBJETIVO GERAL	7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
2.3 ETAPAS METODOLÓGICAS.....	8
3 REVISÃO DA LITERATURA	10
3.1 REJEITOS PROVENIENTES DOS PROCESSOS MINERÁRIOS	10
3.1.1 <i>Disposição de Rejeitos</i>	11
3.1.2 <i>Processos Físicos dos Rejeitos</i>	16
3.1.3 <i>Reologia dos Rejeitos</i>	17
3.2 RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITOS	25
3.2.1 <i>Histórico de Ruptura de Barragens</i>	25
3.2.2 <i>Aspectos Conceituais</i>	29
3.2.3 <i>Abordagens Simplificadas</i>	30
3.2.4 <i>Abordagem Hidráulica</i>	32
3.3 AVALIAÇÃO DOS MODELOS HIDRÁULICOS	43

4	BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DO FUNDÃO	46
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM DO FUNDÃO.....	48
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL DEPOSITADO NA BARRAGEM	51
4.3	ACIDENTE EM 2015.....	53
5	DESENVOLVIMENTO DOS TRABALHOS.....	62
5.1	INTRODUÇÃO	62
5.2	RECONSTITUIÇÃO DAS INFORMAÇÕES DA RUPTURA DE FUNDÃO.....	65
5.2.1	<i>Visitas às áreas atingidas</i>	<i>65</i>
5.2.2	<i>Entrevistas com testemunhas</i>	<i>68</i>
5.3	ETAPA 1: PARÂMETROS DE ENTRADA NO MODELO.....	70
5.3.1	<i>Hidrograma de Ruptura.....</i>	<i>70</i>
5.3.2	<i>Caracterização Geotécnica dos Rejeitos.....</i>	<i>74</i>
5.3.3	<i>Reologia dos Rejeitos</i>	<i>76</i>
5.3.4	<i>Topografia</i>	<i>79</i>
5.4	ETAPA 2: SIMULAÇÃO HIDRÁULICA	84
5.4.1	<i>Modelos Hidráulicos</i>	<i>84</i>
5.4.2	<i>Propagação da Onda de Cheia</i>	<i>85</i>
5.4.3	<i>Fluxo hiperconcentrado.....</i>	<i>91</i>
5.4.4	<i>Parâmetros de convergência do modelo hidráulico</i>	<i>93</i>
5.5	ETAPA 3: MANCHAS DE INUNDAÇÃO	96
5.6	ETAPA 4: ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	99

6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	101
6.1	RESULTADOS GEOTÉCNICOS	101
6.2	RESULTADOS REOLÓGICOS	103
6.2.1	<i>Reômetro rotacional de palheta coaxial – AR 2000ex.....</i>	<i>104</i>
6.2.2	<i>Reômetro rotacional de cilindro concêntrico</i>	<i>108</i>
6.2.3	<i>Teste de Slump</i>	<i>113</i>
6.2.4	<i>Curvas reológicas.....</i>	<i>115</i>
6.3	HIDROGRAMAS DE RUPTURA	118
6.4	PARÂMETROS DE AJUSTE NA MODELAGEM HIDRÁULICA	123
6.4.1	<i>Pseudo-Manning (HEC-RAS).....</i>	<i>123</i>
6.4.2	<i>Parâmetros reológicos (FLO-2D)</i>	<i>125</i>
6.5	RESULTADOS DA MODELAGEM HIDRÁULICA	125
6.6	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA SIMULAÇÃO HIDRÁULICA.....	139
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	143
	REFERÊNCIAS	147
	APÊNDICES.....	159

“Faço parte dos que pensam que a ciência é belíssima...”

Marie Curie

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Imagem aérea da Barragem do Fundão.....	3
Figura 1.2 – Imagens dos satélites SPOT 6 e 7/HIPARC/AirBus das barragens da Samarco (A) e da região de Bento Rodrigues (B)	4
Figura 3.3 – Companhias mineradoras no Brasil	10
Figura 3.4 – Comparação de volumes para vários tipos de alteamento de barragem. (a) Método de montante. (b) Método de jusante. (c) Método da linha de centro	13
Figura 3.5 – Curva de resistência ao escoamento versus concentração em suspensão de rejeitos. Fonte: Adaptado de Boger (2013).....	15
Figura 3.6 – Esquema de classificação do material, quanto à deformação e às propriedades dos fluidos	20
Figura 3.7 – Comportamento dos fluidos submetidos a tensões de cisalhamento.	22
Figura 3.8 – Comportamento reológico dos fluidos independentes do tempo (Adaptado e traduzido de ABULNAGA, 2002).....	23
Figura 3.9 – Incidentes envolvendo barragens de rejeitos (Adaptado de ICOLD, 2001)	27
Figura 3.10 – Análise das causas de ruptura de barragens de rejeitos (Adaptado de Blight, 2010).....	28
Figura 3.11 – Modelos de propagação de ondas de cheia e <i>Dam Break</i> para fluidos Newtonianos e não-Newtonianos.	34
Figura 4.12 – Localização da Barragem do Fundão (Sub-bacias, Rios, Acessos e Localidades).....	47
Figura 4.13 – Arranjo Geral da Barragem do Fundão com crista na El. 920,00 m	49
Figura 4.14 – Croqui esquemático do corte da Barragem do Fundão	50
Figura 4.15 – Curva Cota Volume – DCL’s + ERA até a El. 920,00 m.....	50
Figura 4.16 – Curva granulométrica (Adaptado de MORGENSTERN <i>et al.</i> , 2016).....	52
Figura 4.17 – Confluência do Rio Gualaxo do Norte com o Rio do Carmo. Carreamento de material e formação de banco de rejeitos na margem esquerda	56
Figura 4.18 – Material heterogêneo carreado para a jusante	57

Figura 4.19 – Detritos arrastados pelo vale do rio, tabuleiro de concreto de ponte (Foto tirada na visita do dia 20/07/2016)	58
Figura 4.20 – Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (Candongá)	59
Figura 4.21 – Lama de rejeitos de mineração da Samarco, na foz do Rio Doce.....	60
Figura 5.22 – Fluxograma da metodologia proposta.....	62
Figura 5.23 – Fotos e respectiva localização da visita a Bento Rodrigues no dia 27/01/2016.....	66
Figura 5.24 – Ponto P2 de coleta no rio Gualaxo do Norte, no dia 20/07/2016.....	67
Figura 5.25 – Trecho impactado pela onda de ruptura da Barragem do Fundão no Rio Gualaxo do Norte no dia 20/07/2016	68
Figura 5.26 – Brecha de ruptura	72
Figura 5.27 – Pontos de coleta das amostras do rejeito para ensaios de caracterização geotécnica e reológica	75
Figura 5.28 – a) Reômetro rotacional AR 2000ex utilizado nos ensaios de reologia na UFES, geometria com palheta Coaxial; b) Reômetro rotacional utilizado pela Ausenco, geometria com cilindro concêntrico	77
Figura 5.29 – Amostras de rejeitos a diferentes concentrações volumétricas	78
Figura 5.30 – Suporte cilíndrico para o teste de <i>Slump</i>	79
Figura 5.31 – Ilustração comparativa entre o píxel de 90 m e 30 m	81
Figura 5.32 – Croqui das seções topobatimétricas levantadas em 2007	82
Figura 5.33 – MDE utilizado na simulação hidráulica.....	83
Figura 5.34 – Vista da extensa planície de inundação em Bento Rodrigues após o acidente (Foto tirada na visita do dia 27/01/2016).....	87
Figura 5.35 – Seção de controle hidráulico presente no trecho simulado (Fotos tiradas na visita do dia 27/01/2016).....	87
Figura 5.36 – Foto panorâmica do trecho simulado, englobando a localização de Bento Rodrigues, o trecho a montante do estreitamento e o sentido do fluxo (Foto tirada na visita do dia 27/01/2016).....	88
Figura 5.37 – Seções Transversais do modelo 1D do HEC-RAS.....	89
Figura 5.38 – Malha computacional do modelo 2D do HEC-RAS	90
Figura 5.39 – Malha computacional do modelo 2D do FLO-2D	91

Figura 5.40 – Área de Bento Rodrigues impactada pela onda de ruptura da Barragem do Fundão (Fonte: Imagem ARYA – 06/11/2015).....	97
Figura 5.41 – Área impactada – canal principal de drenagem, planícies de inundação, florestas e vegetação arrastada (Fonte: Imagem ARYA – 06/11/2015).....	98
Figura 5.42 – Seções transversais para comparação dos modelos HEC-RAS e FLO-2D	100
Figura 6.43 – Curva Granulométrica dos Pontos 1, 2 e 3 coletados em comparação com rejeito lançado na Barragem do Fundão	102
Figura 6.44 – Curvas de fluxo obtidas por incremento logarítmico de tensão (1 a 150 Pa) e incremento logarítmico de taxa (0,01 a 1000 1/s) para $C_v= 50,71\%$	104
Figura 6.45 – Curvas de fluxo – comportamento de materiais viscoelásticos	105
Figura 6.46 – Tensões fixas no tempo	106
Figura 6.47 – Deformação ao longo do tempo para tensões fixas.....	107
Figura 6.48 – Deformação ao longo do tempo para tensões fixas.....	108
Figura 6.49 – Curva reológica da tensão de escoamento	109
Figura 6.50 – Reogramas da amostra do Ponto 1	110
Figura 6.51 – Reogramas da amostra do Ponto 2	111
Figura 6.52 – Reogramas da amostra do Ponto 3	111
Figura 6.53 – Curva reológica de viscosidade.....	112
Figura 6.54 – Concentrações volumétricas (C_v) testadas no teste de <i>Slump</i>	114
Figura 6.55 – Composição das curvas exponenciais de viscosidade para as amostras dos Pontos 1 e 2, obtida pelo reômetro rotacional com cilindro concêntrico e com palheta coaxial.....	116
Figura 6.56 – Composição das curvas exponenciais de tensão de escoamento, para as amostras dos Pontos 1 e 2, obtida pelos reômetros rotacionais (cilindro concêntrico e palheta coaxial) e, para o Ponto 2, adicionando o teste de <i>slump</i>	117
Figura 6.57 – Hidrograma afluente (referente ao hidrograma de ruptura da Barragem do Fundão) e efluente da Barragem Santarém.....	119
Figura 6.58 – Composição do hidrograma de ruptura especificando os volumes de água e sólidos.....	119

Figura 6.59 – Composição do hidrograma de ruptura híbrido especificando as vazões totais de água e de sólidos, com a respectiva concentração volumétrica constante	120
Figura 6.60 – Composição do hidrograma de ruptura híbrido especificando as vazões totais de água e de sólidos, com a respectiva concentração volumétrica discretizada no tempo (Composição 1 – $C_{v\text{ máx}} = 66\%$).....	121
Figura 6.61 – Composição do hidrograma de ruptura híbrido especificando as vazões totais de água e de sólidos, com a respectiva concentração volumétrica discretizada no tempo (Composição 2 – $C_{v\text{ máx}} = 54\%$).....	122
Figura 6.62 – Composição do hidrograma de ruptura híbrido especificando os as vazões totais, de água e de sólidos, com a respectiva concentração volumétrica discretizada no tempo (Composição 3 – $C_{v\text{ máx}} = 54\%$).....	123
Figura 6.63 – Seções transversais do modelo hidráulico unidimensional HEC-RAS..	124
Figura 6.64 – Seções transversais para composição dos hidrogramas de ruptura nos modelos HEC-RAS e FLO-2D	127
Figura 6.65 – Resultados de profundidade (em variação percentual dos cenários base) dos cenários simulados para cada ST.....	128
Figura 6.66 – Perfil profundidade por distância para os cenários simulados	129
Figura 6.67 – Tempo de chegada da onda, para a máxima profundidade, para os cenários simulados.....	130
Figura 6.68 – Zoom no tempo de chegada da onda, para a máxima profundidade, para os cenários simulados – 30 Minutos	131
Figura 6.69 – Progressão da onda de inundação proveniente da ruptura da Barragem do Fundão – tempo de 10, 15, 20, 25, 30 e 60 minutos.....	133
Figura 6.70 – Comparação dos hidrogramas a 0,46 km a jusante da ST-1 nos modelos HEC-RAS (1D e 2D) e FLO-2D (Aquoso e Hiperconcentrado).....	134
Figura 6.71 – Comparação dos hidrogramas a 2,11 km a jusante da ST-1 nos modelos HEC-RAS (1D e 2D) e FLO-2D (Aquoso e Hiperconcentrado).....	134
Figura 6.72 – Comparação dos hidrogramas a 5,26 km a jusante da ST-1 nos modelos HEC-RAS (1D e 2D) e FLO-2D (Aquoso e Hiperconcentrado).....	135
Figura 6.73 – Comparação dos hidrogramas no exutório (aproximadamente 6,3 km da ST-1) dos modelos HEC-RAS (1D e 2D) e FLO-2D (Aquoso e Hiperconcentrado)	135

Figura 6.74 – Comparação das manchas de inundação dos Cenários 1 e 2 (HEC-RAS 1D - aquoso e hiperconcentrado).....	137
Figura 6.75 – Comparação das manchas de inundação dos Cenários 2 e 4 (HEC-RAS 1D e 2D hiperconcentrado)	138
Figura 6.76 – Combinação e Classificação Binária do Cenário 2 – Simulação no HEC-RAS 1D de fluidos hiperconcentrados	140
Figura 6.77 – Resultados do viés e fatores de desempenho F^2 , F^3 e F^4	141
Figura 6.78 – Resultados percentuais de falsos positivos e falsos negativos.....	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Casos ruptura de barragens de rejeitos.....	26
Tabela 3.2 – Caracterização do escoamento em função da concentração de sólidos	33
Tabela 3.3 – Combinações para classificação binária	43
Tabela 3.4 – Indicadores de desempenho binários para utilização em estudos de inundação (Adaptado de Rocha, 2015).....	44
Tabela 4.5 – Volume e tempo de enchimento dos reservatórios.....	49
Tabela 4.6 – Elevação da crista da barragem e velocidade de alteamento entre 25/09/2014 e 26/10/2015	53
Tabela 5.7 – Cota de fundo das Seções topobatimétrica (STB) levantadas	83
Tabela 5.8 – Cenários simulados	85
Tabela 5.9 – Simulações realizadas com diferentes parâmetros no FLO-2D para testes de convergência do modelo.....	95
Tabela 6.10 – Caracterização geotécnica do material coletado e das referências do rejeito lançado na Barragem do Fundão	102
Tabela 6.11 – Resultados de tensão de escoamento (τ_y) e viscosidades (η) dos testes, utilizando o reômetro rotacional de palheta coaxial.....	108
Tabela 6.12 – Relação das Concentrações em massa (C_w) e volumétricas (C_v) dos ensaios realizados.....	109
Tabela 6.13 – Resultados de tensão de escoamento (τ_y) e viscosidades (η) dos testes, utilizando o reômetro rotacional de cilindros concêntricos.....	113
Tabela 6.14 – Resultados do teste de <i>slump</i>	114
Tabela 6.15 – Ajuste dos coeficientes adimensionais para representação dos fluxos hiperconcentrados no modelo unidimensional HEC-RAS (Ventura, 2011).....	124
Tabela 6.16 – Distância das seções transversais em relação a ST-1 (HEC-RAS)	126
Tabela 6.17 – Descrições dos valores do viés e fatores de desempenho	141

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

1D	Unidimensional
2D	Bidimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASI	Agência espacial italiana
C_t	Coeficiente de Courant
C	Coeficiente de contração e expansão
c	Celeridade da onda
C_v	Concentração Volumétrica de sedimento
DCL	Diques de Contenção de Lama
DLR	Agência espacial alemã
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNPM	Departamento Nacional Produção Mineral
DOU	Diário Oficial da União
d_s	Diâmetro dos grãos do sedimento
e_n	Coeficiente de restituição de energia após o impacto
ERA	Empilhamento de Rejeitos Arenosos
F	Índice de desempenho da inundação
FEMA	Federal Emergency Management Agency
g_m	Massa específica da mistura
G_s	Massa específica dos grãos
H	Altura do recipiente no teste de <i>slump</i>
H_b	Altura final da brecha (m)
HEC	Hydrologic Engineering Center
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICOLD	International Commission on Large Dams
l	Comprimento da mistura de Prandtl
LAMES	Laboratório de Mecânica dos Solos
LIDAR	Light Detection And Ranging
LL	Limite de Liquidez

LP	Limite de Plasticidade
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
Mm ³	Milhões de metros cúbicos
MPMG	Ministério Público de Minas Gerais
n	Coefficiente de rugosidade de Manning
NBR	Norma Técnica Brasileira aprovada pela ABNT
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
NRCS	National Resources Conservation Service
NWS	National Weather Service
P1	Ponto de coleta de amostra-1
P2	Ponto de coleta de amostra-2
P3	Ponto de coleta de amostra-3
PAE	Plano de Ações Emergenciais
PAEBM	Plano de Ações Emergenciais de Barragens de Rejeitos
p _s	Pressão intergranular
Q	Vazão (m ³ /s)
R ²	Coefficiente de correlação
s	Altura de queda do <i>slump</i>
SECEX	Secretaria de Comércio Exterior
S _f	Declividade da linha de energia (m/m), equivalente ao termo de perda de carga unitária
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
ST	Seções Transversais
STB	Seções Topobatimétricas
T.S.	Teor de sólidos
TIN	Triangulated Irregular Network
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
USACE	United States Army Corps of Engineers
USGS	United States Geological Survey
USSD	United States Society on Dams

V	Velocidade média computada para a célula
V_w	Volume da água acima do fundo da brecha
Z	Fator de inclinação lateral da brecha de ruptura
ZAS	Zona de Autossalvamento
β	Coefficiente de ajuste para diferentes geometrias
γ	Peso específico
ε	Taxa de cisalhamento
δ	Deformação
Δt	Intervalo de tempo de cálculo computacional
Δx	Distância entre duas seções transversais no HEC-RAS e raiz quadrada da largura do elemento do grid no FLO-2D
η	Viscosidade cinemática
η_p	Viscosidade plástica
μ	Viscosidade dinâmica
μ_a	Viscosidade aparente
ρ	Massa específica do fluido
ρ_s	Massa específica dos grãos
τ_0	Tensão limite dinâmica
τ_{EL}	Tensão limite elástica
τ_{ES}	Tensão limite estática
τ_y	Tensão limite de escoamento
τ	Tensão cisalhante total
τ_c	Tensão coesiva resistente
τ_d	Tensão dispersiva
τ_{mc}	Tensão de Mohr-Coulomb
τ_t	Tensão turbulenta
τ_v	Tensão referente à viscosidade do fluido
\emptyset	Ângulo de repouso do material

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O Brasil é um dos mais importantes países no setor de mineração, considerando que sua produção mineral é uma das maiores do mundo. A mineração é um dos pilares de sustentação da economia brasileira, uma vez que, computando o acumulado dos últimos dez anos, o setor de “minérios e concentrados” agregou 232 bilhões de dólares ao conjunto de reservas cambiais nacionais (IBRAM, 2015), sendo um total de 21,6 bilhões em exportação de minérios no ano de 2016. Destes, 13 milhões somente referente ao ferro (IBRAM, 2017).

O tratamento dos minérios envolve operações como britagem, moagem, filtragem e secagem, sendo a sequência dessas operações a origem dos rejeitos e conseqüentemente das barragens de contenção de rejeitos. O conceito de rejeitos é especificado pela norma NBR 13206 (ABNT, 2006) como “todo e qualquer material não aproveitável economicamente, gerado durante o processo de beneficiamento de minérios”.

A disposição dos rejeitos, em barragens, é o tipo de disposição mais amplamente utilizada. Na grande maioria dos casos, o material tipo “polpa” é disposto hidraulicamente dentro do reservatório (RIBEIRO, 2015), e os rejeitos que possuem granulometrias maiores podem ser utilizados como material de construção da barragem, por exemplo, para alteamento das próprias barragens. As barragens de contenção de rejeitos, construídas ou alteadas com os rejeitos provenientes do beneficiamento da própria mineração, são normalmente as alternativas economicamente mais viáveis. Para isso, é comum que o dique de partida seja construído em solo compactado (RIBEIRO, 2015).

As barragens são susceptíveis a falhas, como qualquer outra obra na engenharia. Se por um lado a probabilidade de ocorrência é baixa, os danos a jusante podem ser catastróficos, principalmente quando o vale a jusante é caracterizado por regiões com população urbana ou rural. Algumas barragens de rejeito possuem materiais com alto índice de contaminação, como arsênio e cianeto, portanto, associadas a um alto risco decorrente de sua ruptura. Nesse sentido, torna-se imprescindível o conhecimento das conseqüências da ruptura de barragens, assim como a envoltória de inundação, inclusive proveniente do fluxo de rejeito. Essas envoltórias

podem ser usadas para classificação e geração dos mapas de risco, para o planejamento em situações de emergência, para a criação do sistema alerta da população a jusante, assim como para a valoração dos danos associados.

Cenários de ruptura de uma barragem de terra de contenção de rejeitos podem ser produzidos pela ação isolada ou combinação de diferentes fatores, tais como: erosão interna (*piping*), galgamento, terremoto, instabilidade de taludes, falhas na fundação e falhas estruturais (ICOLD, 2001), como também pelo efeito de liquefação. A probabilidade de falha de uma barragem de contenção de rejeitos está associada a variáveis tais como o tipo de material que a compõe e o tipo de rejeito disposto em seu reservatório (VICK, 1984).

Existem modelos que utilizam os parâmetros reológicos e geotécnicos para a determinação do impacto a jusante devido à ruptura de barragens de rejeitos, conforme metodologias propostas por Jeyapalan *et al.* (1983) e Hungr (1995). Existem também modelos hidráulicos mais completos que possibilitam a análise da propagação da onda de ruptura de inundação de uma barragem, a partir de um problema clássico do fluxo de canal aberto integrado com a planície de inundação e o regime de escoamento não permanente. Conforme USSD (2013), são modelos de propagação do hidrograma de ruptura de barragem disponíveis o FLO-2D, FLDWAV, DAW-W, HEC-RAS DEBRIS 2D, entre outros. Estes modelos citados são os usualmente utilizados, no setor de engenharia, e possuem recursos distintos e diferentes níveis de complexidade.

Em uma ruptura hipotética de uma barragem de contenção de rejeitos, é possível considerar que o comportamento do escoamento do material resultante desta ruptura seja mais semelhante aos fluxos hiperconcentrados (ou fluidos não-Newtonianos), como, por exemplo, fluidos de Bingham, que possuem propriedades reológicas específicas.

Ressalta-se que, para rejeito de minério de ferro, não são frequentes os estudos que subsidiariam as referências dos parâmetros reológicos para esse tipo de rejeito. Nesse contexto, este trabalho apresenta as características reológicas do rejeito desprendido da Barragem do Fundão, obtidas através dos ensaios reológicos realizados.

No dia 05 de novembro de 2015, em Mariana-MG, houve um acidente envolvendo a ruptura da Barragem de rejeitos do Fundão, da mineradora Samarco, de propriedade da Vale e BHP Biliton.

Este acidente causou mortes, destruição do Distrito de Bento Rodrigues, além de afetar outras áreas urbanas a jusante, como Paracatu de Baixo e Barra Longa. Cerca de 680 km dos rios de jusante foram impactados pela deposição de rejeitos e pluma de turbidez, sendo eles os rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, chegando até a área costeira na foz do Rio Doce, na cidade de Linhares (ES), no Oceano Atlântico. A Figura 1.1 apresenta uma imagem aérea da Barragem do Fundão, anterior à ruptura, podendo-se observar a separação entre o rejeito arenoso e a lama (MORGENSTERN *et al.*, 2016).



Figura 1.1 – Imagem aérea da Barragem do Fundão

Fonte: Adaptado de Morgenstern *et al.* (2016)

Morgenstern *et al.* (2016) citam que a crista da Barragem do Fundão encontrava-se na El. 900,00 m, e o barramento apresentava 110 metros de altura máxima no dia de sua ruptura. A cronologia do evento, detalhada no relatório, iniciou-se alguns instantes após as 14:00 horas, quando foram sentidos tremores de terra, na área da Mina do Germano, durante alguns minutos. Por volta de 15:00 horas, a Barragem do Fundão entrou em colapso e, em aproximadamente 15:45 horas, anúncios, via rádio, informavam que a Barragem do Fundão havia rompido. De acordo com Antunes (2015), cerca de 55 milhões de metros cúbicos de rejeito (água, areia e

resíduos de minério de ferro) foram deslocados para a barragem de jusante e, após 40 minutos, o Distrito de Bento Rodrigues estava soterrado. A Figura 1.2 ilustra, através de imagens de satélite, a região das barragens da Samarco e Bento Rodrigues antes e após o acidente.

Após a ruptura da Barragem do Fundão, a Barragem de Santarém, concebida para abastecimento da unidade e para contenção de sedimentos, localizada imediatamente a jusante, sofreu galgamento. E o material liberado fluiu, pelo córrego Santarém, seguindo pelo Rio Gualaxo do Norte, que deságua no Rio do Carmo a aproximadamente 73 km a jusante, que, por sua vez, é um dos formadores do Rio Doce. Solos, vegetação e outros materiais foram arrastados neste percurso, resultando em uma mistura de rejeitos, solos e detritos vegetais e antrópicos, como pontes e construções, que foram se depositando ao longo das planícies de inundação, das margens e calhas dos cursos de água, e seus tributários na medida em que as velocidades de escoamento permitissem.

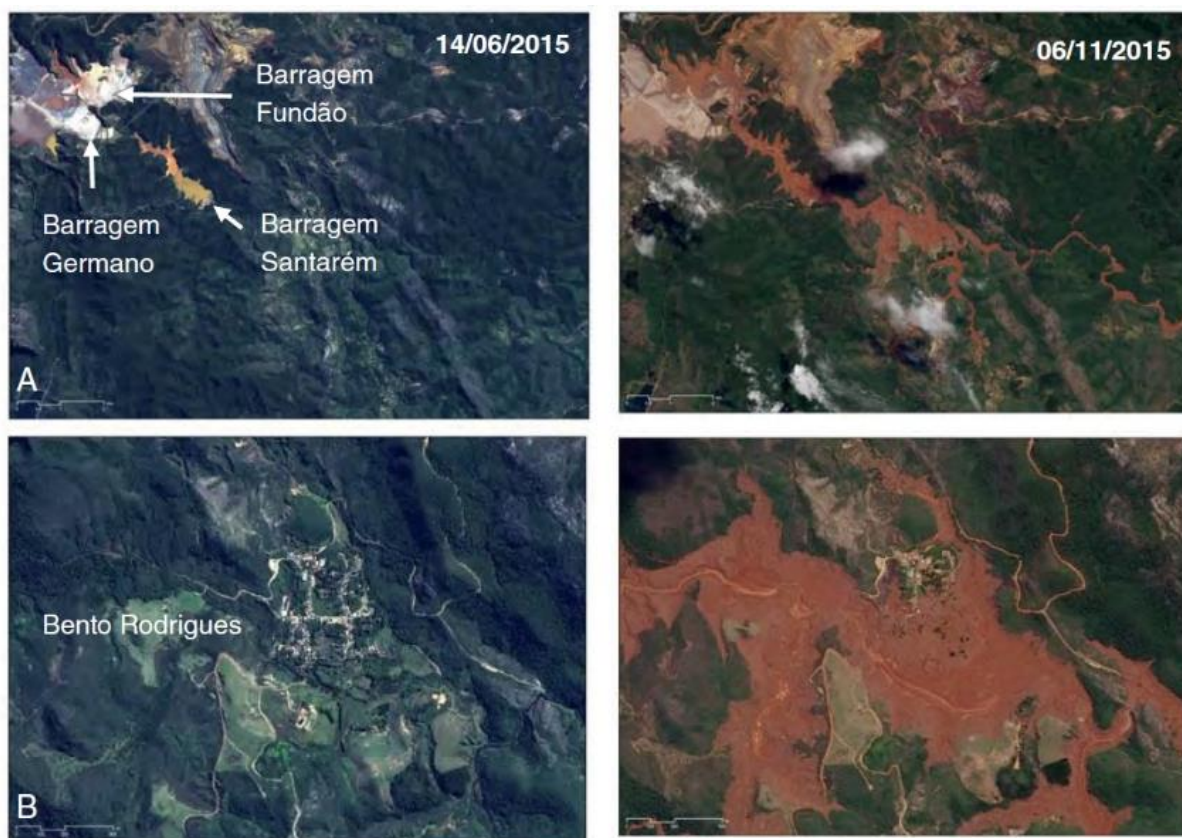


Figura 1.2 – Imagens dos satélites SPOT 6 e 7/HIPARC/AirBus das barragens da Samarco (A) e da região de Bento Rodrigues (B)

Fonte: CBH Doce, 2016

O tema deste trabalho relaciona-se com o arcabouço legal instituído na Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Esta lei 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. Para barragens destinadas à mineração, especificamente para contenção de rejeitos, compete ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) fiscalizar a implantação dos Planos de Segurança das Barragens a serem elaborados pelos empreendedores. Seguindo a tendência nacional e internacional de aprimorar as normativas legais, o DNPM publicou no DOU (Diário Oficial da União), em 19 de maio de 2017, a Portaria nº 70.389.

Com esta publicação, as Portarias 416/2012 e 526/2013, também deste mesmo órgão, ficam revogadas, uma vez que aludem o mesmo arcabouço legal. Dessa maneira, o órgão unifica, em um só documento, os dispositivos legais atribuídos aos órgãos fiscalizadores, referidos nos artigos 8º a 12º da Lei 12.334/2010. Destarte, pretende-se, com essa unificação, aprimorar e refinar os dispositivos presentes na Portaria, além de gerar uma maior praticidade na tentativa de elevar os índices de segurança das barragens.

Na Portaria 70.389 do DNPM, o Artigo 9º, § 1º cita que o Plano de Segurança de Barragem deverá incluir o Plano de Ação de Emergência, quando se tratar de barragens com Dano Potencial Associado Alto ou, em qualquer caso, a critério do DNPM. O Plano de Ação de Emergência, referido como Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (PAEBM), deverá contemplar estudo de inundação, sendo especificados no artigo 2º: *“XIX. Estudo de Inundação: estudo capaz de caracterizar adequadamente os potenciais impactos, provenientes do processo de inundação em virtude de ruptura ou mau funcionamento da Barragem de Mineração, que deverá ser feito por profissional legalmente habilitado para essa atividade cuja descrição e justificativa deverá, necessariamente, constar no PAEBM, sendo de responsabilidade do empreendedor e deste profissional a escolha da melhor metodologia para sua elaboração”*.

Considerando que o estudo de inundação deve ser capaz de representar adequadamente a inundação no caso de uma ruptura da barragem, o desafio surge porque, para as barragens de contenção de rejeitos, não se encontram estudos específicos para estas estruturas e materiais, já

que, em muitos casos, os modelos hidráulicos não possibilitam a simulação de fluidos não-Newtonianos, denominados hiperconcentrados. Ao assumir as hipóteses desenvolvidas para as barragens de água nos estudos de ruptura das barragens de rejeitos, é possível que, em alguns casos, o comportamento físico do problema fique negligenciado, por exemplo, a característica mecânica do fluido a ser propagado, podendo gerar erros na previsão da inundação, como na altura máxima atingida no vale a jusante, as velocidades e os tempos de chegada da onda de inundação, que são aspectos fundamentais para a elaboração de planos de ações emergenciais apropriados.

Ressalta-se que, apesar de não haver uma sequência metodológica única para estudos de *Dam Break*, que englobam as metodologias de formação de brecha, hidrograma de ruptura, modelos hidráulicos a serem utilizados, existe um conhecimento mais seguro para estudos de ruptura provenientes de barragens de água, dado que o fluido a ser propagado é classificado como Newtoniano, e as equações incorporadas aos modelos hidráulicos mais usuais são aplicáveis a este tipo de fluido.

Como já ressaltavam Bryant *et al.* (1983), mesmo quando todos os esforços são feitos para minimizar a probabilidade de ruptura, recomenda-se avaliar as consequências de uma eventual ruptura hipotética. Por conseguinte, o desenvolvimento desta pesquisa possui relevância, pois objetiva incorporar parâmetros para a avaliação da dinâmica do comportamento do fluido proveniente de ruptura de barragens de rejeito, visando realizar análise dos parâmetros de entrada nos modelos de simulação, sendo eles hidrológicos, hidráulicos, topológicos e reológicos dos rejeitos, assim como a utilização de modelos uni e bidimensionais.

Nesse contexto, o estudo de caso da ruptura da Barragem do Fundão pode trazer uma importante contribuição, ao evidenciar quais hipóteses e modelos permitem obter as previsões mais próximas do evento observado e concorrer também para as discussões hidráulicamente embasadas acerca do tema.

2 OBJETIVOS E ETAPAS METODOLÓGICAS

2.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral da pesquisa é realizar a retroanálise da propagação da onda decorrente da ruptura da Barragem do Fundão, com a aplicação de diferentes modelos hidráulicos e hipóteses de simulação, com vistas a avaliar o desempenho dos modelos e a pertinência de diferentes tipos de fluidos.

2.2 *Objetivos específicos*

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Caracterizar geotecnicamente e reologicamente o material desprendido da Barragem do Fundão para incorporação na modelagem de fluidos não-Newtonianos;
- Realizar simulações hidráulicas unidimensionais e bidimensionais, utilizando o HEC-RAS e o FLO-2D, considerando o fluido aquoso e hiperconcentrado;
- Comparar os diferentes mapas de inundação gerados, através da variação dos parâmetros de entrada da simulação hidráulica e aderência à mancha de inundação observada;
- Realizar análise dos resultados da simulação hidráulica, efetuando assim a retroanálise da ruptura da Barragem do Fundão;
- Discutir e avaliar a aplicabilidade dos modelos uni e bidimensionais a este problema, segundo a disponibilidade dos parâmetros de entrada, as características do fluido e a morfologia do vale a jusante.

2.3 *Etapas Metodológicas*

As principais etapas metodológicas desenvolvidas neste estudo são:

- Revisão bibliográfica acerca da mineração no Brasil, a geração de rejeitos, a disposição, os processos físicos e a reologia dos rejeitos, casos históricos de ruptura, abordagem conceitual, simplificada e hidráulica deste tipo de evento, assim como avaliação dos modelos hidráulicos na representação deste complexo fenômeno físico;
- Contextualização e reconstituição do evento de ruptura da Barragem do Fundão ocorrido no dia 05 de novembro de 2015;
- Reconstituição das informações referentes à Barragem e à ruptura, através de visitas à área, entrevista com testemunha e análise da documentação disponibilizada pelo Ministério Público de Minas Gerais e coletadas via internet;
- Determinação dos parâmetros de entrada no modelo hidráulico, como: hidrogramas de ruptura, características geotécnicas e reológicas do material coletado nas visitas à área atingida, composição do MDE SRTM;
- Simulações hidráulicas uni e bidimensionais nos modelos HEC-RAS (1D e 2D) e FLO-2D (2D), variando o tipo de fluido propagado entre aquoso e hiperconcentrado;
- Composição das manchas de inundação e mapeamento dos diferentes cenários apreciados;
- Análise dos resultados incluindo índices de desempenho (variável F) dos modelos hidráulicos, valores de vazão máxima e decaimento, hidrogramas em diferentes trechos, profundidades máximas atingidas e tempo para máxima profundidade.

Fundamentado nas etapas metodológicas descritas acima, analisar a aplicabilidade dos modelos uni e bidimensionais para este tipo de problema, utilizando fluidos aquosos e hiperconcentrados.

Ressalta-se que a questão principal desta pesquisa não transpassa “*como*” e “*o que*” desencadeou a ruptura da Barragem do Fundão, o processo de liquefação e quais os fatores que promoveram a sua ocorrência. É objeto desta pesquisa o comportamento do material no vale a jusante após o desconfinamento do rejeito do reservatório, que se transformou de material sólido para um fluido viscoso.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 *Rejeitos provenientes dos processos minerários*

De acordo com IBRAM (2015), em 2013, o DNPM apurou em 8.870 o número de empresas mineradoras no Brasil, sendo divididas pelas regiões ilustradas na Figura 3.1. Observa-se que a região sudeste possui a maioria das mineradoras, sendo predominantemente formada por micro e pequenas empresas, entretanto com forte influência das grandes companhias, como a Vale, Yamana Gold, Anglo American, dentre outras.

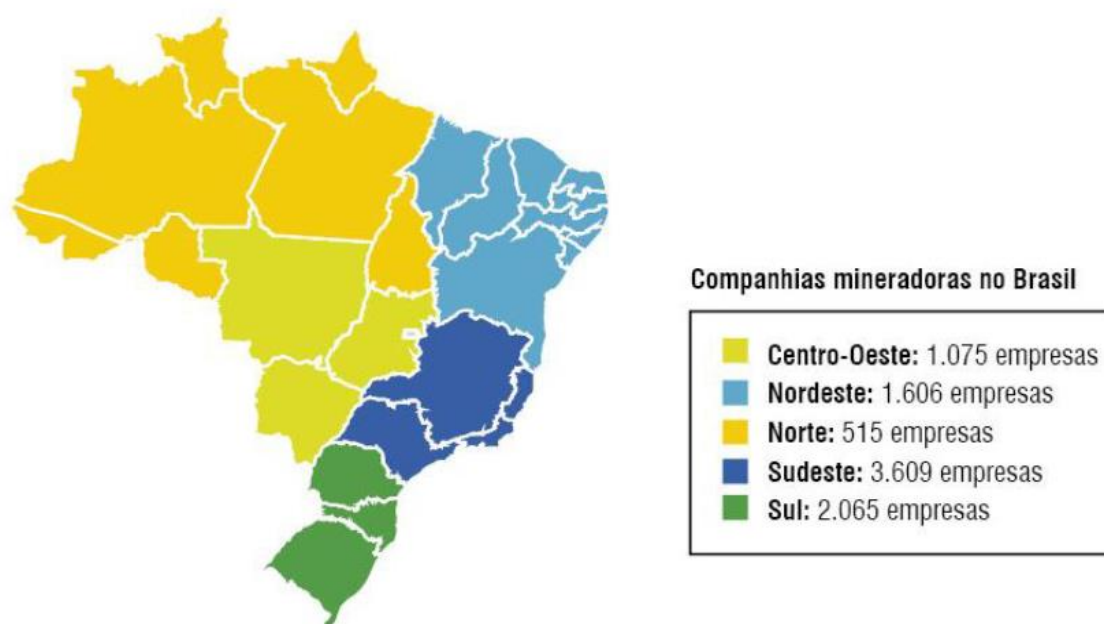


Figura 3.3 – Companhias mineradoras no Brasil

Fonte: (IBRAM, 2015)

De acordo com a Secretaria de Comércio Exterior (SECEX), em relação ao ano de 2014, o minério de ferro liderou, assim como em outros anos, a pauta de exportações na conta de Produtos Básicos, sendo equivalente a 11,47% dos produtos básicos, seguido da soja com 10,34%. Observou-se a diminuição no preço deste minério em -20,54% naquele ano, não abalando a liderança deste segmento.

Na exploração das jazidas e extração do minério, são obtidos materiais de baixo valor agregado, divididos em estéreis, que são materiais provenientes dos processos de decapeamento da mina, e rejeitos, provenientes dos processos de beneficiamento (FERREIRA, 2016), que precisam ser manejados e dispostos em depósitos definitivos. Grande parte dos métodos de concentração dos minérios utiliza processos de flotação, em que se adiciona água ao minério britado e moído, obtendo-se produto concentrado e rejeitos. Por isso, os rejeitos são gerados na forma de polpa e são assim transportados até sua forma final de disposição, seja em reservatório de barragem ou em empilhamentos drenados, conforme permitam suas características geotécnicas e de drenagem. Esses depósitos de rejeitos possuem a função de decantação do material sólido, com melhoria da resistência do material depositado e recuperação de água para o processo.

Boger (2013) salienta que as indústrias de exploração de recursos naturais são os maiores produtores de resíduos do mundo. Grande parte desse rejeito é produzido como uma pasta de partículas finas, denominada “lama”, que é bombeada para um reservatório em que a água excedente será recuperada.

3.1.1 Disposição de Rejeitos

Nas últimas três décadas, as técnicas de disposição de rejeitos têm evoluído constantemente, motivo este impulsionado por maior exigência dos órgãos ambientais, devido ao aumento expressivo nos volumes gerados, à exaustão de áreas para a disposição, como também a maior dificuldade nas outorgas para utilização de água em processos de beneficiamento (RIBEIRO, 2015). Sobretudo, a evolução, nas técnicas de disposição de rejeitos, deu-se pelo histórico de acidentes envolvendo este tipo de estrutura, como as barragens.

Além de não possuírem um valor econômico significativo associado, o rejeito traz uma constante preocupação para as empresas que precisam realizar a sua disposição e, para isso, procuram a combinação de fatores como: minimização dos impactos ambientais e menor custo para sua contenção e segurança. Uma vez que a separação dos processos de disposição podem se dar quanto à concentração dos rejeitos (polpa, pasta ou torta) ou quanto à estrutura (empilhamentos drenados ou barragens de rejeitos), aspectos econômicos influenciam as companhias a optarem pela disposição dos rejeitos em sistemas de barragens, especialmente utilizando o próprio rejeito como parte da estrutura do barramento.

Outro fator importante, na disposição dos rejeitos, é a capacidade de armazenamento do reservatório, que está diretamente ligada às condições de velocidade de lançamento da polpa que o alimenta, assim como os fatores topográficos, hidrológicos, clima, velocidade de deposição de rejeitos e extensão do eixo do barramento. Para o dimensionamento dos reservatórios, a velocidade de sedimentação da parcela de lama se torna um fator crítico. Entretanto, para a parcela grossa dos rejeitos, a velocidade de sedimentação é elevada, não sendo o fator preponderante do dimensionamento (LUZ *et al.*, 2010).

Luz *et al.* (2010) ressaltam que os rejeitos de mineração possuem grande diversidade nas características dos materiais depositados, podendo conter variações significativas em termos de diluição ou comportamento reológico, apresentando características plásticas, como as argilas (lamas), ou não plásticas, como as areias (materiais grossos).

O documento elaborado pelo Comitê Internacional de Grandes Barragens ICOLD (1989) cita que a técnica de alteamento por montante foi aplicada na grande maioria das barragens construídas no passado. Soares (2010) menciona que método de alteamento por montante consiste, muitas vezes, em construção inicial de pequenos diques, sendo posteriormente lançado o rejeito no topo destes diques. O processo de alteamento ocorre com a parcela seca e segue uma sequência de deposição, constituindo camadas fofas com o próprio rejeito de elevada compressibilidade ICOLD (2001).

Como estes materiais se encontram em estado de saturação completa e com baixos índices de permeabilidade, caso haja a aplicação repentina de pressões externas, a fase sólida pode se transformar em líquida, ao absorver parte ou a totalidade desta pressão aplicada. Nesse caso, o rejeito poderá sofrer o processo de liquefação, fluindo como um líquido viscoso. Nos solos grossos, este evento é bastante raro, sendo comum nos solos de granulometria arenosa mais fina (SOARES, 2010). Sendo assim, os alteamentos compostos por rejeitos devem conter de 40 a 50% de areia e polpa com alta porcentagem de sólidos, que pode ser obtida, por exemplo, pelo processo de ciclonagem da polpa (ERAZO LOZANO, 2006).

Portanto, apesar de ser o método mais rentável, uma vez que maximiza o volume de armazenamento (BALLARD *et al.*, 2011), a configuração de montante expõe a barragem a

riscos de rupturas devido à possibilidade de elevação da linha freática e processos de liquefação, visto que o rejeito se encontra fofo e saturado (RIBEIRO, 2000) e com possibilidade de redução da resistência estrutural em caso de terremoto (BALLARD *et al.*, 2011).

Observa-se que barragens construídas com rejeito possuem características geotécnicas inferiores, se comparadas àquelas construídas com solos de empréstimo ou estéril proveniente da lavra, porque o corpo da barragem se comporta como um aterro hidráulico, sendo o rejeito lançado sem controle das variáveis que influenciam o processo de deposição (EHAZO LOZANO, 2006).

De acordo com Erazo Lozano (2006), o método de alteamento por jusante possui melhores condições de estabilidade, se comparado ao método de montante, porém, o volume necessário para o alteamento de montante (*underflow* da ciclonagem dos rejeitos, material de empréstimo ou estéril da lavra) pode chegar a ser três vezes superior, impactando no custo total do projeto, conforme ilustrado na Figura 3.2. Logo, o método de montante é o mais utilizado pela maioria das mineradoras devido principalmente à sua vantagem econômica.

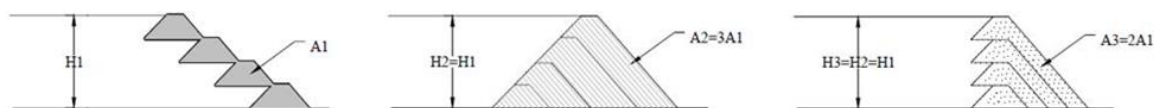


Figura 3.4 – Comparação de volumes para vários tipos de alteamento de barragem. (a) Método de montante. (b) Método de jusante. (c) Método da linha de centro
Fonte: (EHAZO LOZANO, 2006).

Erazo Lozano (2006) ressalta que o método de disposição e a composição da polpa (tipo de fluido de transporte, distribuição granulométrica, geometria dos grãos, textura e densidade, porcentagem de sólidos por peso da polpa) definem o comportamento de segregação dos materiais dispostos e, conseqüentemente, afetam diretamente a geometria do corpo da barragem.

Ribeiro (2000) menciona que o conhecimento dos efeitos das variáveis hidráulicas e sua importância, no processo de formação do depósito, poderiam otimizar o processo construtivo e

garantir a qualidade dos aterros hidráulicos ou barragens alteadas por montante. As análises de laboratório, apesar das possíveis limitações relativas ao efeito de escala e dificuldade de realização dos ensaios, têm apresentado um potencial importante na avaliação da densidade, segregação, geometria, tipo de fluido e estrutura das barragens. É inegável a importância do controle geotécnico, associado a um processo de deposição. Durante a fase de construção e operação da barragem, poder-se-á reduzir a gama de fatores que prejudicam o desempenho e a segurança dessas estruturas, reduzindo os fatores que poderiam levar a estrutura a entrar em colapso.

Considerando a aplicabilidade do método de montante, seria importante definir uma metodologia de controle que pudesse assegurar a qualidade dessas estruturas e torná-las mais seguras, entretanto, isso só será possível a partir do conhecimento das variáveis envolvidas no processo, como as características reológicas e geotécnicas.

Os principais parâmetros reológicos de importância para a engenharia de barragens são a viscosidade e a tensão limite de escoamento (*Yield Stress*). Estes parâmetros variam exponencialmente com a concentração volumétrica (ou teor de sólidos) do rejeito (BOGER, 2013).

A Figura 3.3 apresenta a correlação entre a resistência dos rejeitos ao escoamento, ou tensão limite de escoamento, com a concentração de sólidos ou consistência, sendo separados em três classes: polpa, pasta e torta (BOGER, 2013). A variação da resistência dos rejeitos ao escoamento é perceptível com o aumento da concentração de sólidos.

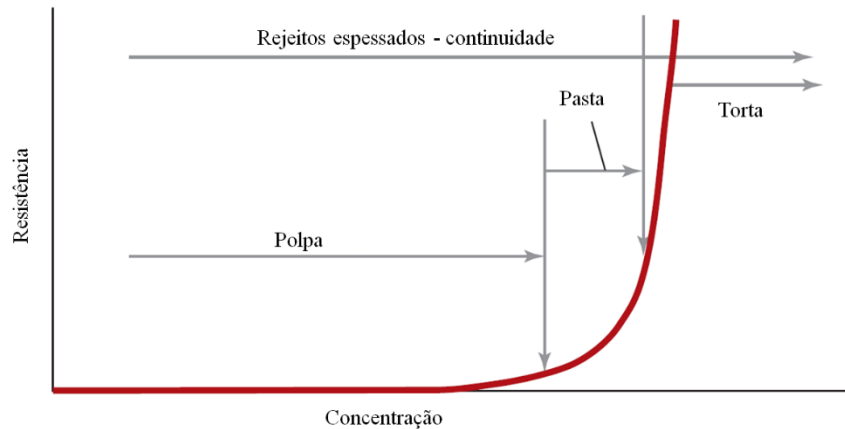


Figura 3.5 – Curva de resistência ao escoamento versus concentração em suspensão de rejeitos. Fonte: Adaptado de Boger (2013)

Certos materiais não podem ser rotulados como sólidos ou fluidos, como o caso dos rejeitos, pois existem variáveis que influenciam diretamente no seu comportamento. De acordo com Boger (2013), ao aplicar um amplo intervalo de tensões a diferentes materiais no devido tempo, é possível observar sólidos se comportando como líquidos e vice-versa.

Nesse contexto, tratam-se dos rejeitos como fluidos para o estudo do comportamento reológico, incluindo a determinação da tensão limite de escoamento do material, no qual, ultrapassado este valor, o material deixa de se comportar como um sólido e entra em movimento, como um fluido viscoso.

As etapas de processamento mineral, bem como de armazenamento do rejeito envolvem suspensões, mistura de minério fino com uma fase líquida, normalmente com água (FERREIRA *et al.*, 2005). Dependendo do teor de sólidos na polpa, o material submetido a um esforço externo, pode ter seu comportamento semelhante ao de um fluido não-Newtoniano, a partir da superação da tensão limite de escoamento deste material.

Assim como cita O'Brien & Julien (1985), ressalta-se que os ensaios realizados corroboram com o entendimento das propriedades físicas e reológicas dos fluxos hiperconcentrados, sendo caracterizados principalmente pelas curvas de:

- Tensão cisalhante x Taxa de cisalhamento;
- Viscosidade x Concentração volumétrica;
- Tensão de escoamento x Concentração volumétrica.

3.1.2 Processos Físicos dos Rejeitos

A previsão das propriedades físicas, geotécnicas e reológicas dos rejeitos depositados é de fundamental importância para a avaliação dos possíveis impactos causados pela ruptura das diferentes estruturas de disposição.

Assim como ressalta Ribeiro (2015), porquanto a mistura entre água e rejeitos é lançada nas barragens ou disposta através de algum outro mecanismo, inicia-se o processo de sedimentação e adensamento. O transporte da usina de beneficiamento até o reservatório é realizado por rejeitodutos, sendo, no local de lançamento, encontrada a condição saturada do rejeito, até que ocorra o processo de adensamento e saturação, eliminando a água através de drenagem e/ou evaporação (FERREIRA, 2016).

Por conveniência, geralmente, no bombeamento da lama para os reservatórios, os rejeitos são lançados com baixa concentração de sólidos, apresentando comportamento hidráulico semelhante ao da água (fluido Newtoniano). No entanto, a decantação das partículas sólidas em suspensão e posterior recirculação da água liberada poderá resultar, quando da ruptura desse reservatório, em um fluido com alto teor de sólidos, podendo apresentar características de um fluido não-Newtoniano.

Ribeiro (2015) cita que existem diversos fatores que influenciam nos fenômenos de sedimentação, adensamento e ressecamento, sendo eles: o tipo de rejeito, o método de disposição, o clima local, as condições da fundação e o método para recuperação da água para o processo. Todavia, destaca-se que a granulometria é o mais importante, uma vez que impacta diretamente nas relações das partículas sólidas com a água.

No estágio final do processo de beneficiamento, o adensamento da polpa pode ser feito através do espessamento. Na maioria dos projetos de mineração, é concebida a recuperação da água para a reutilização no processo, sendo, para isso, prevista a utilização de espessadores e hidrociclones (LUZ *et al.*, 2010). A parcela composta por grãos mais grossos do rejeito (*underflow*) pode ser utilizada na construção do maciço, sendo a fração mais fina (*overflow*) lançada no reservatório.

De acordo com Ribeiro (2015), a sedimentação dos rejeitos arenosos acontece de maneira rápida, porém esta não é a característica dos rejeitos que possuem parcelas significativas da fração argilosa, já que sofrem influência do peso próprio, no processo de consolidação, e possuem altos volumes de vazios. Nesse caso, o processo de adensamento é realizado pela sedimentação, representando, nesta situação, o volume do reservatório indispensável para o armazenamento dos rejeitos (LUZ *et al.*, 2010).

Outro processo físico que ocorre nas barragens de rejeitos é o ressecamento. Quando a disposição dos rejeitos cessa, geralmente na fase final de vida útil da mina, o processo de consolidação continua a ocorrer, começando o dessecamento do material, formando trincas na camada superficial do solo (RIBEIRO, 2015).

3.1.3 Reologia dos Rejeitos

Reologia é a ciência que estuda como a matéria se deforma ou escoar, quando está submetida a esforços originados por forças externas (VLIET & LYKLEMA, 2005).

Machado (2002) propõe que a deformação de um material pode ser estudada segundo diferentes modelos conceituais, a saber:

- Corpo elástico ideal;
- Fluido viscoso ideal; e
- Comportamento viscoelástico.

Um corpo elástico ideal possui a capacidade de se deformar reversivelmente, ou seja, quando é aplicado um esforço e depois é aliviado, o material recupera seu volume e forma original imediatamente após o alívio.

Os fluidos viscosos ideais se deformam irreversivelmente quando uma força é aplicada, sendo que a tensão causa uma deformação que é aliviada através do escoamento. Ou seja, um corpo viscoso ideal não pode sustentar uma tensão, visto que a mesma é aliviada através do escoamento.

Os fluidos viscoelásticos são definidos como materiais que apresentam um comportamento dual, em que a energia do escoamento será parcialmente dissipada, sendo o restante capaz de ser acumulada na estrutura do fluido (MACHADO, 2002). A maioria dos corpos reais não possuem comportamentos de sólidos e nem como líquidos ideais, apresentando comportamentos reológicos viscoelásticos, ou seja, são parcialmente viscosos e elásticos, situando-se entre o líquido e o sólido ideal.

Essa classificação e suas respectivas definições, apresentadas a seguir, advêm do início dos estudos reológicos. Com o desenvolvimento dos viscosímetros e posteriormente dos reômetros capazes de realizar ensaios a uma amplitude de taxas de cisalhamento mais amplas, percebeu-se que muitos materiais não se comportam de forma tão restritiva como as definições propunham. Todavia, ainda são empregadas para a compreensão didática dos resultados reológicos.

Ribeiro (2015) cita a viscosidade como a principal característica reológica do fluido, pois este parâmetro mede a capacidade de um material escoar sob uma aplicação de tensão de cisalhamento externa.

A definição dos termos viscosidade, tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento foi realizada por Machado (2002) e é especificada a seguir:

- ✓ Viscosidade é a resistência de um fluido contra qualquer mudança posicional de seu elemento volumétrico.

- ✓ Tensão de cisalhamento é a força aplicada por unidade de área a ser cisalhada, necessária para manter o escoamento do fluido. A resistência ao escoamento é quem solicita esta tensão, qual seja:

$$\tau = F / A \quad (1)$$

- ✓ Taxa de cisalhamento mede o grau de deformação ou gradiente de velocidade, sendo o deslocamento das partículas ou planos de fluido e inter-relacionando com as distâncias entre os mesmos, ou seja, relaciona a diferença de velocidades entre as partículas ou planos vizinhos. Portanto:

$$\varepsilon = \Delta v / \Delta y \quad (2)$$

Em fluidos viscosos ideais, a tensão de cisalhamento (τ) é proporcional à taxa de cisalhamento, sendo denominado como viscosidade dinâmica (μ) a constante de proporcionalidade (MACHADO, 2002):

$$\tau = \mu * (\Delta v / \Delta y) \quad (3)$$

A viscosidade cinemática é dada pela viscosidade do fluido dividida pela massa específica do fluido (ρ):

$$\nu = (\tau / \varepsilon) / \rho \quad (4)$$

1.1.1.1 Fluidos Viscosos

A classificação dos fluidos viscosos pode ser realizada em função do seu comportamento reológico. Os fluidos podem, essencialmente, ser classificados como Newtonianos e não-Newtonianos (BISCO, 2009). Os fluidos Newtonianos são as substâncias que, em regime de escoamento laminar, apresentam uma proporcionalidade linear entre a tensão de cisalhamento (τ) aplicada e o fluxo de cisalhamento (ε) resultante dessa força externa. Nessas condições, mantém-se a viscosidade constante e única, sendo exemplos desse tipo de fluido a água e a glicerina.

Fluidos não-Newtonianos são caracterizados pela relação não linear entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento, sendo a viscosidade desses fluidos variável com a magnitude da taxa de cisalhamento. Galindo (2013) cita que os fluidos não-Newtonianos podem ser divididos em 3 grupos:

- Fluidos independentes do tempo: fluidos cuja velocidade é dependente exclusivamente da taxa de cisalhamento;
- Fluidos dependentes do tempo: a viscosidade depende da taxa de cisalhamento, como também do tempo de cisalhamento;
- Fluidos viscoelásticos.

A Figura 3.4 ilustra o esquema proposto de classificação do material quanto à deformação e às propriedades dos fluidos.

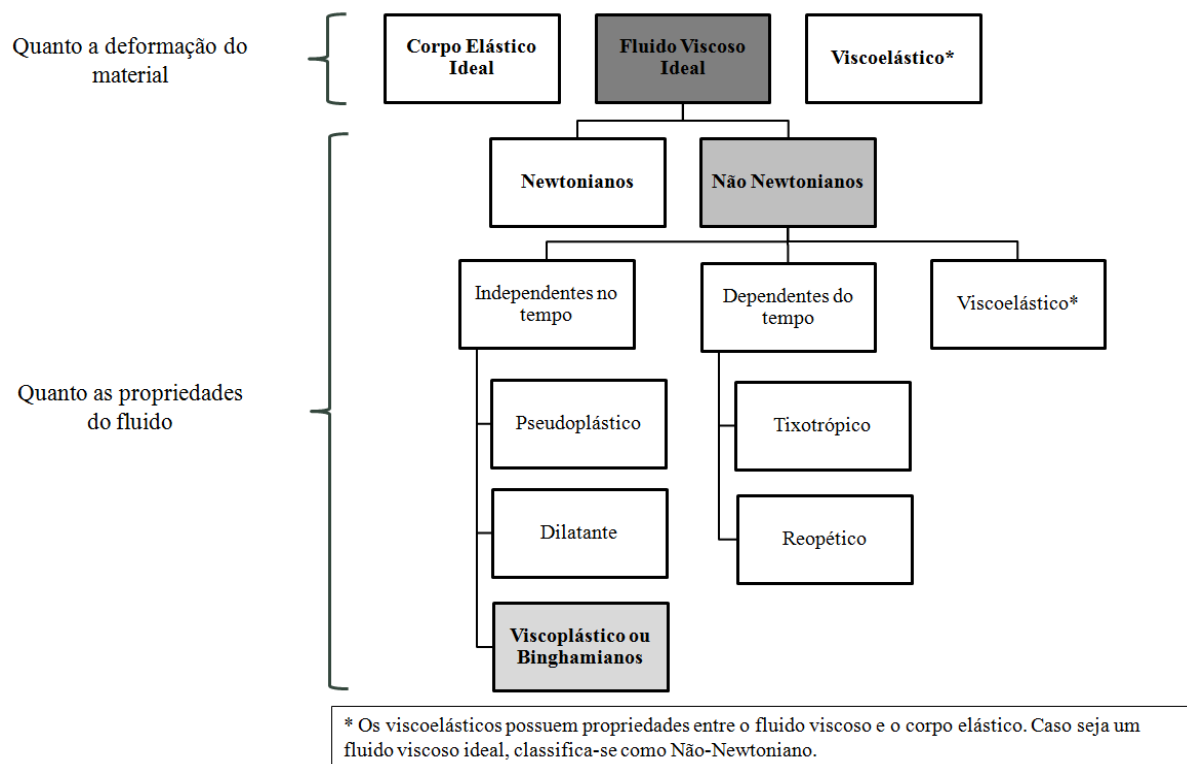


Figura 3.6 – Esquema de classificação do material, quanto à deformação e às propriedades dos fluidos

Os fluídos não-Newtonianos, dependentes do tempo, têm sua viscosidade afetada devido à taxa de cisalhamento aplicada, bem como ao tempo em que a tensão cisalhante ocorre (BISCO, 2009). Os subgrupos, pertencentes a esses fluidos, são os Reopéticos e os Tixotrópicos, os quais apresentam características opostas. As substâncias que apresentam um comportamento de fluxo reopético são caracterizadas pelo aumento da viscosidade durante o cisalhamento. Já os tixotrópicos apresentam um decréscimo na viscosidade, à medida que o cisalhamento é constante com o tempo.

Quanto aos fluidos com características reológicas independentes do tempo, tem-se os dilatantes e os pseudoplásticos, cuja viscosidade depende da taxa de cisalhamento. As substâncias dilatantes possuem uma proporcionalidade direta entre a taxa de cisalhamento e a viscosidade, ou seja, a viscosidade aparente tende a crescer com o aumento da deformação. Já nos fluidos pseudoplásticos, seu comportamento é inverso ao observado pelos dilatantes (SCHRAMM, 2006). De acordo com Galindo (2013), os fluidos pseudoplásticos geralmente não possuem tensão residual, começando a escoar sob a ação de tensões de cisalhamento infinitesimais.

Os fluidos viscoplásticos ou Binghamianos, também independentes do tempo, são caracterizados pela necessidade de uma tensão inicial de cisalhamento para começarem o escoamento (GONÇALVES, 2014). Em outras palavras, estes fluidos requerem aplicação de uma tensão mínima, denominada tensão limite de escoamento (*yield stress* - τ_y), para que haja alguma deformação cisalhante, ou seja, o material se comporta como sólido até que a tensão mínima de escoamento seja excedida, iniciando assim o movimento. A partir desse gatilho, a relação é linear entre a tensão e a taxa de cisalhamento, ou seja, escoam conforme o fluido Newtoniano.

No modelo de Bingham, que é um modelo mais simples e tradicional, a viscosidade tende ao infinito, em baixas taxas, e decresce subitamente a partir do início do movimento do fluido (TARCHA, 2014). A resistência ao fluxo é criada pela interação entre as partículas e a água, sendo representada pela tensão de escoamento (τ_y) e uma viscosidade plástica (η_p), RIBEIRO (2015). A Figura 3.5 ilustra o comportamento do fluido e suas diferentes relações entre tensões cisalhantes e deformações.

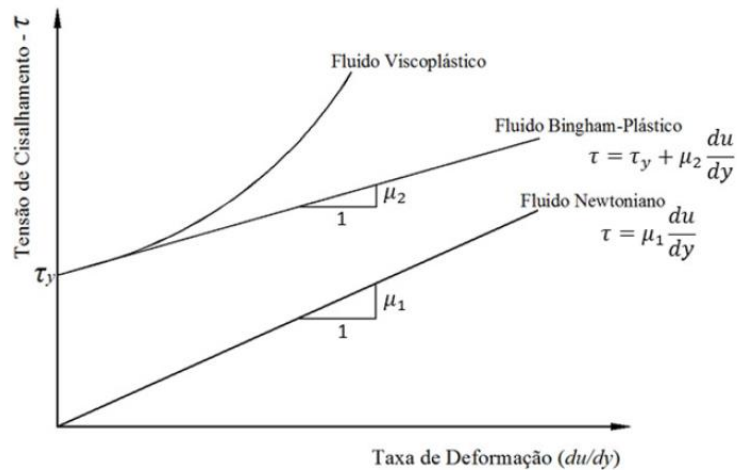


Figura 3.7 – Comportamento dos fluidos submetidos a tensões de cisalhamento.
 Fonte: Adaptado de O'BRIEN e JULIEN, 1985.

O fluido Herschel-Bulkley se assemelha ao modelo Binghamiano, devido à necessidade da tensão inicial para o início do escoamento. Entretanto, o último não possui a proporcionalidade linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, após a tensão de escoamento apresentada pelo primeiro (GONÇALVES, 2014).

Bird *et al.* (1977 *apud* Galindo 2013) descreve que os fluidos Binghamianos são dispersões que podem formar uma rede de interpartículas mantidas por forças ligantes em repouso, que são responsáveis por restringirem a mudança de posição dos elementos, caracterizando um material sólido com alta viscosidade. Destarte, as forças externas, se menores do que aquelas que formam a rede das interpartículas, deformam elasticamente o material sólido. Não obstante, somente quando essas forças externas ultrapassam as forças de ligação entre as partículas, é que a estrutura entra em colapso e inicia a deformação / escoamento. Quando isso acontece a tensão limite de escoamento é excedida, os elementos podem mudar de posição irreversivelmente, transformando o material sólido em líquido e escoando.

A Figura 3.6 ilustra os comportamentos reológicos, sendo a tensão limite de escoamento (τ_y) e a viscosidade aparente (μ) em função da taxa de deformação

dos fluidos independentes do tempo.

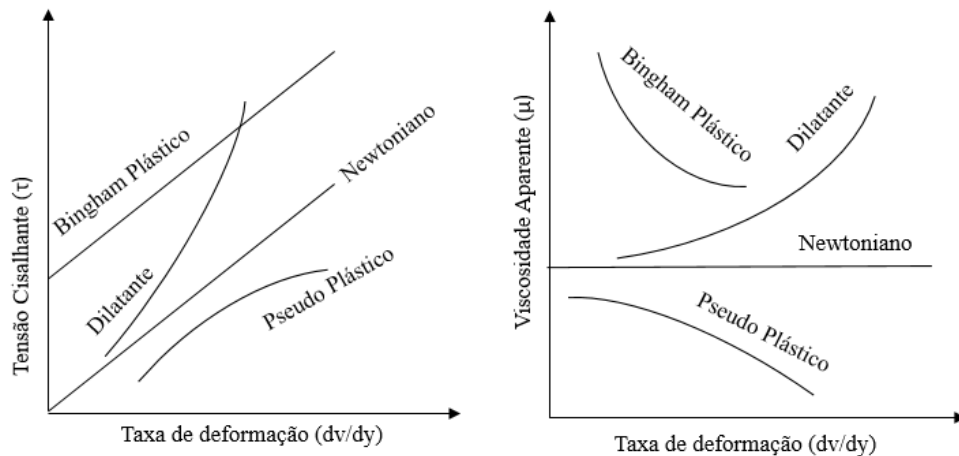


Figura 3.8 – Comportamento reológico dos fluidos independentes do tempo (Adaptado e traduzido de ABULNAGA, 2002)

1.1.1.2 Reometria

Reometria é o termo utilizado para a descrição do conjunto de técnicas experimentais, adotadas na determinação das propriedades reológicas, que são a viscosidade e a tensão limite de escoamento (NASCIMENTO, 2008). Para a determinação dos parâmetros reológicos, foram desenvolvidos equipamentos específicos, os viscosímetros e os reômetros.

Machado (2002) cita os viscosímetros como sendo equipamentos que, por meio de cisalhamento contínuo, permitem determinar os parâmetros viscosos do fluido. Os reômetros, contudo, vão mais além, uma vez que possuem capacidade de medir propriedades viscoelásticas de sólidos, semi-sólidos e fluidos. Assim como ressalta Ribeiro (2015), os reômetros constroem reogramas completos, incluindo o comportamento do material variável no tempo (por exemplo, tixotrópico ou reopético). Já os viscosímetros determinam a resistência ao fluxo para uma sollicitação específica.

De acordo com Akroyd e Nguyen (2003), a obtenção das propriedades reológicas torna-se complexa, quando as amostras ensaiadas são caracterizadas por suspensões heterogêneas de alta densidade das partículas, como o caso das suspensões minerais. Sendo assim, a

homogeneidade da mistura, durante a realização dos ensaios, é uma característica importante para a obtenção de propriedades reológicas mais precisas e confiáveis.

Os reômetros rotacionais são instrumentos nos quais a imposição de velocidade circular, para a rotação dos corpos, resulta na determinação da resistência viscosa e na tensão para início de escoamento do fluido ensaiado (BISCO, 2009). Estes tipos de equipamentos possuem várias geometrias, como a palheta coaxial, placas paralelas, cone-placa cilindro concêntrico, sendo que a escolha deste elemento está atrelada às características físicas das amostras e condições de análise (NASCIMENTO, 2008). Ressalta-se que os reômetros são os equipamentos mais completos para as medições das grandezas que caracterizam as propriedades reológicas.

De uma maneira geral, os reômetros rotacionais podem funcionar com tensão fixa, taxa de cisalhamento fixa ou incremento da tensão. De acordo com Galindo (2013), os equipamentos rotacionais podem ser classificados quanto à variável controlada no ensaio (tensão ou deformação controlada) ou em relação à geometria do sensor.

Um aspecto negativo da imposição de tensão é que não se mede um valor de quebra, mas uma faixa. Em um momento é imposto um valor insuficiente para ruptura do material e, no instante seguinte, uma tensão pouco ou muito superior ao valor limite. É uma limitação do método que torna necessário configurar intervalos de tensão pequenos na proximidade da tensão limite estática. Basicamente, o incremento da tensão ou da taxa de deformação pode ocorrer continuamente ou por passo a passo. O incremento em passos claramente permite um controle superior na acurácia do ensaio, no sentido de facilitar a identificação de que o regime permanente foi atingido (TARCHA, 2014).

Outro método mais simples, para uma medição de ponto único da tensão de escoamento, é o teste de *Slump*. Este teste foi originalmente desenvolvido para testar a trabalhabilidade do concreto, mas adaptações são empregadas para sua utilização nos materiais minerais (CLAYTON *et al.*, 2003).

Basicamente, o *Slump* se caracteriza em colocar um material tipo pasta em um recipiente aberto em ambas as extremidades. O recipiente é então levantado, e a altura do material em relação à altura original do recipiente é medida. Essa é a altura da queda do teste (BOGER, 2013). As

equações 5, 6 e 7 sintetizam os cálculos necessários para a determinação da tensão limite de escoamento a partir do teste de *slump* (CLAYTON *et al.*, 2003; PASHIAS *et al.*, 1996 & BOGER, 2013): BOGER, 2013):

$$s' = \frac{s}{H} \quad [5]$$

$$\tau_{y'} = 0,5 - 0,5 \times \sqrt{s'} \quad [6]$$

$$\tau_y = \tau_{y'} \times \rho g H \quad [7]$$

Nas quais:

- τ_y é a tensão limite de escoamento (Pa);
- $\tau_{y'}$ é a tensão de escoamento adimensional;
- ρ é a massa específica do material (kg/m³);
- H é altura total do recipiente (mm);
- s é a altura de abatimento do cone ou cilindro, denominado *slump* (mm);
- s' é a medida do *slump* adimensional;
- g é a aceleração da gravidade, adotada com valor de 9,81 m/s².

3.2 **Ruptura de Barragens de Rejeitos**

3.2.1 **Histórico de Ruptura de Barragens**

Rupturas de estruturas de contenção de rejeitos são eventos catastróficos, nos quais a massa de rejeito flui distâncias consideráveis, impondo sérios riscos à segurança das pessoas que se

localizam a jusante, assim como podem gerar devastação econômica e ambiental (BRYANT *et al.*, 1983).

Assim como se pode observar nos últimos anos, Blight *et al.* (2003) também citam que, em anos recentes, aconteceram rupturas catastróficas de estruturas projetadas e controladas com cuidados. Na Tabela 3.1 estão listados alguns acidentes envolvendo barragens de rejeito, incluindo o número de óbitos, a localização e o tipo de minério explorado.

Tabela 3.1 – Casos ruptura de barragens de rejeitos

Fonte: Wise Uranium [s.n]

Ano	Localização	Nº vítimas fatais	Tipo de minério
1994	Merriespruit, África do Sul	17 mortos	Ouro
2001	Sebastião das Águas Claras (Nova Lima, MG, Brasil)	2 mortos / 3 desaparecidos	Ferro
2007	Miraí, MG, Brasil	-	Bauxita
2010	Kolontár, Hungria	10 mortos	Bauxita
2014	Mount Polley mine, Canadá	-	Ouro, cobre
2014	Herculano (Itabirito, MG, Brasil)	2 mortos / 1 desaparecido	Ferro
2015	Barragem Fundão (Mariana, MG, Brasil)	18 mortos / 1 desaparecido	Ferro
2016	Dahegou Village, China	-	Bauxita
2017	Tonglvshan Mine, Hubei province, China	2 mortos / 1 desaparecido	Cobre, ouro, prata, ferro

Em um inventário de 18.401 minas, a taxa de ruptura de barragens de rejeitos, nos últimos cem anos, pode ser estimada em 1,2% (ICOLD, 2001). Azam & Li (2010) estimam que, para as barragens de água, esse valor seja muito menor, na casa de 0,01%. Muitos trabalhos apresentam estatísticas acerca de rupturas de barragens (e.g. ICOLD, 2008; Azam & Li, 2010; Rico *et al.*, 2008), analisando diferentes parâmetros de ruptura, como o tempo, altura da barragem, método construtivo ou causa de instabilidades. Ressalta-se que muitas rupturas não possuem informações suficientes sobre o evento, como causa e/ou extensão do impacto no vale a jusante (ROCHA, 2015). ICOLD (2001) cita que este fato se dá, muitas vezes, pela relutância dos

proprietários das barragens em relatar incidentes ou acidentes ocorridos, devido ao receio de sofrerem sanções como a perda de licença de operação.

A partir de um inventário de 3.500 barragens, os dados levantados por Davies (2002) apontam que, no período entre 1970 a 2001, ocorreram, no mundo, em média, pelo menos de 2 a 5 acidentes por ano, resultando em uma probabilidade de falha anual de 1/700 a 1/1750 por barragem.

A Figura 3.7 apresenta um gráfico que ilustra o número de incidentes envolvendo barragens de rejeitos, classificados pela causa da ruptura e pelo método construtivo.

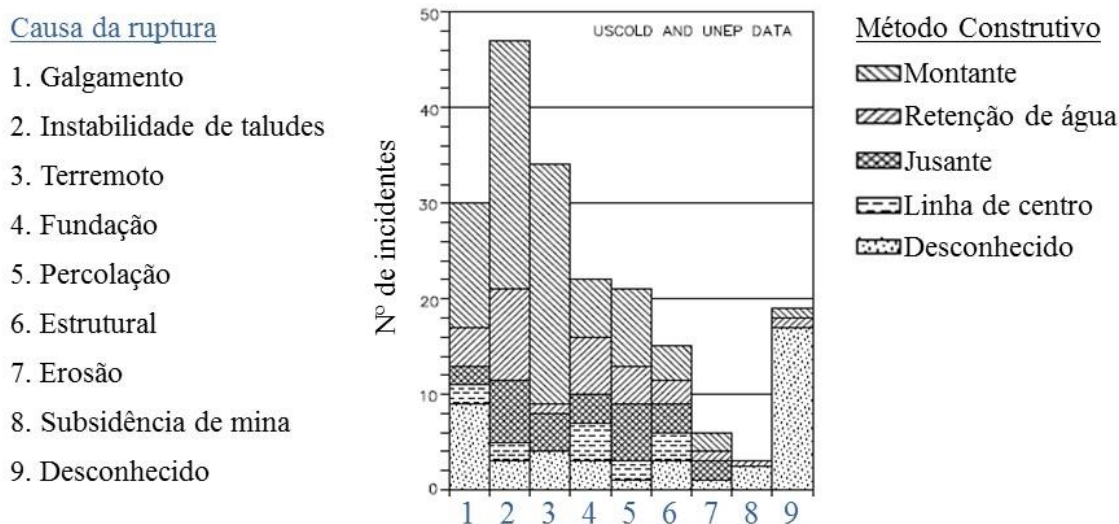


Figura 3.9 – Incidentes envolvendo barragens de rejeitos (Adaptado de ICOLD, 2001)

De maneira geral, observa-se, na Figura 3.7, que o método construtivo, associado ao maior número de incidentes envolvendo ruptura de barragens de rejeitos, é o método de alteamento por montante. Essa afirmação se coloca quando comparada com causas de ruptura, sendo as três maiores a instabilidade de taludes, terremotos e galgamento, respectivamente em ordem decrescente.

Blight (2010) cita as causas principais de ruptura de barragens de rejeitos, representadas na Figura 3.8. De acordo com o levantamento apresentado, a instabilidade de taludes é a causa principal de ruptura de barragens de contenção de rejeitos, sendo responsável por 22% do total das ocorrências dos casos levantados. Nas estatísticas acerca da ruptura de barragens de rejeitos, é difícil definir a causa raiz que levou ao acidente. Segundo o autor, já que o evento raramente ocorre de maneira isolada, seria interessante apresentar as informações em cadeia de eventos que resultaram na falha da estrutura.

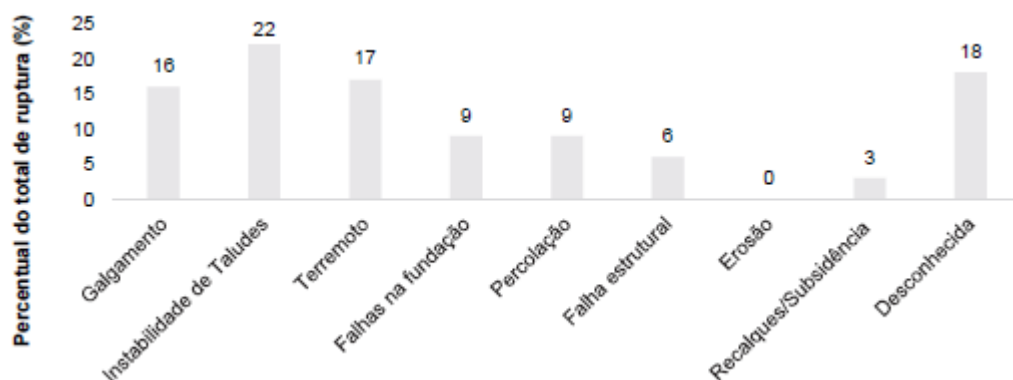


Figura 3.10 – Análise das causas de ruptura de barragens de rejeitos (Adaptado de Blight, 2010)

Melo (2013) cita em seu trabalho que a classificação do modo de falha pode ser flexibilizada, à medida que se percebe correlações entre mais de um modo de falha. Um exemplo citado pelo autor é a ruptura da barragem de Mirriespruit na África do Sul. Neste caso, a ruptura se deu pela combinação de instabilidade do talude, causada pelo aumento da freática com a erosão causada pelo galgamento.

Tal como cita Rocha (2015), ressalta-se que um evento de ruptura de barragem é extremamente caro para a mineradora quanto para a sociedade, que sofre com as consequências diretas e indiretas deste acidente. As principais consequências são as perdas de vida, danos ambientais, sociais, econômicos, paralisação permanente ou temporária das atividades do empreendedor, a título de exemplo, a ruptura da Barragem do Fundão da Samarco. Nesse contexto, seria razoável que os esforços fossem no sentido de evitar uma eventual ruptura, investindo-se na segurança destas estruturas.

3.2.2 Aspectos Conceituais

Autores como Lucia (1981), Jeyapalan (1983), O'Brien *et al.* (1983); Hungr (1995) e Rico *et al.* (2008) apresentam metodologias para a análise de rupturas de barragens de rejeitos. De maneira geral, essas metodologias se apoiam em estudos hidráulicos, geotécnicos e geométricos para a previsão do impacto devido à ruptura de barragens de rejeitos.

Os estudos geotécnicos tiveram sua origem com Lucia (1981), com a consideração de parâmetros geotécnicos dos rejeitos para a determinação de uma geometria estável, após o fluxo proveniente da ruptura da barragem. Já os estudos hidráulicos tiveram sua origem com Jeyapalan *et al.* (1983). Outros trabalhos posteriores evoluíram o conceito abordado por estes autores no qual considera que o fluxo proveniente da ruptura de uma barragem de rejeitos pode ser analisado através da dinâmica de propagação de onda de fluidos não-Newtonianos.

Conforme evidencia Ribeiro (2015), em síntese, os principais aspectos que os estudos de ruptura de barragens de rejeitos visam abordar são a distância alcançada pela onda gerada na ruptura da barragem de rejeitos e com qual velocidade estes fluidos se propagariam. Embora diferentes abordagens e metodologias tenham sido estudadas e desenvolvidas, não existe ainda uma metodologia única que contemple todos os aspectos que influenciam essa complexa questão, como os geométricos, geotécnicos e hidráulicos. Para os reservatórios que possuem a função de retenção somente de água, embora não haja consenso metodológico, a dinâmica do fenômeno físico é mais bem representada nos modelos hidráulicos do que as rupturas decorrentes de barragens de rejeitos.

Uma das incertezas deste tipo de estudo refere-se também ao volume de rejeito a ser propagado para jusante em eventos de ruptura. Rico *et al.* (2008), utilizando dados observados em casos históricos de ruptura de barragens de rejeito, indica, por meio de análises de regressões, que 30% a 50% do volume de rejeito depositado é mobilizado para jusante.

3.2.3 Abordagens Simplificadas

Lucia (1981) analisou 14 casos de ruptura em barragens de rejeitos e propôs um modelo para previsão do alcance da onda de rejeitos, baseado na lei de equilíbrio estático, sendo as forças em duas dimensões, conceituando-se um modelo essencialmente geotécnico.

O conceito desenvolvido por Lucia (1981) considera que, após o início do processo de liquefação, as forças de contato entre os grãos vão reduzindo, tornando o material um fluido altamente viscoso. De acordo com o autor, a resistência residual estará sempre presente, equivalente ao contato entre os grãos. Por conseguinte, para o repouso do fluxo, é necessário o equilíbrio entre as forças atuantes e as forças desenvolvidas pela mobilização da resistência residual. Nesse modelo são necessários a especificação de parâmetros como:

- i. a resistência residual ao cisalhamento não drenada;
- ii. a massa específica dos rejeitos;
- iii. o volume de rejeitos que será escoado por unidade de largura média da brecha;
- iv. a declividade média do trecho a jusante.

Em estudos comparativos de modelos de previsão de ruptura de barragens de rejeito, Melo (2013) concluiu que o modelo proposto por Lucia (1981) apresenta grandes erros de previsão para a ruptura propagada em talvegues que possuem grandes variações na inclinação.

Conforme ressaltado anteriormente, a metodologia proposta por Jeyapalan *et al.* (1983) pode ser considerada precursora do estudo de ruptura de barragens de rejeitos por liquefação, baseado na abordagem hidráulica equacionada, através da propagação de onda dinâmica de fluidos não-Newtonianos (RIBEIRO, 2015).

Nesse contexto, Jeyapalan *et al.* (1983), como também posteriormente Hungr (1995), propõem metodologias simplificadas para estimação do alcance dos rejeitos, em casos de ruptura de barragens, que adicionam parâmetros geométricos do reservatório e geotécnico do rejeito, como tensão limite de escoamento e viscosidade plástica, com o intuito de caracterizar o

comportamento do escoamento devido à propagação de rejeito. As referidas metodologias não consideram, em sua formulação, detalhes da morfologia da região a jusante, simplificando as características geométricas do vale fluvial, que geralmente são consideradas nos modelos hidráulicos usualmente adotados em estudos de ruptura de barragens com reservatório de acumulação de água.

Existem outras limitações, como a distinção teórica proposta por Jeyapalan *et al.* (1983), entre reologias características de rejeitos fosfatados (baixo peso específico, próximo ao peso específico da água) e outros tipos de rejeitos, diferenciando a susceptibilidade deles em gerar fluxos turbulentos e laminares respectivamente.

De acordo com a análise apresentada por Vick (1984), a complexidade das propriedades do rejeito não é condizente com a divisão proposta por Jeyapalan *et al.* (1983). Segundo Vick (1984), teoricamente todos os tipos de reservatórios que contêm rejeitos possuem também um lago de tamanho variável. Nesse sentido, não fica claro a que ponto a quantidade de água reservada dominará a natureza de fluxo do rejeito, de maneira a provocar sua propagação, comportando-se como um fluxo turbulento ou laminar.

Salienta-se que os resultados analíticos do modelo proposto por Jeyapalan *et al.* (1983) são extremamente sensíveis aos parâmetros de entrada, em especial tensão limite de escoamento e viscosidade plástica. Por isso, é necessária a utilização de modelos mais complexos, para melhor caracterização do comportamento do rejeito na propagação do vale a jusante, que considerem a conformação do vale a jusante, assim como a parcela de água presente no rejeito durante sua deposição no reservatório.

Uma abordagem geométrica sobre ruptura de barragens de rejeitos é proposta por Rico *et al.* (2008). Neste trabalho são correlacionadas as características dos reservatórios, como a altura da barragem e volume do reservatório com as características hidráulicas do fluxo resultante dos rejeitos expelidos durante a ruptura. O autor menciona que apenas uma parte dos rejeitos depositados e a água do lago se desprendem do reservatório após a ruptura, sendo difícil a estimativa deste volume.

No trabalho apresentado por Rico *et al.* (2008), foram compilados 250 casos históricos de ruptura, mas muitos dados são encontrados de forma incompleta ou incerta. Somente 29 casos possuíam informações completas acerca da geometria anterior ao acidente, volume expelido do reservatório e alcance do volume propagado. O estudo apresentado pelos autores apresenta relações entre a altura da barragem e a distância percorrida, senão também entre o volume de rejeitos estocados e o volume de ruptura.

3.2.4 Abordagem Hidráulica

De acordo com Rocha (2015), previamente à propagação hidráulica, é necessária uma análise do teor de sólidos (ou concentração volumétrica) existente no reservatório da barragem. Normalmente, as barragens de rejeitos são caracterizadas por fluidos hiperconcentrados, ou seja, a relação entre volume de sólidos e o volume total supera 20% (O'BRIEN & JULIEN, 1985).

A categorização dos fluidos hiperconcentrados, de acordo com suas faixas de concentração volumétricas, prognostica o comportamento do fluxo, auxiliando na definição dos modelos hidráulicos que melhor representam o fenômeno físico em análise.

Com esse objetivo, o *National Resources Council* elaborou documento sobre metodologias de previsão de fluxos de lama (NRC, 1982), delineando os tipos de escoamentos para fluxos hiperconcentrados e de transporte de massa, propondo quatro categorias: escoamento aquoso, corrida de lama, lama plástica e escorregamentos.

Como sugerido por O'Brien e Julien (1985), escoamentos de materiais com concentração volumétrica abaixo de 20% são essencialmente aquosos. A corrida de lama (*Mud flood*) possui propriedade diferente do escoamento aquoso, com uma maior viscosidade e densidade, variando sua concentração volumétrica entre 20% e 45%. A propriedade dominante da lama plástica (*Mudflow*) é alta viscosidade, que resulta numa baixa velocidade, mais lenta que fluidos caracterizados pela corrida de lama (*Mud flood*) com a mesma inclinação, sendo a sua concentração volumétrica definida pelo intervalo de 45% e 55%. A Tabela 3.2 descreve a caracterização do escoamento em função da concentração volumétrica do fluido.

Tabela 3.2 – Caracterização do escoamento em função da concentração de sólidos
 Fonte: Traduzido e adaptado de O'Brien e Julien, 1985

Características do escoamento	Concentração volumétrica - C_v	Descrição do escoamento
Escorregamento	0,53 a 0,90	Não há escoamento
	0,50 a 0,53	Deformações internas e movimento lento devido às tensões
<i>Mudflow</i>	0,48 a 0,50	Escoamento evidente, apesar de lento; Deformações plásticas sem espraiamento sobre as superfícies adjacentes.
	0,45 a 0,48	Início de espraiamentos, apesar da atuação de forças coesivas.
<i>Mud flood</i>	0,40 a 0,45	Mistura-se com facilidade; Apresenta fluidez na deformação alastrando-se sobre superfícies horizontais; Durante movimento a superfície do fluido apresenta considerável declividade; Aparecimento de ondas com dissipação rápida.
	0,35 a 0,40	Acentuada sedimentação; Alastra-se quase por completo sobre superfícies horizontais; Identificação de duas fases (fase líquida aparece); Ondas se propagam por distâncias consideráveis.
	0,30 a 0,35	Separação de água na superfície; Ondas propagam-se com facilidade; Decantação de partículas granulares.
	0,20 a 0,30	Ação de ondas distinta; Superfície fluida; Todas as partículas foram decantadas.
Escoamento aquoso	< 0,20	Inundação provocada por propagação de onda no estado líquido com de carga de sedimentos suspensos.

É importante notar que os diferentes tipos de fluxo, citados na Tabela 3.2, distribuem-se de forma contínua, sendo os limites entre eles pouco nítidos ou bem definidos. Ressalta-se que um único evento pode produzir diferentes tipos de fluxo em momentos e locais diferentes ao longo do curso de água (USGS, 2005).

Existem na literatura modelos hidráulicos capazes de simular os diferentes tipos de escoamento, conforme ilustrado na Figura 3.9. Estes modelos hidráulicos podem ser unidimensionais, bi ou tridimensionais. Enquanto a maioria dos modelos é capaz de modelar o fluxo Newtoniano (líquidos sem resíduos ou baixas concentrações de sólidos em suspensão, em até cerca de 20% de teor de sólidos em volume (O'BRIEN & JULIEN, 1985), apenas alguns são capazes de simular o fluxo não-Newtoniano (alta concentração de sedimentos, fluxo viscoso). O usuário deve escolher um modelo adequado, para executar a simulação, baseado no problema específico a ser modelado e nas informações de entrada disponíveis (USSD, 2013).



Figura 3.11 – Modelos de propagação de ondas de cheia e *Dam Break* para fluidos Newtonianos e não-Newtonianos.

Fonte: Adaptado e traduzido de USSD, 2013

É importante que a escolha do modelo seja adequada para executar a simulação baseada no problema específico e também nos dados de entrada disponível (USSD, 2013). Entretanto, de acordo com Pappenberger *et al.* (2005), na prática, os modelos unidimensionais (1D), baseados nas equações de Saint-Venant, são recorrentes nas simulações hidráulicas. Nessa seara, a técnica de *Pseudo-Manning*, desenvolvida e recomendada por Jin & Fread (1999), é facilmente aplicada no modelo HEC-RAS unidimensional. Essa técnica é caracterizada pela simplicidade e robustez e possui, como principal vantagem, a não obrigatoriedade do conhecimento das reologias do fluido para aplicabilidade no modelo tradicional (ROCHA, 2015).

Os fluxos de detritos (“*debris*”) ou lama (“*mud flow*”) geralmente são fluidos não-Newtonianos. As equações básicas da hidráulica e as equações de transporte de sedimentos não se aplicam, pois, a este tipo de escoamento. Se for necessária uma modelação detalhada dos fluxos de detritos / lama, recomenda-se que seja utilizado um modelo com recursos específicos de fluxo de detritos, como por exemplo o FLO-2D, em detrimento a modelos padrão como o HEC-RAS (BANDURRAGA & GUSMAN, 2011). Além disso, o autor salienta que os fluxos de detritos podem alterar drasticamente a geometria dos canais, através da erosão, bem como da deposição do material na calha do rio e planícies de inundação.

1.1.1.3 Modelo HEC-RAS

O HEC-RAS é um modelo hidráulico de livre acesso desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (HEC) do *U. S. Army Corps of Engineers* (USACE). Este *software* possui

boa capacidade em representar os fenômenos de inundação de ruptura de barragens, por meio da modelagem hidrodinâmica do hidrograma de ruptura, utilizando o escoamento de fluidos Newtonianos. A versão utilizada é a 5.0.1, entretanto, ressalta-se que constantes melhorias e atualizações são propostas pelos desenvolvedores.

O programa possui interface com a plataforma GIS, para a geração de mapas de inundação, usando localizações específicas a jusante de eventos de ruptura e, assim, associa-se às elevações de água, ao volume do fluxo e ao tempo de chegada para cada seção transversal considerada na modelagem (FEMA, 2013).

Para representar fluidos não-Newtonianos, característicos de ondas de cheias causadas por ruptura de barragens de rejeitos, com concentrações volumétricas acima de 20% ($C_v > 0,20$), é feito um ajuste nos parâmetros hidráulicos do modelo, denominado *Pseudo-Manning*, conforme proposto por Ventura (2011).

Uma das principais dificuldades em se utilizar o modelo HEC-RAS, para modelar escoamentos hiperconcentrados, consiste no fato de que suas equações são propostas para fluidos com baixa concentração de sedimentos, com comportamento semelhante à água. Além disso, os fluxos hiperconcentrados não são frequentemente caracterizados por viscosidade e densidade constantes. Conforme mencionado anteriormente, o fluxo pode, ao longo de seu percurso, ganhar ou perder progressivamente material em sua composição.

Para a aplicação do modelo HEC-RAS para fluidos hiperconcentrados, Ventura (2011) propôs uma metodologia de ajuste baseada no princípio da similaridade, permitindo ajustar os coeficientes adimensionais das equações que regem o escoamento de água limpa, no modelo para a situação de um escoamento hiperconcentrado, em função da viscosidade cinemática do fluido, por meio das relações apresentadas nas Equações 8 e 9. As equações são definidas para ajuste dos coeficientes de contração e expansão e a rugosidade de Manning respectivamente. Ressalta-se que, para ajuste do coeficiente de Manning, considera-se o fluxo turbulento com número de Reynolds $Re > 500$.

$$C_{\text{bulked}} = (v / v_{\text{bulked}})^{2/3} C \quad (8)$$

Na qual:

- C_{bulked} = Coeficiente de contração e expansão adotado para o fluido composto por água e sólidos;
- ν = Viscosidade cinemática da água limpa (ft²/s);
- ν_{bulked} = Viscosidade cinemática do fluido composto por água e sólidos (ft²/s);
- C = Coeficiente de contração e expansão adotado para a água limpa.

$$n_{\text{bulked}} = (\nu / \nu_{\text{bulked}})^{1/9} n \quad (9)$$

Na qual:

- n_{bulked} = Coeficiente de rugosidade de Manning adotado para o fluido composto por água e sólidos;
- ν_{bulked} = Viscosidade cinemática do fluido composto por água e sólidos (ft²/s);
- ν = Viscosidade cinemática da água limpa (ft²/s);
- n = Coeficiente de rugosidade de Manning adotado para a água limpa.

De acordo com o autor, há cenários em que a utilização do HEC-RAS, para modelagem de fluxos hiperconcentrados, seria menos precisa, como:

- Obstáculos no decorrer da modelagem hidráulica, tais como pontes;
- Elementos de fluxo de pressão, tais como comportas;
- Canais erosivos ou zonas de deposição em que se espera que o fluxo ganhe ou perca material de maneira significativa;

1.1.1.4 Modelo FLO-2D

O FLO-2D PRO é um modelo bidimensional, comercial, utilizado em modelagens hidráulicas de inundações que integram o rio com as planícies de inundação. O FLO-2D PRO possui recursos de modelagem que incluem o transporte de sedimentos e corrida de lama, estimando inundações de fluxos não-Newtonianos (O'BRIEN *et al.*, 1993). O modelo calcula fluxos em duas dimensões, sendo x e y, mantendo-se constante na variável z, profundidade. Utiliza a conservação do volume, assim como as equações de continuidade e do momento da onda dinâmica. A rotina de cálculo é feita por meio da solução uniforme dos elementos quadrados (*grid*). A vazão é calculada no limite de cada elemento, nas direções potenciais do fluxo (FLO-2D, 2009).

O FLO-2D possibilita a inserção de características reológicas do rejeito a ser propagado e considera, de maneira mais completa, a geometria do vale a jusante, diferentemente de outras metodologias existentes, como as propostas por Jeyapalan *et al.* (1983) e Hungr (1995).

De acordo com Rocha (2015), o FLO-2D possui sua ascendência no modelo MUDFLOW, desenvolvido pela FEMA (*Federal Emergency Management Agency*), com a proposta de realização de simulações para fluidos não-Newtonianos.

As equações que governam o fluido são as equações da continuidade (10) e do momento (equação da onda dinâmica - 11).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{dhV}{dx} = i \quad (10)$$

$$S_f = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (11)$$

Nas quais,

- h é a profundidade do fluxo (m);
- V é a velocidade na profundidade média nas 8 direções do fluxo (m/s);

- S_f é a declividade da linha de energia – componente de atrito (adimensional).

O modelo FLO-2D realiza simulações em multidireções. De acordo com Vianini Neto (2016), existem oito direções potenciais de fluxo, nas quais 4 pontos são cardeais (norte, leste, sul e oeste) e 4 direções são diagonais (nordeste, sudeste, sudoeste e noroeste). Cada cálculo de velocidade é essencialmente unidimensional e resolvido independentemente para as outras 7 direções. A estabilidade do esquema central numérico explícito é baseado no rigoroso critério de controle da variável computacional, intervalo de tempo da simulação (FLO-2D, 2009).

O domínio computacional do FLO-2D é discretizado em elementos quadráticos e uniformes, denominados “*Grids*”. O procedimento computacional envolve calcular a vazão por entre cada fronteira, nas oito direções potenciais do fluxo, iniciando com uma estimativa linear para a profundidade em cada limite dos *grids*. A velocidade (variável dependente) é computada pelo meio da solução da equação do momento. Utilizando a média de área do fluxo entre dois elementos, a descarga é calculada para cada intervalo de tempo, multiplicando-se a velocidade pela área do fluxo (FLO-2D, 2009).

Para solucionar a equação completa da onda dinâmica para a velocidade a cada limite do grid, inicialmente a velocidade do fluxo é calculada com a equação da onda difusiva, utilizando a inclinação média da superfície de água. Essa velocidade é então utilizada como uma primeira estimativa de segunda ordem no método da tangente de Newton-Raphson, para embasar o cálculo da equação da onda dinâmica completa. A equação de *Manning* é utilizada na determinação do termo de declividade da linha de energia (S_f). Se a solução por Newton-Raphson falhar após 3 iterações, o algoritmo, por definição, computa a onda difusiva (FLO-2D, 2009).

A chave para a rotina eficiente da diferença finita é o limite do intervalo de tempo de simulação, determinado pelo critério de estabilidade, evitando surgências, como também permitindo o aumento automático dos intervalos de tempo, de forma a completar a simulação em tempo razoável. O critério de estabilidade é conferido a cada grid, para cada intervalo de tempo, de forma a garantir a estabilidade da simulação. Se o critério de estabilidade é excedido, o intervalo de tempo decresce e a simulação hidráulica, para aquele determinado tempo, é descartada. De

acordo com Jin and Fread (1999 *apud* FLO-2D, 2009), a maioria dos esquemas explícitos de cálculo estão sujeitos à condição numérica de estabilidade de *Courant-Friedrich-Lewy* (CFL).

A interpretação física da condição CFL é que a partícula do fluido não deve viajar mais de um incremento espacial (Δx) em um intervalo de tempo (Δt). Ressalta-se que o FLO-2D utiliza esta condição para planícies de inundação, canais e ruas. A equação (12) representa o intervalo de tempo utilizado no cálculo da estabilidade numérica.

$$\Delta t = C_t \Delta x / (\beta V = c) \quad (12)$$

Na qual C_t é o número de Courant ($0,2 \leq C_t \leq 1$); Δx é a raiz quadrada da largura do elemento do *grid*; V é velocidade média computada para a célula; β é o coeficiente de ajuste para diferentes geometrias ($5/3$ para canais largos); e c é a celeridade de onda.

Uma particularidade importante do modelo FLO-2D se dá na possibilidade da simulação de fluidos não-Newtonianos, denominados hiperconcentrados, incluindo a incorporação dos parâmetros reológicos do material que compõe o fluido.

O FLO-2D realiza a solução do modelo reológico quadrático pela alteração do termo de perda de carga na equação do momento, utilizado para a representação do escoamento de fluidos não-Newtonianos, deduzido a partir das tensões cisalhantes (FLO-2D, 2009). O peso específico da mistura (γ_m), a tensão limite de escoamento (τ_y) e a viscosidade (η) são parâmetros que variam de acordo com a concentração volumétrica (C_v).

Ressalta-se que, na realização de simulações de fluidos *Mud flood* ou *Mudflow*, o modelo preserva a continuidade de ambos os materiais, água e sedimentos.

A relação entre o volume de sedimentos e o volume total é dita concentração volumétrica (C_v), sendo a taxa de sedimentos na água mandatória na mistura do fluxo (ROCHA, 2015). Esta relação é explicitada na Equação (13).

$$C_v = \frac{\text{Volume de sedimentos}}{\text{Volume total}} \quad (13)$$

O hidrograma híbrido é a denominação usualmente utilizada para a inserção do volume de sedimentos ao hidrograma da onda líquida. Assim como afirma Rocha (2015), destaca-se que a representação deste fenômeno é de alta variabilidade, mas ainda dificilmente replicável. Sendo assim, alguns critérios são referenciados no manual do FLO-2D, mais especificamente no documento denominado “*Simulating Mudflows*”. Evidencia-se que não foram encontradas metodologias para a discretização do material no tempo e conformação dos hidrogramas, denominados híbridos.

As tensões cisalhantes, nos fluidos hiperconcentrados, podem ser determinadas pela soma de cinco componentes de tensões. A tensão total τ depende da coesão τ_c e das tensões de Mohr-Coulomb τ_{mc} , viscosa τ_v , turbulenta τ_t e dispersiva τ_d , conforme equação 14.

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (14)$$

Quando escrito em relação à taxa de deformação (dv/dy), é utilizado um modelo reológico quadrático explicitado nas equações 15, 16, 17, 18 e 19.

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + C \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad (15)$$

Nas quais η é a viscosidade dinâmica e C o coeficiente de tensão cisalhante inercial. O termo τ_y refere-se a tensão de escoamento inicial, sendo a soma da tensão de coesão (τ_c) e das tensões de Mohr-Coulomb (τ_{mc}), conforme equação 16.

$$\tau_y = \tau_c + \tau_{mc} \quad (16)$$

A tensão de Mohr-Coulomb (τ_{mc}) por sua vez, pode ser decomposta na equação 17, no qual, p_s é a pressão intergranular e \emptyset é o ângulo de repouso do material.

$$\tau_{mc} = p_s \tan \emptyset \quad (17)$$

Na equação 18, C denota o coeficiente de tensão cisalhante inercial, o qual depende da massa específica da mistura (ρ_m), do comprimento da mistura (l) de Prandtl, do tamanho do sedimento (d_s), da concentração volumétrica de sedimento (C_v).

$$C = \rho_m l^2 + f(\rho_{mv}, C_v) d_s^2 \quad (18)$$

Na equação 19, α_i é o ângulo médio de impacto entre as partículas; ρ_s é a massa específica dos grãos; e_n é o coeficiente de restituição de energia após o impacto com intervalo para areias entre $0,70 < e_n < 0,85$.

$$f(\rho_{mv}, C_v) = \frac{\pi}{12} \left[\left(\frac{6}{\pi} \right)^{1/3} \sin^2 \alpha_1 \rho_s (1 - e_n^2) C_v^{1/2} \right] \quad (19)$$

Os três primeiros termos da equação 15 são referidos como tensões cisalhantes de Bingham. Sua soma define a tensão total de um escoamento de *mudflow* em um regime de escoamento viscoso. Quando se soma também o último termo referente à tensão turbulenta e à tensão dispersiva, ambas dependentes do quadrado do gradiente de velocidade vertical, tem-se o regime inercial de escoamento de um *mud flood*. O'Brien *et al.* (1993) alertam que modelos para propagação de lamas que incorporam somente as tensões, propostas no modelo de Bingham, ignoram as tensões inerciais e assumem que o *mudflow* simulado é viscoso. Essa premissa não é universalmente apropriada, porque todos os *mud floods* e mesmo alguns *mudflows* são turbulentos, com velocidades tão altas quanto 8 m/s.

Dependendo da matriz do fluido, da viscosidade e da tensão limite de escoamento, o escoamento pode ser controlado primeiramente pelas tensões viscosas, o que resulta em velocidades baixas. Por outro lado, se a viscosidade e a tensão limite de escoamento forem baixas, as tensões turbulentas dominarão, e as velocidades serão mais altas.

Para definir todos os termos de tensões utilizados no FLO-2D, a solução apresentada na sequência é utilizada. Por analogia ao trabalho de Meyer-Peter e Muller (1948) e Einstein (1950), as relações de tensões são integradas na profundidade e reescritas como uma declividade adimensional dada pela equação 20.

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} \quad (20)$$

No qual a declividade da linha de energia que representa o atrito total S_f é a soma do atrito S_y , que representa a tensão limite de escoamento, a tensão viscosa S_v e a tensão turbulenta dispersiva, S_{td} . A tensão viscosa e a turbulenta-dispersiva são escritas em termos da velocidade média V . Nesse contexto, a declividade S_v pode ser escrita na forma da equação 21:

$$S_v = \frac{k \eta}{8 \gamma_m} \frac{V}{h^2} \quad (21)$$

Na qual γ_m é o peso específico da mistura de sedimento; e K é o parâmetro de resistência para fluxos laminares, igual a 24 para canais largos e lisos e que aumenta significativamente (~50.000) com a rugosidade e geometria irregular das seções transversais. A resistência ao escoamento das parcelas dispersivas e turbulentas é combinada em uma relação equivalente ao coeficiente de rugosidade de Manning, dada pela equação 22:

$$S_{td} = n_{td}^2 \frac{v^2}{h^3} \quad (22)$$

Em concentrações muito elevadas, as tensões dispersivas aumentam a resistência ao escoamento devido ao incremento dos choques entre as partículas, transferindo fluxo de momento para as camadas limites. Para computar esse aumento na resistência o coeficiente de Manning n_t é incrementado por uma relação exponencial em função da concentração volumétrica C_v (equação 23).

$$n_{td} = n_t b e^{m C_v} \quad (23)$$

Na qual n_t é o coeficiente de rugosidade de Manning, b é um coeficiente (0,0538) e m é um expoente (6,0896). Essa expressão relaciona a resistência dispersiva e turbulenta, em um fluxo hiperconcentrado, em função da razão da profundidade e do tamanho do sedimento. Os termos de atrito podem então ser combinados na forma da equação 24:

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K \eta V}{8 \gamma_m h^2} + \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (24)$$

3.3 Avaliação dos Modelos Hidráulicos

De acordo com Shumann *et al.* (2009), para a calibração e/ou validação dos modelos hidráulicos, são usualmente utilizados os dados observados de um evento. Diferentes finalidades são aplicadas, como a de comparação entre os diferentes modelos, a verificação e determinação de pontos de melhoria do modelo, assim como a determinação da acurácia do modelo. Horrit (2001) cita que o sensoriamento remoto tem se mostrado de grande valia para a calibração. A partir de imagens de satélite de eventos ocorridos, é possível a delimitação do evento observado.

Existem diferentes maneiras para a avaliação do desempenho de um modelo hidráulico em prever a extensão da inundação ou profundidade da cheia. A escolha do melhor método dependerá de alguns fatores, como os detalhes disponíveis para a entrada no modelo, da qualidade dos dados observados, da natureza da calibração e da validação a serem realizadas (SCHUMMAN *et al.*, 2009). Usualmente, para a avaliação do desempenho do modelo hidráulico, utiliza-se a análise visual da imagem observada em comparação àquela gerada pela simulação. De acordo com Rocha (2015), a análise visual é uma ferramenta pertinente, principalmente quando realizada por modeladores experientes, capazes de avaliar o resultado, ao comparar as duas imagens. Entretanto, esse tipo de análise é de difícil aplicação para um conjunto de imagens e irá, inevitavelmente, criar avaliações subjetivas do desempenho do modelo.

Posto isso, para a realização de avaliações, de forma mais objetiva, é necessário aplicar medidas quantitativas, como a análise pixel-a-pixel, denominada comparação binária, proposta por ARONICA *et al.* (2002); WERNER *et al.* (2005); HUNTER *et al.* (2005) e PAPPENBERGER *et al.* (2007). Nessa abordagem, as possíveis combinações, para cada uma das células da área de interesse, são previstas conforme Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Combinações para classificação binária

Combinações	Presente na observação	Ausente na observação
Presente no modelo	A	B
Ausente no modelo	C	D

Dessa maneira, têm as seguintes situações: observado/previsto, observado/não previsto, não observado/previsto, não observado/não previsto.

Na Tabela 3.4, adaptada por Rocha (2015 *apud* Stephens *et al.*, 2014), são apresentadas algumas medidas binárias de desempenho para estudos de inundação. A tabela foi compilada a partir dos estudos de Hunter (2005) e Schumann *et al.* (2009).

O indicador F^2 vem sendo aplicado em vários estudos de inundação: (HORRITT & BATES, 2001; ARONICA *et al.*, 2002; PAPPENBERGER *et al.*, 2007). Aronica *et al.* (2002) e Hunter (2005) recomendam a utilização desse indicador para calibração de modelos determinísticos e para realização de análise de incertezas. Segundo os autores, o indicador F^2 é relativamente não enviesado e discrimina equitativamente as regiões sub e superestimadas. Aronica *et al.* (2002) observam que o índice F^2 tende a favorecer a previsão subestimada da inundação e que esse comportamento deve ser evitado em análises de riscos, nas quais, de maneira conservadora, uma previsão superestimada deve ser favorecida.

Tabela 3.4 – Indicadores de desempenho binários para utilização em estudos de inundação (Adaptado de Rocha, 2015)

Nome	Equação	Intervalo	Comentário
Viés	$\frac{A + B}{A + C}$	$(0, \infty)$ – igual a 1 para uma previsão correta	Balanco entre sub e superestimativa.
F^2 Índice de Sucesso Crítico	$\frac{A}{A + B + C}$	$(0,1)$	Ajuste do F^1 para reduzir a influência do tamanho da área não inundada no domínio.
F^3	$\frac{A - C}{A + B + C}$	$(-1,1)$	Desenvolvido para penalizar a subestimativa da cheia.
F^4	$\frac{A - B}{A + B + C}$	$(-1,1)$	Desenvolvido para penalizar a superestimativa da cheia.

No âmbito deste trabalho, desenvolveu-se outro fator para avaliação de desempenho dos modelos hidráulicos, em relação à mancha previamente observada, denominado “falso positivo” e o “falso negativo”. Para o “falso positivo”, considerou-se o cálculo da relação entre

o pixel, que demonstrou inundação no modelo, embora não tenha sido observado. Esse valor é expresso em porcentagem e é calculado dividindo-se “B” pela área total da mancha observada. No “falso negativo”, considerou-se o inverso, ou seja, embora o pixel não evidenciasse inundação no modelo, ele foi observado. Esse valor é expresso em porcentagem e é calculado dividindo-se “C” pela área total da mancha observada.

4 BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DO FUNDÃO

O Complexo Germano da Mineradora Samarco, no Município de Mariana, no Estado de Minas Gerais, compreende as Barragens do Germano e Fundão, para contenção de rejeitos, e a Barragem Santarém, que possui a finalidade de controlar o carreamento de sedimentos destas barragens para o córrego a jusante e captação de água.

A Barragem do Fundão localiza-se na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, afluente pela margem esquerda do rio do Carmo, cuja confluência com o rio Piranga dá origem ao rio Doce. A barragem do Germano localiza-se no córrego Germano e a barragem Fundão, sobre o córrego do Fundão, que por sua vez, são afluentes ao córrego Santarém. O córrego Santarém deságua na margem esquerda do rio Gualaxo do Norte, a aproximadamente 500 m a leste da comunidade Bento Rodrigues (SETE, 2013).

A Figura 4.1 ilustra o croqui de localização do empreendimento, assim como os córregos, bacia e sub-bacia da área.

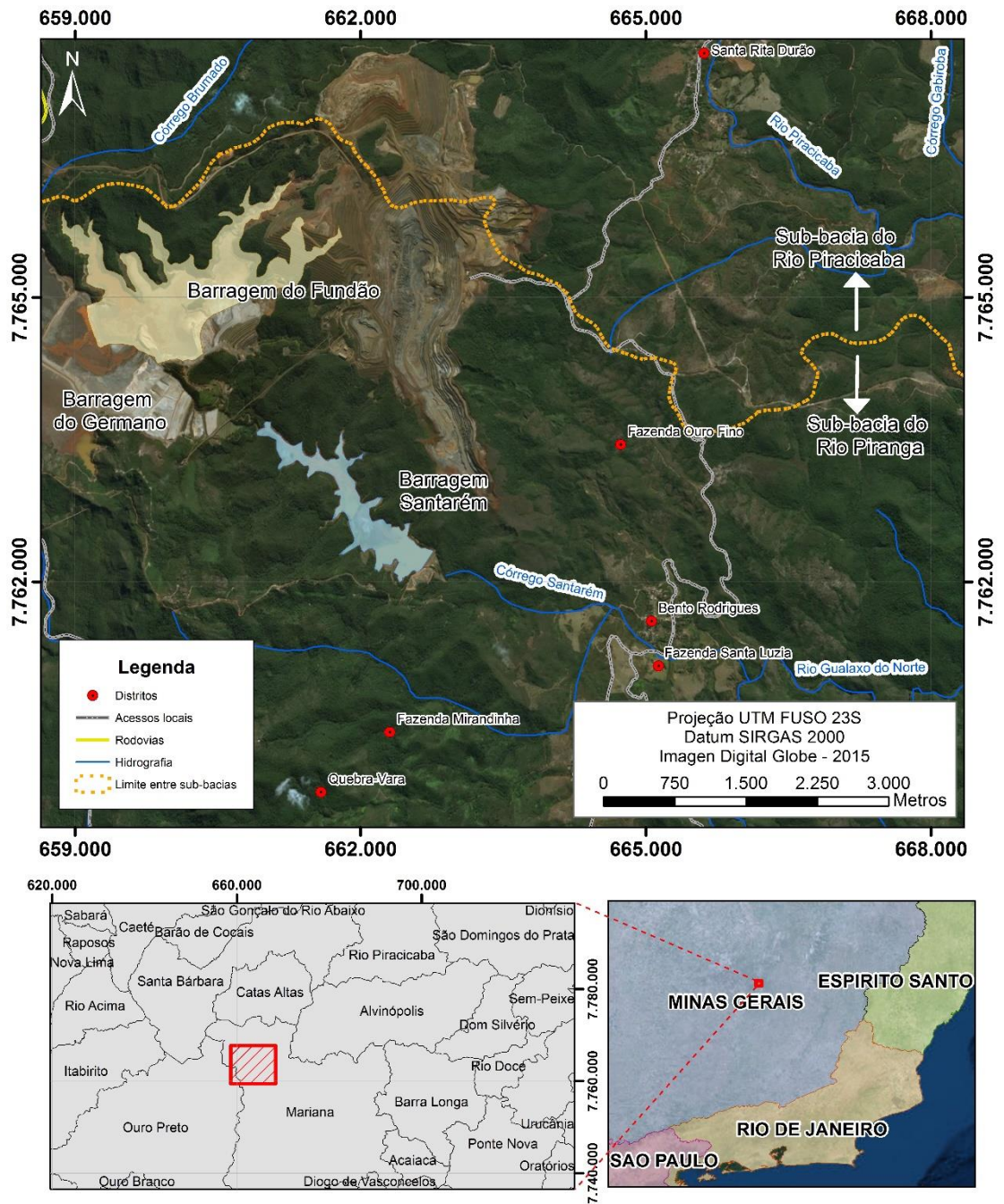


Figura 4.12 – Localização da Barragem do Fundão (Sub-bacias, Rios, Acessos e Localidades)

4.1 **Caracterização da Barragem do Fundão**

De uma maneira geral, a disposição de rejeitos, no Complexo Germano, dava-se pela separação do rejeito em arenoso e fino (lama). O rejeito arenoso era proveniente da flotação convencional, possuindo alta permeabilidade, conferindo-lhe satisfatória resistência em condições drenadas. Este tipo de rejeito era depositado na Barragem do Germano e do Fundão, Dique 1 e na cava exaurida do Germano, sendo, após drenagem, utilizado para o alteamento das barragens pelo método de montante e na implantação de demais estruturas. O rejeito fino (lama), proveniente da deslamagem e do processo de recuperação de minério de ferro nas colunas ‘*re-cleaner*’, devido às baixas permeabilidades e resistência, era depositado no reservatório da Barragem do Germano (Baia 3) e no Dique 2 da Barragem de Fundão (BRANDT, 2005).

Desse modo, a Barragem do Fundão tinha como objetivo atender à demanda de controle ambiental para disposição dos resíduos sólidos, gerados no processo de produção minério, provenientes das plantas de beneficiamento de minério de ferro (BRANDT, 2005).

Conforme citado, no reservatório da Barragem do Fundão, a disposição era realizada separadamente, entre os resíduos arenosos e a lama, em reservatórios específicos. Na porção mais a jusante do córrego Fundão, era localizado o dique de partida para o Empilhamento de Rejeitos Arenosos (ERA). Mais a montante, estavam implantados outros dois Diques de Contenção de Lama (DCL’s). Entre o dique de partida do ERA e os dois DCL’s, existia um reservatório para a disposição do rejeito arenoso: a montante dos DCL’s eram formados reservatórios para disposição da lama, conforme ilustrado na Figura 4.2 (BRANDT, 2005).

O dique de partida do ERA possuía cota de topo na El. 830,00 m e foi a primeira estrutura a ser implantada. Os alteamentos sucessivos do ERA eram realizados para montante, até a cota prevista na El. 920,00 m, utilizando-se o próprio rejeito arenoso como material de construção.

Segundo BRANDT (2005), inicialmente seria realizada disposição da lama a montante dos dois Diques de Contenção de Lama, com cota de topo na El. 850,00 m, que seriam construídos com o próprio rejeito arenoso depositado no reservatório do ERA. A partir da El. 850,00 m, os DCL’s seriam sucessivamente alteados por linha de centro. Estes DCL’s operariam como estruturas separadoras entre a lama e o rejeito arenoso até a El. 920,00 m (BRANDT, 2005).

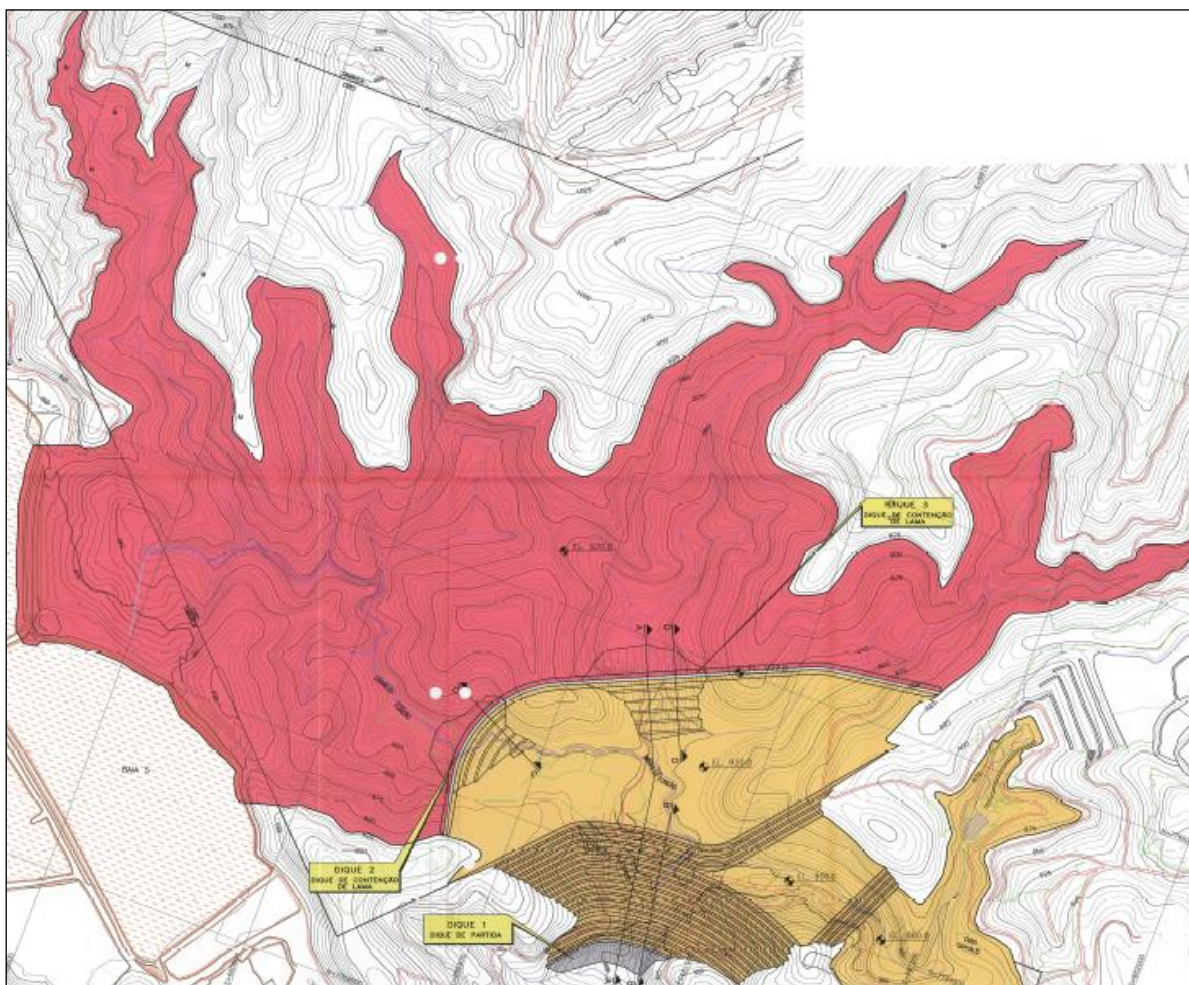


Figura 4.13 – Arranjo Geral da Barragem do Fundão com crista na El. 920,00 m
 Fonte: Pimenta de Ávila (2005)

A capacidade final do reservatório de lamas do Fundão, em sua última etapa de alteamento, na El. 920,00 m, seria de aproximadamente 79 Mm³ de lamas (rejeito argiloso) e de 32 Mm³ para disposição de rejeitos arenosos, conforme Tabela 4.1 e Figuras 4.3 e 4.4.

Tabela 4.5 – Volume e tempo de enchimento dos reservatórios

Elevação (m)	Reservatório Lama (DCL's)		Reservatório Rejeito Arenoso (ERA)	
	Volume (m ³)	Tempo (anos)	Volume (m ³)	Tempo (anos)
Até 850,00 m	7.885.846	1,58	9.328.512	1,44
Até 920,00 m	79.674.744	15,93	32.208.299	4,96

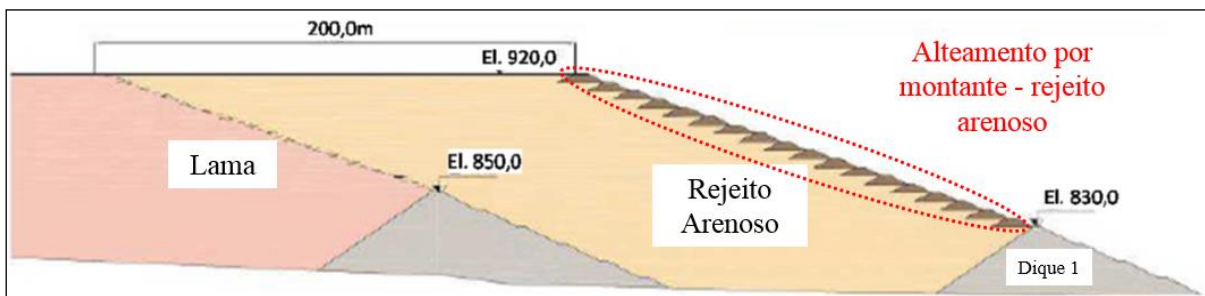


Figura 4.14 – Croqui esquemático do corte da Barragem do Fundão

Fonte: Adaptado de MORGENSTERN *et al.*, 2016)

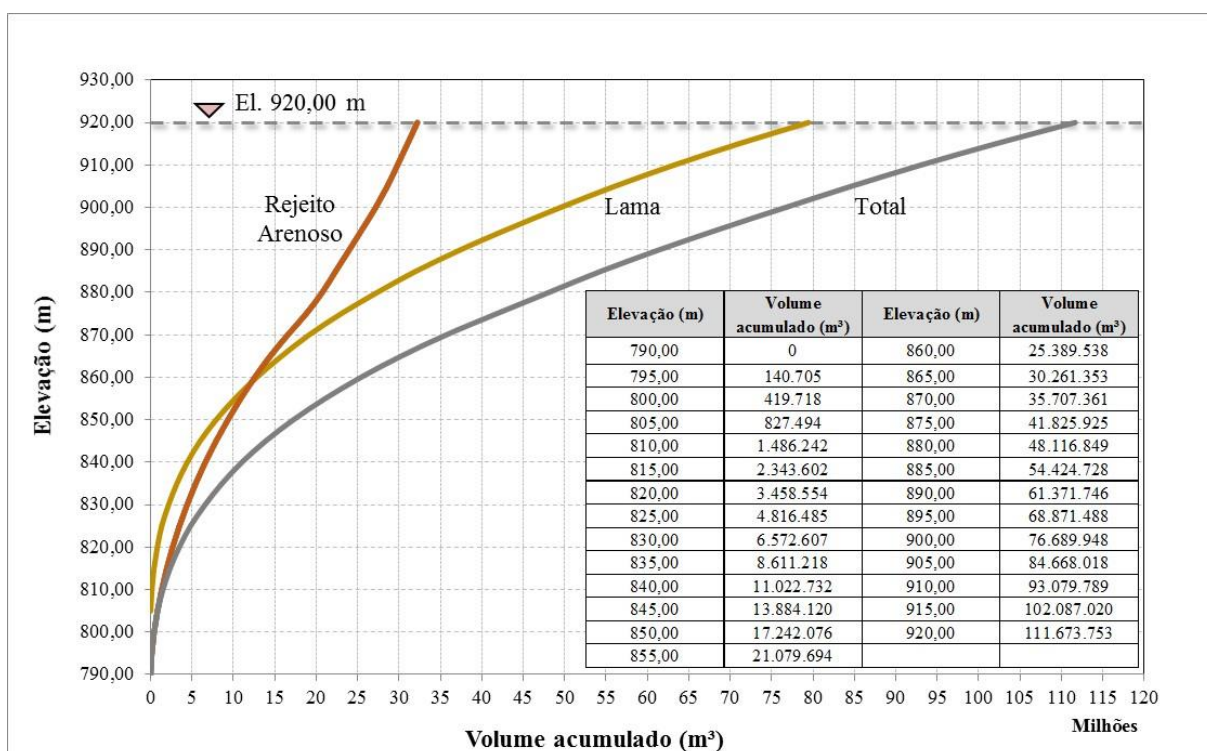


Figura 4.15 – Curva Cota Volume – DCL's + ERA até a El. 920,00 m

A Barragem Santarém está localizada a jusante da Barragem do Fundão. Seu maciço possui uma altura de 32 m, o comprimento da crista é de 268 m e volume de 440.000 m³. O reservatório possui uma altura de 29,5 m, com volume de 6,7 Mm³ (SAMARCO, 2013).

4.2 **Caracterização do material depositado na barragem**

Os dois tipos distintos de rejeitos do beneficiamento de minério de ferro eram produzidos e transportados em forma de lama, como fluxos separados. Os rejeitos arenosos são compostos de duas partículas de areia e silte em aproximadamente igual proporção. Durante a deposição, os rejeitos arenosos formam uma praia de baixa declividade, através da qual a água escoava de forma bastante rápida. A lama, por outro lado, possui granulação fina argilosa. As partículas de tamanho de argila permanecem suspensas e, eventualmente, decantam em água parada produzindo um material de baixa permeabilidade (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

A granulometria dos dois materiais são comparadas na Figura 4.5, que mostra que as areias contêm aproximadamente 40% de silte, enquanto a lama é constituída de partículas do tamanho de argila.

A concentração de minerais derivados de ferro, nas lamas, imprime um alto peso específico, em torno de 3,9 – 4,0, que os distingue das areias mais leves, que possuem peso específico de 2,8 – 2,9 (MORGENSTERN *et al.*, 2016).

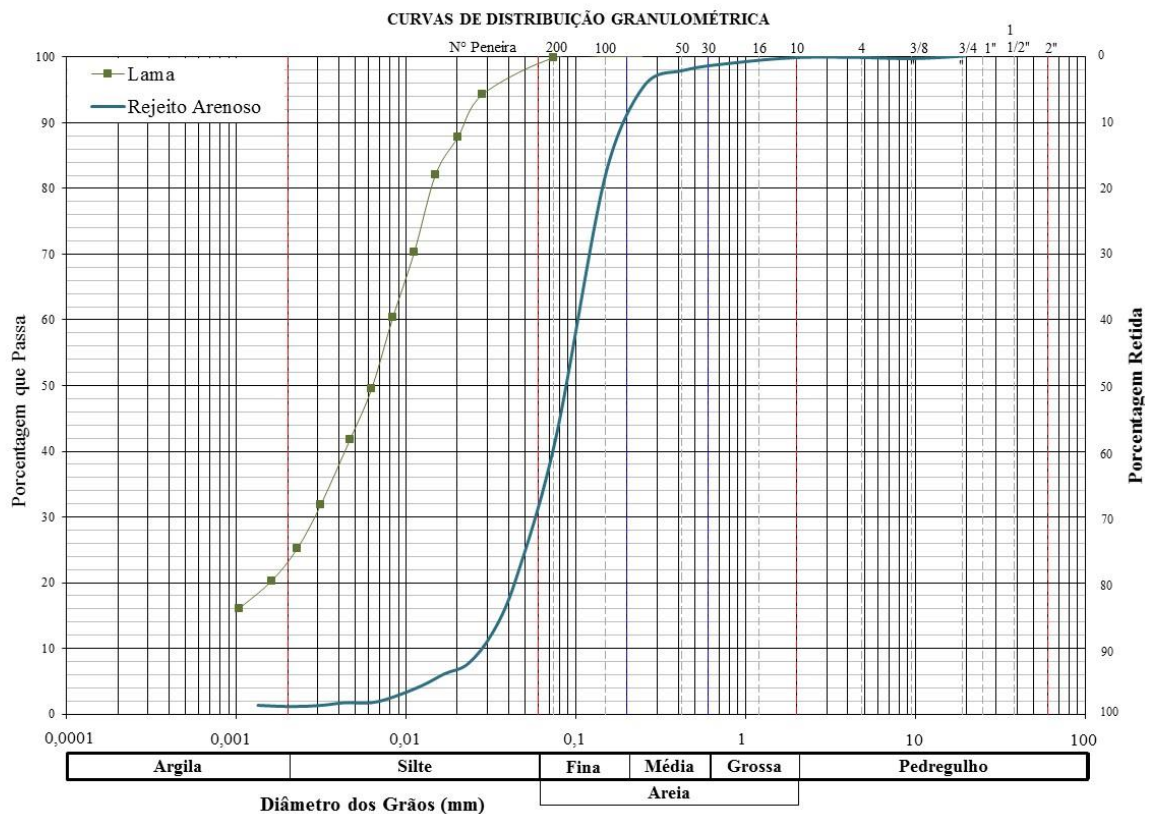


Figura 4.16 – Curva granulométrica (Adaptado de MORGENSTERN *et al.*, 2016)

De acordo com Ferreira (2016), a classificação granulométrica destes materiais obedece a padrões clássicos da Mecânica dos Solos. A característica particular do minério processado pela Samarco é de possuir baixo teor de ferro, sendo, dessa forma, submetido a etapas muito severas de moagem, gerando materiais abrasivos de granulometria muito fina. Sendo assim, os rejeitos depositados no complexo Germano são compostos basicamente por areias finas (rejeitos arenosos) e ultrafinas (rejeitos ‘finos’ ou lamas).

Os valores mais elevados da massa específica dos grãos (G_s) são encontrados nos rejeitos ultrafinos (lamas), demonstrando a parcela tipicamente associada a uma maior presença de ferro, de densidade mais elevada que a sílica (FERREIRA, 2016).

4.3 **Acidente em 2015**

Em 05 de novembro de 2015, ocorreu a ruptura da Barragem do Fundão, liberando água e rejeitos a jusante. Esse acidente de expressiva magnitude causou impactos ambientais, ao longo de 640 km, causou 18 mortes e o desaparecimento de uma pessoa.

O controle de alteamento realizado pela Samarco demonstra que a crista da barragem encontrava-se na El. 898,00 m na data de 26/10/2015. Os dados de alteamentos foram obtidos nos relatórios de monitoramento geotécnico, para o período de 30/07/2014 a 26/10/2015. A Tabela 4.2 apresenta o alteamento e a velocidade de alteamento em m/ano, sendo a velocidade média de alteamento obtida 12,3 m/ano neste período (Geomecânica & Norwegian Geotechnical Institute, 2016).

Tabela 4.6 – Elevação da crista da barragem e velocidade de alteamento entre 25/09/2014 e 26/10/2015

Data	Elevação da Crista (m)	Acréscimo de altura (m)	Velocidade de alteamento (m/ano)	Velocidade média de alteamento do último ano anterior à ruptura 14/15 (m/ano)
25/09/14	885,04	0,00	-	12,30
02/12/14	557,65	2,61	13,80	
30/01/15	889,63	1,98	12,10	
04/03/15	890,50	0,87	9,50	
04/05/15	891,72	1,22	7,20	
25/05/15	892,72	1,00	17,10	
11/06/15	849,05	1,33	28,20	
22/07/15	894,94	0,89	7,80	
27/08/15	895,80	0,86	8,60	
16/09/15	897,60	1,80	32,40	
26/10/15	898,02	0,42	3,80	

Mittal & Morgenstern (1976) *apud* Martin & Mcroberts (2012) recomendam que a taxa de alteamento seja de 4,6m/ano a 9,1m/ano, para garantir a dissipação do excesso de poropressão durante o processo de alteamento.

No dia da ruptura da Barragem do Fundão, 05/11/2016, Morgenstern *et al.* (2016) citam que a crista encontrava-se na El. 900,00 m, com 110 m de altura. A cronologia do evento é exposta no relatório, no qual é mencionado que, logo após as 14:00 horas, sentiram tremores de terra na área da Mina do Germano, durando alguns minutos. Por volta de 15:45 horas, anúncios, via rádio, informavam que a Barragem do Fundão havia entrado em colapso.

O evento relatado, pelo relatório de Morgenstern *et al.* (2016), descreve que uma nuvem de poeira se formou sobre a encosta esquerda, observando-se fissuras no cobertor drenagem recém-construído. Para os observadores que se encontravam na parte inferior do talude de montante, a inclinação acima dos mesmos teve um comportamento ondular, como se fosse uma “fusão”, trazendo a crista da barragem para baixo imediatamente depois. Neste momento, os rejeitos, que por hora se assemelhavam com terra firme, apenas em minutos haviam se transformado em um rio turvo, galgando a Barragem de Santarém, entretanto não causando a ruptura da mesma, seguindo para a cidade de Bento Rodrigues na rota de seu destino final, a foz do rio Doce no mar.

De acordo Morgenstern *et al.* (2016), as descrições e vídeos de testemunhas oculares estabeleceram definitivamente vários pontos. O primeiro ponto é a determinação do local, onde se deu o início da ruptura de Fundão, sendo iniciado na ombreira esquerda da barragem, e não no lado direito ou o pé do talude de jusante. O segundo fato determinado foi a ocorrência da falha da barragem, devido ao fluxo de liquefação dos rejeitos, um processo pelo qual a poropressão entre as partículas de rejeitos aumenta a tal ponto que a massa de material perde a resistência, comportando-se como um fluido. Por fim, o último ponto refere-se à transformação de sólido para líquido, que se deu de forma completa e abrupta, deixando um fluido de viscosidade aparente e comportamento hidráulico pouco diferente da água em apenas alguns segundos.

Conforme mencionado anteriormente, a questão principal desta pesquisa não transpassa “*como*” e “*o que*” desencadeou a ruptura da Barragem do Fundão, o processo de liquefação e quais os fatores que promoveram a sua ocorrência. É objeto desta pesquisa o comportamento do material, no vale a jusante, após o desconfinamento do rejeito do reservatório, que se transformou de material sólido para um fluido viscoso.

A questão acerca do volume desprendido da Barragem do Fundão e propagado para a jusante é tratada por 3 relatórios técnicos:

- Morgenstern *et al.* (2016) citam que 32 Mm³ de rejeitos foram desprendidos do reservatório, o que representa 61% do volume contido, representando uma proporção anormalmente mais elevada em relação às estatísticas de falha de rejeitos da barragem;
- Outro relatório, elaborado por Geomecânica & Norwegian Geotechnical Institute (2016), estima em cerca de 32 Mm³ de rejeitos e água, que representam aproximadamente 58 % de um total de 55 Mm³ de materiais contidos na Barragem do Fundão, foram liberados quando do rompimento da barragem;
- O relatório elaborado pela Golder Associates (2016) menciona que o volume estimado seria de 32 Mm³ de rejeitos e água, representando 55 Mm³ de materiais contidos na Barragem do Fundão.

Todos esses relatórios convergem para o valor de 32 Mm³ de volume desprendido, porém, cada um traz uma porcentagem de quanto este valor representaria do volume total na elevação, na qual a barragem se rompeu. Ressalta-se que ainda existe uma incerteza associada ao volume de rejeitos desprendidos, apesar de vários esforços aplicados nesse sentido.

Esse questionamento persiste, uma vez que a curva cota volume apresentada de projeto não equivale a nenhuma dessas porcentagens acima citadas, quando calculadas para 32 Mm³ de rejeitos e água. A Figura 4.4 representa as curvas de lama e rejeito arenosos unificados, já que o material desprendido se misturou durante o processo de ruptura. Nessa curva, observa-se que 32 Mm³ corresponderia a uma porcentagem de aproximadamente 28%.

Após a ruptura da Barragem do Fundão, a Barragem de Santarém, localizada imediatamente a jusante da Barragem do Fundão, sofreu então um galgamento, armazenando parte do rejeito, cerca de 1,2 Mm³ (GOLDER ASSOCIATES, 2016), e o material liberado fluiu através do curso do córrego Santarém, adentrando em seguida o rio Gualaxo do Norte, que deságua no Rio do Carmo a aproximadamente 73 km a jusante (Figura 4.6), que por sua vez é tributário do Rio Doce.

Foi observado que, ao longo do caminho de jusante percorrido pela onda de ruptura, solos, vegetação e outros materiais foram arrastados, resultando em uma mistura de rejeitos, solos e detritos vegetais e antrópicos, como pontes e construções, que foram se depositando ao longo das planícies de inundação, das margens e calhas dos cursos de água e seus tributários, nos momentos em que a onda de sólidos teve sua velocidade reduzida em certos trechos de seu deslocamento. Esta heterogeneidade e restos de materiais como pontes, podem ser observada na Figuras 4.6, 4.7 e 4.8.

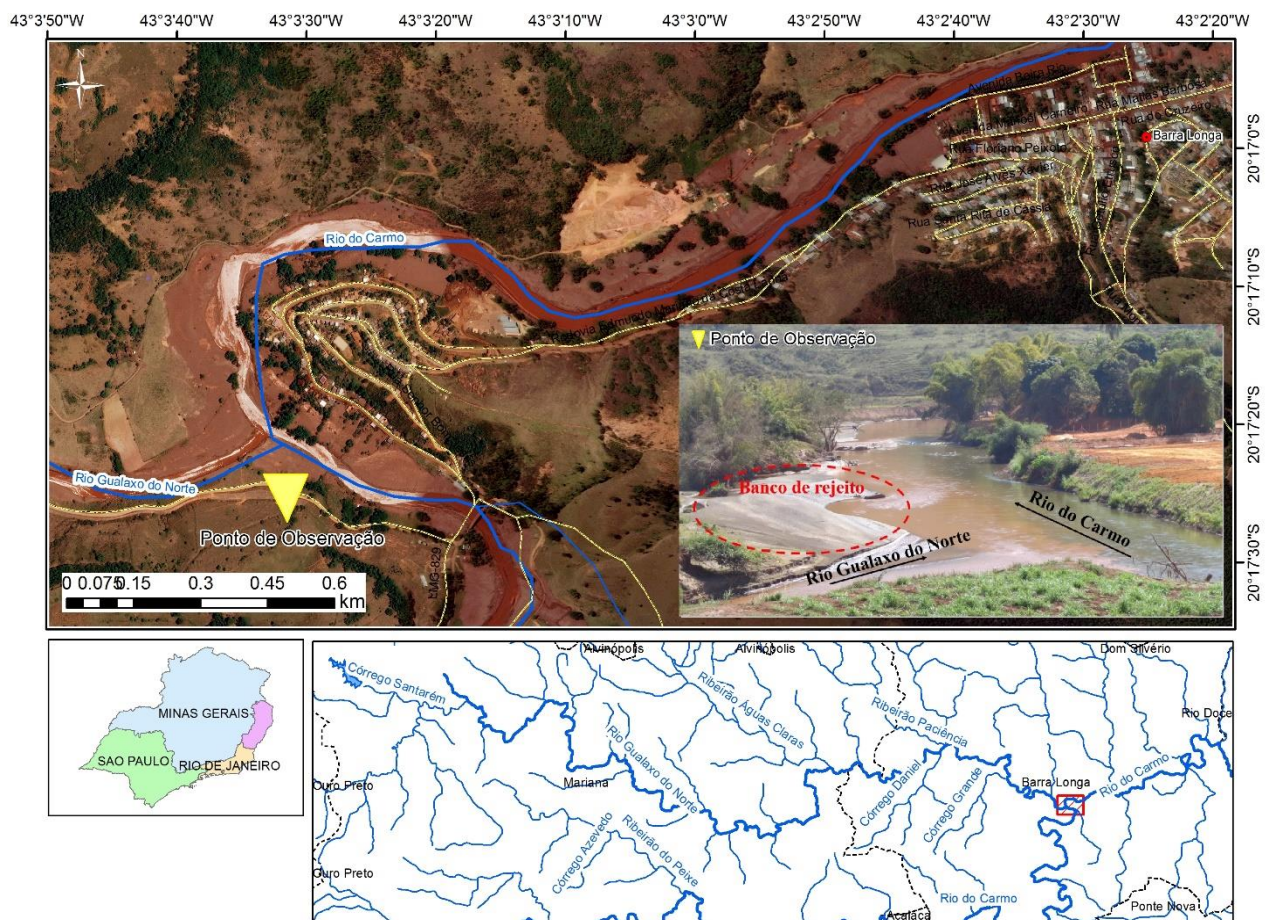


Figura 4.17 – Confluência do Rio Gualaxo do Norte com o Rio do Carmo. Carreamento de material e formação de banco de rejeitos na margem esquerda

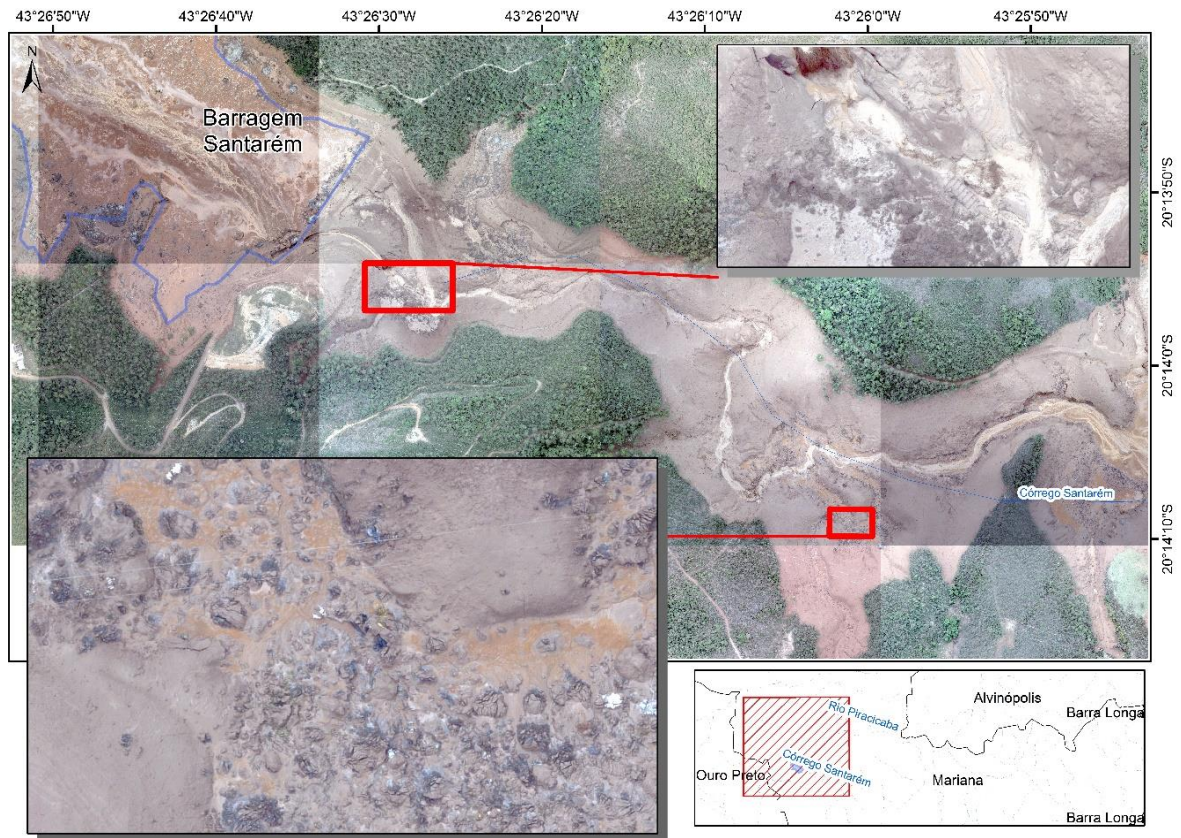


Figura 4.18 – Material heterogêneo carreado para a jusante



Figura 4.19 – Detritos arrastados pelo vale do rio, tabuleiro de concreto de ponte (Foto tirada na visita do dia 20/07/2016)

No trecho subsequente, a montante da bacia do Rio Doce, o fluxo de rejeitos e materiais carreados pelo escoamento encaminhou-se para o reservatório da Barragem de Candonga (Usina Hidroelétrica Risoleta Neves), que se localiza a aproximadamente 110 km a jusante da Barragem do Fundão (Figura 4.9). Grande parte deste volume se depositou nos leitos a jusante e sedimentou no reservatório, ao passo que frações mais finas e outros sólidos em suspensão foram continuamente liberados, através do vertedouro da barragem. Estima-se que 10,5 Mm³ de sedimentos ficaram retidos no reservatório da Barragem de Candonga (GOLDER ASSOCIATES, 2016).

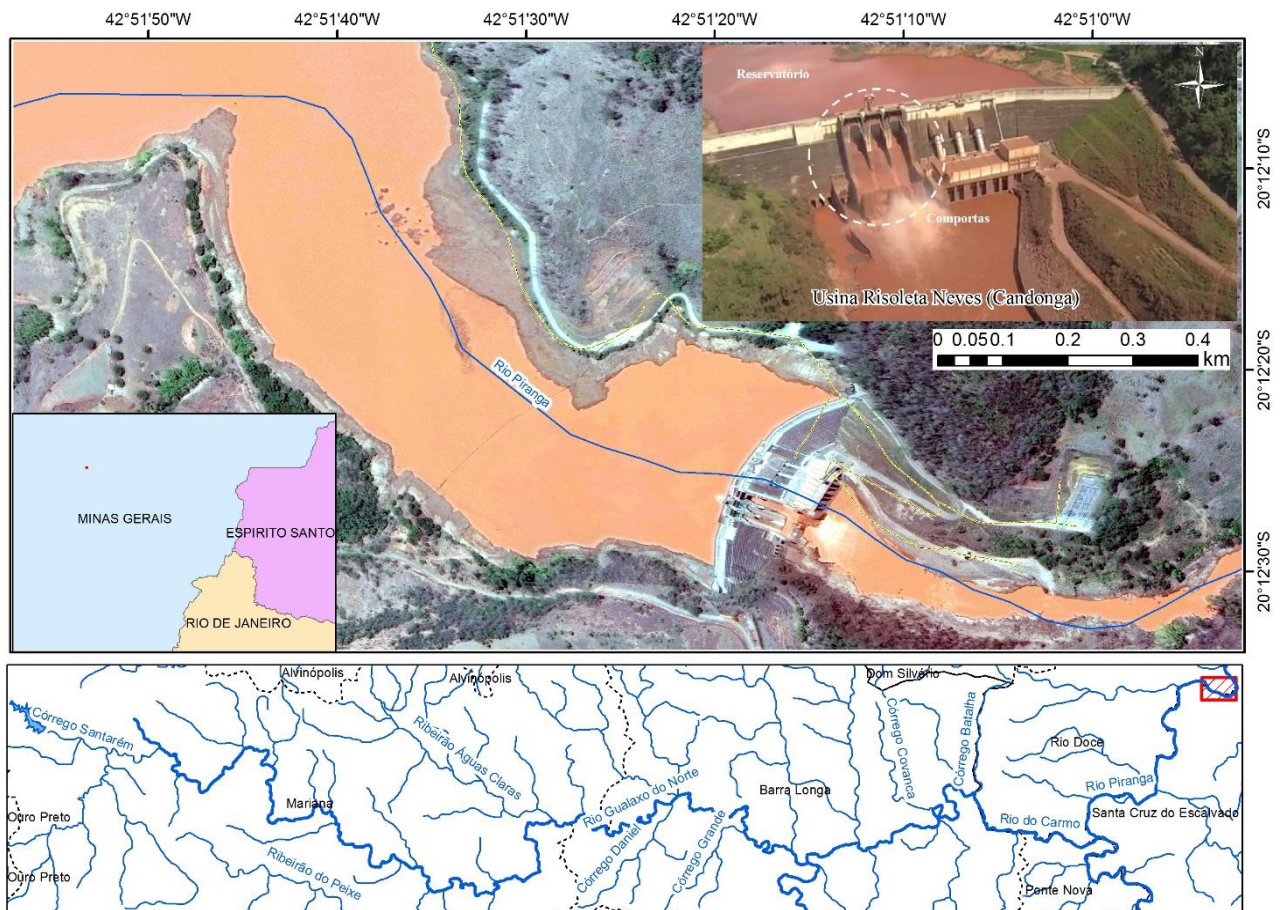


Figura 4.20 – Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (Candonga)

Em resumo, parte destes sólidos e materiais coloidais em suspensão depositou-se na calha do Rio Doce e nos reservatórios, ao longo do curso de água atingido. Parte desse material permaneceu em suspensão na água até a foz do rio Doce (Figura 4.10), caracterizando uma pluma de turbidez de cor alaranjada, penetrando no ambiente estuarino e costeiro, atingindo aproximadamente 640 km de curso de água.



Figura 4.21 – Lama de rejeitos de mineração da Samarco, na foz do Rio Doce
Fonte: Globo G1, 2016.

As alterações físicas, nos córregos e afluentes atingidos pela ruptura da Barragem de Rejeitos, são de cunho geomorfológico, hidrodinâmico e hidrosedimentológico.

As alterações químicas coteja a qualidade da água nos corpos de água e do subsolo, a qualidade do solo e a quantidade / qualidade de sedimentos transportados pelos cursos de água afetados.

As alterações físicas, nos leitos dos rios, são decorrentes da falha súbita da Barragem do Fundão, ocasionando a liberação de material (água e rejeitos) nos rios a jusante dessa estrutura. Esta alteração se dá pela dissipação de energia do fluxo de rejeitos e materiais arrastados e o distúrbio físico resultante, podendo ser considerados em um contexto geomorfológico (JAKOB & JORDAN, 2001), no qual a sua vazão é comparada às vazões normais do curso de água. Quando a vazão do fluxo de rejeitos e materiais arrastados pelo seu escoamento excede muito

as vazões que definem o tamanho e configuração do canal, é provável que este evento cause alterações significativas, visto que o mesmo não é capaz de acomodar as vazões do fluxo desses materiais. Existe uma quantidade de material que não foi ainda relativamente perturbado nas margens do rio, ou seja, não sofreu deslocamentos prévios por enchentes decorrentes de cheias naturais. Estes materiais são potencialmente solos nativos, vegetação e estruturas, que, no caminho do fluxo de rejeitos, foram arrastados pelo seu escoamento, devido à energia do escoamento e ao seu potencial erosivo.

Durante a passagem da cheia proveniente da ruptura da Barragem do Fundão, as alterações hidrodinâmicas, no leito do rio, decorreram do movimento dos rejeitos, através do Rio Gualaxo do Norte principalmente. Observa-se que a existência de tipologias diversas dos trechos fluviais foi o fator chave no transporte e deposição de rejeitos pelo vale a jusante. É notável que, pelas imagens posteriores ao evento de ruptura, a sequência dos trechos de planícies de inundação, separados por canais estreitos que causam estrangulamento hidráulico e conseqüentemente controlaram o fluxo e a deposição do material em áreas alagáveis, funcionou como bacia de deposição ao longo do rio principal. A passagem da onda de fluxo de detritos, através destas singularidades hidráulicas, atenuaram a onda de detritos, provocando remanso nas planícies de inundação da bacia e nos afluentes. É perceptível esse efeito do remanso no trecho do Rio Gualaxo do Norte, a montante da confluência com o córrego Santarém, como também a montante no Córrego Camargo, avançando 2,2 km até alcançar uma calha natural de cerca de 10 m a 15 m de altura (localizado fora da Vila Camargos). Os demais tributários menores (sem nome) do Rio Gualaxo do Norte e do Córrego Camargo sofreram igualmente o efeito de remanso.

5 DESENVOLVIMENTO DOS TRABALHOS

5.1 Introdução

De acordo com Ribeiro (2015), existe um grande empenho, inclusive do meio técnico internacional, para a determinação de uma abordagem única do problema dos estudos de ruptura hipotética de barragem, denominada “*Dam Break*”. Entretanto, a peculiaridade de cada caso fez com que inúmeras abordagens fossem desenvolvidas.

As especificidades dessas abordagens envolvem vários aspectos, sendo eles: cenários de ruptura a serem considerados, metodologia para a determinação da forma da brecha, características físicas e reológicas do material disposto na barragem, concentração volumétrica do fluido desprendido da barragem, modelos hidráulicos a utilizar, entre outros.

O estudo de caso abordado neste trabalho trata da ruptura da Barragem de rejeitos do Fundão. Serão descritas as metodologias e premissas utilizadas para determinar os parâmetros de entrada dos modelos hidráulicos, os modelos hidráulicos utilizados, a topografia, posterior geração das manchas de inundação e análise dos resultados, conforme Figura 5.1

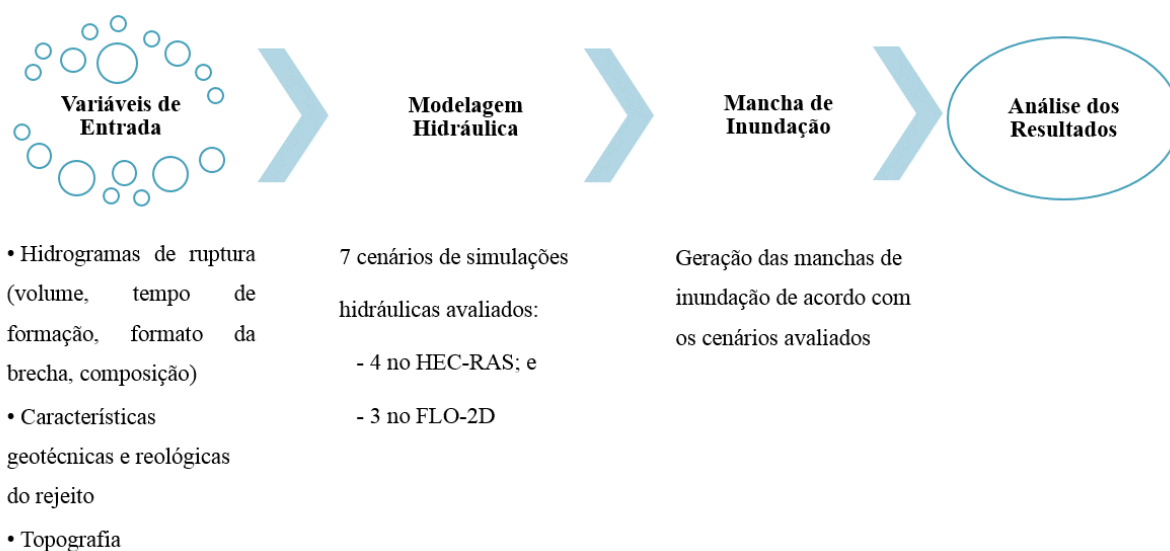


Figura 5.22 – Fluxograma da metodologia proposta

Pretende-se utilizar indicadores de desempenho para a análise dos resultados dos modelos determinísticos e posterior análise sobre as aplicabilidades de cada modelo.

Frisa-se que a análise dos resultados contribui para a avaliação de como variações, na saída do modelo, podem ser influenciadas, qualitativa ou quantitativamente, pelas diferentes fontes de variações, e como o modelo estudado depende dos dados de entrada introduzidos nele (YANG, 2011 *apud* SALTELLI *et al.*, 2000).

Metodologicamente, propõe-se utilizar dois dos modelos mais amplamente empregados neste tipo de estudo, conforme citado por USSD (2013), na geração dos resultados e mapas de inundação, o HEC-RAS e o FLO-2D PRO. O primeiro realiza modelagem hidrodinâmica Newtoniana unidimensional e bidimensional com escoamento não-permanente (Equação de Saint-Venant), enquanto que o segundo possibilita a propagação bidimensional de fluidos Newtonianos e não-Newtonianos. Aplicam-se também ajustes nos parâmetros hidráulicos na modelagem no HEC-RAS, de forma a adaptar esta simulação para fluidos hiperconcentrados. Nesse cenário, a comparação será realizada entre modelos que consideram fluxos Newtonianos, como água, e modelos que inserem a modelagem de fluidos não-Newtonianos, como o escoamento de hiperconcentrados.

Os principais parâmetros de entrada dos modelos hidráulicos utilizados são os hidrogramas de ruptura, a caracterização geotécnica, a caracterização reológica dos rejeitos e a topografia, que compõem o MDT (Modelo Digital de Terreno) utilizado na simulação.

A priori, não se tem estabelecido, de maneira abrangente, um modelo que represente uma solução única para a extensão dos impactos decorrentes da ruptura de barragens de rejeitos, utilizando o escoamento de fluidos hiperconcentrados. O FLO-2D possibilita a inserção de características reológicas do rejeito a ser propagado e considera, de maneira mais completa, a geometria do vale a jusante, diferentemente de outras metodologias existentes, como a proposta por Hungr (1995) e Jeyapalan *et al.* (1983).

Para consideração do fluido hiperconcentrado no modelo FLO-2D, é necessário determinar as propriedades reológicas do rejeito. Para essa determinação do material depositado na Barragem do Fundão, foi realizada a coleta do material desprendido da barragem e depositado no vale a

jusante. Após a coleta do material, realizou-se ensaios de caracterização geotécnicas e reológicas do rejeito de minério de ferro.

A partir da definição das características reológicas e geotécnicas do rejeito, da determinação da topografia a ser utilizada como base para os dois modelos hidráulicos, analisa-se de forma comparativa os dois modelos de propagação de inundação, utilizados neste estudo de caso.

A partir da mancha de inundação observada, analisaram-se as manchas geradas, a partir das simulações, e os resultados hidráulicos para os diversos cenários escolhidos. Com isso, avaliaram-se quais os parâmetros de entrada no modelo são mais sensíveis para a simulação, como também a aplicabilidade dos modelos, no caso de rupturas de barragens de rejeitos, com características do material desprendido, típicas de fluidos hiperconcentrados, não-Newtonianos.

Cabe ressaltar, contudo, uma questão notável deste estudo de caso. O principal ponto em comum para todos os cenários simulados se deve à inexistência de topografia de precisão do vale a jusante, como, por exemplo, levantamento a laser, aerofotogramétrico, LIDAR, entre outros. Na ausência da topografia de boa resolução, adotou-se uma fonte gratuita de resolução de 30 metros (SRTM).

Além de descrever as variáveis de entrada para os modelos hidráulicos, este capítulo apresenta as etapas intrínsecas de um estudo de caso de ruptura de barragem, sendo estes:

- i. Composição dos hidrogramas de ruptura, abrangendo o volume desprendido da barragem, o tempo de ruptura, a forma da brecha e a distribuição do volume no tempo;
- ii. Caracterização geotécnica e reológica dos rejeitos desprendidos da barragem;
- iii. Topografia do vale a jusante;
- iv. Propagação da onda de ruptura pelo vale a jusante por meio dos modelos hidráulicos;
- v. Geração das manchas de inundação; e

vi. Análise dos resultados gerados.

Foram realizados 7 (sete) cenários com diferentes simulações hidráulicas. Os resultados das simulações foram avaliados com parâmetros hidráulicos e geométricos, como vazão e profundidades máximas de inundação, tempo de chegada de onda. A avaliação dos resultados geométricos consistem no cômputo da diferença entre a área inundada observada e as áreas simuladas, sendo também utilizados índices de desempenho, conforme descrito no item 3.3.

O processo de geração dos mapas de inundação consistiu essencialmente em aplicações de técnicas de geoprocessamento, utilizando a ferramenta ArcGis. Os modelos utilizados, HEC-RAS e FLO-2D, geram os resultados em formato raster e *shapefile* respectivamente, ambos georeferenciados. Dessa forma, a geração dos mapas de inundação consistiu na sobreposição do arquivo exportado, em formato da mancha de inundação, à imagem de satélite da região de interesse.

5.2 **Reconstituição das Informações da Ruptura de Fundão**

5.2.1 **Visitas às áreas atingidas**

A partir de janeiro de 2016, a Defesa Civil permitiu visita à área de Bento Rodrigues, mediante justificativa. No dia 27 de janeiro de 2016, realizou-se a primeira visita técnica na área atingida, com o objetivo de reconhecimento da área de estudo a ser modelada hidraulicamente, as singularidades hidráulicas presentes na topografia, senão também pontos de interesse para possível calibragem do modelo. A Figura 5.2 demonstra alguns pontos de destaque observados durante esta visita, com suas respectivas localizações.



Figura 5.23 – Fotos e respectiva localização da visita a Bento Rodrigues no dia 27/01/2016

No dia 20/07/2016, foi realizada uma segunda visita à área impactada pela ruptura da Barragem do Fundão. Essa segunda visita teve como objetivo a coleta do material desprendido da barragem e depositado no leito do rio, com a finalidade de conhecer as propriedades reológicas e geotécnicas dos rejeitos, para posterior simulação hidráulica deste estudo de caso.

A Figura 5.3 ilustra o segundo ponto (P2), no qual foi coletado o material. Refere-se a um trecho do Rio Gualaxo do Norte, com as seguintes coordenadas: 684367 m E; 7754439 m S; fuso 23 S.



Figura 5.24 – Ponto P2 de coleta no rio Gualaxo do Norte, no dia 20/07/2016

Na visita do dia 20/07/2016, percorreu-se todo o trecho entre Bento Rodrigues e Gesteira, com a finalidade de análise e conhecimento dos impactos causados pela passagem da onda de cheia, proveniente da ruptura da Barragem do Fundão, pelo vale a jusante. A Figura 5.4 ilustra um trecho no Rio Gualaxo do Norte, no qual é perceptível a marca de cheia no tronco das árvores que não foram arrastadas, algumas vegetações carreadas, como também a criação de bancos de rejeito depositados nas margens do rio.



Figura 5.25 – Trecho impactado pela onda de ruptura da Barragem do Fundão no Rio Gualaxo do Norte no dia 20/07/2016

5.2.2 Entrevistas com testemunhas

Logo após o incidente, os moradores de Bento Rodrigues foram acomodados em hotéis e pensões no centro de Mariana / MG, porque as casas foram soterradas pelo material desprendido da Barragem do Fundão. Com o intuito de conhecer os tempos de chegada de onda, foram realizadas entrevistas, no dia 14/11/2015, com os antigos moradores de Bento Rodrigues na cidade de Mariana. Nestes relatos, houve convergência dos entrevistados, no que se refere à hora de chegada da onda de ruptura em Bento Rodrigues. O tempo estimado foi de 30 a 40 minutos após a ruptura da barragem, sendo equivalente a 16:00 horas do dia 05/11/2015.

Ressalta-se que nenhum nome foi citado, de forma a manter a privacidade das testemunhas e por não se tratar do ponto central nessas entrevistas. As entrevistas possuem como objetivo principal estabelecer a cronologia e aspectos principais do evento.

Foram entrevistadas 5 pessoas que descreveram o momento exato de chegada da onda em Bento Rodrigues, a partir de cada situação vivida. No momento da entrevista, o Distrito de Bento Rodrigues encontrava-se com acesso impedido ao público por questões de segurança. Apenas a Defesa Civil tinha permissão para acessar o local, portanto, postergada a visita técnica à área, quando da liberação da mesma.

Segue transcrita a descrição do evento de uma das pessoas entrevistadas, que narra a cronologia do evento: *“Eu estava fechando a policlínica e minha casa era no sentido da barragem. Eram aproximadamente 16:00 horas. Eu estava escutando um barulho muito estranho... Fiquei parado na rua por um momento... Passando uns 5 minutos, passou um colega meu falando que a Barragem tinha arrombado... Daí para frente foi uma correria em toda a cidade. No mais tardar, às 16:30 horas a onda já tinha tomado Bento Rodrigues. Foi tudo muito rápido... Vinha lama, pedaço de pau, uma moita de bambu junto.”*

Outra pessoa entrevistada disse que, às 15:50 horas, seu irmão, que trabalhava para a Samarco na área da Mina, telefonou avisando que a Barragem havia rompido. Quando olhou pela janela, já era visível a poeira e já se escutava um barulho muito alto. Segundo o seu relato, não demorou 15 minutos para a chegada da onda em Bento Rodrigues.

Um relato detalha o momento em que a onda encontra a seção de controle hidráulica a jusante de Bento Rodrigues, diminui a velocidade e aumenta o nível de lama em Bento Rodrigues: *“Minha casa era próximo ao rio, porém em um lugar mais alto... distância de 200 metros do rio. Eu estava na esquina de casa na hora da ruptura...um colega meu passou gritando que a barragem tinha estourado, porque o tio da namorada dele estava trabalhando lá na barragem no momento. Aí na hora que a barragem estourou, o tio ligou para essa menina avisando... Era por volta de 15:15 – 15:20 horas... Foi questão de 10 – 15 minutos, a lama já estava chegando em Bento Rodrigues. A onda desceu em alta velocidade, porém, chega a um certo ponto, para baixo de onde a gente morava, que é um lugar que a gente chamava de funil. E lá eram dois*

paredões de pedra, de um lado e do outro...e começou a represar, a lama então não tinha tanta vazão para baixo, aí, a lama que visse para trás tinha que espalhar. Então, neste momento, ela estava com pouca velocidade...Neste momento em que ela foi perdendo a velocidade, ela começou a espalhar Bento e a subir. Logo depois de Bento Rodrigues, era um lugar que a gente chamava de funil.”

Outra testemunha entrevistada, trata-se de uma professora da UFMG, do departamento de Geotecnia e Transportes, que também não será identificada por questões de privacidade. Esta professora encontrava-se logo a jusante da Barragem do Fundão, a montante da Barragem de Santarém, realizando coleta de amostras na Samarco, para pesquisas da UFMG. Em seu relato, declara ter escutado, por volta das 14:00 horas, um barulho similar a um trovão. Entre às 14:30 horas e 15:00 horas, sentiu alguns tremores de terra. Cita que as 16:00 horas escutou dois estrondos que já correspondiam à ruptura e liberação do rejeito para jusante.

De acordo com estes relatos e juntamente aos relatos apresentados no relatório da ruptura, elaborado por MORGENSTERN *et al.* (2016), conclui-se que o evento de ruptura ocorreu rapidamente, atingindo Bento Rodrigues em menos de 30 minutos.

5.3 Etapa 1: Parâmetros de entrada no modelo

5.3.1 Hidrograma de Ruptura

Para a determinação dos hidrogramas de ruptura, foi realizada a composição entre dados observados e estimados que abrangem o volume desprendido da Barragem do Fundão, o tempo de ruptura, a forma da brecha e a distribuição do volume no tempo. Conforme observado no evento, a ruptura da Barragem do Fundão ocasionou o assoreamento e posterior galgamento da Barragem Santarém, localizada a jusante.

O volume de rejeitos liberados em um caso de ruptura de barragem de rejeitos, a priori, é de difícil definição. De acordo com uma análise de regressão apresentada por Rico *et al.* (2008), em casos históricos, cerca de 35% do volume total são propagados a jusante, sendo, entretanto, possível observar registros de até 100% do volume total do reservatório mobilizado para jusante. O volume total é composto por água e sedimentos.

Observa-se que a influência de fatores preponderantes, como a quantificação de água em relação ao material sólido (teor de sólidos ou concentração volumétrica), determinada pela existência ou não de praia no reservatório, grau de adensamento dos rejeitos e ruptura associada a evento chuvoso ou seco, não foram contemplados nesta análise.

No estudo de caso da Barragem do Fundão, o volume desprendido do reservatório foi determinado pelos relatórios técnicos, em consonância com a curva cota x volume de projeto, apresentada no item 4.1 (MORGENSTERN *et al.*; GEOMECÂNICA & NORWEGIAN GEOTECHNICAL INSTITUTE; GOLDR ASSOCIATES, 2016). Todas as referências apresentadas convergem para o valor de rejeito desprendido da Barragem do Fundão de 32 Mm³, conforme descrito no item 4.3. Considerou-se também que 1,2 Mm³ de material ficou retido na Barragem Santarém. O hidrograma propagado para jusante contempla esse material retido e posterior galgamento da Barragem Santarém.

No estudo de caso da ruptura da Barragem do Fundão, como o mecanismo de ruptura se deu por liquefação do rejeito, considerou-se que grande parte do maciço foi mobilizado, conformando a brecha até o terreno natural, segundo Figura 5.5. Sendo assim, a geometria da brecha de ruptura foi determinada pela topografia primitiva do vale. Conhecendo o ano do projeto e posterior construção da Barragem do Fundão (2005), buscou-se a topografia anterior a este ano, de forma a obter o terreno natural. O raster (denominado “SRTM1S21W044V3”) foi levantado em 11 de fevereiro de 2000, possibilitando dessa forma obter a conformação do terreno natural, anterior a construção da Barragem do Fundão. O MDE SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc-Second Global*), com resolução de 30 m, está disponível em <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

Na determinação do tempo de formação da brecha referente à Barragem do Fundão, foram compilados diferentes fontes de dados, incluindo testemunhas no local, vídeos disponíveis na internet e relatórios técnicos sobre o evento (MORGENSTERN *et al.*; GEOMECÂNICA & NORWEGIAN GEOTECHNICAL INSTITUTE; GOLDR ASSOCIATES, 2016).

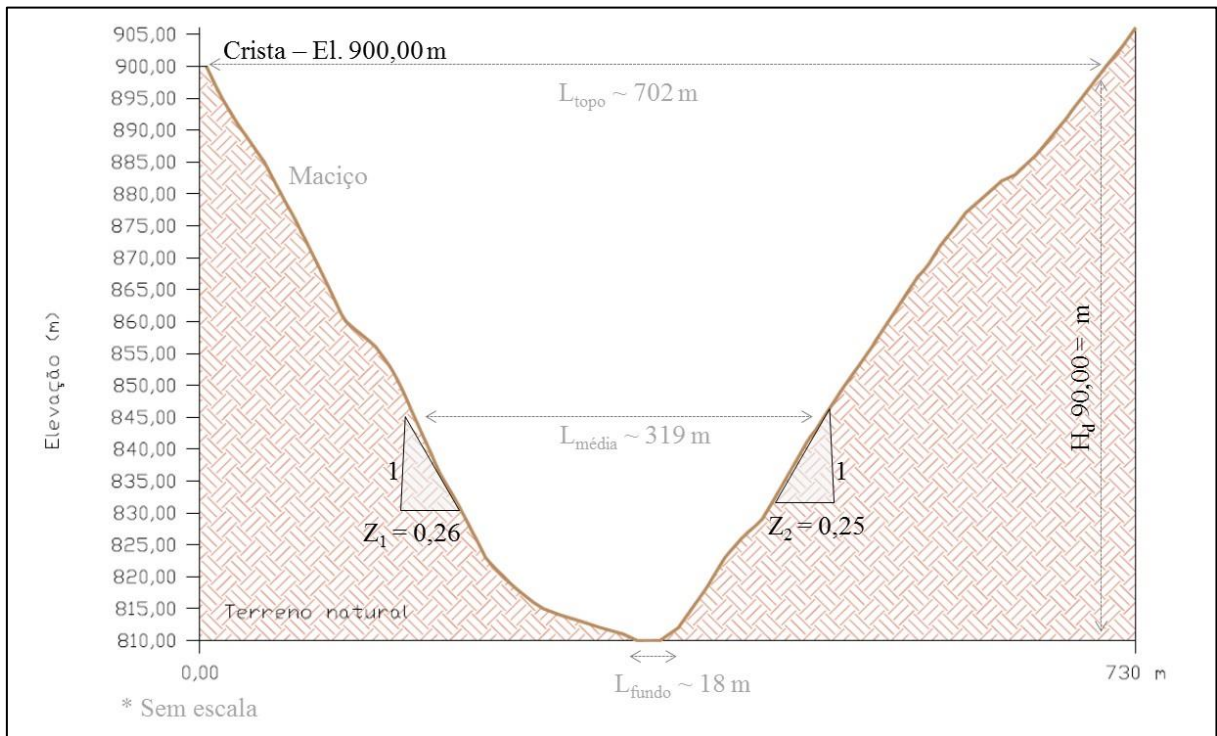


Figura 5.26 – Brecha de ruptura

Para o cômputo da vazão de ruptura, foram aplicadas as equações de previsão, propostas por Froehlich (2016), Azimi *et al.* (2015), e o modelo hidrológico paramétrico, HEC-HMS (USACE). A grande vantagem do modelo paramétrico é a obtenção do hidrograma de ruptura, cujos parâmetros geométricos e o tempo de formação são obtidos por meio de equações de previsão ou de análise comparativa de casos históricos semelhantes. Nesse tipo de modelo, o hidrograma de ruptura é calculado pela evolução linear ou senoidal das dimensões geométricas da brecha, ao longo do tempo, e por meio de alguns princípios de hidráulica (ROCHA, 2015).

A metodologia proposta por Froehlich (2016) trata de dois modelos matemáticos não-lineares, para previsão da vazão de pico proveniente da ruptura de barragem, com base na avaliação das medidas de 41 falhas de barragens. Consideram-se barragens de terra as estruturas compostas por materiais de aterro, incluindo solo natural ou rocha, resíduos obtidos de operações de mineração ou de moagem. Destarte, considera-se que a Barragem do Fundão, alteada com a parcela arenosa do próprio rejeito, é de terra. Quanto à altura e volume da brecha (H_b), Froelich

(2016) recomenda que o fundo da brecha seja formado usualmente até a fundação da barragem, que possui parâmetros de resistência maiores que o maciço.

É necessário que a altura máxima da brecha ou a mínima elevação do fundo seja estimada com uma razoável certeza. O volume de água (V_w) acima do fundo da brecha, contido no reservatório no momento na ruptura, representa o montante que irá eventualmente se desprender do reservatório. Logo, dependendo do design do maciço e da elevação do fundo da brecha, o V_w pode ser substancialmente menor do que a capacidade do reservatório (FROEHLICH, 2016).

A representação física do evento de ruptura, com a composição do hidrograma de ruptura da Barragem do Fundão e posterior galgamento e hidrograma efluente da Barragem de Santarém, foi realizada no modelo HEC-HMS 4.2.

Nesse contexto, de maneira a avaliar a influência do volume de sólidos em relação ao volume de água, foram criados 3 hidrogramas de ruptura para os diferentes cenários avaliados:

1. Hidrograma composto pelo volume desprendido, correspondente a 100% do volume como sendo de água;
2. Hidrograma considerando o teor de sólidos da Barragem do Fundão, discretizando tanto a vazão total quanto a concentração volumétrica do volume desprendido. Neste caso, adotou-se, como premissa, que a C_v se manteria constante ao longo de todo o tempo, ou seja, o material desprendido da barragem corresponde a um fluido de igual C_v ao longo do tempo; e
3. Hidrograma considerando o teor de sólidos da Barragem do Fundão, discretizando tanto a vazão total quanto a concentração volumétrica do volume desprendido. Neste caso, adotou-se, como premissa, que a C_v varia ao longo de todo o tempo, existindo um pico de desprendimento de material sólido do reservatório, igualmente temporizado ao pico da vazão total.

Esta variação da concentração se fez importante para a avaliação da variação das características do escoamento, quando incorporados os parâmetros do rejeito, uma vez que, quanto maior o

teor de sólidos presente no fluido, maior a variação de viscosidade em relação à água e à presença de tensões de escoamento.

Portanto, em síntese, foram adotadas as seguintes premissas:

- O volume de material (água e rejeito) desprendido da Barragem do Fundão corresponde a 32 Mm³;
- A geometria da brecha determinada a partir da conformação do terreno natural, obtido posteriormente a construção do maciço, pela topografia denominada primitiva;
- O tempo de formação da brecha foi determinada pelas referências citadas de testemunhas e relatórios técnicos;
- Variação da composição dos hidrogramas de ruptura, sendo um essencialmente aquoso, e outros dois compostos pela concentração volumétrica do reservatório.

5.3.2 Caracterização Geotécnica dos Rejeitos

A caracterização geotécnica faz-se importante para garantir que o material ensaiado e posteriormente utilizado no modelo hidráulico se assemelha ao material desprendido da Barragem do Fundão. É interessante também conhecer a variabilidade das amostras de maneira espacial, dada pela incorporação de material orgânico e/ou alterações físico/químicas que possam ocorrer no processo de propagação de material pelo vale a jusante. Essas alterações, no que lhe concerne, podem interferir nas propriedades reológicas obtidas.

Para a determinação dos parâmetros de entrada referentes à caracterização geotécnica e reológica do material depositado na Barragem do Fundão, foi coletado material desprendido da barragem em 3 pontos a jusante da barragem, sendo um no córrego Santarém (na região de Bento Rodrigues) e dois mais a jusante, no Rio Gualaxo do Norte, de acordo com o mapa apresentado na Figura 5.6.

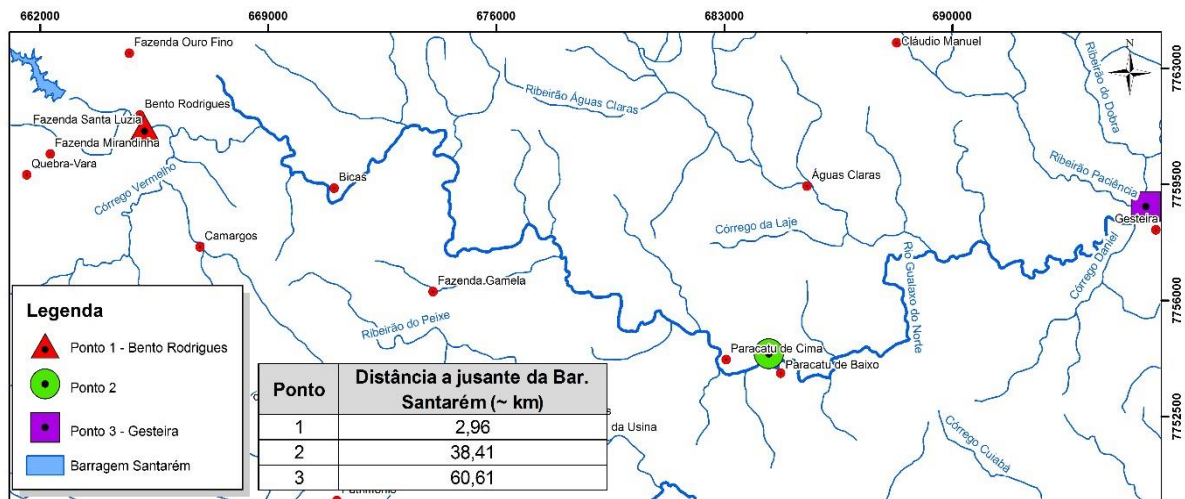


Figura 5.27 – Pontos de coleta das amostras do rejeito para ensaios de caracterização geotécnica e reológica

Após a coleta do material, iniciou-se a realização dos ensaios de caracterização geotécnicas e reológicas do rejeito de minério de ferro no Laboratório de Mecânica dos Solos (LAMES) da UFES (Universidade Federal do Espírito Santo). Nessa caracterização, foram realizados os ensaios de granulometria por sedimentação, determinação do peso específico dos grãos, Índice de Plasticidade, Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Liquidez (LL).

A amostra foi preparada para a caracterização, seguindo-se os procedimentos descritos na NBR 6457 (ABNT, 1986). Para a determinação da densidade real dos grãos, utilizou-se a referência DNER-ME 093 (DNER, 1994) e a análise granulométrica, que foi realizada segundo a NBR 7181 (ABNT, 1984). Para a determinação do Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), adotou-se as recomendações prescritas na NBR 6459 e NBR 7180 (ABNT, 1984) respectivamente.

Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos (LAMES) da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, em parceria com o mestrando Neemias Dias.

Foi determinado também o teor de matéria orgânica de cada amostra. Para isso, utilizou-se a NBR 13600 (ABNT, 1996). Nessa norma, utiliza-se uma mufla com temperatura a

aproximadamente ($440 \pm 5^\circ\text{C}$) para a queima da amostra e posterior determinação do teor de matéria orgânica.

5.3.3 Reologia dos Rejeitos

De acordo com Tarcha (2014), a determinação precisa da tensão limite de escoamento é complexa e pode exigir a avaliação de métodos e procedimentos distintos, já que o material apresenta diferentes comportamentos, e existe a dificuldade de reprodutibilidade dos resultados. Por conseguinte, optou-se pela utilização de 3 metodologias distintas para a determinação do comportamento reológico do material desprendido da Barragem do Fundão, sendo eles:

- 1) Reômetro rotacional com palheta coaxial;
- 2) Reômetro rotacional cilindro concêntrico;
- 3) Teste de *Slump*.

Na determinação dos parâmetros reológicos do material, determinaram-se os parâmetros de viscosidade e tensão limite de escoamento do material. O primeiro teste aplicado corresponde ao reômetro rotacional com palheta coaxial, disponível no laboratório da UFES. Este reômetro rotacional é do tipo AR 2000ex com geometria associada à palheta coaxial, conforme ilustrado na Figura 5.7 (a). Esse equipamento funciona com tensão controlada, permitindo a aplicação de duas metodologias para obtenção das curvas reológicas: a imposição de tensões fixas e a imposição da taxa de cisalhamento. É possível também realizar o teste de varredura de tensões, que propicia uma primeira estimativa da tensão limite de escoamento da amostra.

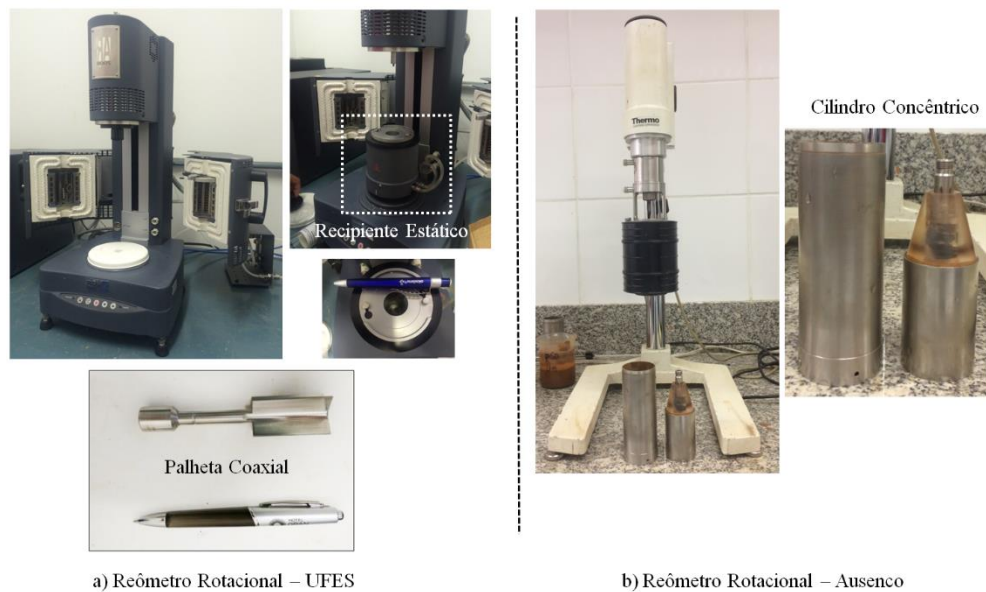


Figura 5.28 – a) Reômetro rotacional AR 2000ex utilizado nos ensaios de reologia na UFES, geometria com palheta Coaxial; **b)** Reômetro rotacional utilizado pela Ausenco, geometria com cilindro concêntrico

No esforço de determinar a tensão limite de escoamento do rejeito, foram realizados testes com três características distintas: varredura de tensões de cisalhamento, controle da tensão e controle da taxa de cisalhamento. A partir da varredura de tensões, é possível a observação da variação da taxa de cisalhamento, teste este que representa um reflexo do comportamento da amostra, a partir do incremento gradual da tensão cisalhante. A partir desse resultado, foram fixadas tensões próximas ao intervalo obtido com o incremento de tensões e taxas de cisalhamento.

Enfatiza-se que o reômetro utilizado controla intrinsecamente a tensão aplicada, portanto, apesar de permitir a configuração de taxas de deformação, efetivamente o reômetro controla as tensões para resultarem nas taxas estipuladas, ou seja, executa controle por realimentação. A tecnologia de tensão controlada aplicada sugere que essa variável seja obtida com precisão, sendo adequada para ensaios que demandam um controle sensível (TARCHA, 2014).

Para o segundo teste reológico, utilizou-se o reômetro rotacional, provido pela empresa Ausenco. Nesse teste, utilizou-se a geometria de cilindros concêntricos, diferente da utilizada na UFES, conforme Figura 5.7 (b). Evidencia-se que a utilização dos dois testes distintos foi

relevante, posto que a faixa das concentrações volumétricas funcionais testadas nos reômetros foram diferentes.

O reômetro rotacional com palheta coaxial possui limitação de fábrica para taxas de cisalhamento inferiores a 10^{-2} s^{-1} . Conseqüentemente, durante a realização dos ensaios, conseguiu-se trabalhar com concentrações volumétricas entre 46% e 55% ($46\% < C_v < 55\%$). Conquanto o reômetro rotacional, com cilindro coaxial utilizado, opera na faixa de concentrações volumétricas entre 35% e 42% ($35\% < C_v < 42\%$). A Figura 5.8 ilustra a consistência do material a diferentes concentrações volumétricas, nas faixas próximas aos valores testados.

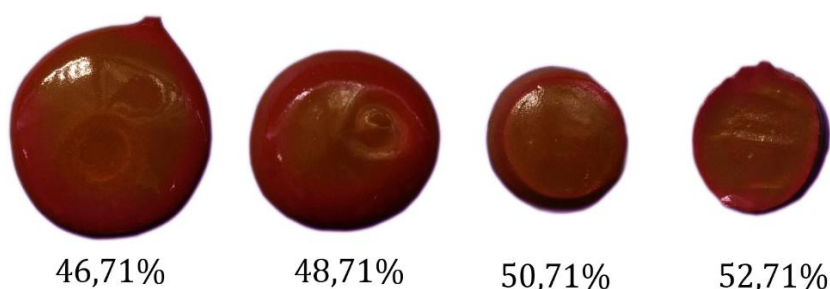


Figura 5.29 – Amostras de rejeitos a diferentes concentrações volumétricas

O terceiro ensaio reológico realizado foi o teste de *Slump*. Estes testes foram realizados em conjunto com a aluna da UFMG, Bárbara Batista, no âmbito do seu TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) em Engenharia Civil, em 2016. Para esse teste, desenvolveu-se um aparato simples e funcional de PVC, com as dimensões necessárias para a aplicação da metodologia proposta por Pashias *et al.* (1996), conforme descrito no item 3.1.3. Nessa metodologia proposta, variam-se as superfícies de realização do teste de *slump*, entre lisas e rugosas, não sendo encontradas interferências significativas nos valores finais dos testes. A partir dessa constatação, concluiu-se que o atrito existente, no local que ocorrerá o fluxo da amostra, não interfere no resultado final, inferiu-se, pois, que a escolha do material, utilizado no cilindro, também não influenciaria significativamente nos resultados de *slump*.

Pashias *et.al* (1996) recomenda que, em geometrias cilíndricas, a razão H/D (altura por diâmetro) deve ser mantida próxima a 1 (um), dado que, para razões muito grandes, o material poderia fluir consideravelmente, e assim a altura do *slump* aumentaria. Em contrapartida, para razões muito pequenas, o diâmetro muito grande impediria a medição do decréscimo real da altura do *slump*, e assim apenas uma pequena parcela da tensão de escoamento conseguiria ser calculada. Posto isso, o aparato escolhido possui altura igual a $H=162$ mm, e o diâmetro $D=96,5$ mm, sendo a razão H/D em torno de 1,68, compatível com o dimensionamento proposto pela metodologia. A Figura 5.9 ilustra o aparato utilizado com suas respectivas dimensões.

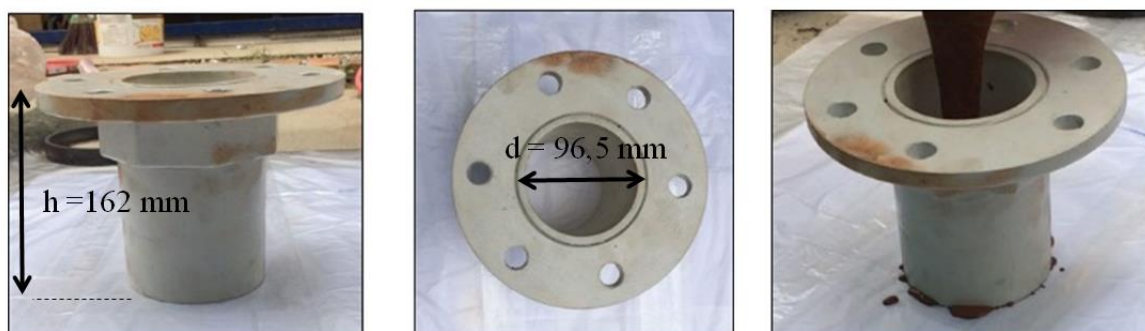


Figura 5.30 – Suporte cilíndrico para o teste de *Slump*

Salienta-se que este teste possui a correlação para o cálculo somente na tensão limite de escoamento, não sendo correlacionado com a viscosidade, que é também um parâmetro importante na determinação do comportamento reológico do rejeito.

5.3.4 Topografia

O MDE (Modelo Digital de Elevação) gerado, para o estudo de caso da ruptura da Barragem do Fundão, foi a base gratuita proveniente da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução espacial de 30 metros. Essa topografia foi disponibilizada pelo *website Earth Explorer* (USGS, 2016).

A topografia é um fator importante para a simulação hidráulica. Como ressalta YAN *et al.* (2015), não é possível comparar as incertezas relacionadas à precisão da topografia a outras incertezas associadas à modelagem hidráulica. Entretanto, mesmo não sendo possível mensurar

essas incertezas em relação a outros fatores inerentes à modelagem, é de fato mostrado, a partir de diversos estudos (ARONICA *et al.*, 1998; PAPPERBERGER *et al.*, 2005; SANDERS, 2007), que erros na topografia impactam significativamente nos resultados do modelo.

Extenuantes tentativas de obtenção de topografia de precisão, através de solicitações à Samarco e ao Ministério Público Estadual (MPMG), responsável pelo caso, foram realizadas sem sucesso. Notou-se a incompreensão da importância dos esforços de pesquisa, como esta, para aperfeiçoamento dos próprios planos emergenciais pelas partes envolvidas, ainda que sob influência do embate judicial e repercussões decorrentes. Assim, optou-se pelos modelos digitais de terreno gratuitos, sendo o mais recomendável, para estudos hidráulicos, o MDE SRTM (YAN *et al.*, 2015), que foi utilizado para este estudo.

O SRTM foi gerado por interferometria por radar. Essa técnica possui um imageador que, por meio de uma antena central, emite um sinal e registra as informações do retorno do sinal por antenas auxiliares posicionadas em uma distância conhecida, ao se deslocar ao longo de sua trajetória. Esse projeto foi originado de uma cooperação entre a NASA, a NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*, do Departamento de Defesa dos Estados Unidos), as agências espaciais alemã (DLR) e italiana (ASI). O sobrevoo da missão SRTM ocorreu em fevereiro de 2000.

Até o início de 2015, os dados eram distribuídos gratuitamente somente na resolução de 90 m, com exceção dos Estados Unidos, cuja área era disponibilizada com resolução de 30 m (ROCHA, 2015). Após o anúncio feito na Cúpula do Clima, realizada em Nova York em setembro de 2014, os dados, com resolução de 30 m, passaram a ser distribuídos gratuitamente em escala global. Essa alteração possibilitou melhorar em 3 vezes a resolução espacial dos estudos de inundação que utilizam o MDE STRM como base topográfica. De maneira ilustrativa, na Figura 5.10 está apresentada uma amostra do ganho na descrição de terreno, quando se aumenta a precisão horizontal do MDE SRTM de 90 m para 30 m.

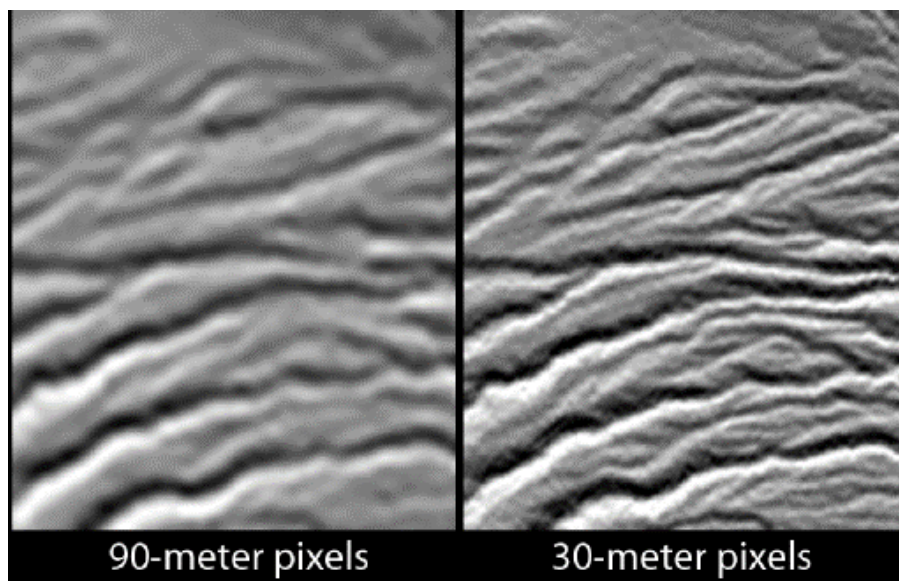


Figura 5.31 – Ilustração comparativa entre o píxel de 90 m e 30 m
Fonte: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

São descritas, a seguir, algumas considerações importantes, quando se utiliza o SRTM como base topográfica para modelos hidráulicos.

Deve-se atentar para a significância dos erros verticais do SRTM, quando aplicados em trechos de rios locais ou em estudos de escalas pequenas. Os erros verticais característicos do SRTM podem ser resultantes de ruídos aleatórios com alturas aproximadas entre 2 m e 5 m (YAN *et al.*, 2015).

Uma das maiores desvantagens do SRTM, para modelagem hidráulica, está relacionada ao fato de a tecnologia por interferometria por radar não possibilitar a obtenção da geometria da calha abaixo do nível de água (VIANINI NETO, 2016). Os dados do SRTM capturam a elevação do nível de água no momento da passagem emissão do sinal (Farr *et al.*, 2007). Adicionalmente, uma vez que o píxel possui tamanho de 30 metros, as elevações das regiões, no entorno do curso de água, são representadas junto à elevação do curso de água em um único valor de elevação. Esse comportamento resulta em superestimativa na elevação do fundo do curso de água. Nessa perspectiva, o ajuste do MDE, de acordo com seções topobatimétricas levantadas em campo, mostrou-se de fundamental importância.

Para a área a jusante da Barragem do Fundão, realizou-se a calibração do canal do MDE SRTM, a partir dos valores das seções topobatimétricas disponibilizadas pelo estudo de Pimenta de Ávila (2008). No âmbito deste estudo, foram realizados trabalhos, em campo, com o intuito de caracterizar o canal principal, através de seções topobatimétricas. Rocha (2015) cita que o ajuste da topografia, a partir das seções, pode levar à diminuição da diferença média entre as elevações de pontos de controle, como na retroanálise de Miraí, de 5,6 m para 0,7 m.

No estudo de ruptura hipotética realizado pela Pimenta de Ávila em 2008, para a caracterização do córrego Santarém e Rio Gualaxo do Norte, foram levantadas 4 seções topobatimétricas (STB) em novembro de 2007. A Figura 5.11 ilustra um croqui esquemático realizado com parte do documento G021600-G-130513 (numeração Samarco), emitido em março de 2008 pela Pimenta de Ávila. Ressalta-se que este documento faz parte do acervo técnico repassado pelo MPMG para esta pesquisa. A Tabela 5.1 descreve as cotas de fundo do curso de água, obtidas através do levantamento topobatimétrico, e utilizadas para calibração altimétrica do MDE SRTM.

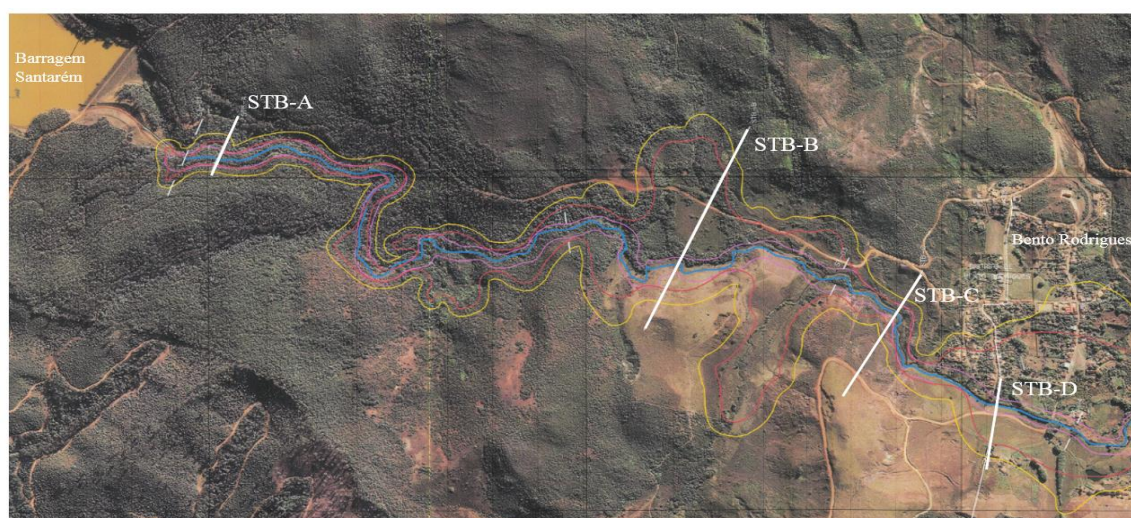


Figura 5.32 – Croqui das seções topobatimétricas levantadas em 2007

Tabela 5.7 – Cota de fundo das Seções topobatimétrica (STB) levantadas

STB	Cota de Fundo (m)
A	721,41
B	697,63
C	694,02
D	692,05

A partir deste ajuste, foi gerado um modelo topográfico hidrológicamente consistente, incluindo a inserção de canais naturais para encaminhamento do fluxo e altimetricamente alinhado pelas seções topobatimétricas, conforme ilustrado na Figura 5.12.

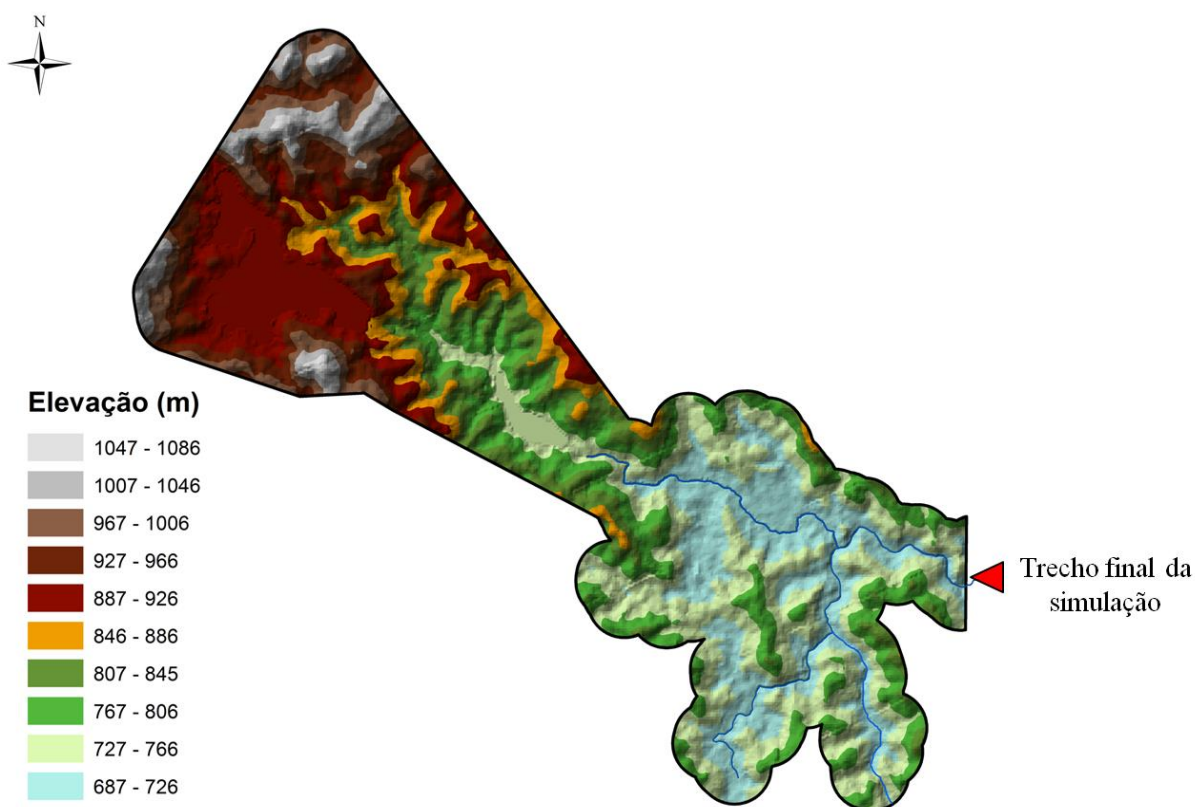


Figura 5.33 – MDE utilizado na simulação hidráulica

Com a disponibilização gratuita de imagens com boa resolução, como as imagens do Google Earth PRO e *Bing*, os estudos de inundação realizados com modelagem hidráulica veem sendo apresentados, sobrepondo a mancha à imagens na etapa de mapeamento (ROCHA, 2015). Entretanto, em muitos casos observa-se que o talvegue gerado através do MDE e o talvegue observado na imagem não são espacialmente alinhados e/ou equivalentes em sua forma. Conforme observado por Paiva *et al.* (2011), além da questão envolvendo o posicionamento, existe a não representatividade correta das elevações de fundo, afetando assim o perfil longitudinal extraído diretamente do MDE. Estes ruídos são erros sistemáticos relacionados à vegetação, aos efeitos da superfície de água e aos erros dos próprios dados do MDE.

Para a eliminação dos ruídos do SRTM, foi realizada a correção do perfil longitudinal do leito do rio. A correção foi baseada no perfil retirado do ArcGis e posterior rotina computacional executada fora do ArcGis. Na rotina de cálculo, adotou-se que uma cota altimétrica de montante do perfil deve ser igual ou superior à cota de jusante, como também altimetricamente alinhada com as seções topobatimétricas levantadas.

Assim como observa Rocha (2015), dados topográficos de precisão possibilitam a descrição do talvegue e da planície de inundação, sendo indicadas a qualquer análise de risco de inundação. MERWADE *et al.* (2008) pondera que a qualidade e resolução do MDT influencia os cálculos hidrológicos, hidráulicos e conseqüentemente a extensão da inundação. Entretanto, observa-se que a utilização de topografia de precisão, que resultaria teoricamente em resultados melhores, ainda não é uma realidade, na engenharia hidráulica, aplicada ao setor minerário no Brasil.

5.4 ***Etapa 2: Simulação Hidráulica***

5.4.1 **Modelos Hidráulicos**

De maneira a avaliar a aplicabilidade dos diferentes tipos de simulação hidráulica, 1D, 2D, aquoso e hiperconcentrado, e analisar a influência da escolha do modelo de propagação hidráulica, no mapeamento de inundações decorrente de rupturas de barragens de rejeitos, foram analisados sete cenários, conforme descrito na Tabela 5.2. Os modelos utilizados foram os programas HEC-RAS e FLO-2D.

Tabela 5.8 – Cenários simulados

Modelo Hidráulico	Cenário	Tipo simulação / Grid (m)	Tipo Fluido	Tipo do hidrograma
HEC-RAS	1	1 D	Aquoso	Hidrograma único
	2		Hiperconcentrado com ajustes nos parâmetros do modelo hidráulico	Hidrograma único
	3	2 D / 15 m	Aquoso	Hidrograma único
	4		Hiperconcentrado com ajustes nos parâmetros do modelo hidráulico	Hidrograma único
FLO-2D	5	2D / 15 m	Aquoso	Hidrograma único
	6		Hiperconcentrado com incorporação dos parâmetros de reologia dos rejeitos	Separação do volume de sedimentos e água: Hidrograma híbrido com C_v constante e igual a 47%
	7			Separação do volume de sedimentos e água: Hidrograma híbrido com C_v variável - Composição 3

5.4.2 Propagação da Onda de Cheia

O evento de ruptura de barragens possui sua natureza intrinsecamente transiente. Sendo assim, para a representação da cheia proveniente deste fenômeno, adota-se geralmente o regime de escoamento não permanente. Nessa conjuntura, é necessário determinar as condições de

contorno de montante e jusante, as seções transversais ou malha computacional e os parâmetros de convergência e estabilidade deste tipo de simulação.

- Condição de contorno de montante

Como condição de contorno de montante, foi utilizado o hidrograma resultante das simulações hidrológicas realizadas no HEC-HMS, descritas no item 5.3.1. Ressalta-se que este hidrograma é referente ao galgamento da Barragem Santarém, localizada a cerca de 2 km a jusante da Barragem do Fundão e, portanto, o ponto de início da simulação hidráulica refere-se ao trecho logo a jusante da Barragem Santarém.

- Condição de contorno de jusante

Neste estudo de caso, utilizou-se a profundidade normal como condição de contorno de jusante. O trecho simulado engloba:

- ✓ Planície de inundação característica da região de Bento Rodrigues (Figura 5.13);
- ✓ Estreitamento do trecho do rio a jusante de Bento Rodrigues (Figuras 5.14 e 5.15);
- ✓ Condição de contorno em um trecho mais a jusante do controle hidráulico proveniente do estreitamento.

As fotos ilustrativas das Figuras 5.13 a 5.15 foram obtidas na visita à área simulada em 27/01/2017.



Figura 5.34 – Vista da extensa planície de inundação em Bento Rodrigues após o acidente (Foto tirada na visita do dia 27/01/2016)

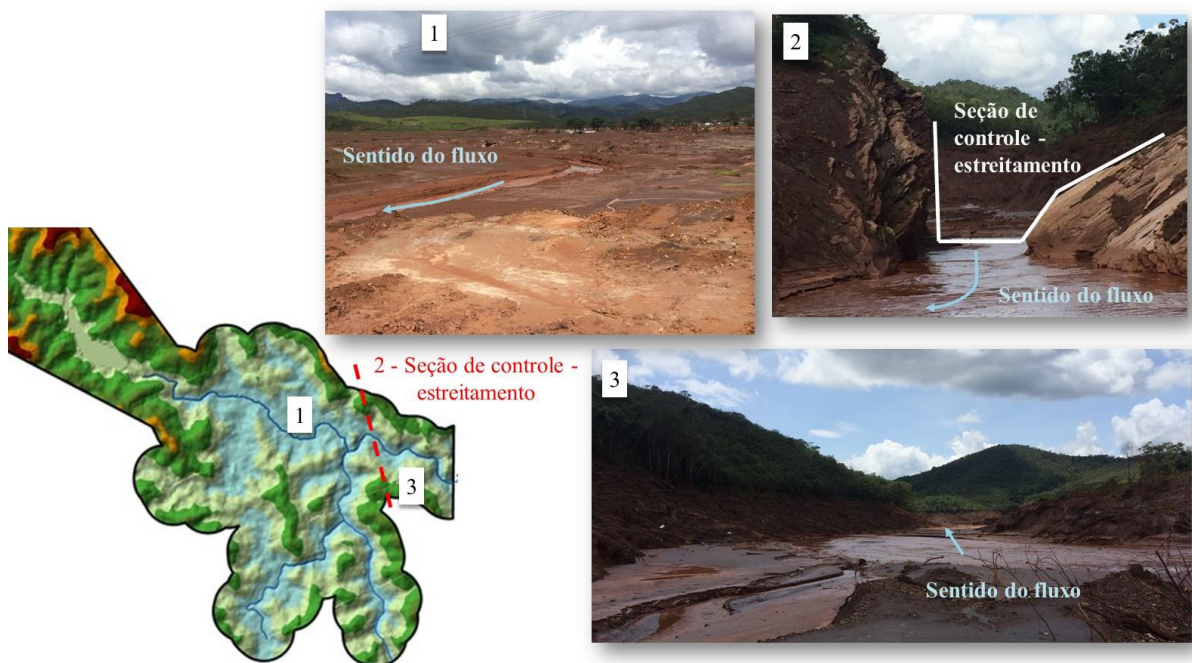


Figura 5.35 – Seção de controle hidráulico presente no trecho simulado (Fotos tiradas na visita do dia 27/01/2016)

A foto 1 ilustra o trecho a montante do estreitamento, com larga planície de inundação. A foto 2 ilustra o estreitamento do fluxo com presença de afloramento da rocha, sendo a vista de jusante para montante, e a foto 3 ilustra o trecho a jusante do estreitamento com alargamento do canal, novamente vista de montante para jusante.



Figura 5.36 – Foto panorâmica do trecho simulado, englobando a localização de Bento Rodrigues, o trecho a montante do estreitamento e o sentido do fluxo (Foto tirada na visita do dia 27/01/2016)

- Seções transversais no modelo 1D

A modelagem unidimensional foi realizada utilizando o programa HEC-RAS, versão 5.0.1. A construção do modelo geométrico, com traçado das seções transversais sobre o terreno composto (MDT), foi realizado no software ArcGis, com utilização da ferramenta HEC-GeoRAS. Esta ferramenta possibilita a exportação dos dados de topografia georreferenciados para o HEC-RAS.

As seções transversais, ao longo do trecho simulado, foram traçadas, considerando tanto as singularidades da topografia quanto os locais de interesse determinados, a partir da imagem de fundo. Foram traçadas 14 seções transversais no terreno, buscando obter uma interseção perpendicular ao leito do rio e conformar as curvas de nível, de forma a representar o terreno e gerar uma simulação unidimensional representativa.

Os córregos tributários afluentes ao rio principal de propagação da onda de inundação são uma consideração importante, na geração do modelo geométrico da modelagem 1D, uma vez que é

possível que ocorra um fluxo reverso nestes locais, quando da passagem da onda (USACE, 2014). De fato, este comportamento foi observado na propagação da onda decorrente da ruptura da Barragem do Fundão.

Todavia, é necessário contabilizar os tributários, quando possuem tamanho significativo, já que podem incorporar grandes volumes de armazenamento retirados da onda de inundação. Além disso, é necessário incluir a extensão a montante dos tributários nos mapas de inundação. Desse modo, algumas seções foram prolongadas nos cursos de água dos tributários, no Rio Gualaxo do Norte, com o objetivo de analisar o fenômeno de remanso causado pela passagem da onda da cheia no córrego principal, conforme Figura 5.16. Esta metodologia é proposta por USACE (2014).

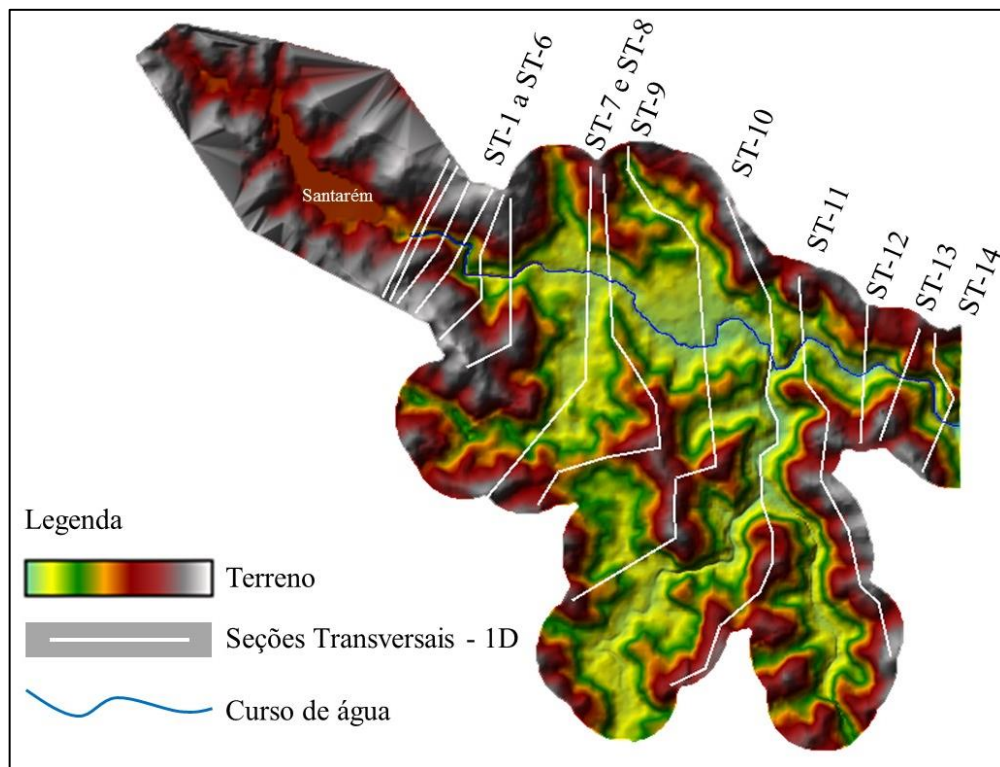


Figura 5.37 – Seções Transversais do modelo 1D do HEC-RAS

- Malha computacional no modelo 2D

Para importação dos dados de elevação (consolidados pela metodologia descrita no item 5.3.4) nos modelos hidráulicos utilizados, foram gerados dois arquivos distintos, através do software ArcGis. O modelo hidráulico HEC-RAS 5.0.1 importa o terreno em formato raster (TIFF), através da plataforma *RASMapper*. A Figura 5.17 ilustra o terreno ao fundo, a determinação da área computacional que é realizada dentro da plataforma do modelo. Ressalta-se que é necessária a determinação do tamanho do *Grid* inicial, neste caso, adotado em 15 m. Entretanto, é possível a discretização em tamanhos menores para a melhor descrição da topografia da área, podendo ser gerados polígonos de até 8 lados. Na região do curso de água, utilizam-se elementos denominados *breaklines*, que permitem orientar a malha ortogonalmente ao alinhamento, para permitir uma melhor visualização dos níveis de água na calha menor, se for o caso.

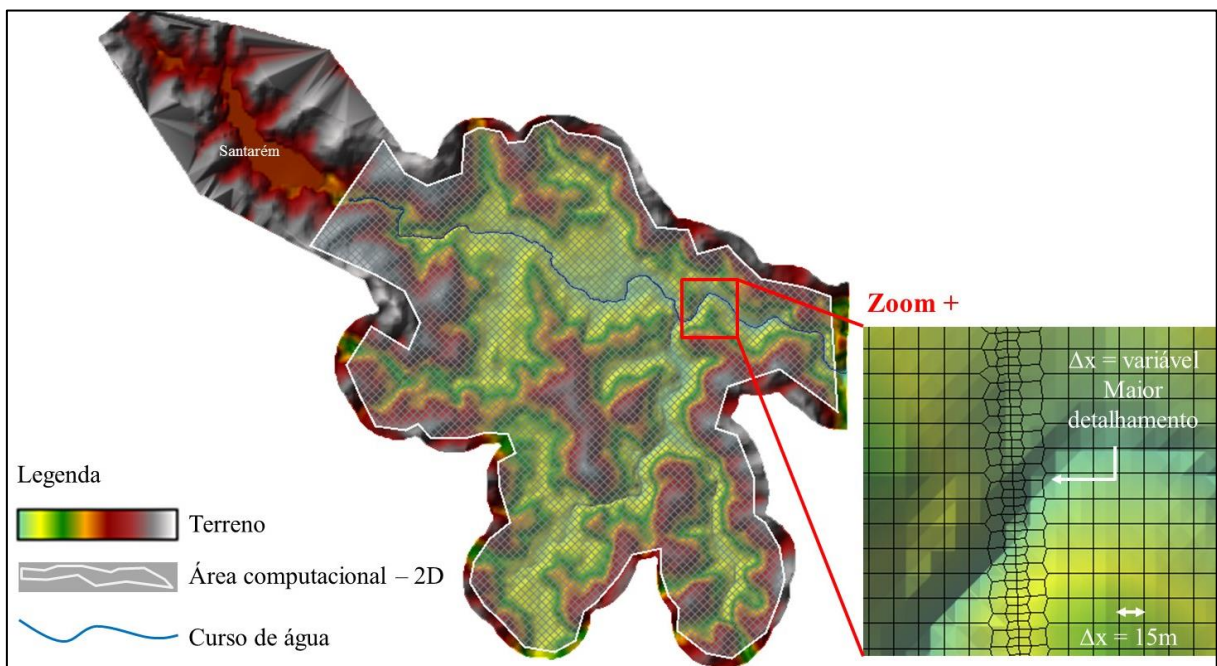


Figura 5.38 – Malha computacional do modelo 2D do HEC-RAS

O modelo FLO-2D importa a topografia, através de pontos com coordenadas X, Y e Z equivalentes às coordenadas e à elevação, respectivamente descritas em um arquivo de texto

(txt). Por isso, os dados de elevação já se encontram georreferenciados. A Figura 5.18 ilustra a informação de elevação importada para a plataforma GDS e a determinação da área computacional, no qual será gerado o *Grid*. Diferentemente do HEC-RAS, não é possível criar *Grid* de tamanhos variados, sendo todos os elementos quadráticos, de mesmo valor de lado. Destaca-se que foi adotado o mesmo tamanho de 15 m para a malha.

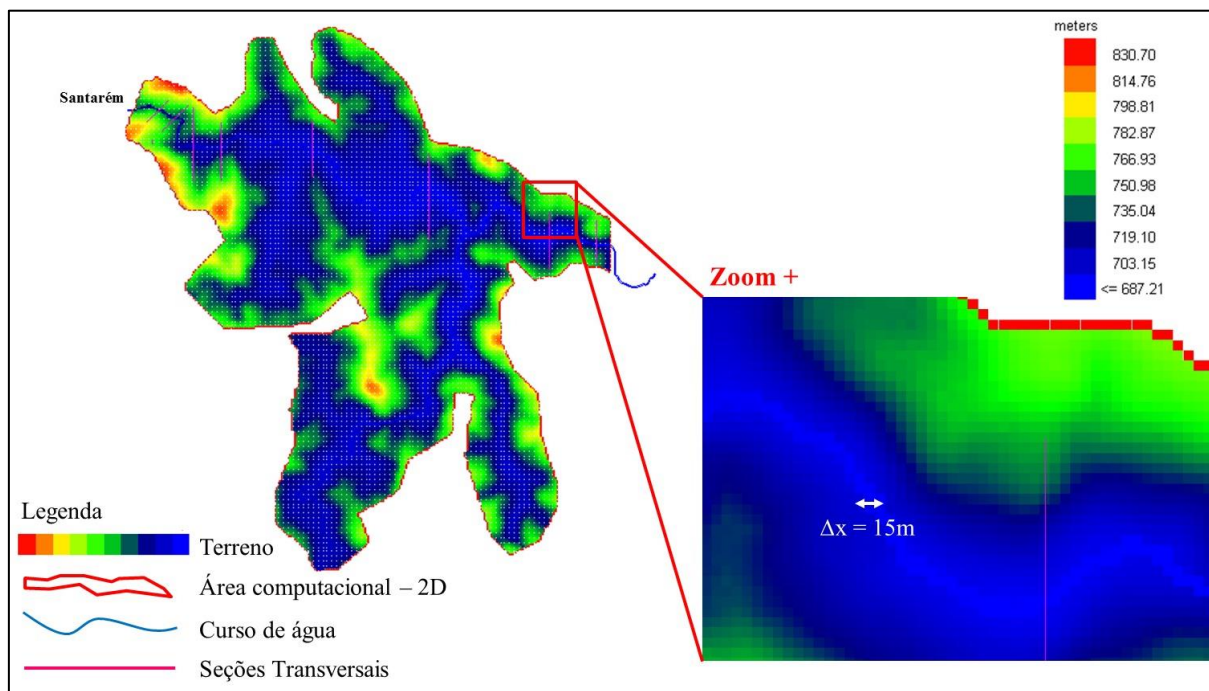


Figura 5.39 – Malha computacional do modelo 2D do FLO-2D

5.4.3 Fluxo hiperconcentrado

- HEC-RAS

O ajuste dos parâmetros da simulação hidráulica utiliza inicialmente a viscosidade dinâmica do fluido a ser propagado, sendo este valor função da concentração volumétrica do fluido a ser propagado.

A metodologia propõe ajustes no coeficiente de Manning e nos coeficientes de contração e expansão, baseados no princípio da similaridade, permitindo ajustar, de maneira adimensional,

os parâmetros das equações que regem o escoamento de um fluido Newtoniano, para a situação de um escoamento hiperconcentrado, conforme equações apresentadas no item 3.3.4.

Destarte, a partir da determinação do valor de viscosidade do material a ser propagado, dada uma determinada concentração volumétrica, são ajustados os coeficientes de Manning, que seriam adotados para o fluido aquoso (sem presença alta concentração de sedimentos) para fluidos caracteristicamente viscosos, como o caso dos rejeitos. Esse ajuste é possível tanto para o modelo unidimensional quanto para o modelo bidimensional.

Outro ajuste realizado, para a representação dos fluidos hiperconcentrados no modelo, refere-se aos coeficientes de contração e expansão, que, por padrão, são adotados iguais a 0,1 e 0,3 respectivamente (USACE, 2016b). Contudo, esse ajuste é possível somente no modelo 1D, devido à metodologia de solução das equações hidrodinâmicas do fluxo.

- FLO-2D

Para a realização de simulações de fluidos hiperconcentrados (*mudflow* ou *mud flood*), com qualquer modelo reológico, é necessária a determinação dos parâmetros de viscosidade e tensão limite de escoamento. Evidencia-se que esses parâmetros são variáveis com a concentração volumétrica, matematicamente representada por curvas exponenciais.

A viscosidade, a tensão de escoamento e a densidade do fluido propagado afetam a turbulência, a quantidade de movimento e a dissipação de energia do escoamento (FLO-2D, 2009).

A partir dos ensaios reológicos (Item 5.3.3), são determinadas as viscosidades e tensões limites de escoamento para cada concentração volumétrica testada. Estes resultados são plotados em formato de gráfico, e determinam-se os parâmetros da equação exponencial que regem o comportamento daquele determinado material. O formato das equações são:

$$\tau_y = \alpha e^{\beta C_v} \text{ e } \eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$$

Por conseguinte, para a inserção do comportamento reológico do fluido no modelo FLO-2D, é necessária a determinação dos parâmetros de α , α_1 , β e β_1 . Devem-se gerar as curvas de tensão

limite de escoamento e viscosidade com unidades de medida Dynes/cm² e Poises respectivamente.

5.4.4 Parâmetros de convergência do modelo hidráulico

- Intervalo de tempo (Δt)

Para as distintas simulações hidráulicas realizadas, por meio dos softwares HEC-RAS e FLO-2D, são adotados esquemas de convergência diferenciados.

O HEC-RAS funciona com esquema implícito de cálculo, no qual o intervalo de cálculo é estipulado pelo modelador. Posto isso, de maneira conservadora, para garantir a estabilidade do modelo, assim como a condição de Courant, adotou-se intervalo de tempo igual a 1 s. Frisa-se que o tempo computacional é inversamente proporcional ao intervalo computacional.

O modelo FLO-2D não possibilita ao modelador a determinação do intervalo de cálculo, sendo este tempo automaticamente ajustado para atender às condições de estabilidade, estipuladas para aquela determinada simulação.

- Critérios de tolerância e instabilidade do modelo hidráulico

Foram realizadas diversas simulações no modelo hidráulico FLO-2D, com o intuito de convergir os resultados para uma solução estável com grau de confiabilidade. De acordo com o próprio manual do programa (FLO-2D, 2009), alguns parâmetros de convergência da simulação podem ser alterados, como o coeficiente de Courant, “Surface Detention - TOL”, “DEPTOL” e “WAVEMAX”. Foram também aplicadas variações do tamanho do *Grids*, nos valores dos coeficientes de Manning e na distribuição temporal da concentração volumétrica de rejeitos. A Tabela 5.3 denota as variações dos parâmetros utilizadas nas simulações realizadas. O parâmetro “Surface Detention - TOL” refere-se ao valor mínimo da profundidade do fluxo para o encaminhamento da inundação. “WAVEMAX” é o coeficiente de estabilidade numérica para a solução da equação da onda dinâmica completa.

A variável “DEPTOL” é o valor de tolerância para a porcentagem de mudança na profundidade, para um dado intervalo de tempo. Quando esse critério é excedido para qualquer elemento, o intervalo de tempo é decrescido. Esse critério afeta o tempo computacional e a acuidade da profundidade, visto que o “DEPTOL” é fixado em 0 (zero), somente o critério de Courant será utilizado para a estabilidade e convergência do modelo. Se a solução apresenta erros, na conservação do volume e/ou surgências, esse parâmetro pode estar muito alto para a estabilidade numérica do modelo, uma vez que decresce este valor, o intervalo de cálculo é também reduzido, melhorando a estabilidade numérica, entretanto, aumentando o tempo computacional.

Para tratar problemas de instabilidade numérica, o manual do FLO-2D (FLO-2D, 2009) cita que o número de Courant deve ser reduzido e pode-se alternar, de 3 maneiras, o parâmetro “WAVEMAX”, sendo definidos por:

- WAVEMAX no intervalo entre 0,10 e 1,00, com valor típico igual a 0,25. Nessa configuração, o critério de estabilidade da onda dinâmica aumenta ou diminui o intervalo computacional, quando o WAVEMAX é excedido. Essa configuração implica em modelos mais lentos, porém mais estáveis;
- WAVEMAX no intervalo entre -0,10 e -1,00, com valor típico igual a -0,25. Para essa condição, o critério de estabilidade numérica de onda dinâmica é desabilitado. Apenas o critério de Courant determina o aumento ou decréscimo do intervalo de cálculo, para garantia da convergência;
- WAVEMAX igual a zero ou maior que 100 (>100), com valor típico igual a 100,25. Para essa condição, o critério de estabilidade numérica dinâmico é desabilitado. O critério de Courant e o parâmetro “DEPTOL” determinam o aumento ou decréscimo do intervalo de cálculo, para garantia da convergência.

O número Courant é o principal critério de estabilidade utilizado no modelo FLO-2D PRO. Se a redução do número de Courant não conseguir alcançar a estabilidade numérica, a

porcentagem de mudança de profundidade (DEPTOL) e os critérios de estabilidade de onda dinâmica completa (WAVEMAX) podem ser atribuídos.

As combinações dos parâmetros da simulação hidráulica que estão demarcadas na Tabela 5.3 representam as modelagens que obtiveram melhor convergência no quesito estabilidade numérica. Os cenários 5, 6 e 7 são compostos pelas combinações 17, 10 e 16 respectivamente.

Tabela 5.9 – Simulações realizadas com diferentes parâmetros no FLO-2D para testes de convergência do modelo

Combinação	Grid (m)	Tipo Fluido	Hidrograma	Surface Detention-TOL	DEPTOL	WAVE-MAX	Courant	Manning		
1	15	Hiperconcentrado	Cv constante - Cv = 0,47	0,03	0,20	0,25	0,30	0,15		
2						0,25	0,20	0,16		
3						100,25	0,20	0,25		
4				0,10	0,00	0,25	0,20	0,20	0,30	0,15
5									0,25	0,25
6									0,20	0,20
7				0,03	0,20	0,25	0,30	0,30	0,30	0,30
8									0,30	0,10
9									0,30	0,10
10	30					100,25	0,20	0,25 / 0,30		
11	15	Hiperconcentrado	Cv variável - Composição 1	0,05	0,00	0,00	0,40	0,15		
12			Cv variável - Composição 2	0,10	0,00	0,00	0,60			
13			Cv variável - Composição 3	0,10	0,00	0,00	0,60			
14			Cv variável - Composição 1	0,03	0,20	0,25	0,30	0,25		
15			Cv variável - Composição 2	0,10	0,20	100,25	0,20			
16			Cv variável - Composição 3	0,10	0,20	100,25	0,20			
17	15	Aquoso	Água - Q total					0,10		
18	20		Água - Q total	0,03	0,00	0,00	0,60	0,04		
19	30		Água - Q total					0,10		

Nas simulações realizadas no HEC-RAS, observou-se que o principal parâmetro para convergência do modelo foi o intervalo de tempo utilizado.

5.5 ***Etapa 3: Manchas de inundação***

Todo o pré-processamento de topografia e pós-processamento de composição das manchas de inundação, resultante dos modelos hidráulicos, foram realizados no ArcGis®, com auxílio de ferramentas como o HEC-GeoRAS, HEC-GeoHMS, ET GeoWizards e Arc Hydro Tools.

A reconstituição da mancha de inundação, efetivamente observada decorrente da ruptura da Barragem do Fundão, foi realizada a partir da imagem de altíssima precisão, disponibilizada pelo Ministério Público de Minas Gerais (MPMG), através de solicitação oficial da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, especificando o escopo da pesquisa.

Esta imagem foi obtida no dia 06/11/2015, imediatamente após a ruptura da Barragem do Fundão. A imagem (TIFF) é proveniente do satélite ARYA, com células de 5 cm de lado e três bandas. A partir desta imagem, foi possível delinear, com precisão, as áreas afetadas na área do estudo, inclusive a visualização e possibilidade de diferenciação entre os rejeitos propagados, árvores/vegetações arrastadas, automóveis e destroços de construções civis, conforme pode ser observado nas imagens exemplificativas das Figuras 5.19 e 5.20.

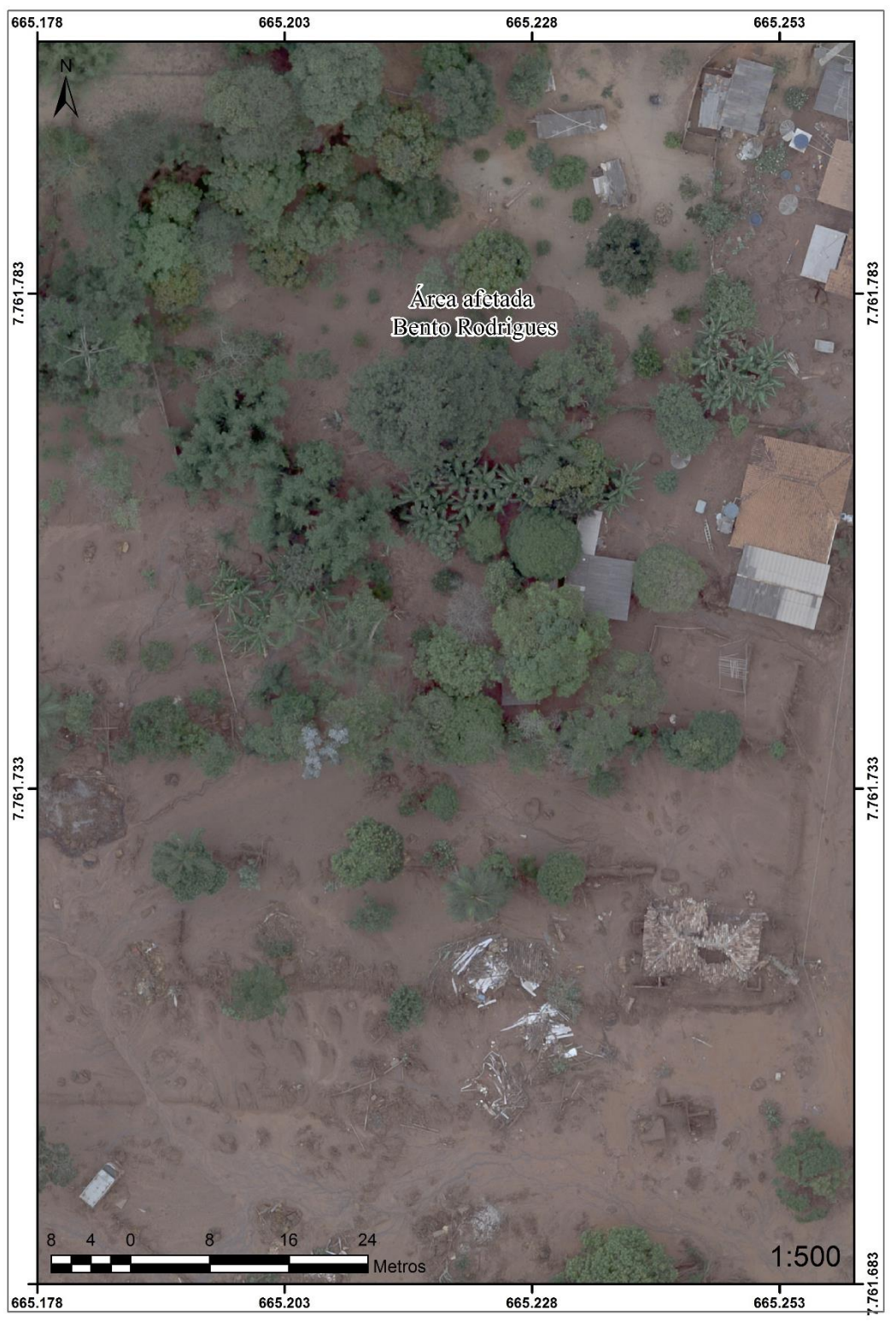


Figura 5.40 – Área de Bento Rodrigues impactada pela onda de ruptura da Barragem do Fundão (Fonte: Imagem ARYA – 06/11/2015)



Figura 5.41 – Área impactada – canal principal de drenagem, planícies de inundação, florestas e vegetação arrastada (Fonte: Imagem ARYA – 06/11/2015)

5.6 ***Etapa 4: Análise dos resultados***

Ressalta-se que a análise de sensibilidade contribui para a avaliação de como variações, na saída do modelo, podem ser influenciadas qualitativa ou quantitativamente, pelas diferentes fontes de dados de entrada, introduzidas na simulação hidráulica (SALTELLI *et al.*, 2000 *apud* YANG, 2011).

Utilizou-se um indicador de desempenho para a análise dos resultados dos modelos determinísticos e também para a realização de análise de incertezas desses resultados. Esse indicador realiza a comparação entre as manchas simuladas e observadas no evento de ruptura da Barragem do Fundão, com cálculo dos índices de desempenho F, conforme citado no item 3.1.3

Nessa abordagem, todas as células da área de interesse são analisadas e enquadradas em um dos quatro conjuntos com as possíveis combinações: observado/previsto, observado/não previsto, não observado/previsto, não observado/não previsto.

As análises dos resultados dos sete diferentes cenários simulados possuem o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros de entrada em cada um dos modelos. O principal aspecto avaliado é a alteração na propagação da onda de inundação, quando se incorpora rejeitos (partículas sólidas) e suas características reológicas no fluido, assim como a possível aplicabilidade em modelos 1D e 2D.

Destaca-se que o dado de entrada de topografia não foi avaliado, dado que todas as simulações possuíram a mesma fonte topográfica, composta por base gratuita (MDT SRTM), conforme especificado no item 5.3.4.

A título de comparação dos resultados, foram criadas algumas seções transversais nas mesmas posições, sendo possível a comparação de valores de vazão máxima, decaimento das vazões de pico, profundidades máximas, assim como o comportamento do fluido, através de hidrogramas. A Figura 5.21 ilustra essas seções e suas respectivas localizações.

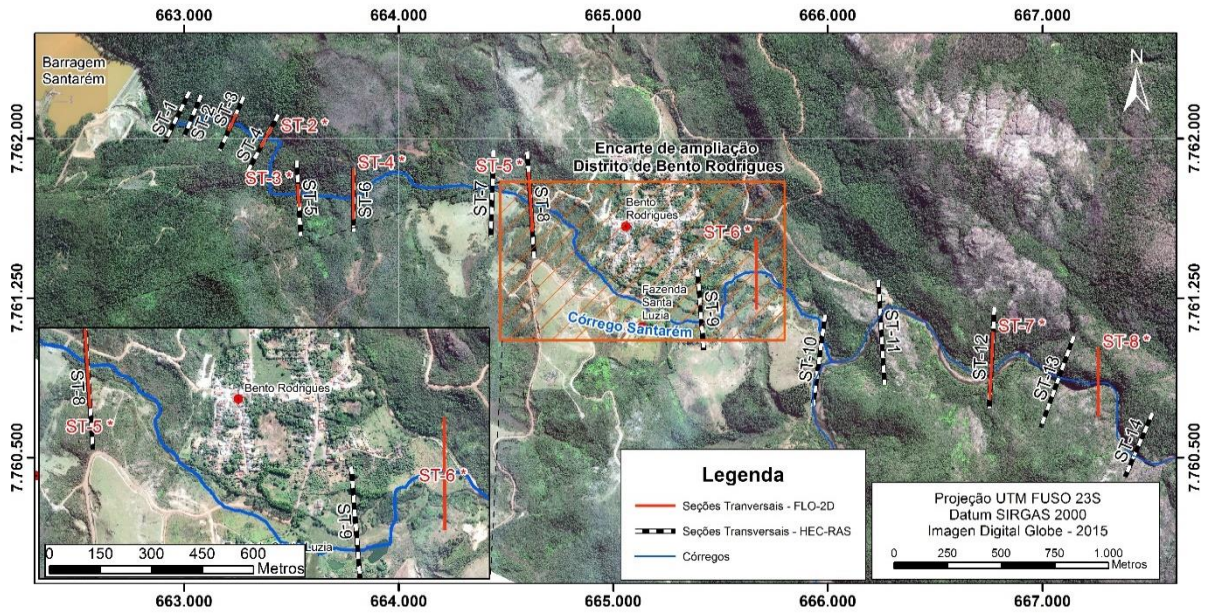


Figura 5.42 – Seções transversais para comparação dos modelos HEC-RAS e FLO-2D

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 *Resultados Geotécnicos*

Na Figura 6.1, é ilustrada a curva granulométrica obtida nos ensaios de peneiramento por sedimentação dos pontos P1 e P2, como também as curvas do rejeito arenoso e da lama, depositadas na Barragem do Fundão, obtidas em Morgenstern *et al.* (2016). Percebe-se que a amostra do P2 se assemelha consideravelmente com o rejeito arenoso, enquanto a amostra retirada do P1 encontra-se entre a curva do rejeito arenoso e da lama.

O valor do peso específico das amostras, referentes aos pontos 1, 2 e 3 encontrados nos ensaios de caracterização, foi de 3,37, 3,12 e 3,22 respectivamente. No relatório elaborado por Morgenstern *et al.* (2016), a variação do peso específico da lama é de 3,9 – 4,0, e do rejeito arenoso é de 2,8 – 2,9. Ferreira (2016) determina o peso específico da lama e do rejeito arenoso, sendo respectivamente 3,83 e 2,91. A Tabela 6.1 apresenta uma síntese dos parâmetros geotécnicos das amostras coletadas, assim como das referências utilizadas no estudo.

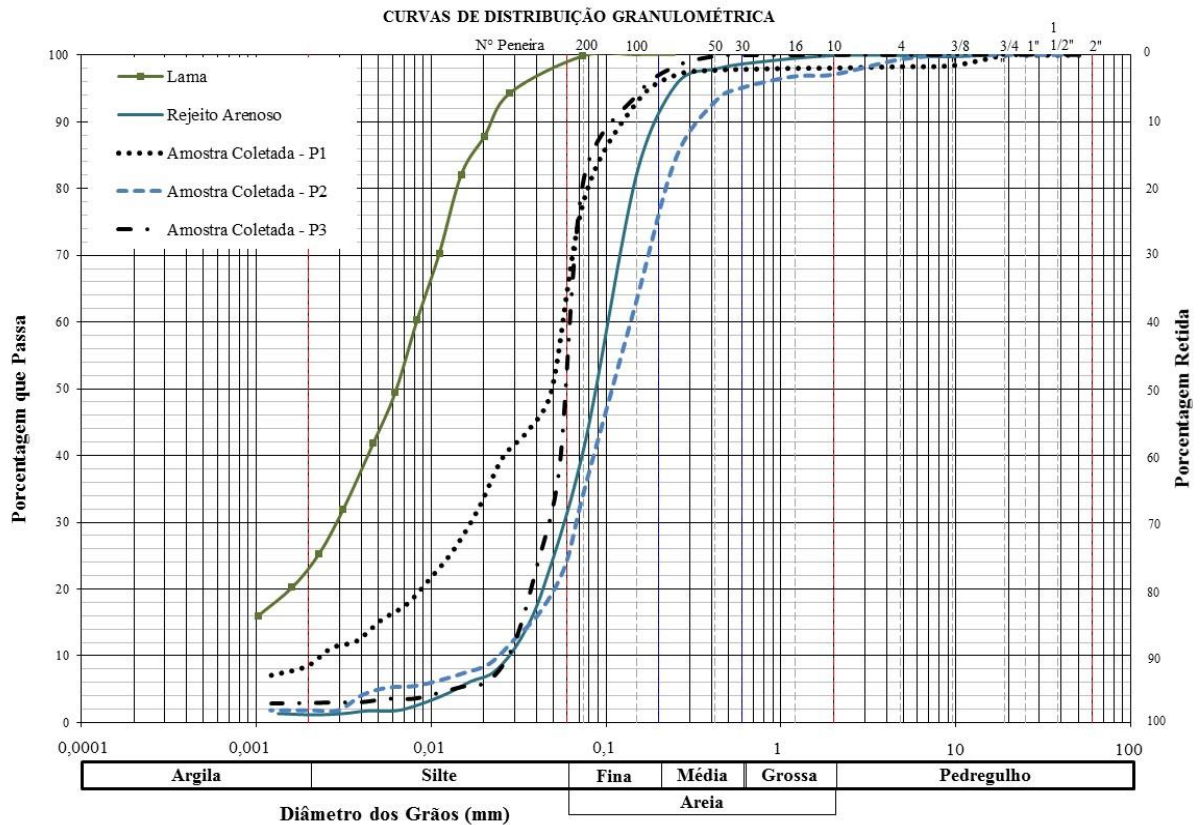


Figura 6.43 – Curva Granulométrica dos Pontos 1, 2 e 3 coletados em comparação com rejeito lançado na Barragem do Fundão

Tabela 6.10 – Caracterização geotécnica do material coletado e das referências do rejeito lançado na Barragem do Fundão

Parâmetro	Amostra coletada			Morgensten <i>et al.</i> (2016)		Ferreira (2016)	
	P1	P2	P3	Lama	Rejeito Arenoso	Lama	Rejeito Arenoso
Densidade real dos grãos (g/cm^3)	3,37	3,09	3,21	3,9 – 4,0	2,8 – 2,9	3,83	2,91
Limite de Plasticidade (%) (NBR 7180)	NP	NP	NP	-	-	11,2	NP
Limite de Liquidez (%) (NBR 6459)	NP	NP	NP	-	-	24,1	NP
Índice de Plasticidade (%) (NBR 7180)	NP	NP	NP	7 - 11	NP	12,9	NP
Classificação	Areia fina silto-arenosa	Areia fina silto-arenosa	Areia fina silto-arenosa	Silte-argiloso	silto-arenosa	Silte-argiloso	Areia fina - siltosa

Foi também realizado o ensaio para determinação do teor de matéria orgânica de cada amostra coletada. Os valores encontrados são:

- P1 = 1%
- P2 = 1%
- P3 = 1,1 %

Este parâmetro é importante para a interpretação da variação das características geotécnicas e reológicas das amostras. É esperado que exista uma variação entre as amostras, já que foram coletadas em pontos distintos do vale a jusante, no qual existiu uma variação entre o fluxo propagado, o sedimento depositado e transportado.

6.2 **Resultados Reológicos**

Conforme especificado no item 5.3.3, foram realizados 3 testes reológicos distintos. Os primeiros resultados dos ensaios de reologia apresentados são decorrentes dos testes, utilizando o reômetro rotacional de palheta coaxial (AR 2000ex), retratado no item 6.2.1. Ressalta-se que serão apresentados gráficos de tensão fixa, varredura de tensões e varredura de taxas de cisalhamento, para uma concentração específica do Ponto 1 de coleta. Os resultados de Tensão Limite de escoamento serão determinados para as diferentes concentrações de todos os pontos analisados, de maneira similar ao apresentado.

Todos os resultados dos testes realizados com este tipo de reômetro (AR 2000ex), para as diferentes concentrações, estão apresentados em DIAS (2017), porque faz parte do escopo do estudo realizado em parceria com a UFES.

E o item 6.2.2 é referente aos resultados encontrados, utilizando o reômetro rotacional de cilindros concêntricos, realizados no equipamento de propriedade da Ausenco. O item 6.2.3 refere-se aos resultados encontrados, utilizando o teste de *slump*.

Em vista disso, as curvas reológicas foram compostas, utilizando os resultados destes 3 testes, uma vez que os mesmos são realizados com frações da mesma amostra, entretanto, em faixas de concentração volumétrica distinta.

6.2.1 Reômetro rotacional de palheta coaxial – AR 2000ex

Ressalta-se que, para cada teste, foi preparada uma nova amostra, com frações do mesmo material coletado, de forma a não comprometer a homogeneização e consequentemente os resultados referentes às tensões limite de escoamento e viscosidade dos fluidos.

A Figura 6.2 refere-se aos resultados das varreduras de taxa e tensão de cisalhamento, que correspondem a testes nos quais programa-se o reômetro, para funcionar com incremento logarítmico de tensão cisalhante e posteriormente com incremento logarítmico de taxas fixas de tensão de cisalhamento.

Os resultados apresentados são referentes às amostras retiradas do Ponto 1 coletado, com concentração de $C_v = 50,71\%$ e temperatura controlada de 25° .

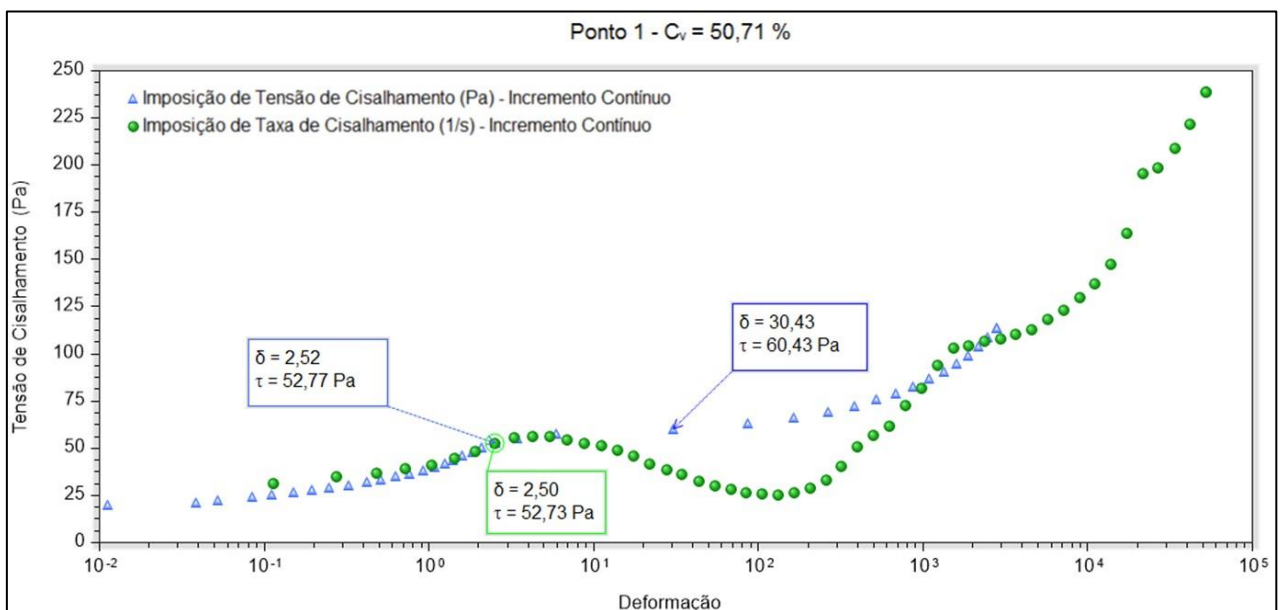


Figura 6.44 – Curvas de fluxo obtidas por incremento logarítmico de tensão (1 a 150 Pa) e incremento logarítmico de taxa (0,01 a 1000 1/s) para $C_v= 50,71\%$

O início do escoamento do material é caracterizado pela falta de proporcionalidade entre a taxa de cisalhamento e a tensão τ , sobretudo, pelo incremento súbito da deformação com uma variação pequena de tensão de cisalhamento.

A Figura 6.3 ilustra a curva de fluxo da amostra ensaiada. O comportamento da amostra é típico de materiais viscoelásticos, segundo TARCHA (2014). São demarcadas as 3 tensões, sendo elas: as tensões elástica, estática e dinâmica.

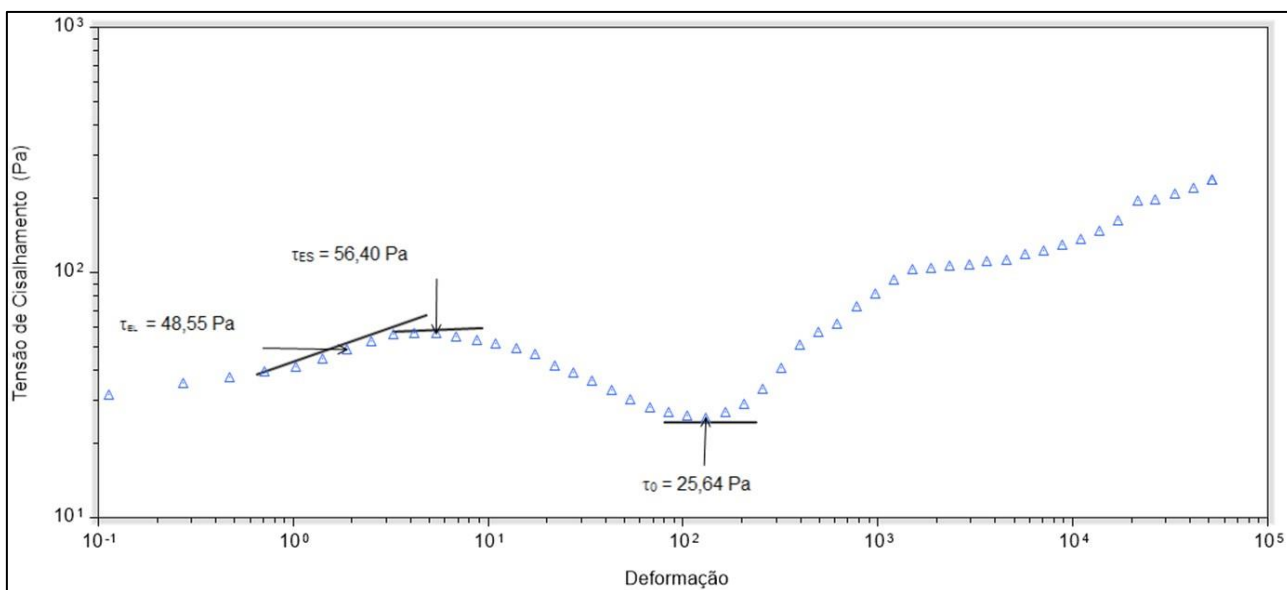


Figura 6.45 – Curvas de fluxo – comportamento de materiais viscoelásticos

A tensão limite elástica (τ_{EL}) representa o limite da reversibilidade do material, no qual representa a transição entre a fase elástica e plástica. Ou seja, a aplicação de valores superiores a esta tensão, na amostra, implica em deformações definitivas do material. Essa tensão é comumente utilizada pela mecânica dos solos. A tensão limite estática (τ_{ES}) representa a tensão mínima para a estrutura entrar em colapso, no qual se verifica o escoamento contínuo da matéria, assemelhando-se ao conceito de Bingham, sendo de interesse na engenharia hidráulica. A tensão limite dinâmica (τ_0) representa o valor mínimo, para manter o escoamento, após a fratura do material.

A Figura 6.4 exibe, em detalhes, a tensão imposta e os valores medidos ao longo do tempo. Cada curva é equivalente a uma tensão aplicada no tempo, podendo-se observar a capacidade do equipamento no controle dessa variável, devido à ausência de oscilações no tempo.

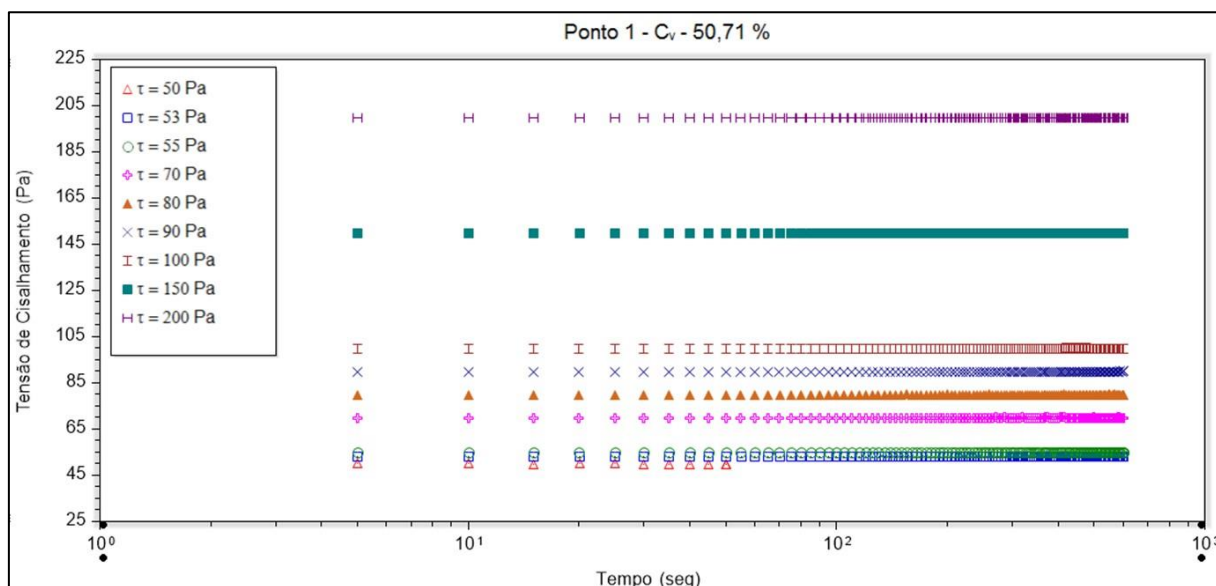


Figura 6.46 – Tensões fixas no tempo

A Figura 6.5 representa o comportamento da amostra, em relação à deformação no tempo, devido à aplicação de valores de tensão de cisalhamento fixos entre 50 Pa e 200 Pa, nos quais podem-se observar as modificações estruturais da amostra. Observa-se que, para valores inferiores à tensão limite de escoamento ($\tau_y < 53$ Pa), mesmo com a aplicação de tensão no passar do tempo, não se observa aumento dos valores de deformação, mantendo a coerência com as curvas de fluxo apresentadas na Figura 6.2. Entretanto, para valores de tensão $\tau \geq 53$ Pa, com a aplicação constante de tensão, é observado o aumento dos valores de deformação, indicando que a estrutura foi desestruturada ou quebrada. Atenta-se que, quanto maior o valor de tensão imposta, mais rapidamente e maior se dá a deformação do material, corroborando a observação apresentada por Tarcha (2014).

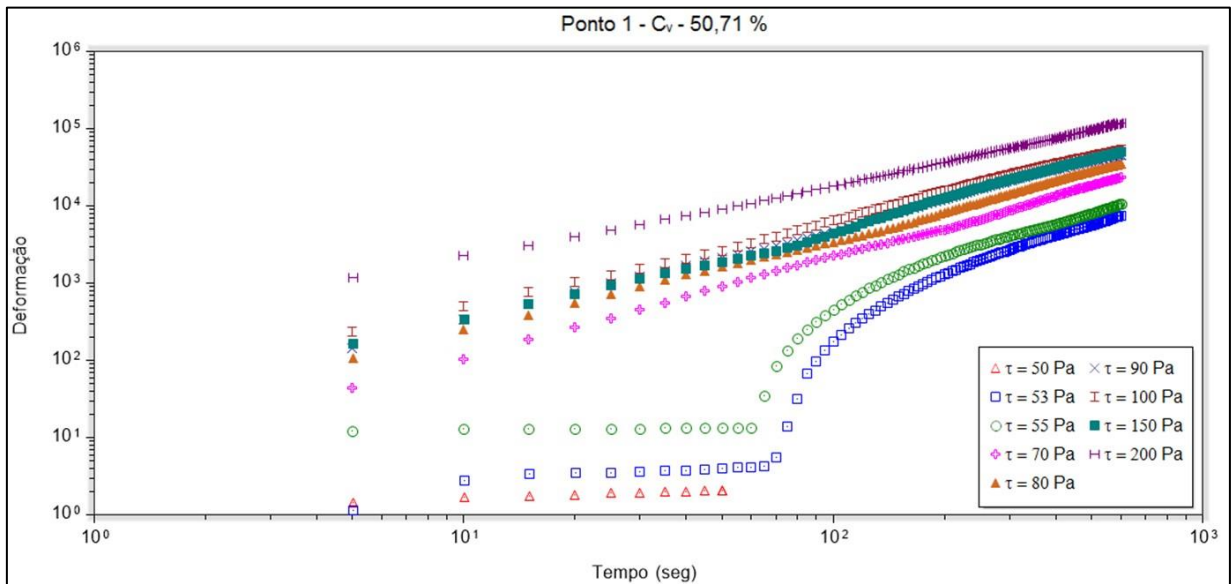


Figura 6.47 – Deformação ao longo do tempo para tensões fixas

A Figura 6.6 apresenta a relação de tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento, para cada concentração volumétrica avaliada da amostra referente ao Ponto 1. De acordo com Boger (2013), a viscosidade (η) de um fluido é definida como a relação entre a tensão de cisalhamento (τ) a taxa de cisalhamento (ϵ). Para fluidos do tipo Bingham, a viscosidade é dada pelo coeficiente linear dessa relação. Logo, foram ajustados linearmente os valores de tensão versus taxa de cisalhamento, a partir de cada tensão limite de escoamento, para cada concentração volumétrica correspondente, de forma a obter os valores de viscosidade após o escoamento do fluido ou desestruturação da matéria.

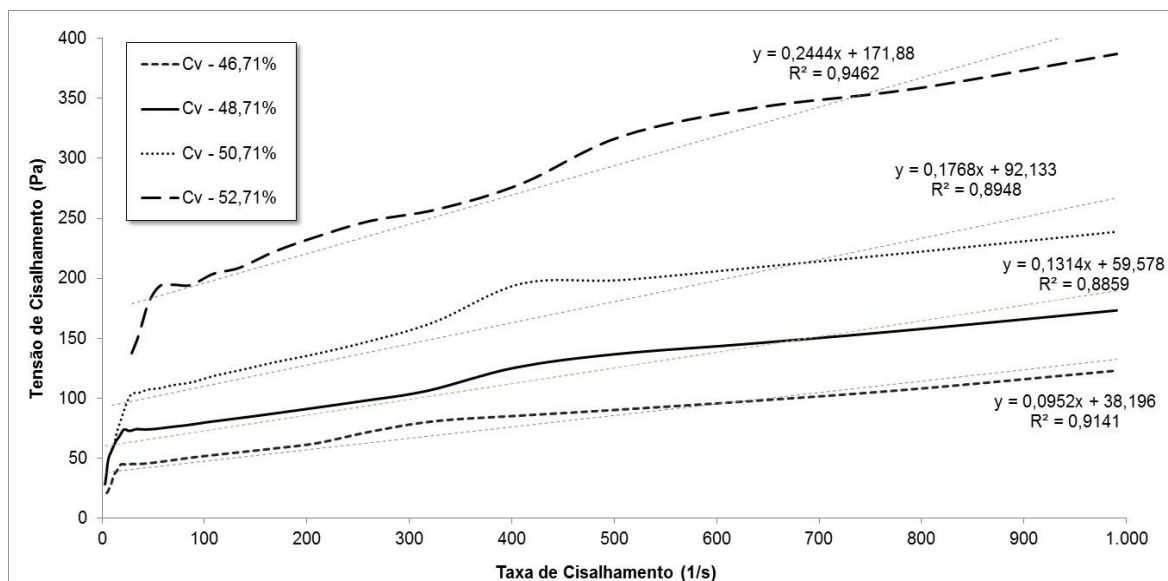


Figura 6.48 – Deformação ao longo do tempo para tensões fixas

A Tabela 6.2 apresenta os resumos dos resultados encontrados para os testes, utilizando o reômetro de palheta coaxial.

Tabela 6.11 – Resultados de tensão de escoamento (τ_y) e viscosidades (η) dos testes, utilizando o reômetro rotacional de palheta coaxial

Ensaio	Ponto de Coleta	C_w %	C_v %	η		τ_y	
				[cP]	[Pa*s]	[dyn/cm ²]	[Pa]
Reômetro - Palheta Coaxial	1	74,71	46,71	95,20	0,0952	200,00	20,00
		76,19	48,71	131,40	0,1314	380,00	38,00
		77,61	50,71	176,80	0,1768	530,00	53,00
		78,97	52,71	244,40	0,2444	1180,00	118,00
	2	74,71	48,87	76,70	0,0767	100,00	10,00
		76,19	50,87	137,00	0,1370	180,00	18,00
		77,61	52,87	358,00	0,3580	350,00	35,00
		78,98	54,87	445,70	0,4457	770,00	77,00

6.2.2 Reômetro rotacional de cilindro concêntrico

Os ensaios realizados, pelo reômetro rotacional de cilindro concêntrico, foram realizados para os 3 pontos de amostra coletados, cada ponto com 3 concentrações volumétricas distintas,

conforme apresentada na Tabela 6.3. Ressalta-se que C_w corresponde à concentração em massa dos sólidos, e C_v à concentração volumétrica correspondente.

Tabela 6.12 – Relação das Concentrações em massa (C_w) e volumétricas (C_v) dos ensaios realizados

Ponto de Coleta	C_w		C_v	
	%	Relativo	%	Relativo
1	63,78	0,64	36,50	0,37
	66,39	0,66	39,20	0,39
	68,27	0,68	41,28	0,41
2	61,97	0,62	34,75	0,35
	65,79	0,66	38,59	0,39
	67,91	0,68	40,88	0,41
3	63,51	0,64	36,26	0,36
	66,18	0,66	39,01	0,39
	68,81	0,69	41,89	0,42

A Figura 6.7 apresenta os resultados das curvas de tensão de escoamento versus C_v para os três pontos de coleta, sendo apresentados em Pascal (Pa).

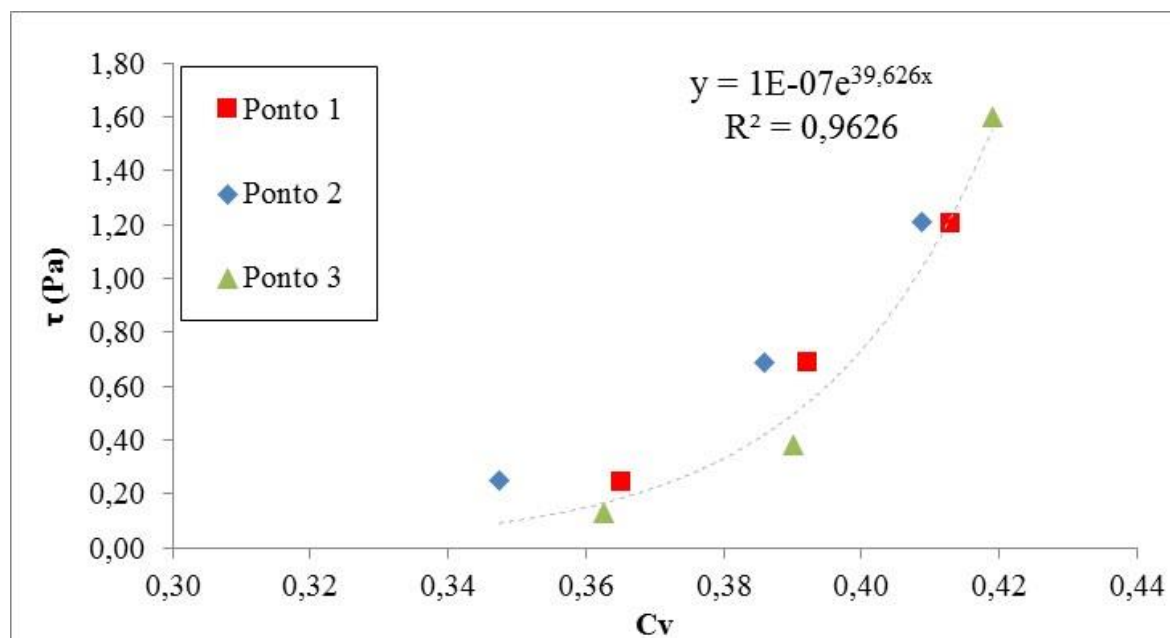


Figura 6.49 – Curva reológica da tensão de escoamento

De maneira análoga à descrita no item 6.2.1, a viscosidade foi obtida pela relação linear entre a tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento, considerando o fluido Bingham. As Figuras 6.8, 6.9 e 6.10 ilustram os reogramas das amostras 1, 2 e 3 respectivamente, obtidos com o reômetro rotacional de cilindro concêntrico.

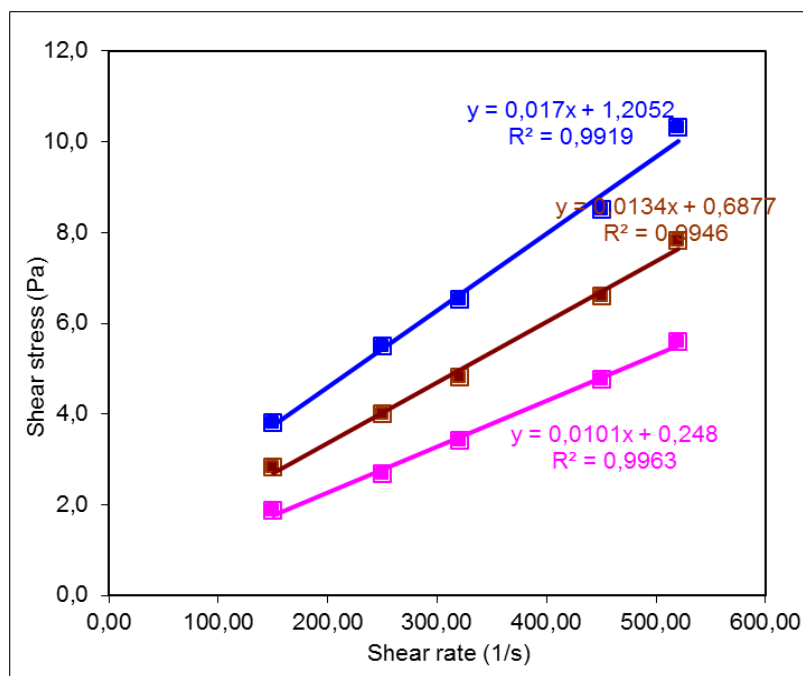


Figura 6.50 – Reogramas da amostra do Ponto 1

Na Figura 6.8, a curva em azul apresenta a $C_v = 41\%$, a curva em bordô, a $C_v = 39\%$ e a curva em rosa, a $C_v = 37\%$.

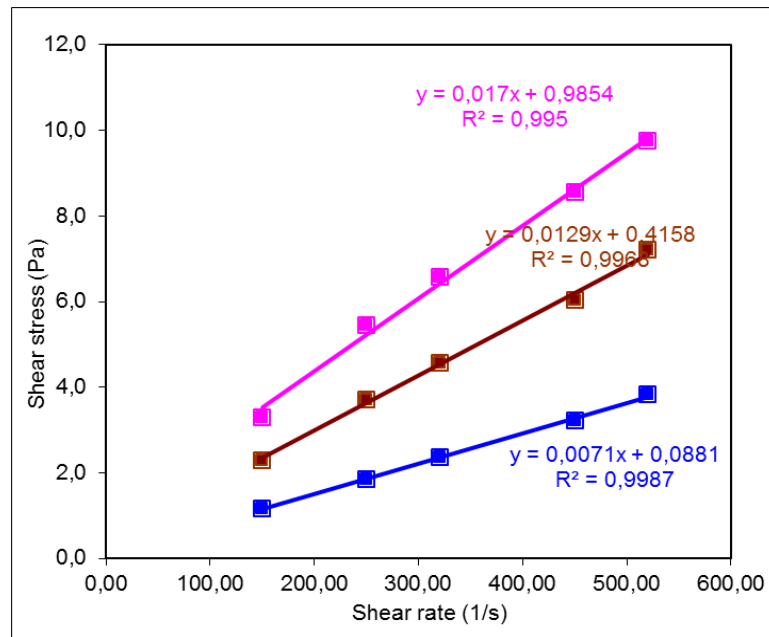


Figura 6.51 – Reogramas da amostra do Ponto 2

Na Figura 6.9, a curva em rosa apresenta a $C_v = 41\%$, a curva em bordô, a $C_v = 39\%$ e a curva em azul, a $C_v = 35\%$.

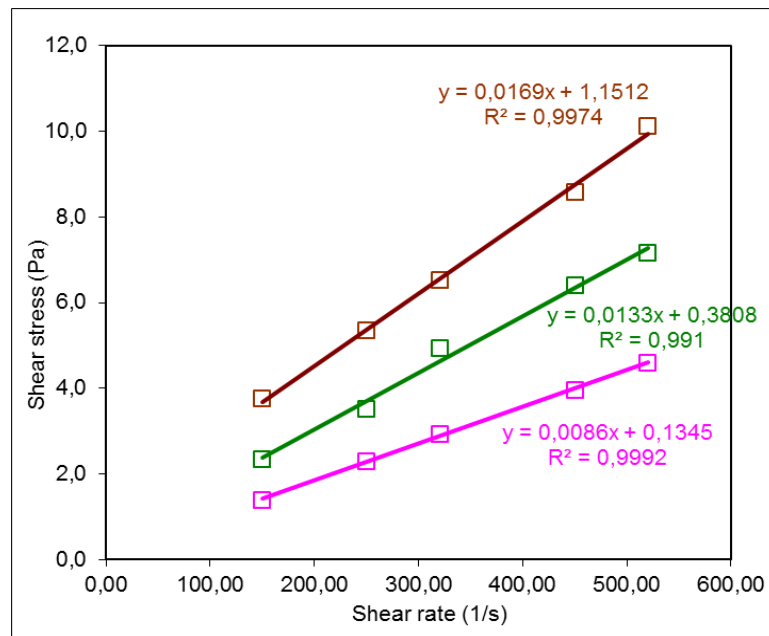


Figura 6.52 – Reogramas da amostra do Ponto 3

Na Figura 6.10, a curva em bordô apresenta a $C_v = 42\%$, a curva em verde, a $C_v = 39\%$ e a curva em rosa, a $C_v = 36\%$.

A Figura 6.11 apresenta a composição da curva exponencial de viscosidade versus C_v , para os reogramas apresentados acima, sendo apresentados em Pascal*segundos (Pa*s).

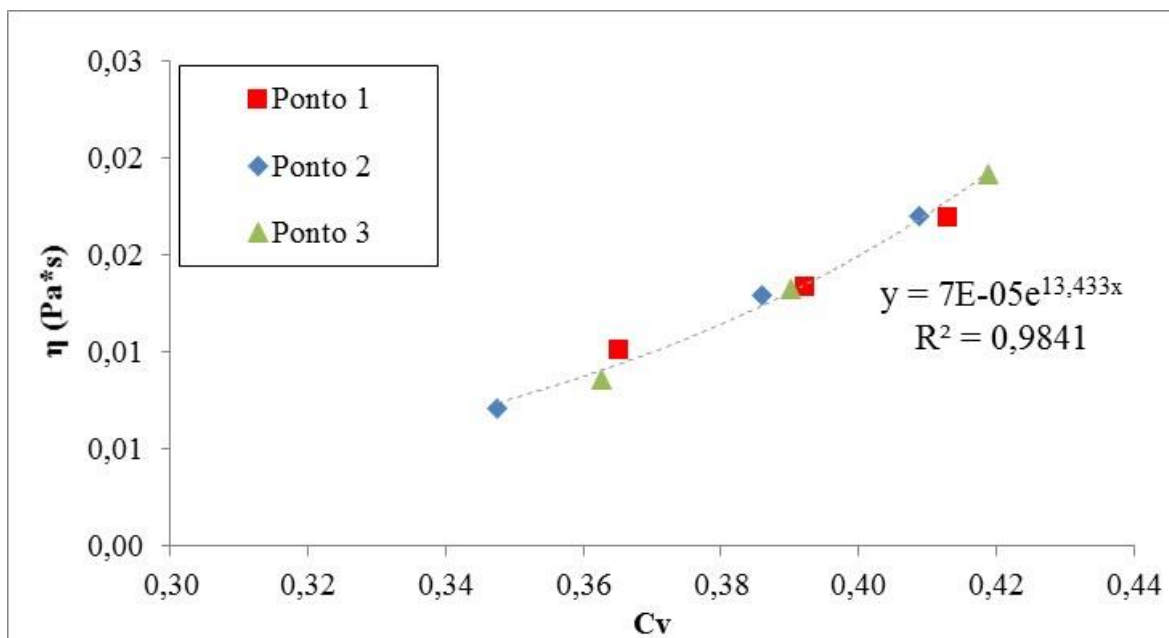


Figura 6.53 – Curva reológica de viscosidade

A Tabela 6.4 apresenta os resultados encontrados para os testes, utilizando o cilindro concêntrico.

Tabela 6.13 – Resultados de tensão de escoamento (τ_y) e viscosidades (η) dos testes, utilizando o reômetro rotacional de cilindros concêntricos

Ensaio	Ponto de Coleta	Cw	Cv	η		τ_y	
		%	%	[cP]	[Pa*s]	[dyn/cm ²]	[Pa]
Reômetro - Cilindros Concêntricos	1	63,78	36,50	10,10	0,0101	2,50	0,25
		66,39	39,20	13,40	0,0134	6,90	0,69
		68,27	41,28	17,00	0,0170	12,10	1,21
	2	61,97	34,75	7,10	0,0071	0,90	0,09
		65,79	38,59	12,90	0,0129	4,20	0,42
		67,91	40,88	17,00	0,0170	9,90	0,99
	3	63,51	36,26	8,60	0,0086	1,30	0,13
		66,18	39,01	13,30	0,0133	3,80	0,38
		68,81	41,89	19,20	0,0192	16,00	1,60

6.2.3 Teste de *Slump*

O teste de *slump* foi realizado para amostras coletadas no Ponto 2. Conforme descrito no item 5.3.3, foi utilizado o suporte cilíndrico com 162 mm de altura e 96,5 mm de diâmetro, também ilustrado na Figura 6.12.

Os testes foram realizados para 4 concentrações volumétricas, sendo as mesmas iguais a $C_v = 46,5\%$, $C_v = 50,6\%$, $C_v = 52,6\%$ e $C_v = 57,14\%$. A Figura 6.12 retrata os testes, e é possível observar a textura de dada concentração volumétrica, assim como a considerável diferença do abatimento dos rejeitos, o que resulta em diferenças nas tensões limites de escoamento.



Figura 6.54 – Concentrações volumétricas (C_v) testadas no teste de *Slump*

A metodologia para o teste (PASHIAS *et al.*, 1996) baseia-se na resposta de altura (s), que representa a diferença entre a altura do cilindro e a altura final do rejeito escoado, para cada concentração ensaiada. A Tabela 6.5 apresenta os resultados de τ_y , encontrados a partir das variáveis consideradas nos cálculos.

Tabela 6.14 – Resultados do teste de *slump*

C_v (%)	M_s (g)	M_w (g)	ρ (g/cm ³)	W (%)	s (cm)	s'	τ_y'	$\rho g H$ (Pa)	τ_y (Pa)
46,50	1718,96	633,89	1,98	36,87	10,50	0,648148	0,10	315,59	30,76
50,60	1870,53	585,31	2,07	31,29	9,20	0,567901	0,12	329,40	40,58
52,60	1944,46	561,61	2,11	28,88	8,50	0,524691	0,14	336,14	46,32
57,14	2112,29	507,82	2,21	24,04	5,50	0,339506	0,21	351,43	73,33

Na Tabela 6.5,

s é a medida do Slump (cm);

s' é a medida do Slump (adimensional);
 C_v é o teor de sólidos em volume (%)
 M_s é a massa de sólidos (g);
 M_w é a massa de água (g);
 ρ é a densidade aparente seca da amostra (g/cm^3);
 g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$);
 w é o teor de umidade (%);
 τ_y é a tensão de escoamento adimensional;
 τ_y é a tensão de escoamento (Pa).

6.2.4 Curvas reológicas

Conforme ressaltado anteriormente, o reômetro rotacional, com palheta coaxial utilizado, possui limitação de fábrica para taxas de cisalhamento inferiores a 10^{-2} 1/s . Sendo assim, durante a realização dos ensaios, conseguiu-se trabalhar com concentrações volumétricas entre 50% e 53% ($50\% < C_v < 53\%$). Por conseguinte, o reômetro rotacional, com cilindro coaxial utilizado, trabalha em uma faixa de concentrações volumétricas entre 34% e 42% ($34\% < C_v < 42\%$).

A Figura 6.13 ilustra a composição das curvas exponenciais de viscosidade versus concentração volumétrica (C_v), para as amostras dos Pontos 1 e 2, obtida pelo reômetro rotacional com cilindro concêntrico e com palheta coaxial.

A Figura 6.14 ilustra a composição das curvas exponenciais de tensão limite de escoamento versus concentração volumétrica (C_v), para as amostras dos Pontos 1 e 2, obtida pelo reômetro rotacional com cilindro concêntrico e com palheta coaxial.

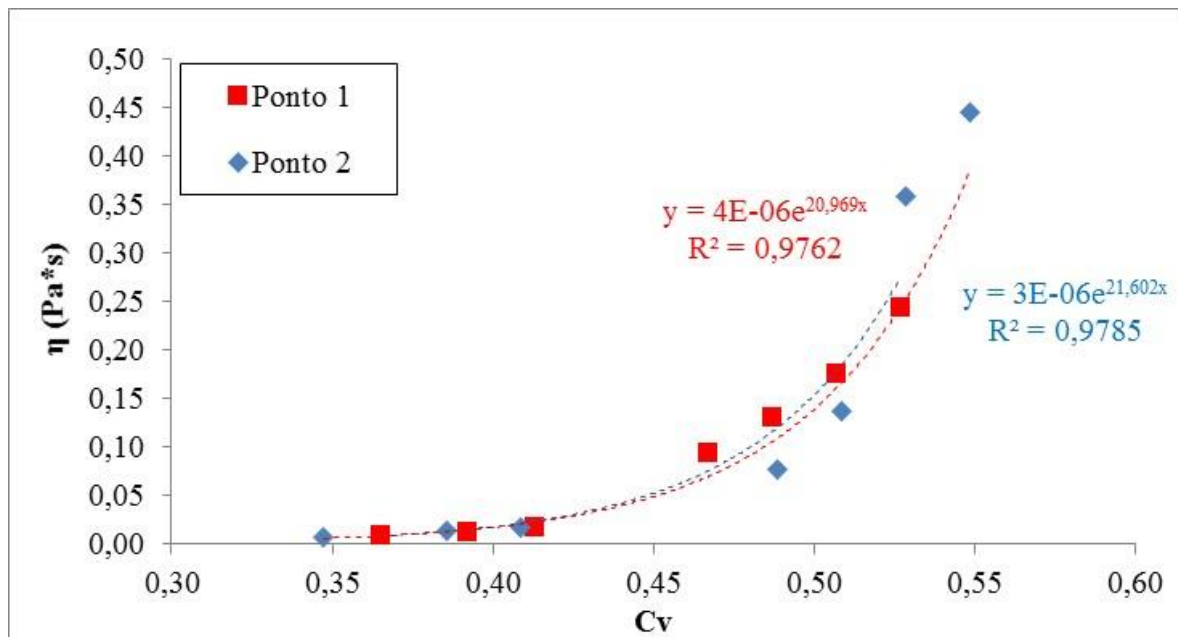


Figura 6.55 – Composição das curvas exponenciais de viscosidade para as amostras dos Pontos 1 e 2, obtida pelo reômetro rotacional com cilindro concêntrico e com palheta coaxial

Na Figura 6.13, a curva em vermelho refere-se às amostras do Ponto 1, com coeficiente de correlação à curva exponencial de $R^2 = 0,9762$. A curva em azul refere-se às amostras do Ponto 2, com coeficiente de correlação à curva exponencial de $R^2 = 0,9785$. As equações das curvas estão retratadas no próprio gráfico.

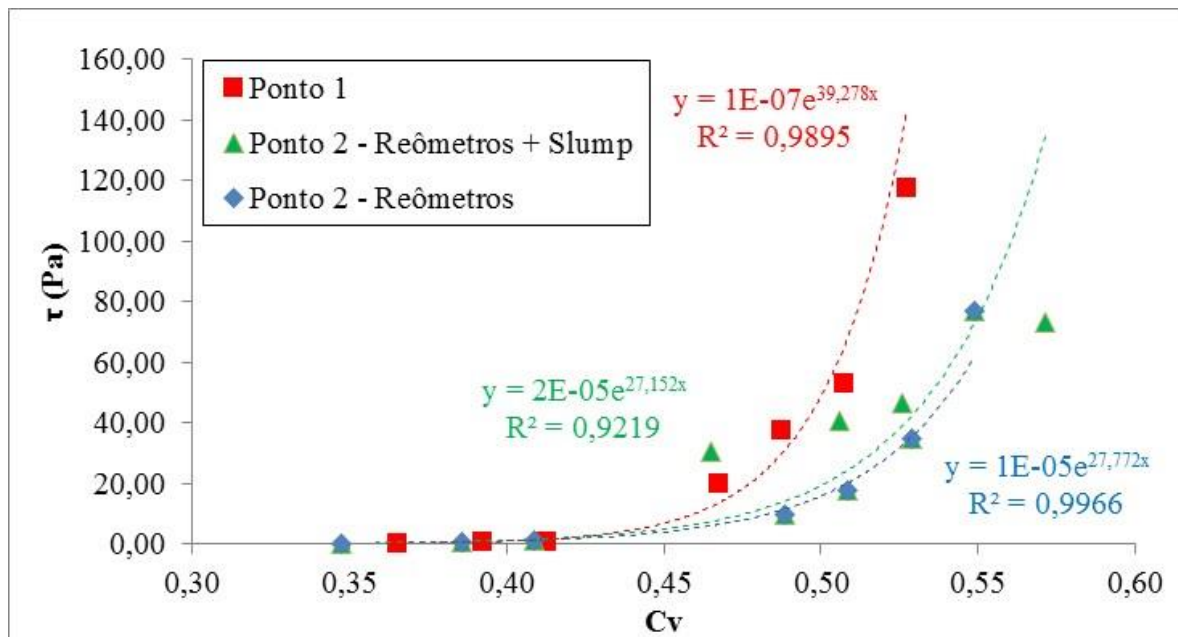


Figura 6.56 – Composição das curvas exponenciais de tensão de escoamento, para as amostras dos Pontos 1 e 2, obtida pelos reômetros rotacionais (cilindro concêntrico e palheta coaxial) e, para o Ponto 2, adicionando o teste de *slump*

Na Figura 6.14, adicionou-se uma terceira curva, com os valores encontrados no teste de *slump* para a amostra 2, conforme retratado no item 6.2.3. Ressalta-se que a curva em vermelho refere-se às amostras do Ponto 1, com coeficiente de correlação à curva exponencial de $R^2 = 0,9895$. A curva em azul refere-se às amostras do Ponto 2, com coeficiente de correlação à curva exponencial de $R^2 = 0,9966$. E a curva em verde refere-se aos testes com os reômetros mais o teste de *slump* da amostra 2, diminuindo a correlação para $R^2 = 9219$. As equações das curvas estão retratas no próprio gráfico.

Salienta-se que os coeficientes das curvas exponenciais, conforme descrito no item 5.4.3, são os *inputs* necessários para a caracterização dos fluidos não-Newtoniano no *software* FLO-2D Pro.

Tarcha (2015) salienta que o processo para determinação precisa da tensão limite de escoamento é complexo e pode exigir a avaliação de métodos e procedimentos distintos, visto que os materiais apresentam diferentes comportamentos, e existe a dificuldade de reprodutibilidade dos resultados.

6.3 **Hidrogramas de Ruptura**

A vazão de pico calculada, a partir das referências citadas (FROEHLICH, 2016; AZIMI *et al.*, 2015), e de simulação, no modelo hidrológico paramétrico HEC-HMS (USACE, 2016^a), foram iguais a 14.822 m³/s, 26.470 m³/s e 33.284 m³/s respectivamente.

Optou-se por utilizar o modelo hidrológico paramétrico HEC-HMS, uma vez que, após a ruptura da Barragem do Fundão, houve o armazenamento de 1,2 Mm³ de rejeito e posterior galgamento da Barragem Santarém. No módulo “*Dam Break*” do modelo HEC-HMS, conseguiu-se representar o fenômeno físico observado, durante a translação da onda de cheia pelo reservatório de Santarém, conforme mostrado na Figura 6.15.

O hidrograma de entrada, nos modelos hidráulicos, corresponde ao hidrograma efluente do galgamento da Barragem Santarém. Nesse hidrograma, são incorporados os parâmetros reológicos e geotécnicos do rejeito, necessários para a simulação hidráulica dos fluidos não-Newtonianos. A Figura 6.16 ilustra as referências e premissas utilizadas para a composição dos hidrogramas, considerando os volumes de água e sólidos, decorrentes da ruptura da Barragem de rejeitos do Fundão.

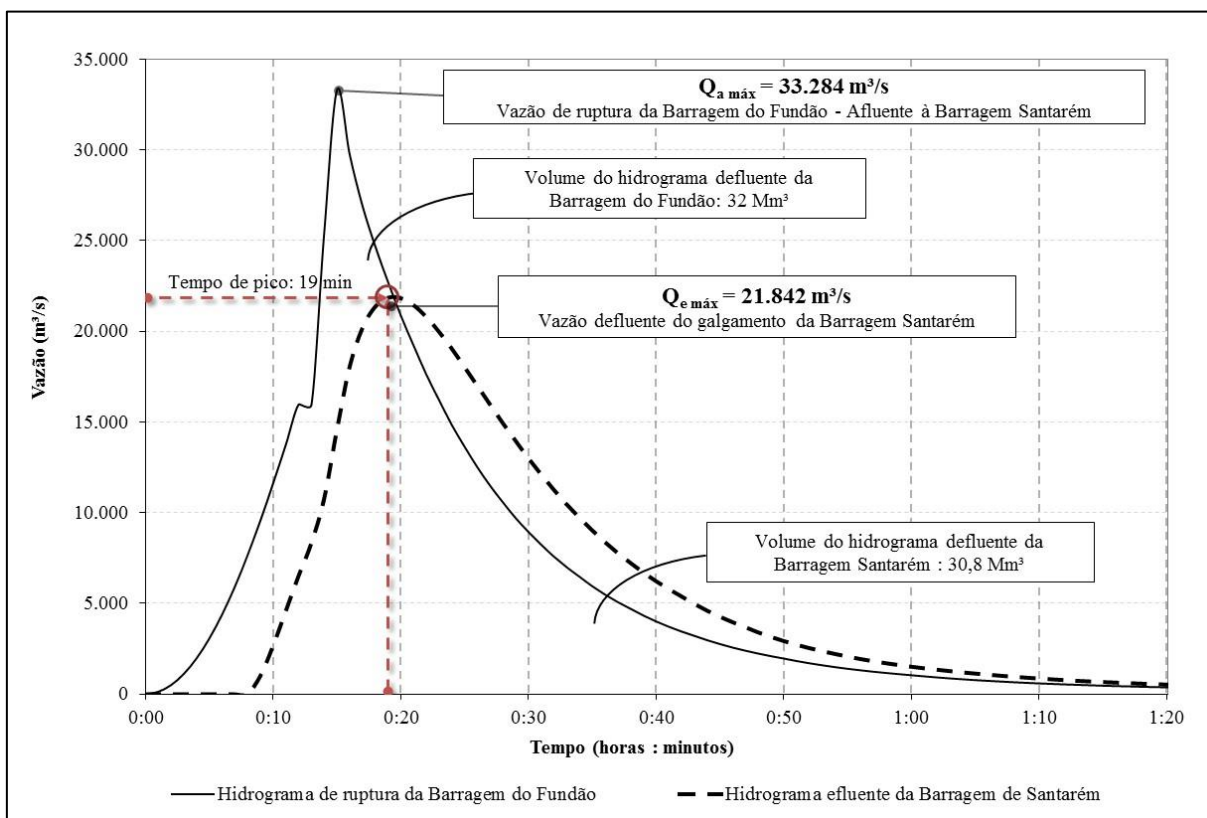
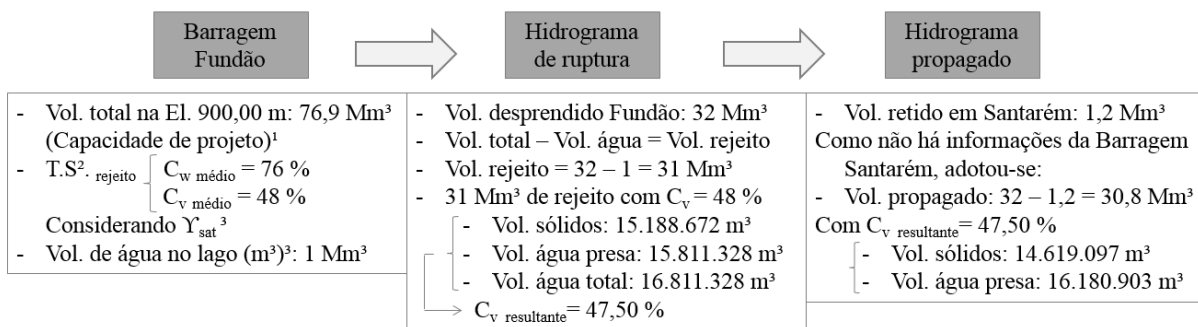


Figura 6.57 – Hidrograma afluente (referente ao hidrograma de ruptura da Barragem do Fundão) e efluente da Barragem Santarém



¹ Pimenta de Ávila Consultoria (2008);

² Calculado a partir dos parâmetros de Ferreira (2016);

³ Premissas adotadas.

Figura 6.58 – Composição do hidrograma de ruptura especificando os volumes de água e sólidos

As Figuras 6.17 a 6.20 representam os hidrogramas híbridos compostos para a propagação dos fluidos hiperconcentrados, não-Newtonianos. Nesses hidrogramas, foram discriminados as vazões de água e sólidos, de acordo com a variação da concentração volumétrica no tempo, representadas nos eixos secundários.

Dessa maneira, variando a vazão de sólidos, através da concentração volumétrica, variam-se também as propriedades reológicas do fluido, já que essas propriedades são função também de C_v . A Figura 6.17 representa o hidrograma híbrido com concentração volumétrica constante de 47%, representando que o fluido escoaria como um material previamente misturado.

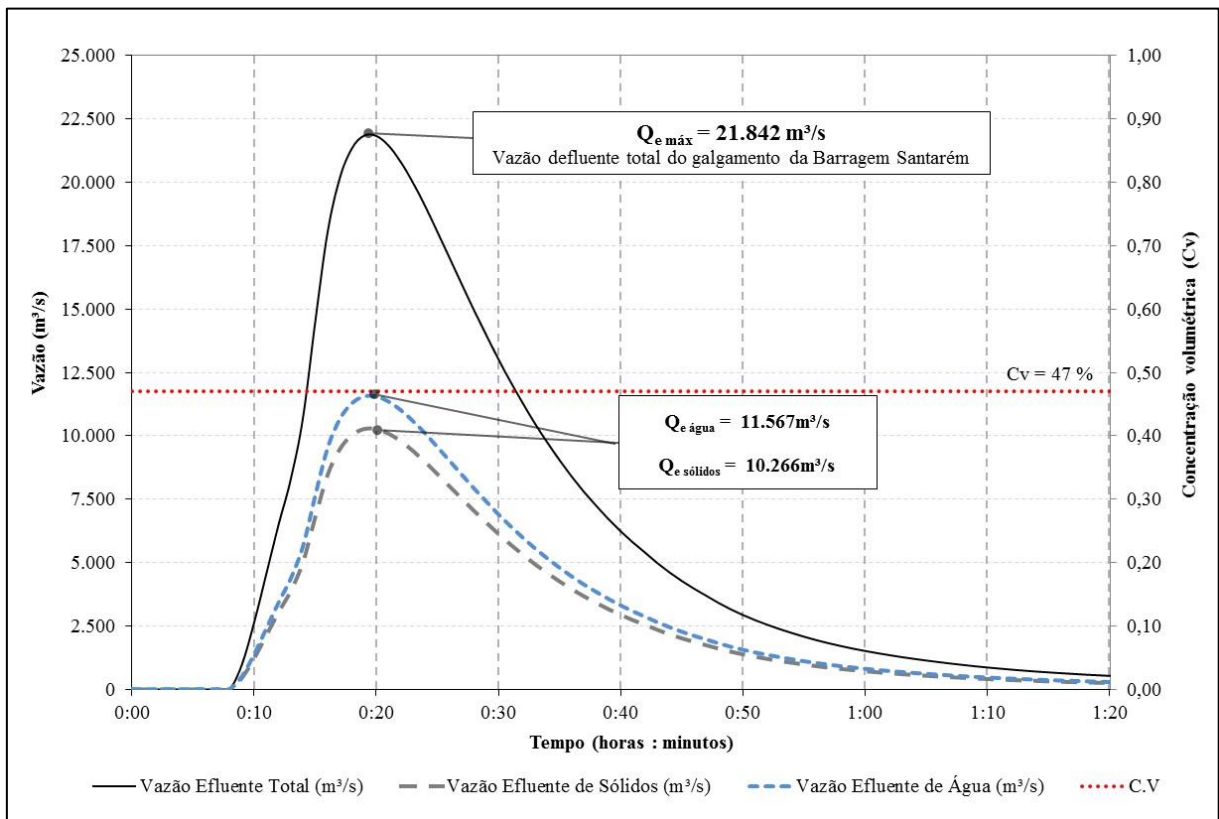


Figura 6.59 – Composição do hidrograma de ruptura híbrido especificando as vazões totais de água e de sólidos, com a respectiva concentração volumétrica constante

As Figura 6.18 a 6.20 representam três composições distintas de hidrogramas híbridos. Os hidrogramas foram compostos, variando a relação entre a vazão de sólidos e água no tempo. O

volume total de sólidos e água foi conservado, entretanto, variou-se a maneira com a qual o mesmo se divide no tempo. As composições 1 e 2 possuem uma frente de onda de água, sendo o sedimento posteriormente incorporado. A principal diferença entre essas 2 composições se dá pela C_v máxima atingida, sendo 66% e 54% respectivamente. Essa premissa impacta no maior pico de vazão de sólidos da composição 1, havendo assim mudanças bruscas no regime de escoamento, em um determinado intervalo de tempo.

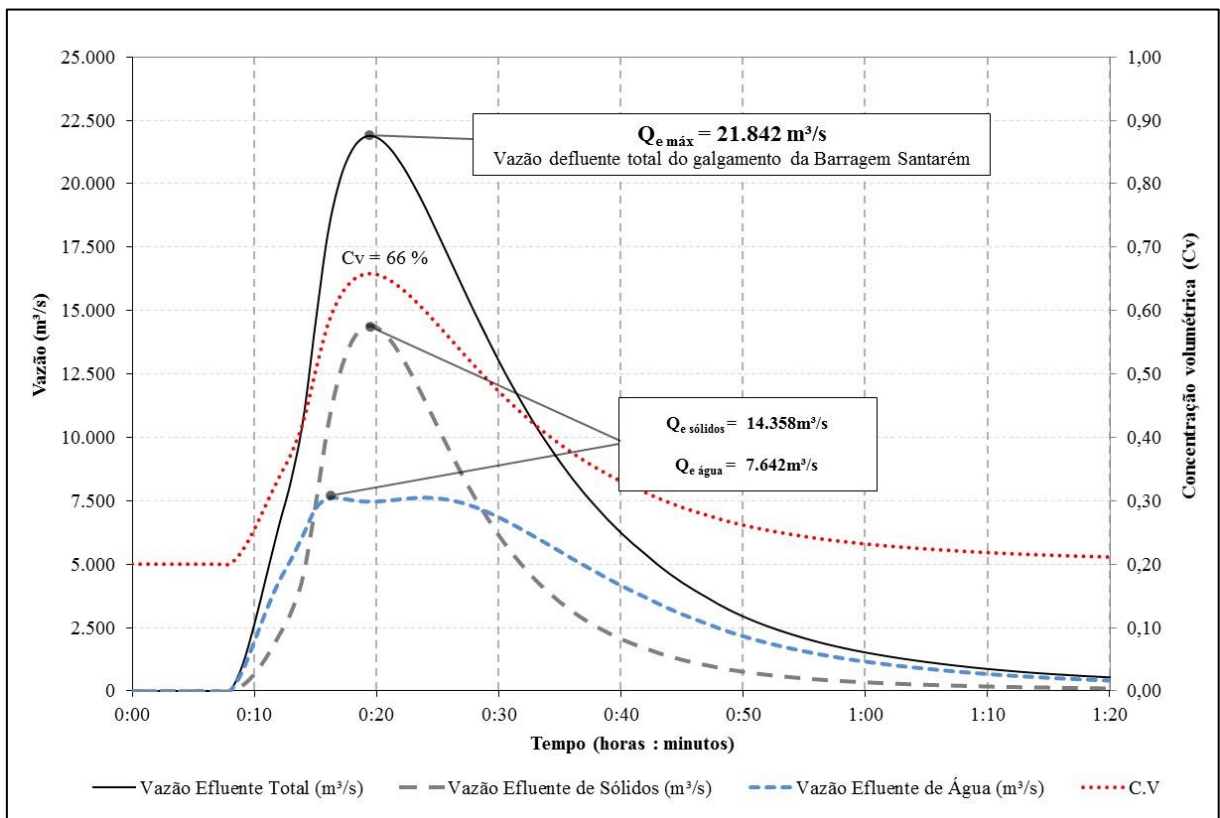


Figura 6.60 – Composição do hidrograma de ruptura híbrido especificando as vazões totais de água e de sólidos, com a respectiva concentração volumétrica discretizada no tempo (Composição 1 – $C_{v\text{máx}} = 66\%$)

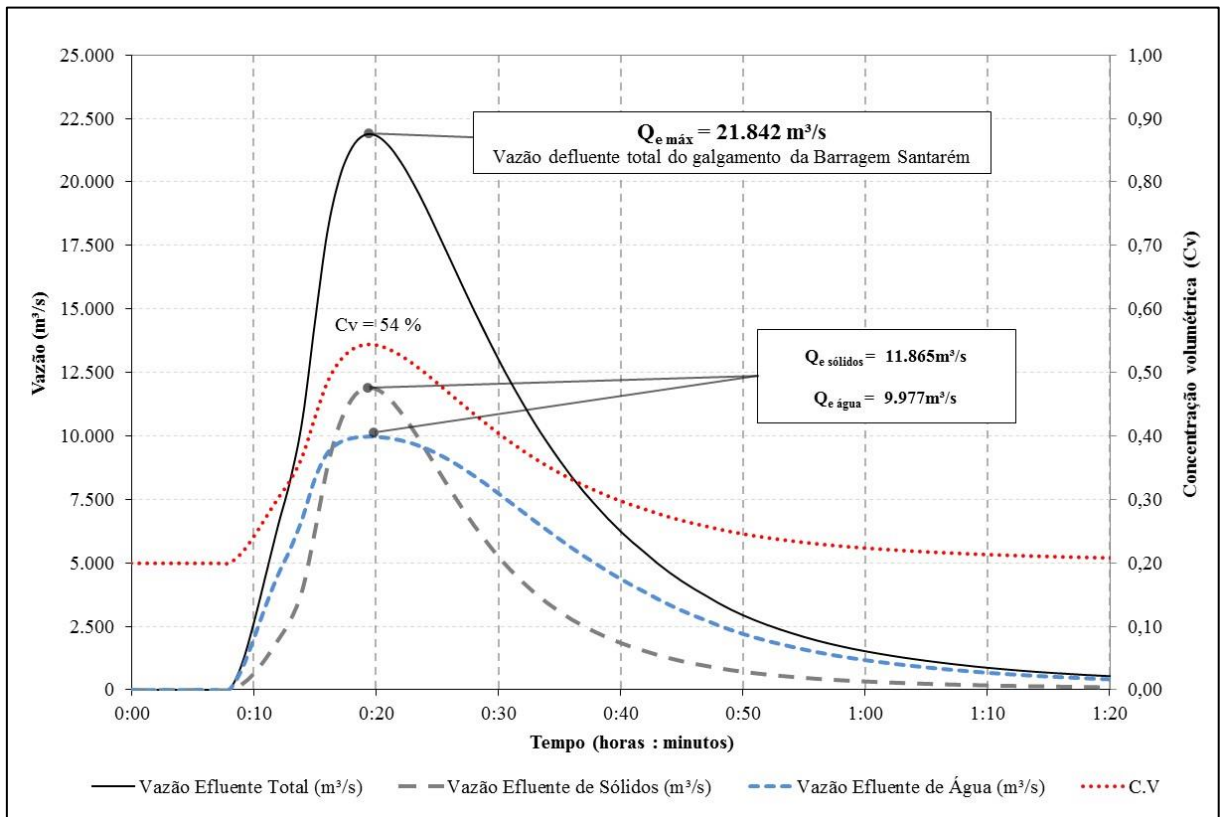


Figura 6.61 – Composição do hidrograma de ruptura híbrido especificando as vazões totais de água e de sólidos, com a respectiva concentração volumétrica discretizada no tempo (Composição 2 – $C_{v\text{ máx}} = 54 \%$)

A composição 3 caracteriza-se pela distribuição mais homogênea entre a vazão de água e sólidos no tempo. Essa premissa implica variações menos bruscas do regime de escoamento, sendo, a princípio, mais fácil a convergência do modelo hidráulico.

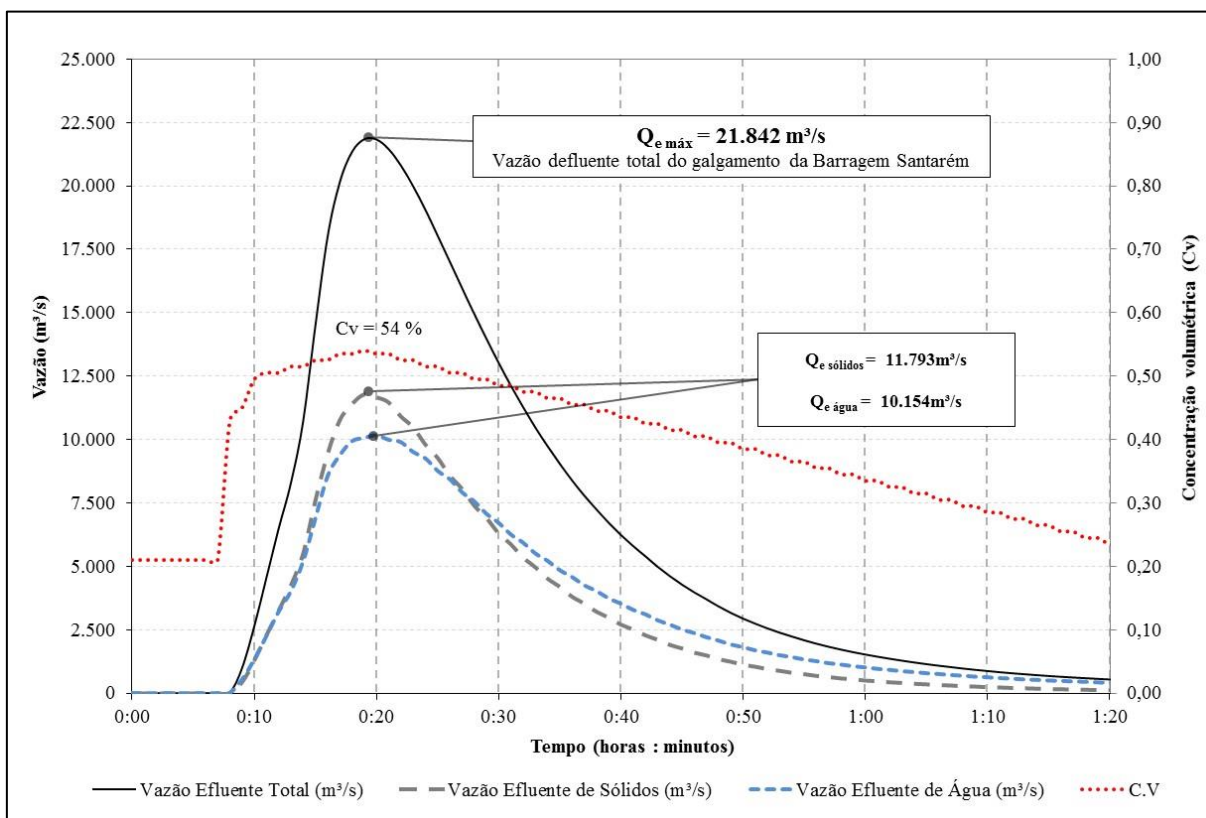


Figura 6.62 – Composição do hidrograma de ruptura híbrido especificando os as vazões totais, de água e de sólidos, com a respectiva concentração volumétrica discretizada no tempo (Composição 3 – $C_v \text{ máx} = 54 \%$)

Para todos os testes realizados com as três diferentes composições, conforme descrito no item 5.4, através da Tabela 5.3, a única composição na qual o modelo hidráulico FLO-2D convergiu foi a composição 3. Dessa maneira, o cenário 7 representa os resultados dessa composição, incluindo também as curvas reológicas apresentadas no item 6.2.4.

6.4 Parâmetros de Ajuste na Modelagem Hidráulica

6.4.1 Pseudo-Manning (HEC-RAS)

O ajuste dos parâmetros da simulação hidráulica utiliza inicialmente a viscosidade dinâmica do fluido a ser propagado, sendo este valor função da concentração volumétrica do fluido.

Para o estudo de caso da Barragem do Fundão, conforme representado na Figura 6.16, o valor da concentração volumétrica do hidrograma propagado é de 47%, sendo esse valor correspondente a uma viscosidade dinâmica de 0,08 Pa*s, conforme curva reológica composta pelos resultados obtidos do reômetro de palheta coaxial (Tabela 6.3). Os coeficientes do modelo unidimensional foram ajustados para representar fluidos hiperconcentrados, conforme metodologia explicitada nos itens 3.3.4 e 5.4.3 (Tabela 6.6).

Tabela 6.15 – Ajuste dos coeficientes adimensionais para representação dos fluxos hiperconcentrados no modelo unidimensional HEC-RAS (Ventura, 2011)

Viscosidade cinemática – água limpa 25°C (ft ² /s)	9,61 x 10 ⁻⁶
Concentração volumétrica (%)	47
Viscosidade cinemática – fluxo hiperconcentrado 25°C (ft ² /s)	4,19 x 10 ⁻⁴
Coefficiente de Manning – água limpa	0,100
Coefficiente de Manning – hiperconcentrado	0,152
Coefficiente de contração e expansão – água limpa	0,1 / 0,3
Coefficiente de contração e expansão – hiperconcentrado	0,008 / 0,024

A Figura 6.21 ilustra as seções transversais utilizadas na modelagem unidimensional.

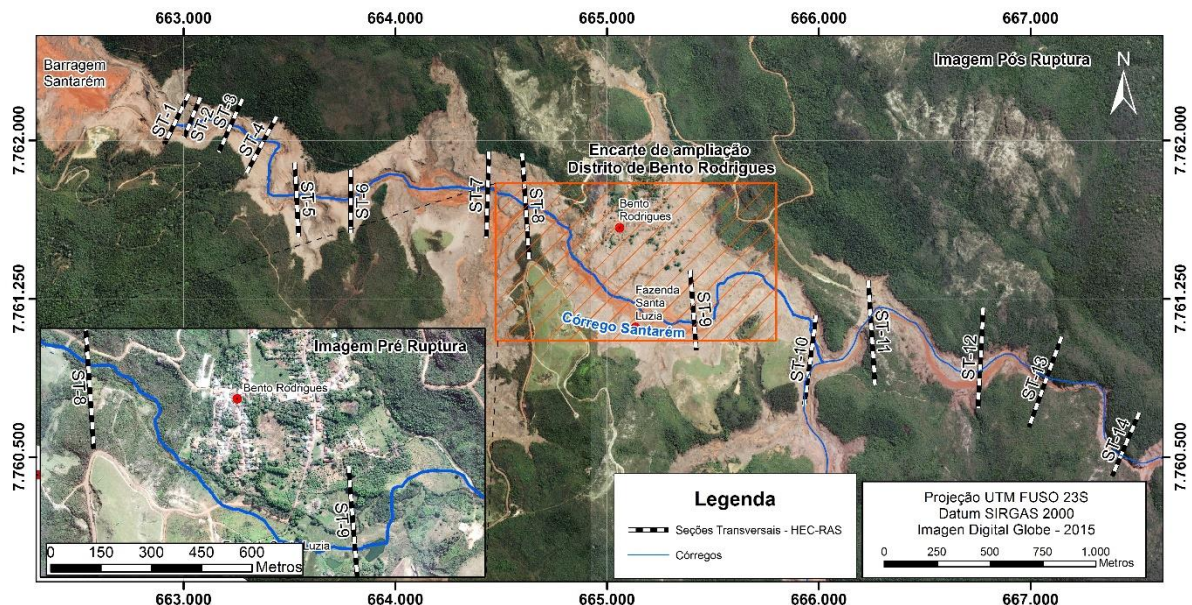


Figura 6.63 – Seções transversais do modelo hidráulico unidimensional HEC-RAS

6.4.2 Parâmetros reológicos (FLO-2D)

Nas simulações hidráulicas dos cenários 6 e 7, realizadas no FLO-2D, é necessário adicionar os parâmetros das curvas exponenciais reológicas, conforme descrito no item 5.4.3 e o G_s (peso específico dos grãos).

O programa possui limitações quanto ao parâmetro de peso específico, sendo o valor máximo igual a 3, valor adotado nas simulações. As curvas reológicas utilizadas referem-se à composição dos resultados do Ponto 1, apresentada nas Figuras 6.13 e 6.14, sendo a viscosidade e a tensão limite de escoamento respectivamente.

Consequentemente, para a curva reológica da viscosidade ($\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$), os valores de $\alpha_1 = 0,000004$ e $\beta_1 = 20,969$. Os valores da curva reológica da tensão limite de escoamento ($\tau_y = \alpha e^{\beta C_v}$) são $\alpha = 0,0000001$ e $\beta = 39,278$.

6.5 Resultados da Modelagem Hidráulica

A Figura 6.22 ilustra as seções transversais utilizadas na modelagem unidimensional no HEC-RAS. A Tabela 6.7 especifica as distâncias das seções transversais em relação à ST-1 do HEC-RAS. Para as simulações bidimensionais, tanto no HEC-RAS quanto no FLO-2D foram inseridas seções transversais ao longo da malha, de forma a obter os hidrogramas em cada simulação realizada. As seções incorporadas no modelo 2D do HEC-RAS são correspondentes às seções do modelo 1D. No FLO-2D, as seções transversais, incorporadas ao *grid* com suas respectivas equivalências ao HEC-RAS, podem ser observadas na Figura 6.22.

Tabela 6.16 – Distância das seções transversais em relação a ST-1 (HEC-RAS)

ST	Distância em relação a ST-1 (m)	ST	Distância em relação a ST-1 (m)
ST-1	0	ST-8	2.108
ST-2	75	ST-9	3.210
ST-3	283	ST-10	4.122
ST-4	464	ST-11	4.589
ST-5	920	ST-12	5.259
ST-6	1.180	ST-13	5.636
ST-7	1.906	ST-14	6.262

A Figura 6.23 retrata as variações percentuais das profundidades atingidas em cada seção transversal analisada, para cada um dos 7 cenários, em relação a um cenário base. O cenário base escolhido refere-se à modelagem unidimensional do HEC-RAS, considerando um fluido aquoso (Cenário 1). Essa escolha balizou-se na simulação mais trivial de ser realizada, de modo que seja possível comparar os ganhos nos quesitos de resultados em se aplicar modelos mais robustos, conseqüentemente, mais complexos no quesito de convergência e imprescindibilidade de parâmetros de entrada.

A Figura 6.24 representa o perfil de profundidade por distância, em relação à seção transversal ST-1 do HEC-RAS. A Figura 6.25 representa o tempo de chegada da onda, para a máxima profundidade, para os cenários simulados. A Figura 6.26 ilustra o zoom no gráfico da Figura 6.25, para o tempo de chegada de 30 minutos, sendo possível observar qual cenário apresenta maiores distâncias percorridas. A Portaria do DNPM 70.389, de maio de 2017 preconiza a Zona de Autossalvamento (ZAS), como sendo a maior distância entre 30 minutos de tempo de chegada de onda ou 10 km. Posto isso, dá-se a importância para este resultado.

Ressalta-se que os resultados apresentados, nas Figuras 6.24 e 6.25, são referentes às mesmas seções comparadas na Figura 6.23, ou seja, finaliza na ST-12 (HEC-RAS) e ST-7* (FLO-2D), totalizando 5,26 km de trecho a jusante.

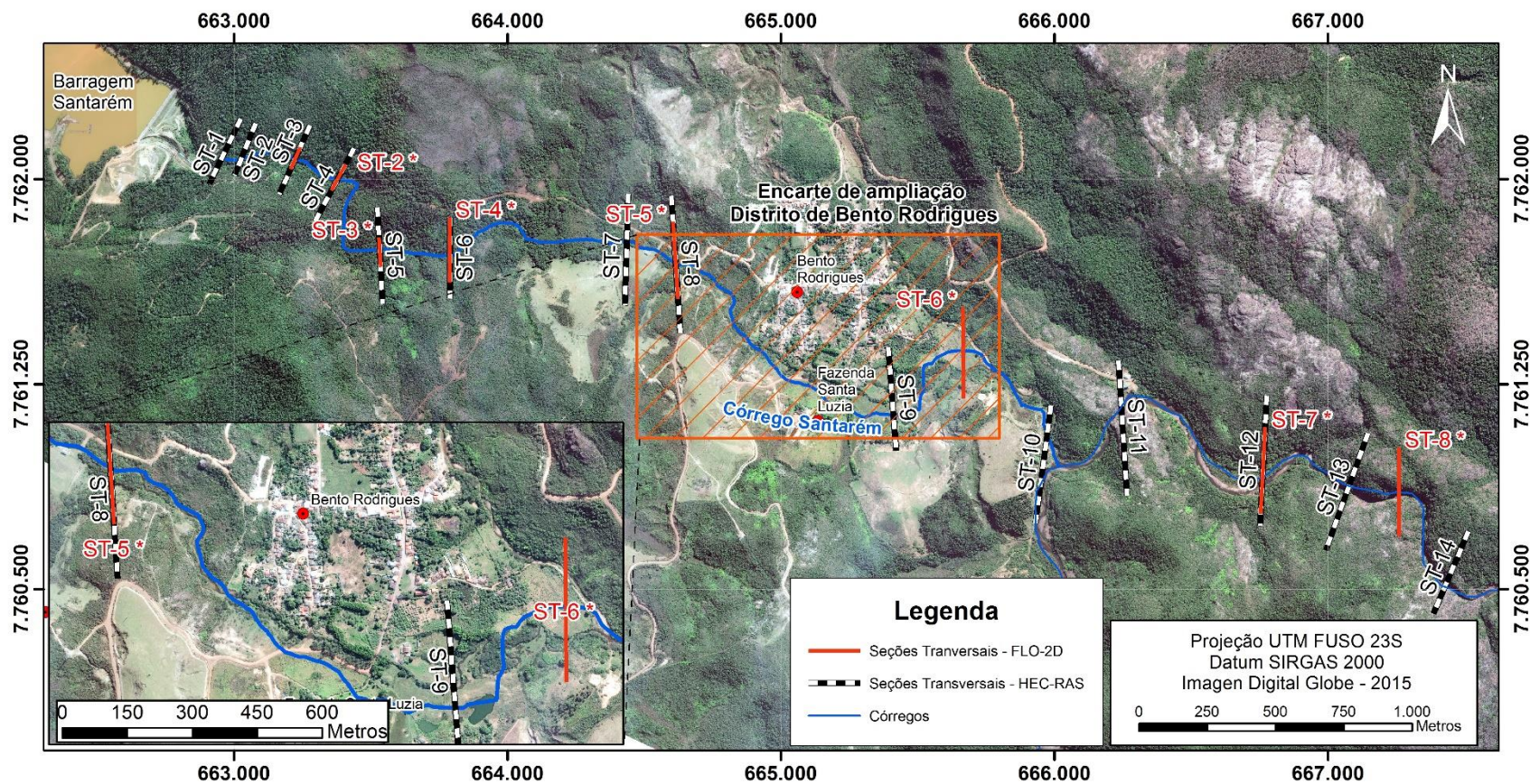


Figura 6.64 – Seções transversais para composição dos hidrogramas de ruptura nos modelos HEC-RAS e FLO-2D

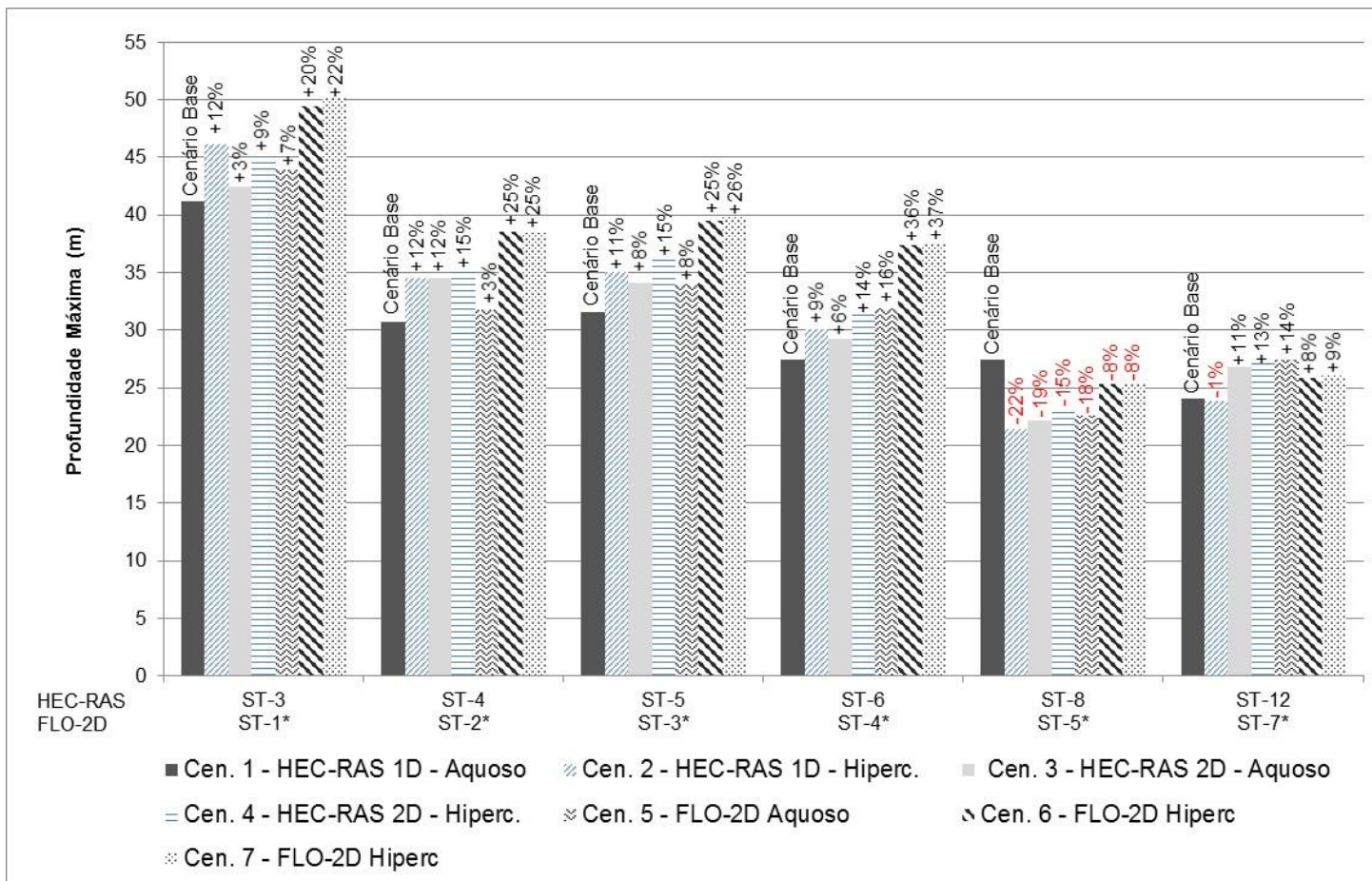


Figura 6.65 – Resultados de profundidade (em variação percentual dos cenários base) dos cenários simulados para cada ST

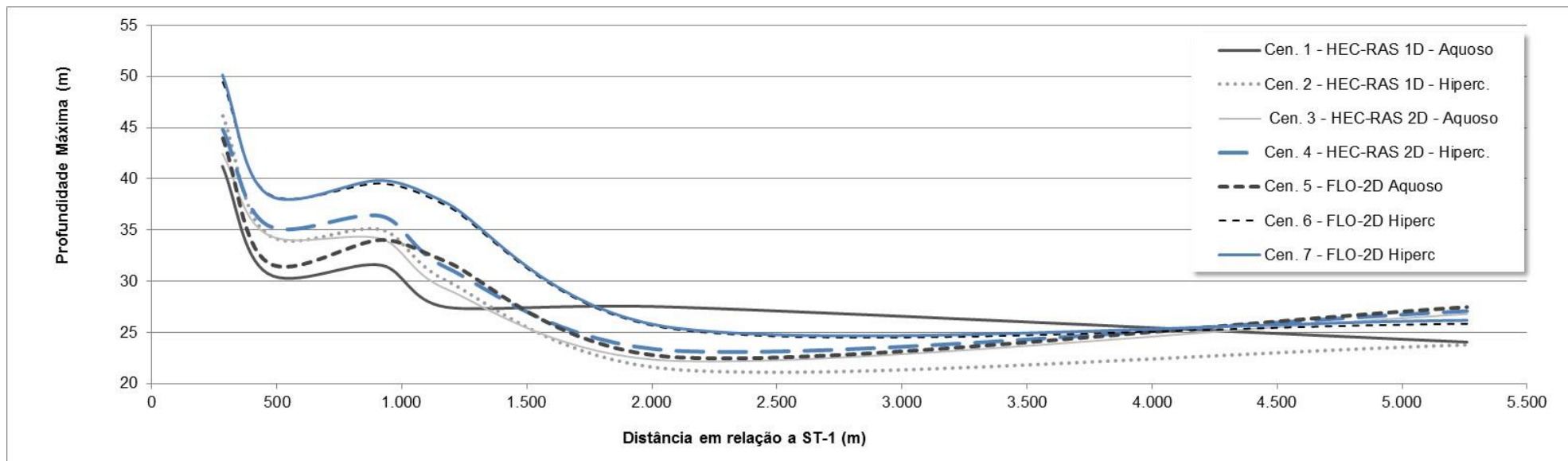


Figura 6.66 – Perfil profundidade por distância para os cenários simulados

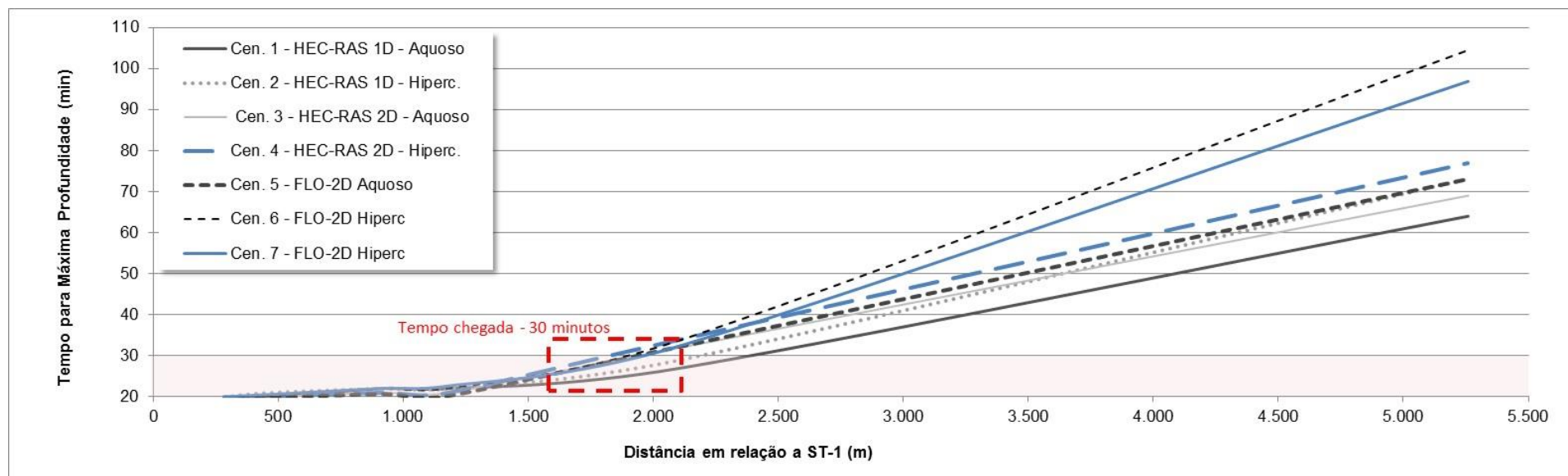


Figura 6.67 – Tempo de chegada da onda, para a máxima profundidade, para os cenários simulados

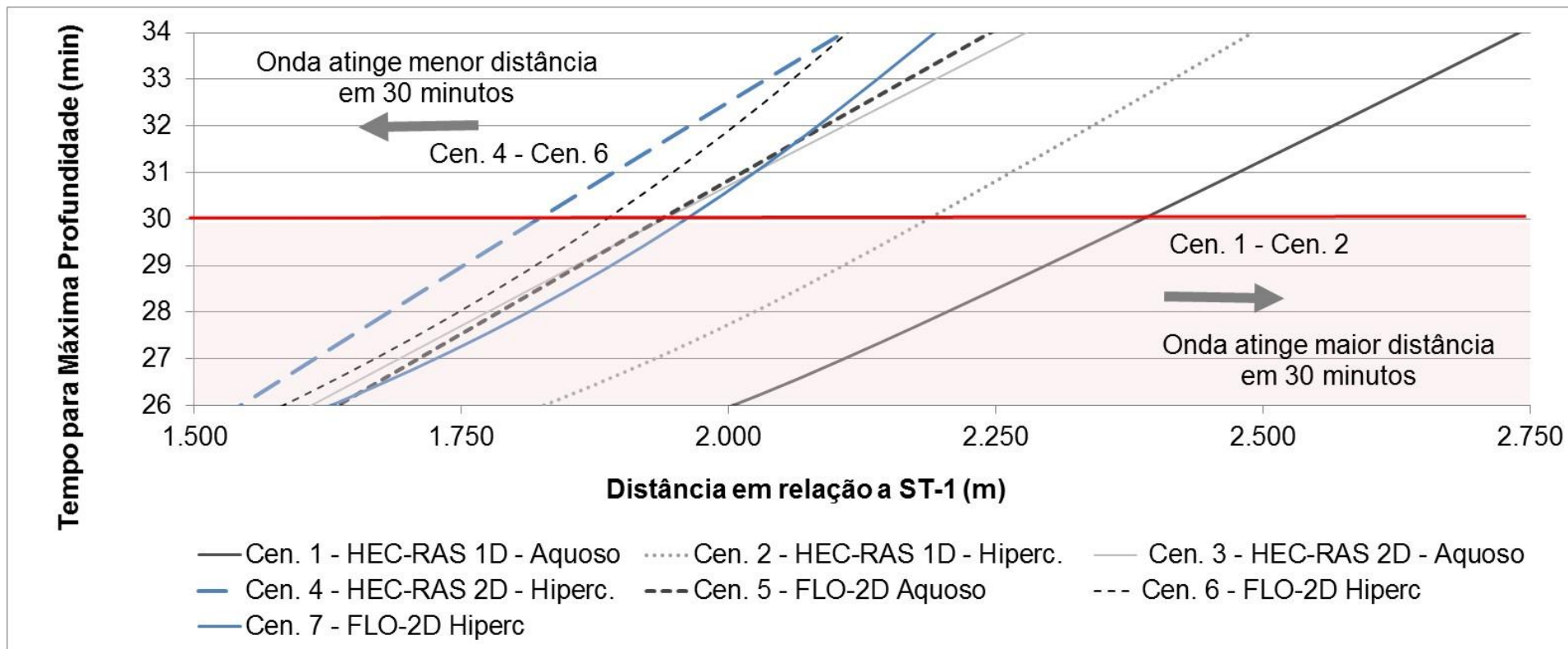


Figura 6.68 – Zoom no tempo de chegada da onda, para a máxima profundidade, para os cenários simulados – 30 Minutos

Para os valores de profundidade máxima, retratados nas Figuras 6.22 e 6.23, observa-se que as maiores profundidades atingidas são referentes aos Cenários 6 e 7, logo nas primeiras seções analisadas, sendo provavelmente decorrentes do escoamento do fluido, incorporando os parâmetros de reológicos no modelo FLO-2D. Estes cenários diferem do cenário base (Cenário 1) em mais de 20 %, ou seja, com sobrelevações superiores ao cenário base em mais de 20%. Essa observação é válida até a ST-6 (HEC-RAS) ou ST-4* (FLO-2D), também podendo ser observada no perfil de profundidades da Figura 6.24.

A partir desse resultado, pontua-se que, quando há comunidades ou ocupação nos primeiros quilômetros a jusante da barragem, a profundidade atingida pela passagem da onda de ruptura de barragens de rejeito, com fluidos tipicamente viscosos, poderá atingir maiores valores do que ondas compostas somente por água. Entretanto, conforme Figura 6.25, o tempo para chegada da onda máxima também é maior, não sendo uma consideração conservadora. Para os cenários nos quais foram incluídos parâmetros dos rejeitos e a premissa de fluidos não-Newtonianos (seja através de ajustes de pseudo-Manning ou diretamente), o tempo de chegada de onda são maiores, principalmente em se tratando de regiões mais a jusante.

A progressão da onda de inundação do Cenário 2 (HEC-RAS, unidimensional, fluido hiperconcentrado) é exemplificada pela Figura 6.27. Observa-se que a onda, proveniente da ruptura da Barragem do Fundão e posterior galgamento da Barragem de Santarém, atinge a região de Bento Rodrigues rapidamente, em aproximadamente 20 minutos, estando o distrito soterrado entre 30 e 60 minutos. A simulação hidráulica ilustra o evento com aceitável correspondência ao evento observado.

Um aspecto interessante e igualmente importante, do ponto de vista de modelagem hidráulica e de análise dos impactos nos corpos de água a jusante, é a incorporação dos afluentes na simulação hidráulica. Mesmo quando aplicada uma simulação unidimensional, é possível considerar os afluentes no modelo hidráulico. No caso da ruptura da Barragem do Fundão, observa-se que o Rio Gualaxo do Norte, o trecho a montante da confluência com o córrego Santarém, foi impactado com sobrelevação do nível de água e com deposição de rejeitos em aproximadamente 4 km a montante da confluência, como pode ser facilmente observado na Figura 6.27 e nos mapas apresentados em Apêndice.

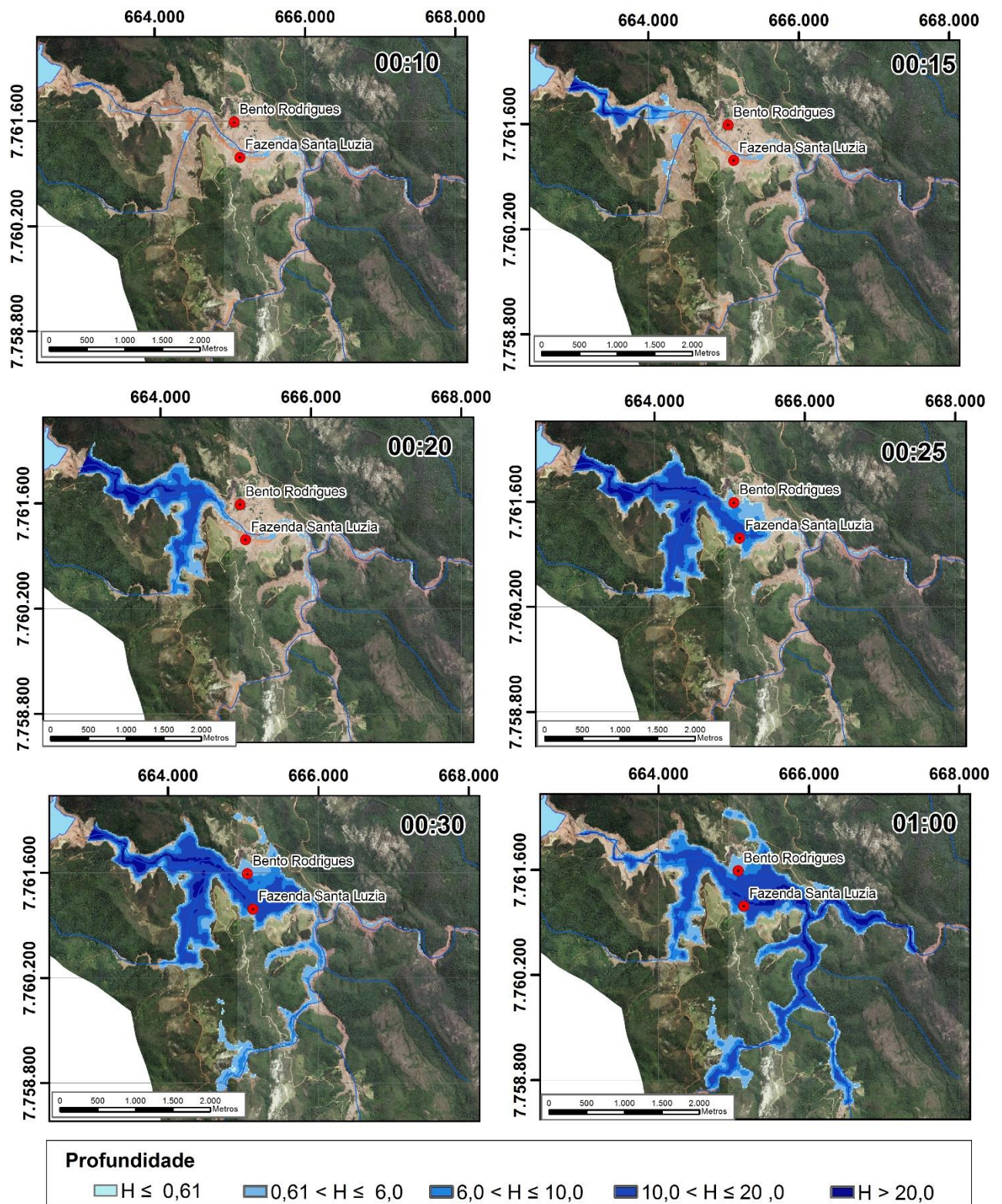


Figura 6.69 – Progressão da onda de inundação proveniente da ruptura da Barragem do Fundão – tempo de 10, 15, 20, 25, 30 e 60 minutos

As Figuras 6.28 a 6.31 ilustram alguns hidrogramas de referências, incluindo os 7 cenários avaliados.

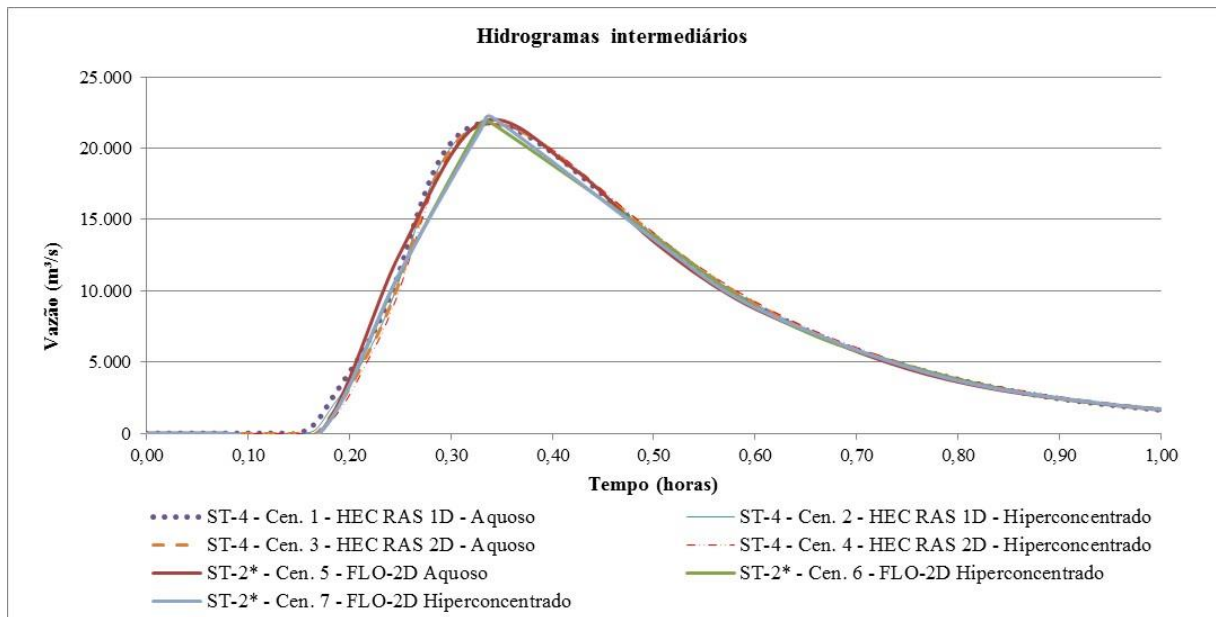


Figura 6.70 – Comparação dos hidrogramas a 0,46 km a jusante da ST-1 nos modelos HEC-RAS (1D e 2D) e FLO-2D (Aquoso e Hiperconcentrado)

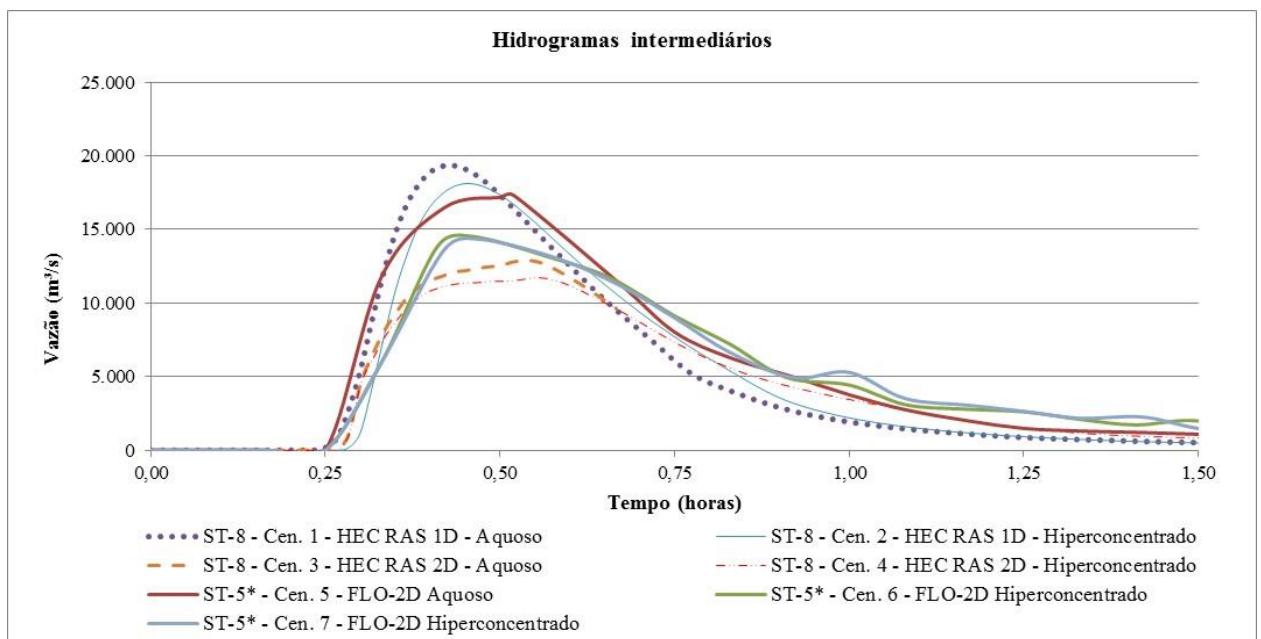


Figura 6.71 – Comparação dos hidrogramas a 2,11 km a jusante da ST-1 nos modelos HEC-RAS (1D e 2D) e FLO-2D (Aquoso e Hiperconcentrado)

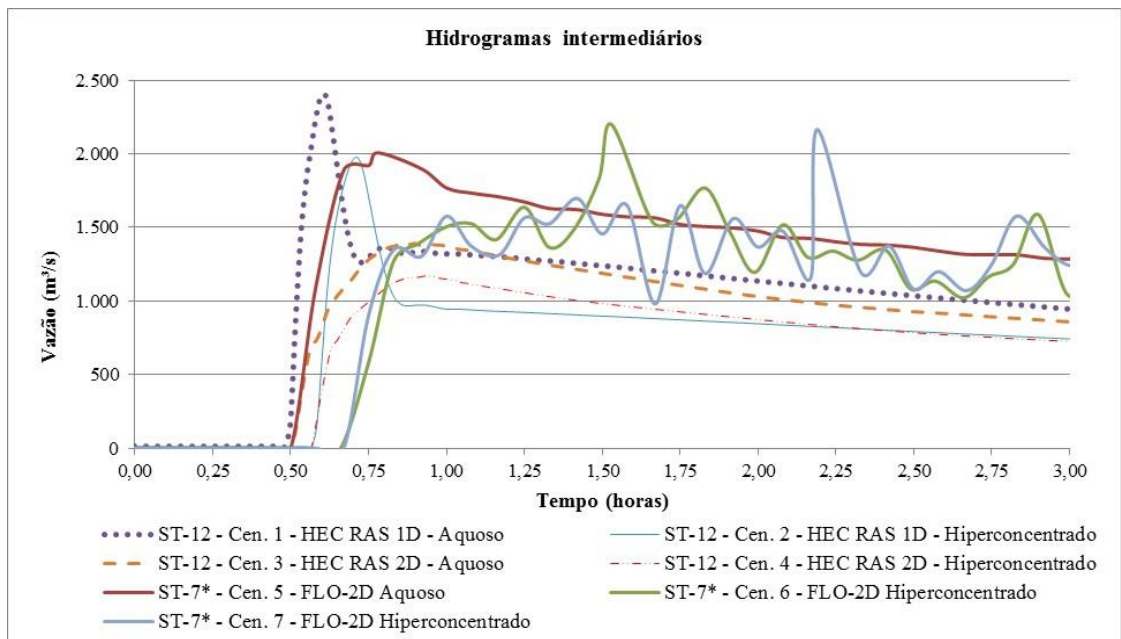


Figura 6.72 – Comparação dos hidrogramas a 5,26 km a jusante da ST-1 nos modelos HEC-RAS (1D e 2D) e FLO-2D (Aquoso e Hiperconcentrado)

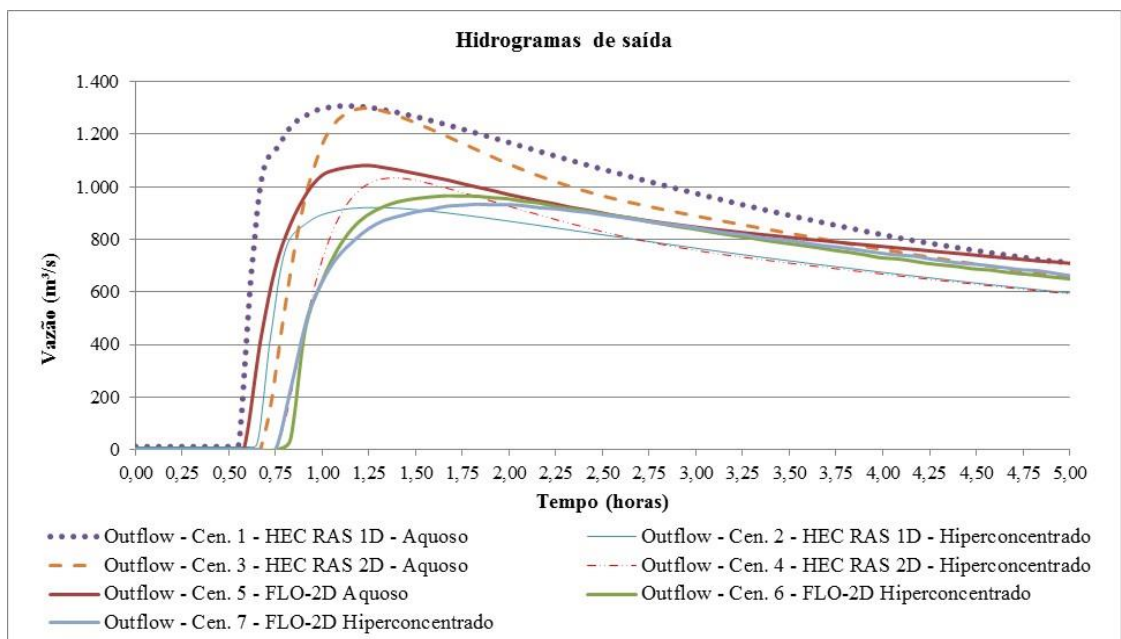


Figura 6.73 – Comparação dos hidrogramas no exutório (aproximadamente 6,3 km da ST-1) dos modelos HEC-RAS (1D e 2D) e FLO-2D (Aquoso e Hiperconcentrado)

Avaliando os resultados de vazão máxima, é clara a influência dos parâmetros do rejeito no decaimento da vazão, proporcionada pelos maiores valores do coeficiente de Manning, dos coeficientes de expansão e contração e/ou incorporação dos parâmetros dos rejeitos. Os valores superiores dos parâmetros hidráulicos do pseudo-Manning resultam em maiores perdas de energia pelo fluido, no decorrer da propagação da onda, sendo condizente com o comportamento dos fluidos viscosos.

Os hidrogramas apresentados na Figura 6.30 apresentam valores variáveis de vazão para os cenários 6 e 7. Destaca-se que esta seção corresponde a um trecho a jusante da seção de controle hidráulico (estreitamento) do rio. Sendo assim, é possível que esses valores estejam sofrendo influência da passagem do fluido não-Newtoniano por esta singularidade hidráulica, tendendo a ser uma área de grande turbulência e dissipação de energia, como também variações na concentração de sólidos em volume, decorrente de fenômenos de deposição e transporte de sedimentos.

Os mapas de inundação, para cada um dos cenários simulados, encontram-se em Apêndice, sendo compostos pelos resultados das simulações dos diversos cenários com a mancha de inundação observada. Consta também, em Apêndice, o mapa para a mancha de inundação observada, delimitada a partir da imagem de precisão do satélite Ayra.

A Figura 6.32 ilustra a diferença dos resultados, em planta, dos dois cenários modelados em 1D com o HEC-RAS. A área inundada pelo fluido aquoso é menor que a área inundada pelo fluido hiperconcentrado. Pelas profundidades apresentadas na Figura 6.23, é coerente tal observação, mesmo que em menor escala.

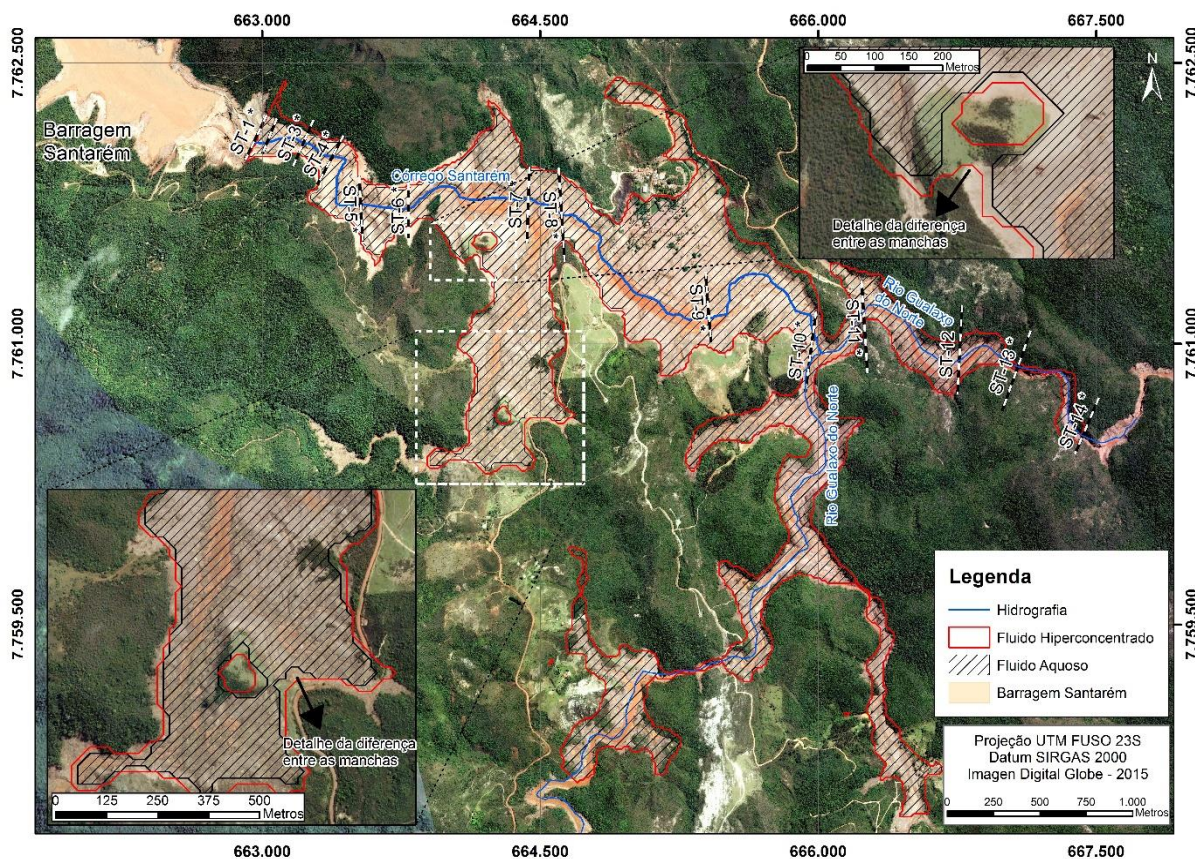


Figura 6.74 – Comparação das manchas de inundação dos Cenários 1 e 2 (HEC-RAS 1D - aquoso e hiperconcentrado)

A Figura 6.33 ilustra a diferença dos resultados, em planta, dos dois cenários modelados, no HEC-RAS, de fluidos hiperconcentrados, o Cenário 2 em 1D e o Cenário 4 em 2D. A área inundada pelo modelo unidimensional é menor que a área inundada pelo bidimensional, principalmente, nos afluentes. A principal diferença entre os dois modelos é observada no que se refere ao tempo de chegada de onda, conforme ilustrado nas Figuras 6.25 e 6.26.

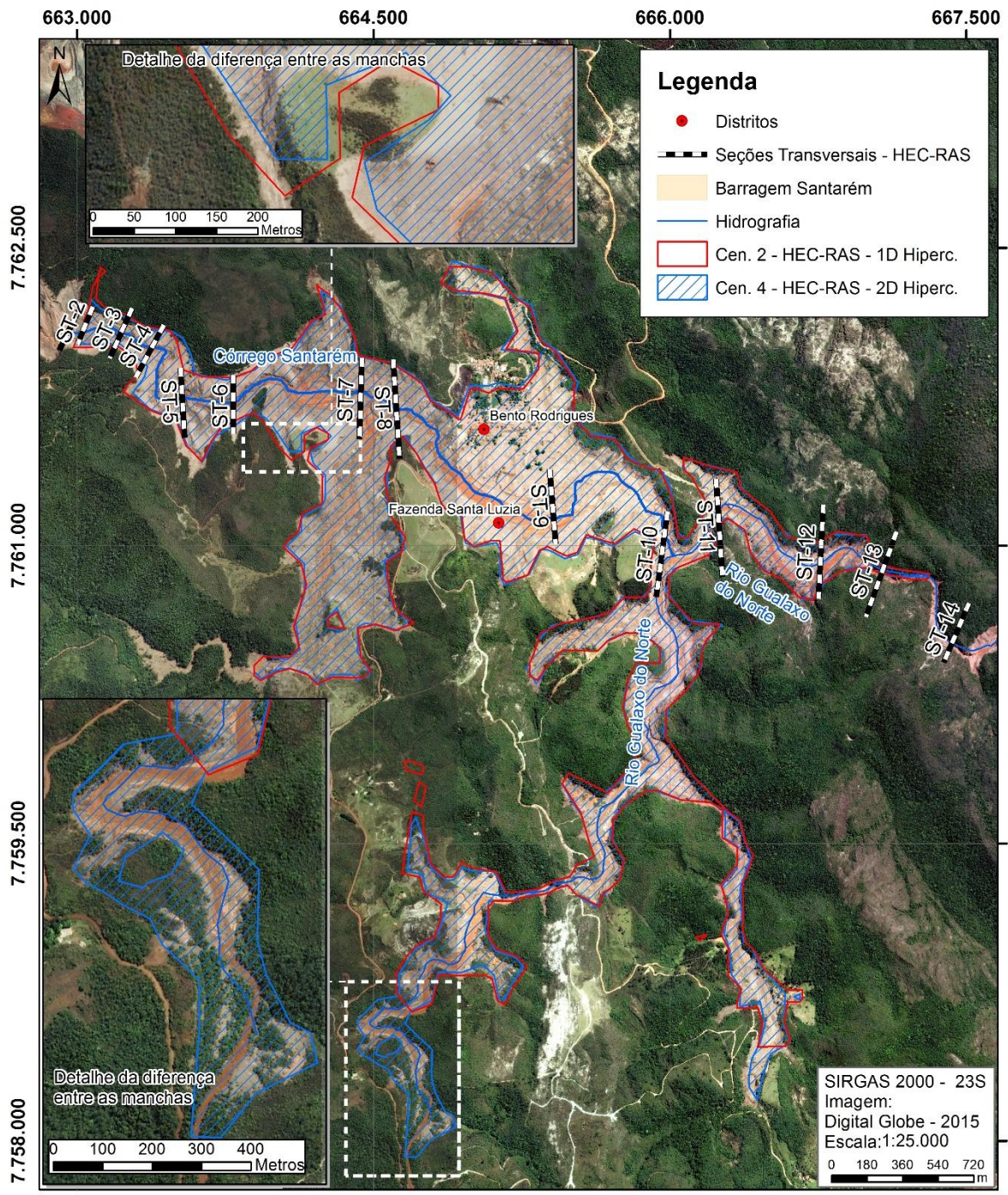


Figura 6.75 – Comparação das manchas de inundação dos Cenários 2 e 4 (HEC-RAS 1D e 2D hiperconcentrado)

6.6 **Avaliação de Desempenho da Simulação Hidráulica**

De acordo com Schumman *et al.* (2009), existem muitas maneiras de avaliar o desempenho de um modelo hidráulico de representar a extensão ou profundidade da inundação. A escolha do método depende dos detalhes inerentes ao modelo, da qualidade dos dados de entrada que compõe o modelo, a natureza da calibração e da validação a serem realizadas. Por conseguinte, evidencia-se que, por meio de indicadores “F”, é possível realizar uma avaliação de desempenho da simulação hidráulica. Assim como ratifica Rocha (2015), um alto índice de desempenho “F” não necessariamente indica uma boa calibração do modelo hidráulico, uma vez que esses índices devem ser associados a outras formas de análise das manchas de inundação, como níveis observados x simulado.

A Figura 6.34 exemplifica a combinação binária descrita no item 3.3, resultante da simulação unidimensional no HEC-RAS, de fluidos hiperconcentrados, referente ao Cenário 2. Essa classificação é então utilizada para os cálculos dos índices de desempenho F.

RETROANÁLISE DA RUPTURA DA BARRAGEM DO FUNDÃO - COMBINAÇÕES E CLASSIFICAÇÃO BINÁRIA
 RESULTADO DO CENÁRIO 2 - SIMULAÇÃO NO HEC-RAS 1D - FLUIDO HIPERCONCENTRADO

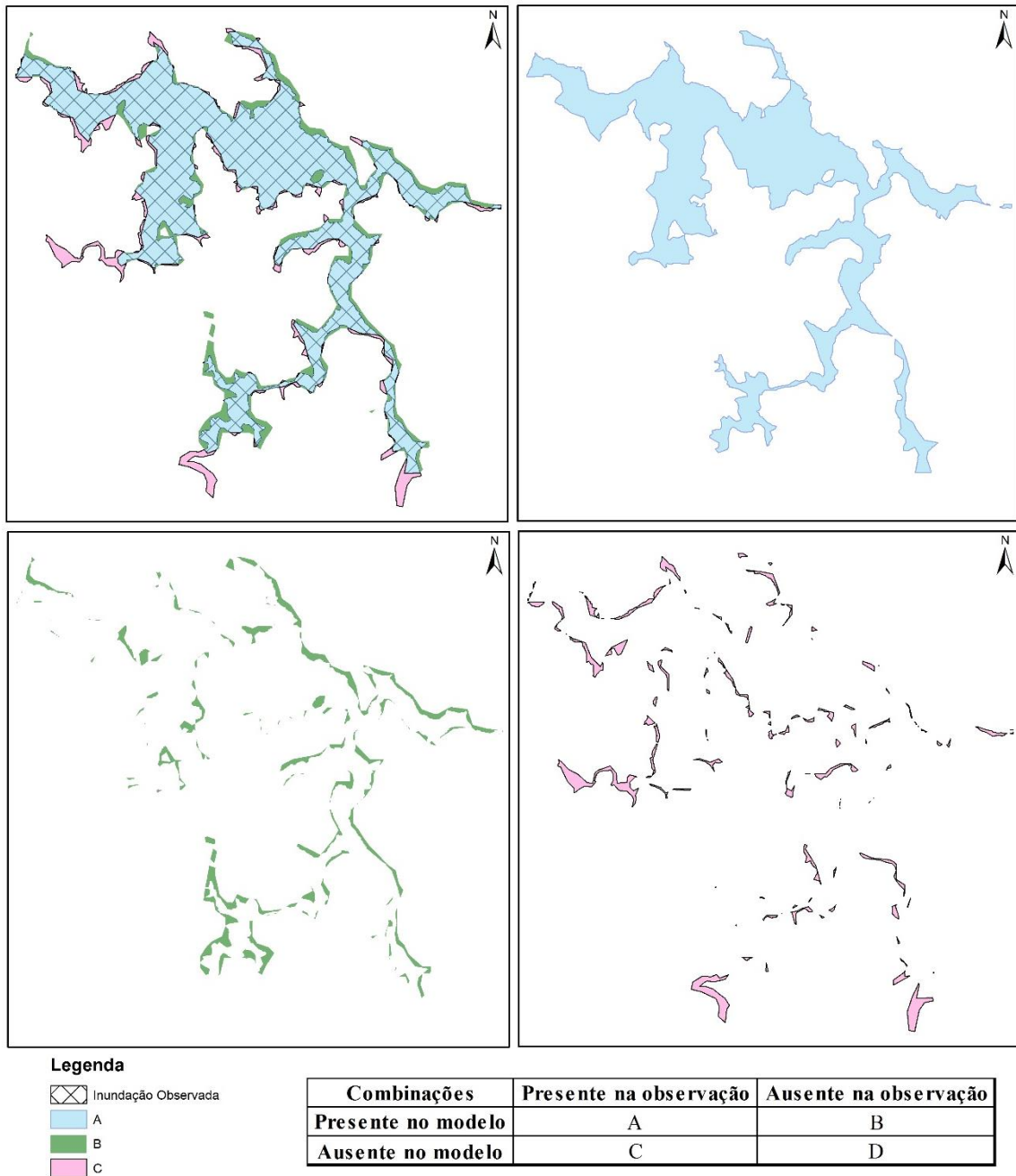


Figura 6.76 – Combinação e Classificação Binária do Cenário 2 – Simulação no HEC-RAS 1D de fluidos hiperconcentrados

O desempenho das simulações hidráulicas dos 7 cenários foi avaliado por meio da comparação entre a mancha real (área inundada real) e as manchas de inundações resultantes das simulações

hidráulicas. A Tabela 6.8 sintetiza a descrição dos valores obtidos no cálculo do viés, assim como nos fatores de desempenho (F^2 , F^3 e F^4) analisados. Os resultados estão apresentados nos gráficos da Figura 6.35.

Tabela 6.17 – Descrições dos valores do viés e fatores de desempenho

Parâmetro	Intervalo dos valores	Descrição
Viés	$(0, \infty)$ - previsão correta: 1	Balço entre sub e superestimava
F^2	$(0,1)$	Índice de sucesso crítico
F^3	$(-1,1)$	Penaliza subestimativa
F^4	$(-1,1)$	Penaliza superestimava

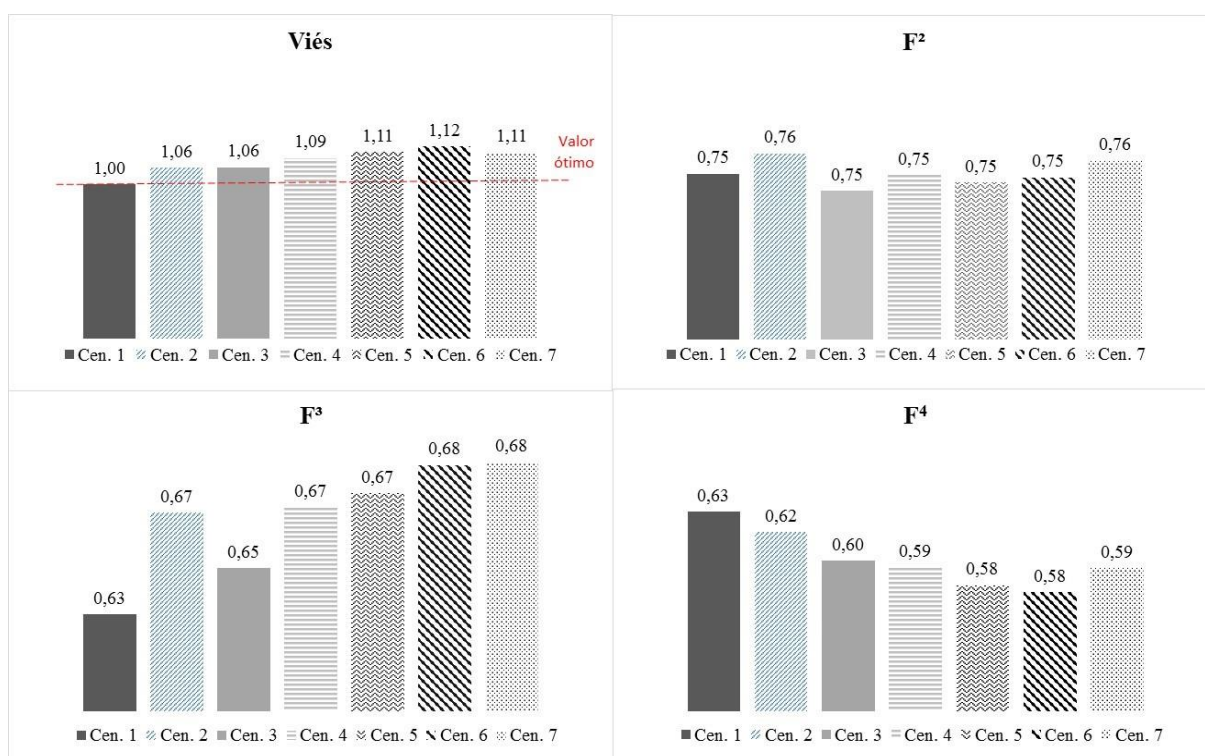


Figura 6.77 – Resultados do viés e fatores de desempenho F^2 , F^3 e F^4

A Figura 6.36 ilustra os percentuais de falsos positivos e falsos negativos para cada um dos cenários. O falso positivo refere-se à mancha que foi simulada, mas não foi observada no real, ou seja, os locais nos quais a simulação indicaria inundação, no entanto não ocorreu. O falso negativo refere-se à situação contrária, ou seja, locais nos quais foram observadas inundações,

entretanto o modelo não acusou. De maneira geral, neste estudo, observa-se que os valores de falsos positivos são maiores em percentuais do que os falsos negativos, ou seja, a mancha de inundação gerada, a partir dos diferentes programas e cenários, geraria manchas que mais superestimam a inundação do que subestimam, considerando todas as premissas adotadas, não sendo possível a generalização para todas as simulações.

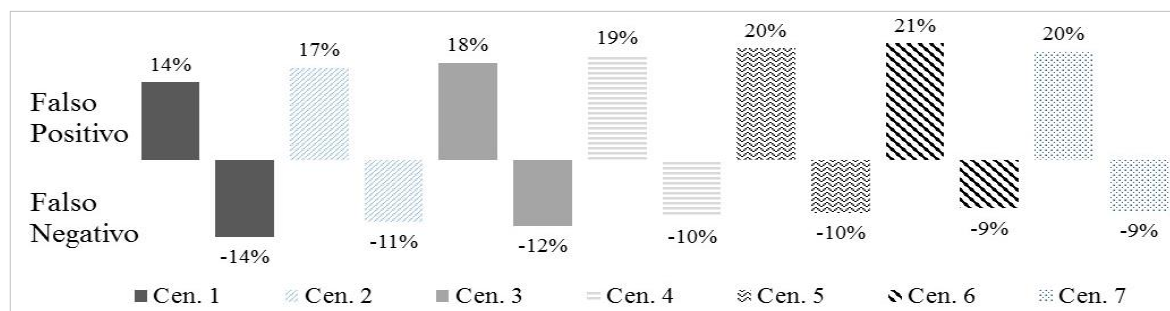


Figura 6.78 – Resultados percentuais de falsos positivos e falsos negativos

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Trabalhos de retroanálise são uma importante ferramenta para conhecer melhor e analisar os fenômenos ocorridos, de forma a avaliar e aperfeiçoar os modelos e metodologias usadas na previsão destes fenômenos. Entretanto, para se realizar a retroanálise, é recomendável que os dados sejam os mais acurados possíveis, o que, na maioria dos casos, é de difícil obtenção.

As simulações hidráulicas realizadas ilustram a consequência da incorporação das características geotécnicas e reológicas do rejeito na modelagem hidráulica, quando se trata da análise de velocidades, profundidades atingidas e tempo de chegada de onda.

Assim como Boger (2013) ponderou, ressalta-se que a água livre é o maior problema, em se tratando de barragens de rejeito. Indica-se que a água livre seja removida, aumentando a tensão limite de escoamento e a viscosidade do material, reduzindo o volume disposto, o custo para armazenamento e, eventualmente, aumentando a segurança da estrutura.

Como exemplo desta ponderação acerca dos estudos reológicos, variando o volume de água presente na disposição do rejeito, cita-se a mineradora Alcoa na Austrália Ocidental. De acordo com Boger (2013), a partir do entendimento das propriedades reológicas do rejeito do tipo lama vermelha, optou-se pela disposição seca, em pasta (maior teor de sólidos), em detrimento da lama (mais fluido). Essa alternativa se mostrou economicamente vantajosa, uma vez que reduziu o volume de resíduos em aproximadamente 50%, aumentou a recuperação da água recirculada e materiais cáusticos, reduzindo consequentemente os custos gastos com a disposição dos rejeitos. Nessa conjuntura, destaca-se a importância dos métodos de controle de campo combinado a análises de laboratório das características dos rejeitos lançados nos reservatórios, sendo esta análise uma contribuição sistemática no quesito qualidade técnica das barragens, assim como na manutenção da segurança da estrutura.

Outra consideração importante é acerca da incorporação, na modelagem hidráulica, dos afluentes do rio principal que foi afetado pela onda de ruptura. Dado que, no caso da ruptura da Barragem do Fundão, foram observados impactos de sobrelevação do nível de água e de

deposição de rejeito nas margens do rio, em aproximadamente 4 km, a montante do Gualaxo do Norte, na confluência com o córrego Santarém.

Posto que a tensão de escoamento aumenta exponencialmente com a concentração do rejeito, pequenas variações na concentração podem resultar em consideráveis mudanças na tensão de escoamento e na viscosidade do rejeito (SOFRÁ & BOGER, 2002). Destarte, é necessária a análise do teor de sólidos, no qual se encontra o rejeito depositado na barragem, para a correta correlação com os parâmetros da viscosidade do fluido. A partir da determinação da concentração volumétrica final do fluido a ser propagado, realiza-se o ajuste nos parâmetros da modelagem hidráulica, com o objetivo de representar as características do fluido a ser propagado pelo vale a jusante.

Os resultados das simulações indicaram ser perceptível que o decaimento da vazão é superior, quando há o aumento do valor de viscosidade do fluido. O tempo para máxima profundidade também é superior, em consequência de menores velocidades observadas no fluido com grande carregamento de partículas sólidas em suspensão.

É importante realçar que, em se tratando de estudos de ruptura de barragens de rejeitos (*Dam Break*), com finalidade de embasamento de PAEBM (Plano de Ações Emergenciais de Barragem de Mineração), e considerando a escassez de informações, deve-se utilizar o menor tempo de chegada de onda. Esta consideração implica na adoção de critérios mais conservadores para estar em consonância com o principal objetivo deste documento, evitar perdas de vidas humanas. No entanto, isso poderia resultar em um dimensionamento inadequado da estrutura de resposta à emergência, dificultando o direcionamento correto de recursos essenciais, neste momento de crise, nos pontos em que seriam mais necessários. Nesse âmbito, ressalta-se que a abordagem desta questão torna-se circular. Ou seja, abordagens “conservadoras” implicam, em geral, em resultados que indicarão maiores gastos, com seguros contra danos (aspectos financeiros) ou mesmo em relação a obtenção / renovação de licenças ambientais. Logo, o investimento em estudos mais precisos, como a obtenção de topografias de precisão, ensaios de laboratório para os rejeitos podem ser aplicados e vantajosos financeiramente.

Conforme ressaltado anteriormente, existem outros modelos que incorporam os parâmetros do rejeito na simulação hidráulica, podendo inclusive computar fluidos não-Newtonianos, como o modelo bidimensional FLO-2D. A utilização de modelos mais completos, conseqüentemente mais complexos, implica inevitavelmente em aumento dos esforços e tempos computacionais. Nessa seara, é necessário avaliar o quão efetivo seria esta incorporação, inclusive analisando a qualidade e a disponibilidade de dados de entrada, como a topografia e a reologia dos rejeitos. Sendo assim, a definição da abordagem metodológica, para um estudo desta natureza, deve ser realizada caso a caso. Atrelar a obtenção de resultados mais precisos a simples adoção de um modelo hidráulico não é assertiva. A complexidade das variáveis envolvidas corroboram com essa colocação e este estudo indica isso. A experiência e o conhecimento crítico do modelador é essencial para uma análise dessa natureza, frente a um cenário de tantas incertezas.

Cada simulação traz embutida as suas vantagens e desvantagens, na qual é possível ao simulador escolher o tipo de simulação que melhor se ajusta à realidade física a ser modelada. Certamente, diversas incertezas e espaços, para aprimoramento do processo físico, associados à ruptura de barragens ainda existem, mas não devem ser considerados como fator de impedimento para desenvolvimento e divulgação dos estudos, conforme ressaltado por Rocha (2015).

As análises de inundação são, em muitos casos, realizadas a partir de topografias gratuitas. A utilização deste dado não é proibitivo, sendo apenas necessárias as devidas ressalvas, quanto à imprecisão e à possibilidade de influência nos resultados de inundação gerados. A topografia gratuita de menor precisão pode ser utilizada, por exemplo, em estudos conceituais, nos quais são exigidos um nível menor de precisão, balizando-se como uma primeira estimativa. Quando se fazem necessários estudos com um maior grau de detalhamento, a topografia de precisão torna-se um dos dados de entrada necessário. Ressalta-se que a imprecisão dos dados topográficos não é a única limitação relativa aos resultados obtidos dos estudos de *Dam Break*.

Um caso observado de ruptura de barragem possibilita a delimitação de uma envoltória de inundação observada, propiciando diversas perspectivas para a modelagem hidráulica de inundações, decorrentes de ruptura de barragens de rejeitos, inclusive em diferentes graus de aprofundamento de retroanálise. Tem-se como recomendações para trabalhos futuros à

superação de algumas limitações encontradas neste trabalho, como também trabalhos aditivos, tais como:

- A precisão do MDE impacta diretamente nos resultados encontrados. Foi utilizado neste estudo, o SRTM com pixel de 30 metros. Nesse sentido, recomenda-se que sejam realizadas novas simulações com topografia de maior precisão, por exemplo, perfilamento a laser, LIDAR ou qualquer outra técnica que implique em uma maior precisão da composição do MDE;
- A partir de simulações provenientes de topografias de maior precisão, indica-se avaliar os resultados das simulações derivadas das topografias distintas;
- Não foram realizadas análises de sensibilidade, quanto ao valor do coeficiente de Manning. O valor inicial adotado foi de 0,100. Os ajustes de Pseudo-Manning partiram desse valor inicial. Nesse contexto, sugere-se a análise de sensibilidade deste importante parâmetro hidráulico, assim como a calibração do mesmo, a partir da mancha observada;
- Em face de todas as incertezas intrínsecas à representação do processo físico de um evento da magnitude da ruptura de uma barragem de rejeitos, como a Barragem do Fundão, recomenda-se a quantificação das incertezas pela utilização de técnicas mais específicas, como a metodologia especificada por GLUE (HORRIT, 2006). A análise de sensibilidade contribui para a avaliação de como variações, na saída de um modelo, podem ser repartidas, qualitativa ou quantitativamente, a diferentes fontes de variações, e como o modelo dado depende da informação introduzida nele (YANG, 2011).
- Pelos resultados encontrados, é perceptível o controle hidráulico exercido pela seção de estreitamento presente no vale logo a jusante de Bento Rodrigues, influenciando consideravelmente a dinâmica do escoamento do fluido. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se que o trecho simulado seja prolongado, com a finalidade de avaliar a influência desta seção, assim como o comportamento do fluido ao longo de extensões maiores, analisando o efeito da incorporação das características dos fluidos hiperconcentrados em trechos maiores de simulação.

REFERÊNCIAS

ABNT -ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Tubo de cobre leve, médio e pesado, sem costura, para condução de fluidos – Requisitos”. NBR-13206. 2006.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Amostra de Solos – Preparação para ensaios de compactação e caracterização. NBR-6457, 1986.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solo-Análise granulométrica – NBR-7181, 1984a.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solo-Determinação do limite de liquidez – NBR-6459, 1984b.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solo-Determinação do limite de plasticidade – NBR-7180, 1984c.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Solo-Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C– NBR-13600, 1996.

ABULNAGA, BAHA. *Slurry Systems Handbook*. McGraw-Hill, 2002.

AKROYD, T.J., NGUYEN, Q.D. Continuous on-line rheological measurements for rapid settling slurries. *International Journal of Mineral Processing*. p. 731 – 738, 2003.

ANTUNES, M. As lições de uma tragédia – Rompimento das barragens da Samarco levanta o debate sobre novas tecnologias e processos que reduzam a necessidade de barragens na mineração. *Revista Mineração & Sustentabilidade*, v. 25, n. 5, 2015. Disponível em: <<http://www.youblisher.com/p/1362635-Revista-Mineracao-Sustentabilidade-Edicao-25/>>.

Acesso em: 12 maio 2016.

ARONICA, G.; BATES, P. D.; HORRITT, M. S. Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE. *Hydrological Processes*, v. 16, n. 10, p. 2001-2016, 2002.

ARONICA, G.; HANKIN, B.; BEVEN, K. Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data. *Advances in Water Resources*, v. 22, n. 4, p. 349-36, 1998.

AZAM, S.; LI, Q. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotechnical News*, v. 28, n. 4, p. 50-54, 2010.

AZIMI, R.; VATANKHAH, A. R.; KOUCHAKZADEH, S. Predicting peak discharge from breached embankment dams. In: 36th IAHR WORLD CONGRESS, Hague, Netherlands, 2015. *Proceedings...* Hague, Netherlands: IAHR, 2015.

BALLARD, J.C. *et al.*. "Risks of Tailings Dam Failure". Alemanha, 2011.

BANDURRAGA, M. GUSMAN, A. J. Sediment/Debris Bulking Factors and Post-Fire Hydrology for Ventura County. Final Report. Ventura County, Watershed Protection District. WEST Consultants, Inc. San Diego, California. Junho, 2011.

BIRD, R. B., ARMSTRONG, R.C.; HASSAGER; O. Dynamic of polymeric liquids. New York: Johnson Wiley & Sons, 458p, 1977.

BISCO, R.A. "A influência de algumas variáveis sobre a reologia de polpas minerais" 394f. Dissertação (Mestrado em Engenharia metalúrgica e de Minas).UFMG, Belo Horizonte, 2009.

BLIGHT G.E., FOURIE, A.B. A review of catastrophic flow failures of deposits of mine waste and municipal refuse. University of Wwatersand, Johannesburg, South Africa. 17p. 2003.

BLIGHT, G. E. Geotechnical engineering for mine waste storage facilities. London: Taylor & Francis Group, 641 p. 2010.

BOGER, D.V. "Rheology of Slurries and Environmental Impacts in the Mining Industry". p. 57-239. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 2013.

BRANDT Meio Ambiente. EIA, Estudo de Impacto Ambiental. Barragem de Rejeitos do Fundão. Belo Horizonte, 289 pg. Novembro de 2005.

BRASIL. Lei no 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 n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei n. 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, 2010.

BRASIL. Portaria no 416 de 03 de setembro de 2012. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração conforme a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, Brasília, 2012.

BRASIL. Portaria no 526 de 03 de dezembro de 2013. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração conforme a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, Brasília, 2013.

BRASIL. Portaria no 70.389 de 17 de maio de 2017. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens – DNPM, Brasília, 2017.

BRAYANT, S.M., DUNCAN, J.M., SEED, H.B. Application of tailings dam flow analyses to field conditions. Report UCB/ GT/83-03. Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, California. 1983.

CBH Doce – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce: Rompimento da Barragem em Mariana. Disponível em:

149

<<http://www.cbhdoce.org.br/documentos-sobre-a-bacia/encarte-especial-sobre-a-bacia-do-rio-doce-rompimento-da-barragem-em-mariana/>>. Acesso em: 11 maio 2016.

CLAYTON, S.; GRICE, T.G.;BOGER,D.V. Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions. *International Journal of Mineral Processing*, Melbourne, p.3-21, 2003.

DAVIES, M. P. Tailings impoundment failures: are geotechnical engineers listening? *Geotechnical News, Waste Geotechnics*, p. 31-36. September, 2002.

DIAS, N. A. Determinação de propriedades reológicas de rejeito de mineração por meio de reômetro rotacional. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Vitória. 2017.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Solos - Determinação da densidade real – DNER-ME 093, 1994.

EINSTEIN, H. A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. US, Department of Agriculture, 1950.

ERAZO LOZANO, A. F. “Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica”. Dissertação de mestrado. USP (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo). Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. 2006.

FARR T.G.; CARO E.; CRIPPEN R.; DUREN R.; HENSLEY S.; KOBRICK M.; PALLER M.; RODRIGUEZ E.; ROSEN P.; ROTH L.; SEAL D.; SHAFFER S.; SHIMADA J.; UMLAND J.; WERNER M.; BURBANK D.; OSKIN M.; ALSDORF D. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45, RG2004, 2007.

FEMA – Federal Emergency Management Agency. Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures. FEMA P-946. 2013. Disponível em: <https://www.fema.gov/media-library->

data/96171edb98e3f51ff9684a8d1f034d97/Dam_Guidance_508.pdf>. Acesso em: 30 maio 2016.

FERREIRA, D. S. Análise do comportamento de aterro experimental executado sobre um depósito de rejeitos finos. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Núcleo de Geotecnia. 145pg, 2016.

FERREIRA, E.E. *et al.*. “Reologia de suspensões minerais: uma revisão” p. 83-87. Ouro Preto, Minas Gerais. 2005.

FLO-2D Software. FLO-2D Pro Documentation. Nutrioso, AZ: FLO-2D Software, 2009.

FROEHLICH, D. Enhanced Predictions for Peak Outflow from Breached Embankment Dam. [Journal of Hydrologic Engineering](#), v. 21, n. 11, p. 04016041-1 - 04016041-15, 2016.

GALINDO, M. S. V., Desenvolvimento de uma metodologia para a avaliação da viscosidade de solos. Dissertação de Mestrado. Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 113p, 2013.

GEOMECÂNICA & NORWEGIAN GEOTECHNICAL INSTITUTE. Ruptura da Barragem do Fundão em 5 de novembro de 2015 - Avaliação das causas da ruptura. Relatório elaborado pela Geomecânica & Norwegian Geotechnical Institute, com parceria do Ministério Público de Minas Gerais, no setor NUCAM (Núcleo de Resoluções de Conflitos Ambientais), 135 p. 26 de abril de 2016.

Globo G1. Disponível em: <http://g1.globo.com/espírito-santo/desastre-ambiental-no-rio-doce/noticia/2015/12/satelite-da-nasa-mostra-evolucao-da-lama-na-foz-do-rio-doce-no-es.html>. Acessado em 16/10/2016.

GOLDER ASSOCIATES. Golder Associates Brasil Consultorias e Projetos. Avaliação dos Impactos no Meio Físico Resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão. Relatório Técnico nº RT-023_159-515-2282_00-J. Belo Horizonte. 2732 p. 2016.

GONÇALVES, S.G. “Influência da granulometria e de aditivos no comportamento reológico do rejeito de lavagem da bauxita” 394f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). UFPA, Belém. 2014.

HORRITT, M. S. A methodology for the validation of uncertain flood inundation models. *Journal of Hydrology*, v. 326, n. 1, p. 153-165, 2006

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology*, v. 253, n. 1, p. 239-249, 2001.

HUNGR, O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 32, p. 610-623, 1995.

HUNTER, Neil Martin. Development and assessment of dynamic storage cell codes for flood inundation modelling. Tese de Doutorado. University of Bristol. 2005.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. Informações sobre a economia mineral brasileira. IBRAM, 2015. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005836.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2016.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. Informações sobre a economia mineral brasileira. IBRAM, 2017. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006389.pdf>>. Acesso em: 15 abril 2017.

ICOLD – International Commission on Large Dams. Tailing dams risk of dangerous occurrences: lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121. 144 p. Paris, 2001.

ICOLD – International Commission on Large Dams. Tailings Dams Safety. Guidelines, 1989.

ICOLD – International Commission on Large Dams. Tailings Dams. Risk of dangerous occurrences: lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121. 144 p., Jaouhara, 2008.

JAKOB, M., JORDAN, P. Design flood estimates in mountain streamns; the need for a geomorphic approach. *Can. J. Civil Eng.*, 28, 425-439. 2001

JEYAPALAN, B.; JEY, K. J.; DUNCAN, M.; SEED, H. B. Analyses of Flow Failures of Mine Tailings Dams. [Journal of Geotechnical Engineering](#), v. 109. n. 2, p. 150-171, 1983.

JIN, M.; FREAD, D. 1D modeling of mud/debris unsteady flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 8, p. 827-834, 1999.

LUCIA, P. Review of experiences with flow failures of tailings dams and waste impoundments. 1981. 228 f. PhD. Dissertation – University of California, Berkeley, 1981.

LUZ, A.B., SAMPAIO, A., FRANÇA, S. C. A., Tratamento de Minérios – 5ª Edição/Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MACHADO, J. C. V., Reologia e escoamento de fluidos: ênfase na indústria do petróleo. Rio de Janeiro. Editora Interciência: PETROBRAS, 2002.

MARTIN, T.E. McROBERTS, E.C. *Some considerations in the stability analysis of upstream tailings dams*. 17 pg. 2012.

MELO, L. P. R. Análise comparativa de metodologias de previsão de inundação decorrente da ruptura de barragens de rejeitos: Caso Hipotético da Barragem Tico-Tico. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2013.

MERWADE, V.; OLIVERA, F.; ARABI, M.; EDLEMAN, S. Uncertainty in flood inundation mapping current issues and future directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 13, n. 7, p. 608-620, 2008.

MEYER-PETER, E.; MÜLLER, R. Formulas for bed-load transport, 1948.

MITTAL, H.K. & MORGENSTERN, N.R. *Seepage control in tailings dams*. *Canadian Geotech. Journ.*, Vol. 13(3), pp. 277-293. August, 1976.

MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. Fundão Tailings Dam Review Panel. Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam. 2016. 88 p. Disponível em: <<http://fundaoinvestigation.com/>>. Acesso em: 07 setembro 2016.

NASCIMENTO, Christine Rabello. Reologia e reometria aplicadas ao estudo de polpas minerais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 53p. (Série Rochas e Minerais Industriais, 12). 2008.

NRC – Natural Research Council. Selecting a Methodology for Delineating Mudslide Hazard Areas for the National Flood Insurance Program. Committee on Methodologies for Predicting Mudflow Areas. Washington, D.C.: National Academy Press, 1982.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y. Physical properties and mechanics hyperconcentrated sediment flows. In: SPECIALTY CONFERENCE - DELINEATION OF LANDSLIDE, FLASH FLOOD AND DEBRIS FLOW HAZARDS IN UTAH, Logan, 1984. Proceedings... Utah: Utah State University, p. 260-279. 1985.

O'BRIEN, J. S.; JULIEN, P. Y.; FULLERTON, W. T. Two-Dimensional Water Flood And Mudflow Simulation. Journal of Hydraulic Engineering, v. 119, n. 2, p. 244-261, 1993.

PAIVA, R. C. D., Collischonn, W., Tucci, C. E. M.. Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. Journal of Hydrology 406 (p. 170-181). DOI 10.1016. 2011.

PAPPENBERGER, F.; BEVEN, K.; FRODSHAM, K.; ROMANOWICZ, R.; MATGEN, P. Grasping the unavoidable subjectivity in calibration of flood inundation models: A vulnerability weighted approach. Journal of Hydrology, v. 333, n. 2, p. 275-287, 2007.

PAPPENBERGER, F.; BEVEN, K.; HORRITT, M.; BLAZKOVA, S. Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. Journal of Hydrology, v. 302, n. 1, p. 46-69, 2005.

PASHIAS, N. *et al.*. A fifty cent rheometer for yield stress measurement. Journal of Rheology. Melbourne, 1996.

PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA. Germano / Planta II. Disposição de Rejeitos no Vale do Córrego Fundão. Plano de Ações Emergenciais (PAE). Estudo de Ruptura Hipotética da Barragem de Rejeitos do Córrego do Fundão. Relatório Técnico, v. 2. Nova Lima, MG: PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA, 47 p. 2008.

PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA. Planta de Detalhe da área do empreendimento. Barragem do Fundão. Desenho Técnico. Nova Lima, MG: PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA, 2005.

RIBEIRO, L. F. M. (2000) - “Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicados a Barragens de Rejeitos”. Tese de Doutorado. UNB (Universidades Federal de Brasília). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 2000.

RIBEIRO, V. Q. F. Proposta de metodologia para avaliação de rupturas de estruturas de disposição de rejeitos. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2015.

RICO, A. M.; BENITO, G.; DÍEZ-HERRERO, A. Floods from Tailings Dam Failures. Journal of Hazardous Materials, v. 154, n 2, p. 79-87, 2008.

ROCHA, F. F. Retroanálise da ruptura da barragem São Francisco – Miraí, Minas Gerais, Brasil. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2015.

SALTELLI, A.; CHAN, K.; SCOTT, E. M. Sensitivity Analysis. Probability and Statistics Series. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Publishers, 2000.

SAMARCO. Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental (RADA). Barragem de Fundão. Belo Horizonte. Samarco Mineração S.A. 34 pg. Abril de 2013.

SANDERS, B. F. Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. Advances in Water Resources, v. 30, n. 8, p. 1831-1843, 2007.

SCHRAMM, G. “Reologia e Reometria: Fundamentos Teóricos e Práticos” 232f. 2. Ed. Artliber Editora Ltda. São Paulo. 2006.

SCHUMANN, G.; BATES, P. D.; HORRITT, M. S.; MATGEN, P.; PAPPENBERGER, F. Progress in integration of remote sensing–derived flood extent and stage data and hydraulic models. *Reviews of Geophysics*, v. 47, n. 4, 2009.

SETE Soluções e Tecnologias Ambientais., Relatório de Impacto Ambiental do Projeto Unificação e Alçamento das Barragens de Rejeito Germano e Fundão. Mariana/ MG (RIMA). Relatório Técnico. 79 pg. Outubro de 2013.

SOARES, L. “Barragem de Rejeitos”. Livro Tratamento de Minérios, 5ª Edição – Capítulo 19 – pág. 831–896. CETEM (Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia). COPM (Coordenação de Processos Mineraiis). 2010.

SOFRÁ, F.;BOGER, D.V. “Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry”. p. 319-330. *Chemical Engineering Journal*. 2002.

STEPHENS, E.; SCHUMANN, G.; BATES, P. Problems with binary pattern measures for flood model evaluation. *Hydrological Processes*, v. 28, n. 18, p. 4928-4937, 2014.

TARCHA, B. A. Desafios na medição da tensão limite de escoamento de óleos parafínicos. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória: UFES, 2014.

USACE – United States Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center's – [Hydrologic Engineering Center](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/) (HEC-HMS). Version 4.2. Davis, CA. 2016a. Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/downloads.aspx>>. Acesso em: 30 maio 2016.

USACE – United States Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center's – River Analysis System (HEC-RAS). Version 5.0.3. Davis, CA. 2016b. Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/downloads.aspx>>. Acesso em: 30 maio 2016.

USACE – United States Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center's – Using HEC-RAS for Dam Break Studies. Davis, CA. 2014.

USGS -. United States Geological Survey Distinguishing between Debris Flows and Floods from Field Evidence in Small Watersheds. Geological Survey Fact Sheet U 2004-3142, 2005.

USGS – United States Geological Survey. Aster Global DEM. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 02 maio 2016.

USSD – United States Society on Dams. Changing Times —The Challenges and Risks of Managing Aging Infrastructure Under a New Financial Reality. In: 33rd Annual USSD Conference, Phoenix, Arizona, 2013. Proceedings... Phoenix, Arizona. 2013.

VENTURA COUNTY WATERSHED PROTECTION DISTRICT; WEST CONSULTAINS. Sediment/Debris Bulking Factors and Post-fire Hydrology for Ventura-County. Final Report. Ventura, CA; San Diego, CA: Ventura County Watershed Protection District; WEST Consultains, 184 p. 2011.

VIANINI NETO, L. Estudo de Ruptura da Barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: Retroanálise da Brecha do Acidente de 1954 e Ruptura Hipotética nas Condições Atuais. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2016.

VICK, S. G. Analyses of flow failures of mine tailings dams and investigation of flow failures of tailings dams. Journal of Geotechnical Engineering, v.110, p. 454-456, 1984.

VLIET, T. V.; LYKLEMA, H. Chapter 6: Rheology. In: Fundamentals of interface and colloid science. 1ª ed. v. 4. Amsterdam, The Netherlands: Academic Press; Elsevier, p. 6.1-6.88. 2005.

WERNER, M. G. F.; HUNTER, N. M.; BATES, P. D. Identifiability of distributed floodplain roughness values in flood extent estimation. Journal of Hydrology, v. 314, n. 1, p. 139-157, 2005.

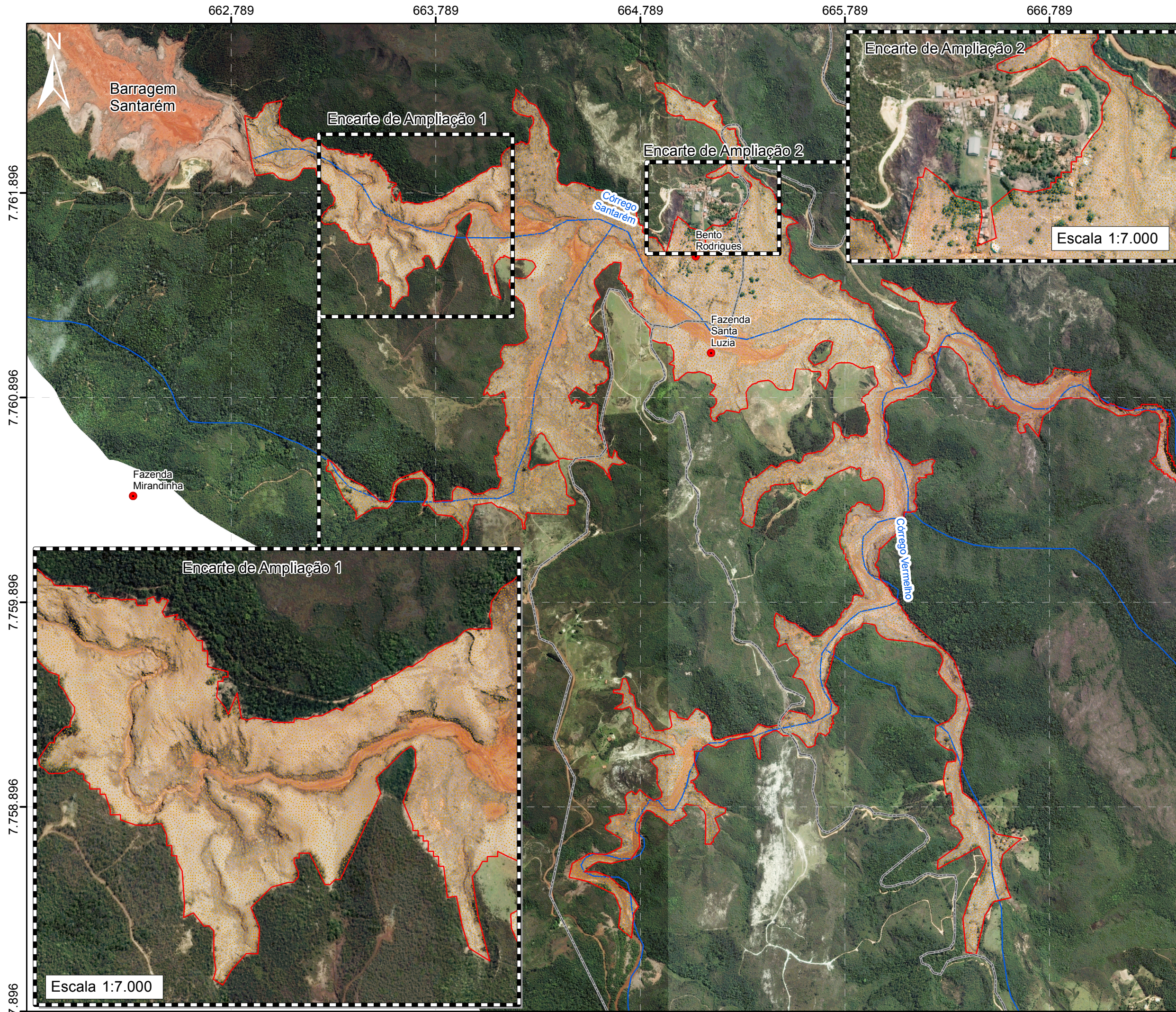
WISE URANIUM PROJECT. World Information Service on Energy. [s.n]. Disponível em: <<http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>>. Acesso em: 01 de junho 2017.

YAN, K.; DI BALDASSARRE, G.; SOLOMATINE, D. P.; SCHUMANN, G. J. P. A review of low-cost space-borne data for flood modelling; topography, flood extent and water level. Hydrological Processes, 2015.

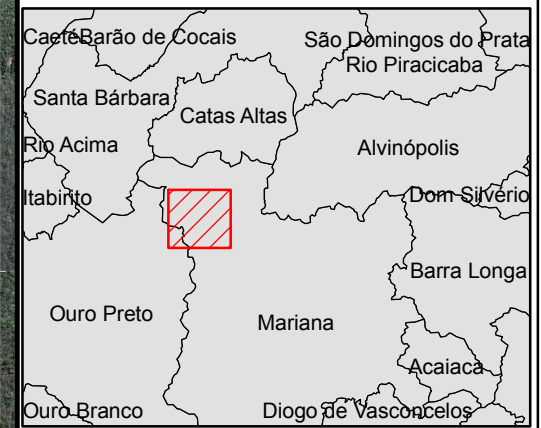
YANG, J. Convergence and uncertainty analyses in Monte-Carlo based sensitivity analysis. Environmental Modelling & Software, v. 26, p. 444-457, 2011.

APÊNDICES

MAPAS DE INUNDAÇÃO



LOCALIZAÇÃO

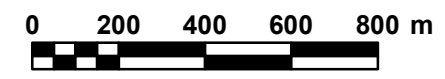


LEGENDA

- Distritos
- Acessos locais
- Hidrografia
- Mancha de inundação observada delimitada pela imagem de satélite

Projeção UTM FUSO 23S
Datum SIRGAS 2000
Imagem Digital Globe - 2015

ESCALA: 1/17.500



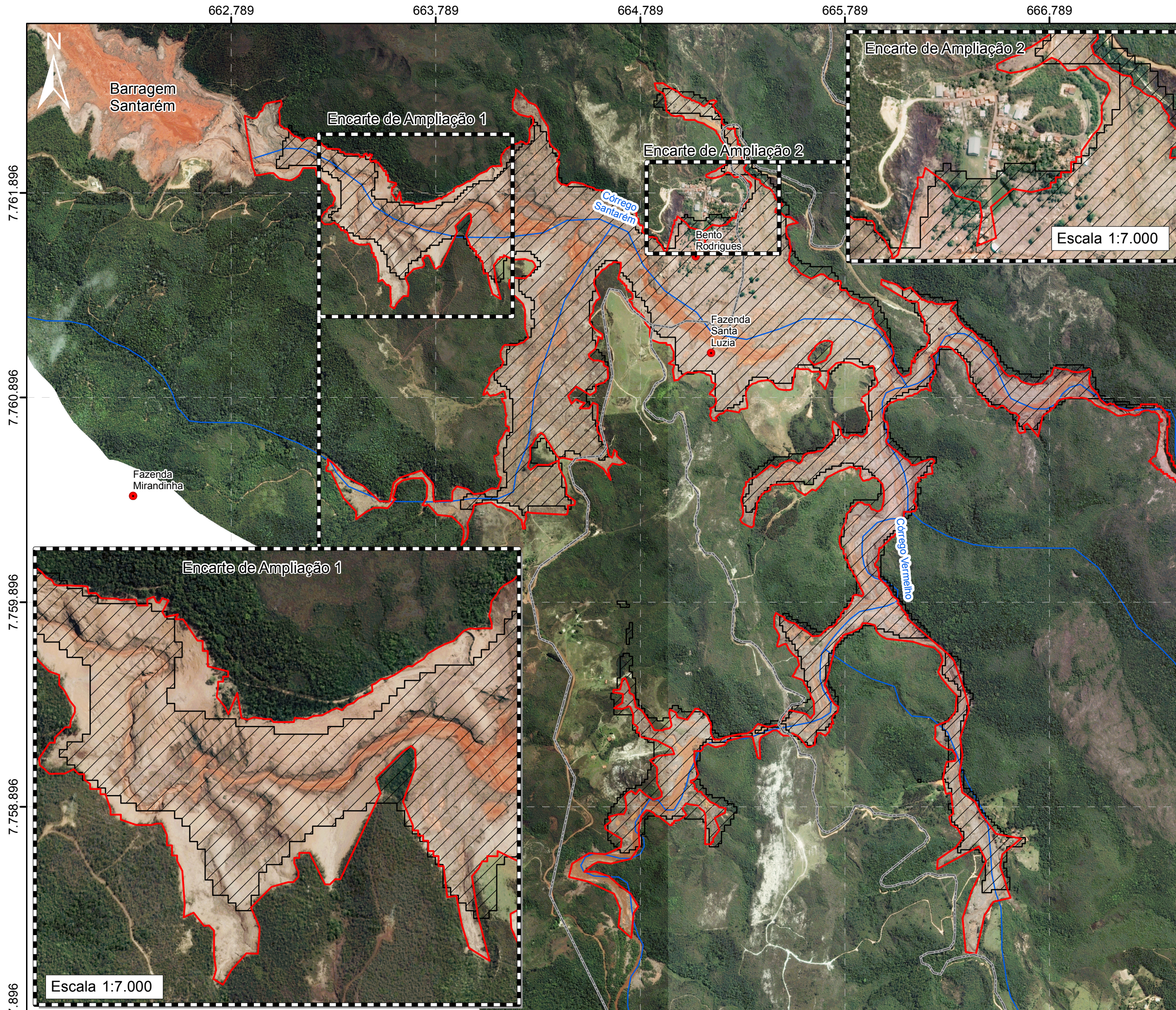
**RETROANÁLISE DA RUPTURA DA BARRAGEM DO FUNDÃO
MANCHA OBSERVADA - DELIMITAÇÃO PELA IMAGEM DE SATÉLITE**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS
UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

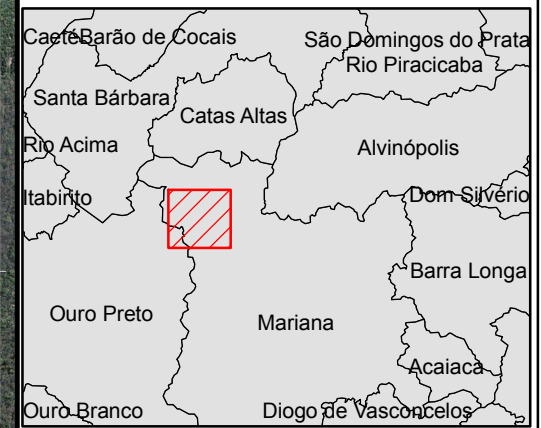
Julho / 2017
Fornato para impressão: A3

NATHÁLIA COUTO MACHADO





LOCALIZAÇÃO



LEGENDA

- Distritos
- Acessos locais
- Hidrografia
- Mancha de Inundação Observada
- Cenário 1 - Aquoso - HEC-RAS 1D

Projeção UTM FUSO 23S
Datum SIRGAS 2000
Imagem Digital Globe - 2015

ESCALA: 1:17.500



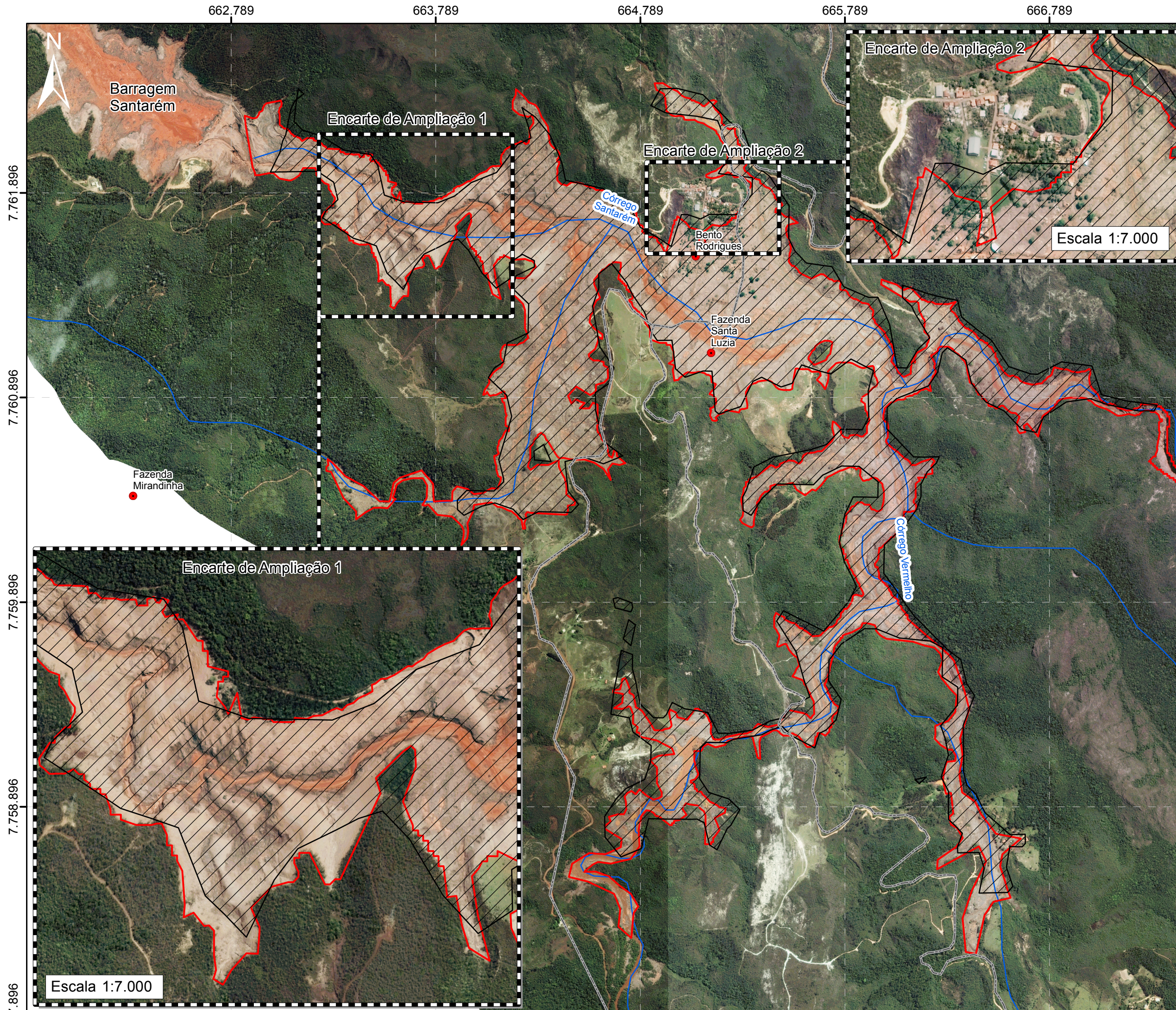
**RETROANÁLISE DA RUPTURA DA BARRAGEM DO FUNDÃO
CENÁRIO 1 - SIMULAÇÃO 1D DE FLUIDO AQUOSO
HEC-RAS 1D**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS
UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

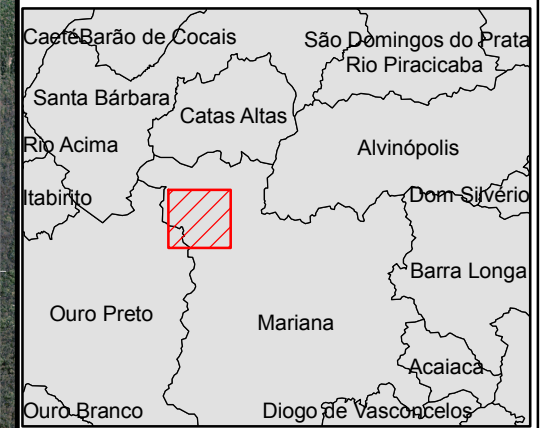
Julho / 2017
Fornato para impressão: A3

NATHÁLIA COUTO MACHADO





LOCALIZAÇÃO

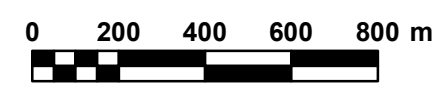


LEGENDA

- Distritos
- Acessos locais
- Hidrografia
- Mancha de Inundação Observada
- Cenário 2 - Hiperconcentrado - HEC-RAS 1D

Projeção UTM FUSO 23S
Datum SIRGAS 2000
Imagem Digital Globe - 2015

ESCALA: 1:17.500



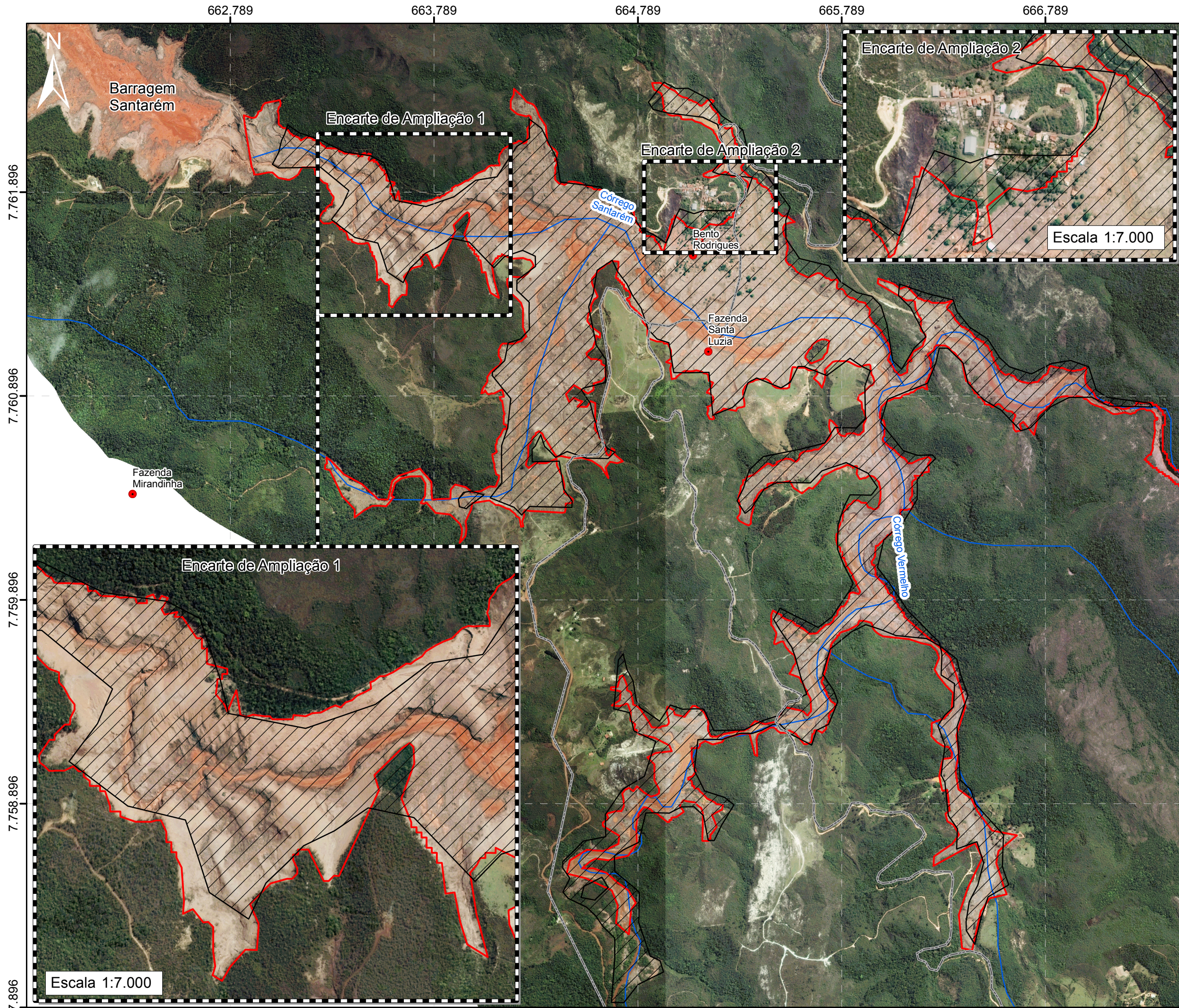
**RETROANÁLISE DA RUPTURA DA BARRAGEM DO FUNDÃO
CENÁRIO 2 - SIMULAÇÃO 1D
DE FLUIDO HIPERCONCENTRADO
HEC-RAS 1D**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS
UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE
MINAS GERAIS**

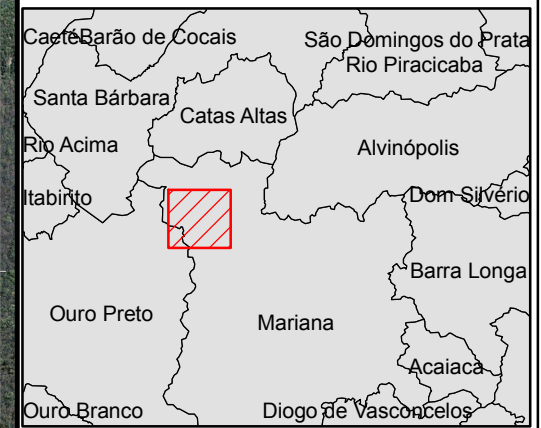
Julho / 2017
Fornato para impressão: A3

NATHÁLIA COUTO
MACHADO





LOCALIZAÇÃO



LEGENDA

- Distritos
- Acessos locais
- Hidrografia
- Mancha de Inundação Observada
- Cenário 3 - Aquoso - HEC-RAS 2D

Projeção UTM FUSO 23S
Datum SIRGAS 2000
Imagem Digital Globe - 2015

ESCALA: 1/17.500

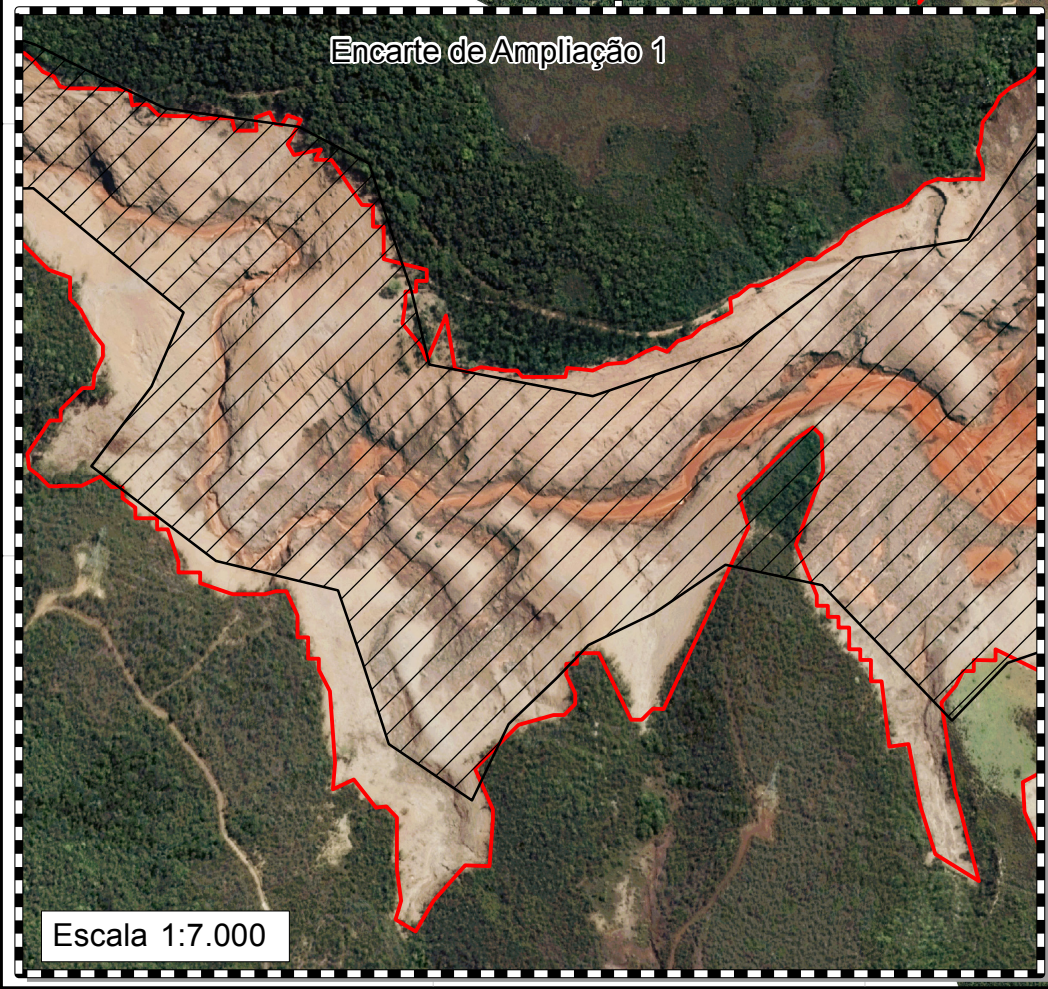
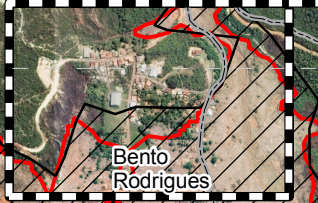


**RETROANÁLISE DA RUPTURA DA BARRAGEM DO FUNDÃO
CENÁRIO 3 - SIMULAÇÃO 2D DE FLUIDO AQUOSO
HEC-RAS 2D**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS
UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Julho / 2017
Fornato para impressão: A3

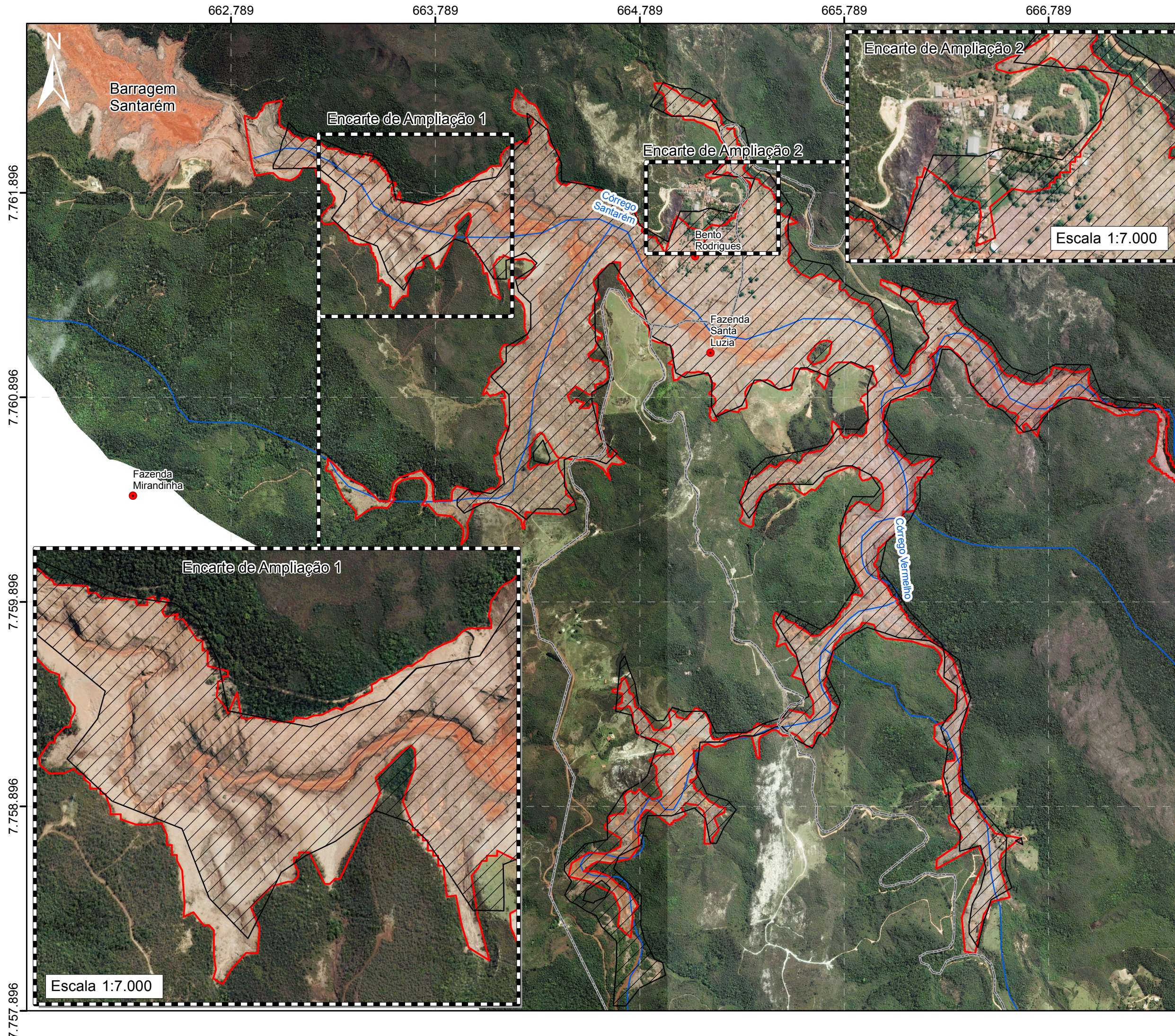
NATHÁLIA COUTO MACHADO



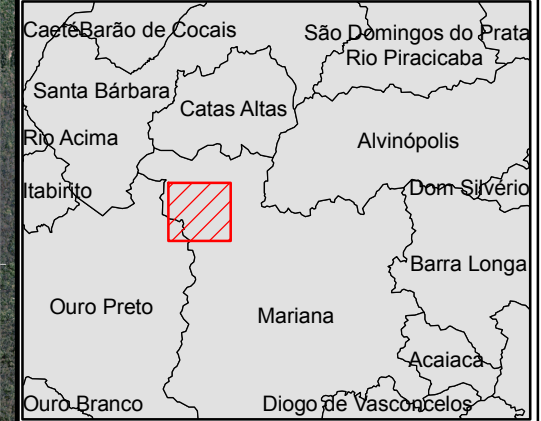
662.789 663.789 664.789 665.789 666.789

7.761.896
7.760.896
7.759.896
7.758.896
7.757.896

Escala 1:7.000



LOCALIZAÇÃO



LEGENDA

- Distritos
- Acessos locais
- Hidrografia
- ▭ Mancha de Inundação Observada
- ▨ Cenário 4 - Hiperconcentrado - HEC-RAS 2D

Projeção UTM FUSO 23S
Datum SIRGAS 2000
Imagem Digital Globe - 2015

ESCALA: 1/17.500



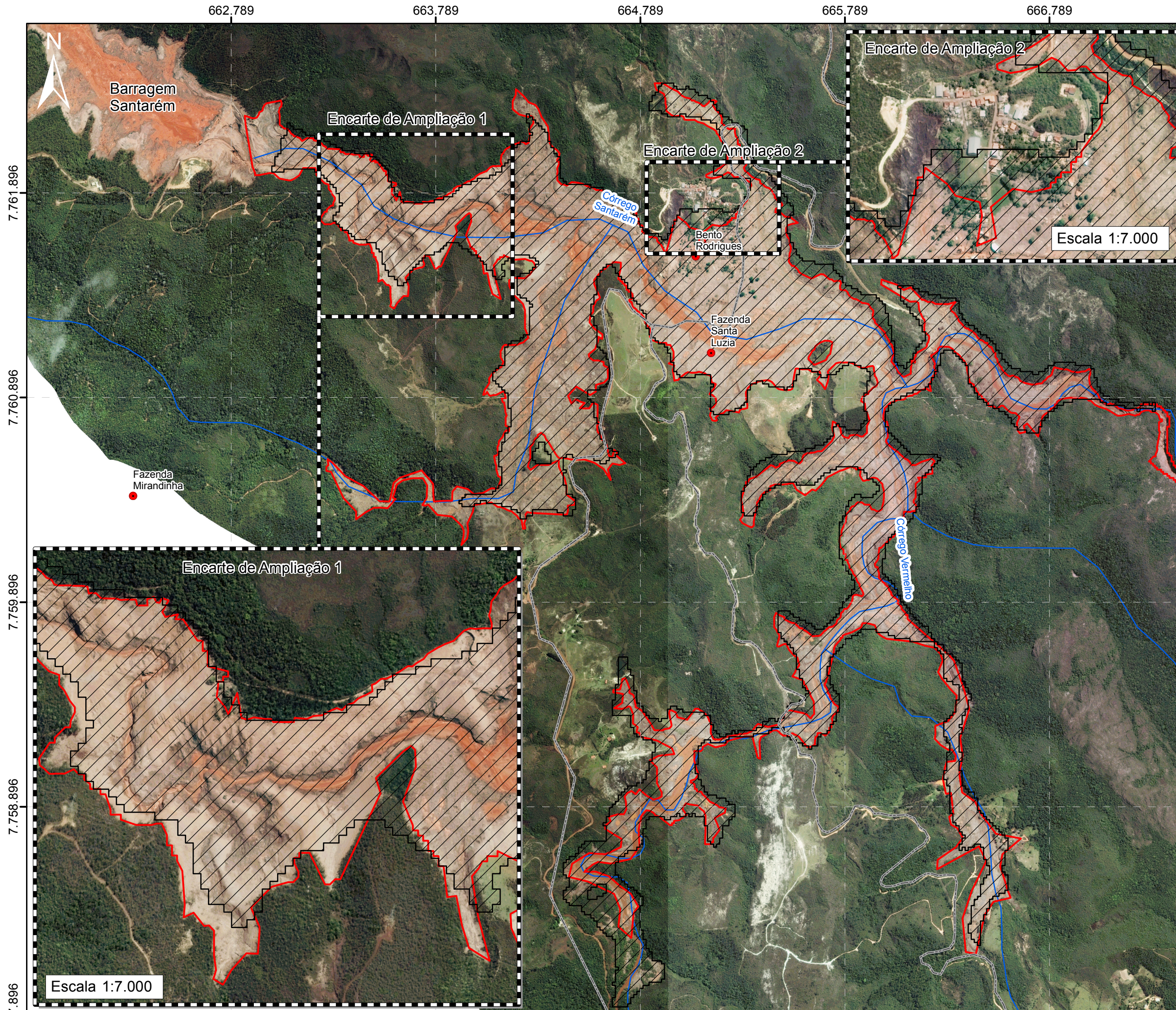
**RETROANÁLISE DA RUPTURA DA BARRAGEM DO FUNDÃO
CENÁRIO 4 - SIMULAÇÃO 2D DE FLUIDO HIPERCONCENTRADO
HEC-RAS 2D**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS
UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Julho / 2017
Fornato para impressão: A3

NATHÁLIA COUTO MACHADO





LOCALIZAÇÃO



LEGENDA

- Distritos
- Acessos locais
- Hidrografia
- Mancha de Inundação Observada
- Cenário 5 - Aquoso - FLO-2D

Projeção UTM FUSO 23S
Datum SIRGAS 2000
Imagem Digital Globe - 2015

ESCALA: 1/17.500



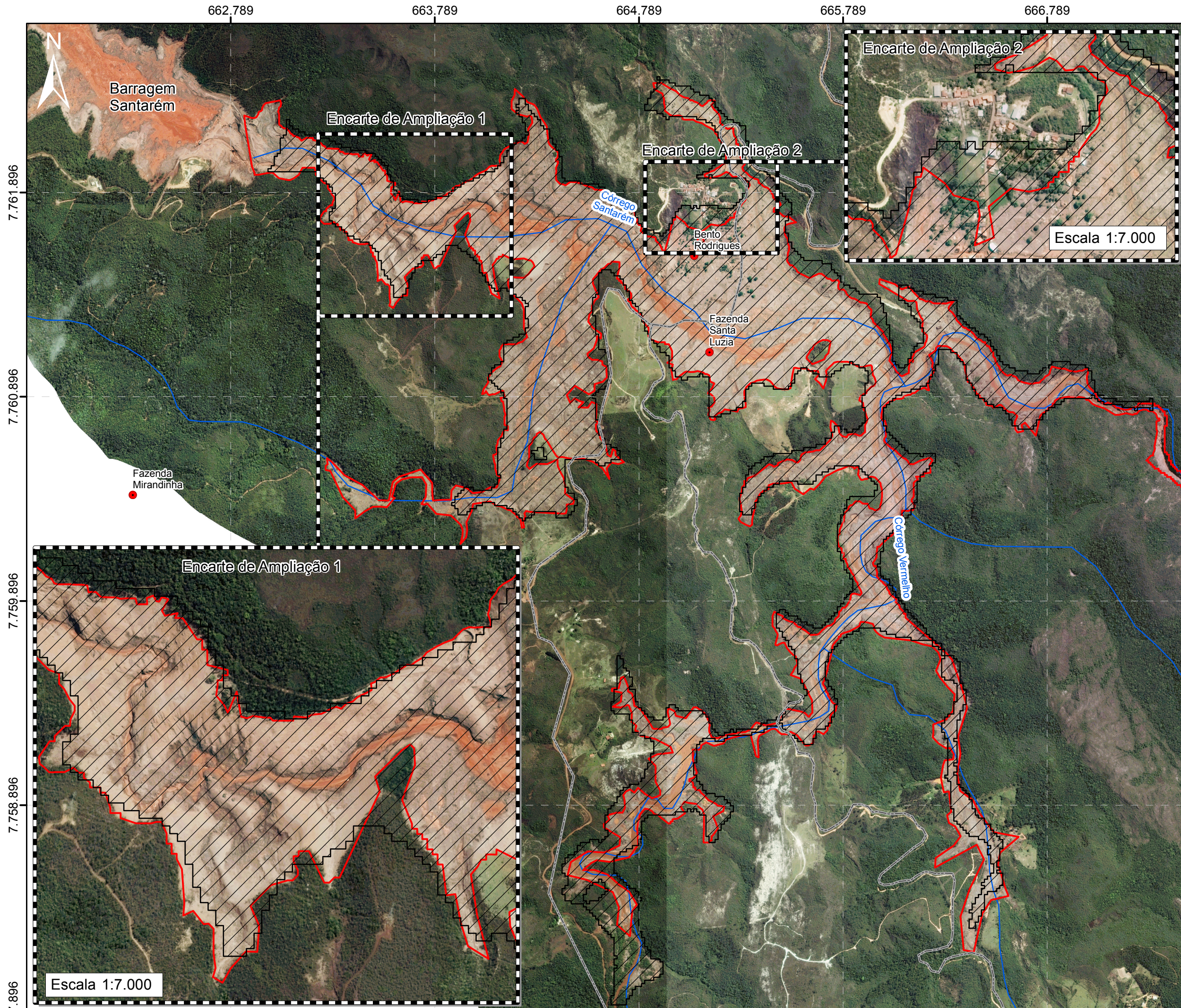
**RETROANÁLISE DA RUPTURA
DA BARRAGEM DO FUNDÃO
CENÁRIO 5 - SIMULAÇÃO 2D
DE FLUIDO AQUOSO
FLO-2D**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS
UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE
MINAS GERAIS**

Julho / 2017
Fornato para impressão: A3

NATHÁLIA COUTO
MACHADO





LOCALIZAÇÃO

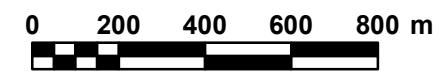


LEGENDA

- Distritos
- Acessos locais
- Hidrografia
- Mancha de Inundação Observada
- Cenário 6 - Hiperconcentrado - Cv constante - FLO-2D

Projeção UTM FUSO 23S
Datum SIRGAS 2000
Imagem Digital Globe - 2015

ESCALA: 1/17.500



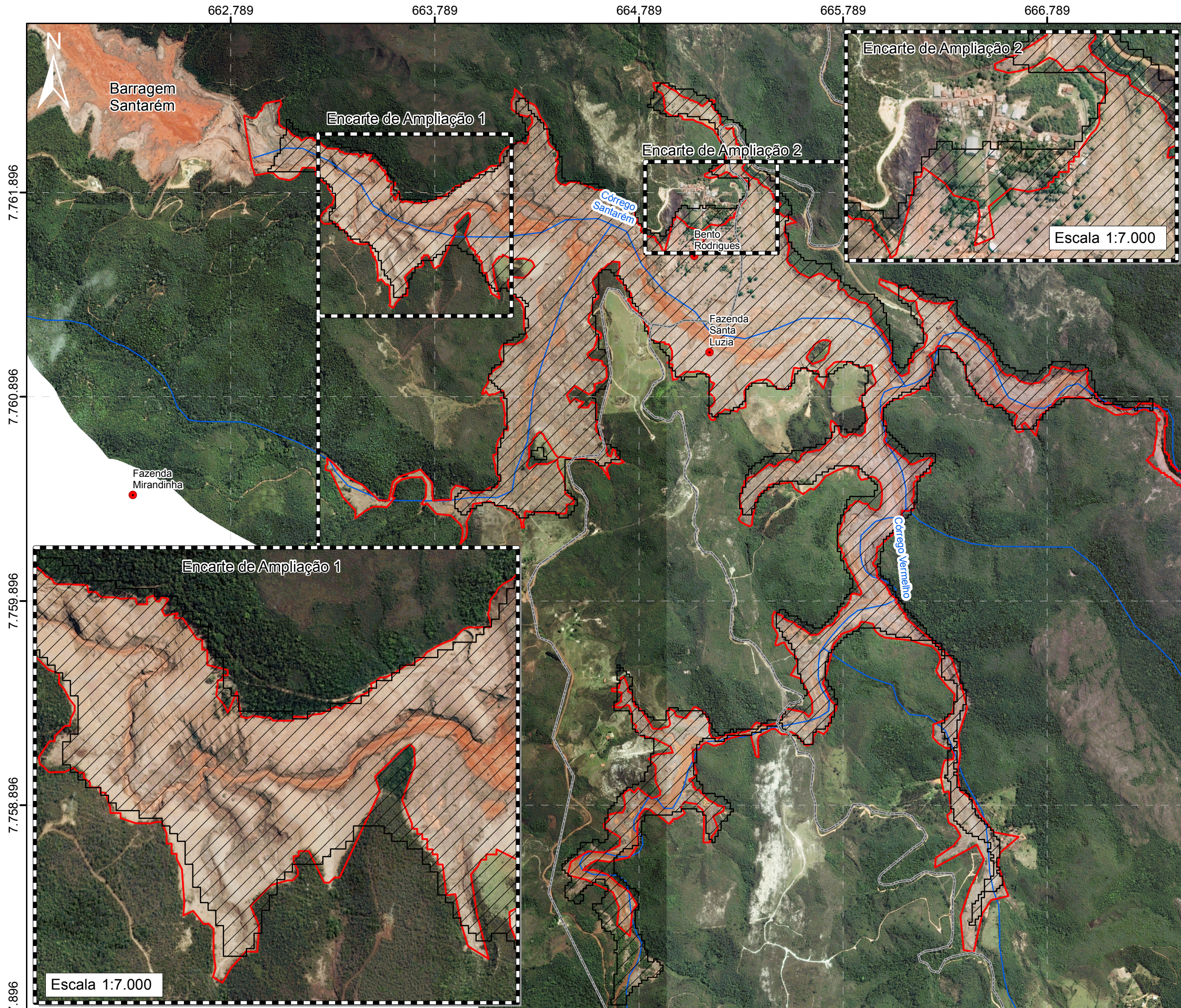
**RETROANÁLISE DA RUPTURA DA BARRAGEM DO FUNDÃO
CENÁRIO 6 - SIMULAÇÃO 2D DE FLUIDO HIPERCONCENTRADO
CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA CONSTANTE - FLO-2D**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS
UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

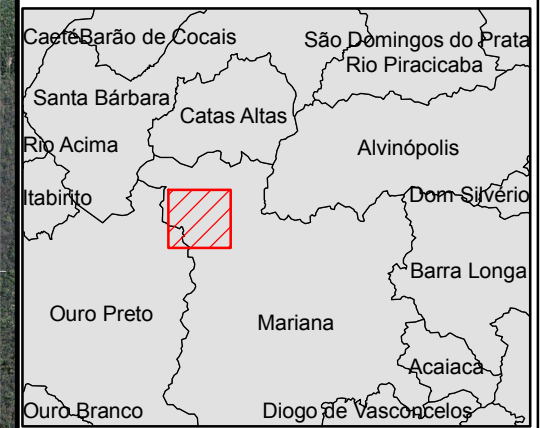
Julho / 2017
Fornato para impressão: A3

NATHÁLIA COUTO MACHADO





LOCALIZAÇÃO



LEGENDA

- Distritos
- Acessos locais
- Hidrografia
- ▭ Mancha de Inundação Observada
- ▨ Cenário 7 - Hiperconcentrado - Composição 3 - FLO-2D

Projeção UTM FUSO 23S
Datum SIRGAS 2000
Imagem Digital Globe - 2015

ESCALA: 1/17.500



**RETROANÁLISE DA RUPTURA DA BARRAGEM DO FUNDÃO
CENÁRIO 7 - SIMULAÇÃO 2D DE FLUIDO HIPERCONCENTRADO
COMPOSIÇÃO 3 - FLO-2D**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS
UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Julho / 2017
Fornato para impressão: A3

NATHÁLIA COUTO MACHADO

