



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAMILA EBBERS FABIANI GIANTOMASO

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE RIVERFLOW2D  
NA MODELAGEM NUMÉRICA DE RUPTURA DE BARRAGEM DE REJEITOS

CURITIBA

2023

CAMILA EBBERS FABIANI GIANTOMASO

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE RIVERFLOW2D  
NA MODELAGEM NUMÉRICA DE RUPTURA DE BARRAGEM DE REJEITOS

Dissertação apresentada para obtenção de título de Mestre no curso de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.  
Orientador: Tobias Bleninger

CURITIBA  
2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Giantomaso, Camila Ebbers Fabiani

Análise de sensibilidade da utilização do software Riverflow2D na modelagem numérica de ruptura de barragem de rejeitos / Camila Ebbers Fabiani Giantomaso. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Tobias Bernward Bleninger

1. Vazões naturais. 2. Barragem de rejeitos. 3. Estudo de ruptura de barragem. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. III. Bleninger, Tobias Bernward. IV . Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE  
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL - 40001016021P0

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **CAMILA EBBERS FABIANI GIANTOMASO** intitulada: **ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE RIVERFLOW2D NA MODELAGEM NUMÉRICA DE RUPTURA DE BARRAGEM DE REJEITOS**, sob orientação do Prof. Dr. TOBIAS BERNWARD BLENINGER, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Julho de 2023.

Assinatura Eletrônica

14/07/2023 11:51:54.0

TOBIAS BERNWARD BLENINGER

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

21/08/2023 16:34:36.0

JOSÉ JUNJI OTA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

18/07/2023 13:19:46.0

MARCOS CRISTIANO PALU

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, pelo grande incentivo pessoal e especialmente ao meu Pai, André Fabiani e Meu padrinho Cristóvão Fernandes pela inspiração profissional e técnica; aos colegas de mestrado, pelas discussões que determinaram o rumo da dissertação; ao orientador Tobias Bleninger pelas contribuições ao longo de todo o curso de mestrado e, principalmente, neste trabalho; aos colegas da HIDROBR, principalmente Stella Andrade e Letícia Lima, que por meio de projetos levantaram questionamentos e se disponibilizaram a contribuir na elaboração dessa dissertação, inclusive facilitando o uso de dados reais e softwares internos essenciais para elaboração dos estudos.

## RESUMO

Este trabalho busca analisar a sensibilidade do modelo numérico comercial Riverflow2D, da Hydronia, quanto ao uso em simulações computacionais em estudos de ruptura hipotética de barragens de mineração. Através de um estudo de caso, com disponibilidade de dados de topografia de precisão e ensaios reológicos em rejeito do processo produtivo do minério de ferro, foram feitas variações no tamanho da discretização da malha computacional, variações nos valores do coeficiente de rugosidade e variações no tipo de fluido em newtoniano e não newtoniano, variando também os equacionamentos dos modelos reológicos. As simulações foram executadas e seus resultados foram comparados quanto aos hidrogramas, vazão de pico, profundidade e velocidade máximas e tempo de chegada em cinco seções de resultado. Ainda foram comparadas as envoltórias máximas das manchas obtidas, assim como suas áreas totais e o tempo computacional gasto em cada simulação. Como resultado se obteve que o refinamento das malhas causa aumento considerável do esforço computacional, porém, para o caso de estudo, em termos de variação de parâmetros hidráulicos não se teve grande variabilidade das malhas com 20m e menores tamanhos. A variação dos coeficientes de rugosidade revelou que maiores coeficientes de fato aumentam a profundidade dos escoamentos, diminuindo as vazões e velocidades de propagação da onda e aumentando os tempos de chegada. E, por fim, o teste de sensibilidade sobre consideração de fluido newtoniano e não newtoniano assim como variação dos equacionamentos reológicos confirmou grande variabilidade de resultados e comportamentos de escoamentos com a variação dos equacionamentos.

Palavras-chave: Riverflow2D; barragem de rejeitos; modelagem.

## **ABSTRACT**

This paper analyzes the sensitivity of Hydronia's Riverflow2D commercial numerical model for use in computer simulations in hypothetical rupture studies of mining dams. Through a case study, with availability of high-quality topography data and rheological tests in tailings of the iron ore production process, variations were made in the size of the discretization of the computational mesh, variations in the values of the coefficient of roughness and variations in the type of fluid in Newtonian and non-Newtonian, using three different rheological models. The simulations were performed, and their results were compared regarding hydrograms, peak flow, maximum depth and velocity and arrival time in five result cross-sections. The maximum envelopes of the spots obtained, as well as their total areas and the computational time spent in each simulation were also compared. As a result, it was obtained that the refinement of the meshes causes a considerable increase in the computational effort, however, for the case study, in terms of variation of hydraulic parameters there was no great variability of the meshes with 20 m and smaller sizes. The variation of the roughness coefficients revealed that higher coefficients in fact increase the depth and peak flow, decreasing the velocities of wave propagation and increasing the arrival times. And finally, the sensitivity test on consideration of Newtonian and non-Newtonian fluid as well as variation of rheological equations confirmed great variability of results and flow behaviors with the variation of equations.

Keywords: Riverflow2D; tailings dam; modelling.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	13
1.2 OBJETIVOS .....	14
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>15</b>
2.1 ABORDAGEM GERAL: RIVERFLOW2D .....	17
2.2 MALHAS COMPUTACIONAIS .....	18
2.3 EQUACIONAMENTOS REOLÓGICOS: A CONSIDERAÇÃO DE FLUIDO NÃO NEWTONIANO EM PROPAGAÇÃO DE ONDAS NO SOFTWARE RIVERFLOW2D 19	
2.4 COEFICIENTE DE RUGOSIDADE .....	23
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>24</b>
3.1 PREMISSAS DO CASO DE ESTUDO .....	24
3.2 MODELAGEM DA MALHA COMPUTACIONAL .....	30
3.3 COEFICIENTE DE RUGOSIDADE .....	30
3.4 TIPO DE FLUIDO E EQUACIONAMENTO REOLÓGICO .....	31
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>33</b>
4.1 SENSIBILIDADE AO TAMANHO DE DETALHAMENTO DA MALHA COMPUTACIONAL .....	34
4.1.1 Hidrogramas e vazões máximas .....	35
4.1.2 Profundidades máximas .....	39
4.1.3 Velocidades máximas .....	40
4.1.4 Tempos de chegada .....	41
4.1.5 Envoltórias máximas .....	42
4.1.6 Discussão de resultados e tempo computacional .....	44
4.2 SENSIBILIDADE EM RELAÇÃO AO COEFICIENTE DE RUGOSIDADE .....	46
4.2.1 Hidrogramas e vazões máximas .....	46
4.2.2 Profundidades máximas .....	49
4.2.3 Velocidades máximas .....	50
4.2.4 Tempos de chegada .....	51
4.2.5 Envoltórias máximas .....	52
4.2.6 Discussão de resultados e tempo computacional .....	54
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE ESCOAMENTO NEWTONIANO E NÃO NEWTONIANO COM MODELO REOLÓGICO QUADRÁTICO, <i>FULL BINGHAM</i> E <i>HERSCHEL- BULKLEY</i> .....	56
4.3.1 Hidrogramas e vazões máximas .....	56

4.3.2 Profundidades máximas .....	60
4.3.3 Velocidades máximas.....	61
4.3.4 Tempos de chegada.....	62
4.3.5 Envoltórias máximas .....	63
4.3.6 Discussão de resultados e tempo computacional .....	65
4.4 PRINCIPAIS RESULTADOS, APRESENTAÇÃO DAS LIMITAÇÕES DO ESTUDO E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS .....	68
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – TIPOS DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DO FLUIDO (CDA, 2021).....	20
FIGURA 2.2 – COMPORTAMENTO DOS DIFERENTES TIPOS DE FLUIDO QUANDO SUBMETIDOS À VARIAÇÕES DA TENSÃO DE CISALHAMENTO (adaptado de MACHADO, 2017) .....	22
FIGURA 3.1 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA DE REJEITO.	25
FIGURA 3.2 - CONSISTÊNCIA DO REJEITO ANALISADO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DA MISTURA – RESULTADOS SLUMP TEST MINIATURA.....	26
FIGURA 3.3 - TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DA MISTURA.....	26
FIGURA 3.4 - VISCOSIDADE EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DA MISTURA.....	27
FIGURA 3.5 – HIDROGRAMA DE RUPTURA – CENÁRIO DE RUPTURA EXTREMO. ....	28
FIGURA 3.6 – ILUSTRAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE TERRENO .....	29
FIGURA 3.7 – USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DO VALE DE JUSANTE PARA DEFINIÇÃO DOS COEFICIENTES DE RUGOSIDADE DE MANNING .....	31
FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS.....	33
FIGURA 4.2 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO MODELO BASE .....	35
FIGURA 4.3 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 1-A .....	35
FIGURA 4.4 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 1-B .....	36
FIGURA 4.5 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 1-C .....	36
FIGURA 4.6 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 1-D .....	37
FIGURA 4.7 – VAZÕES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO .....	38
FIGURA 4.8 – PROFUNDIDADES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO .....	39
FIGURA 4.9 – VELOCIDADES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO .....	40
FIGURA 4.10 – TEMPOS DE CHEGADA POR SEÇÃO DE RESULTADO .....	41
FIGURA 4.11 – ENVOLTÓRIAS MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO .....	43
FIGURA 4.12 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 2-A .....	46
FIGURA 4.13 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO MODELO BASE .....	47
FIGURA 4.14 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 2-B .....	47
FIGURA 4.15 – VAZÕES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO .....	48
FIGURA 4.16 – PROFUNDIDADES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO .....	49

FIGURA 4.17 – VELOCIDADES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO .....	50
FIGURA 4.18 – TEMPOS DE CHEGADA POR SEÇÃO DE RESULTADO .....	51
FIGURA 4.19 – ENVOLTÓRIAS MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO .....	53
FIGURA 4.20 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 3-A .....	56
FIGURA 4.21 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO MODELO BASE.....	57
FIGURA 4.22 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 3-B .....	57
FIGURA 4.23 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 3-C .....	58
FIGURA 4.24 – VAZÕES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO .....	59
FIGURA 4.25 – PROFUNDIDADES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO .....	60
FIGURA 4.26 – VELOCIDADES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO .....	61
FIGURA 4.27 – TEMPOS DE CHEGADA POR SEÇÃO DE RESULTADO .....	62
FIGURA 4.28 – ENVOLTÓRIAS MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO .....	64

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – EXEMPLOS DE SOFTWARES DE MODELAGEM HIDRÁULICA QUE SE APLICAM À MODELAGEM DE RUPTURA DE BARRAGENS ....	16
TABELA 2.2 – MODELOS REOLÓGICOS DISPONÍVEIS NO RIVERFLOW-2D.....	21
TABELA 3.1 –VAZÕES DE PICO E TEMPO DE RETORNO POR ANO HIDROLÓGICO DE EVENTOS EXTREMOS NA REGIÃO DO ESTUDO.....	28
TABELA 3.2 – COEFICIENTES DE RUGOSIDADE DE MANNING UTILIZADOS. ..	30
TABELA 4.1 – RELAÇÃO DE SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA TESTES DE SENSIBILIDADE.....	34
TABELA 4.2 – VAZÕES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO .....	38
TABELA 4.3 – PROFUNDIDADES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO .....	39
TABELA 4.4 – VELOCIDADES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO .....	40
TABELA 4.5 – TEMPOS DE CHEGADA POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO .....	41
TABELA 4.6 – ÁREAS DAS ENVOLTÓRIAS MÁXIMAS EM CADA SIMULAÇÃO ...	42
TABELA 4.7 – RESUMO DE RESULTADOS DA VARIAÇÃO DO TAMANHO DAS CÉLULAS DA MALHA COMPUTACIONAL E TEMPO COMPUTACIONAL.....	44
TABELA 4.8 – VAZÕES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO .....	48
TABELA 4.9 – PROFUNDIDADES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO .....	49
TABELA 4.10 – VELOCIDADES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO .....	50
TABELA 4.11 – TEMPOS DE CHEGADA POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO .....	51
TABELA 4.12 – ÁREAS DAS ENVOLTÓRIAS MÁXIMAS EM CADA SIMULAÇÃO .	52
TABELA 4.13 – RESUMO DE RESULTADOS DA VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE RUGOSIDADE E TEMPO COMPUTACIONAL.....	54
TABELA 4.14 – VAZÕES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO .....	59

TABELA 4.15 – PROFUNDIDADES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO.....	60
TABELA 4.16 – VELOCIDADES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO .....	61
TABELA 4.17 – TEMPOS DE CHEGADA POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO .....	62
TABELA 4.18 – ÁREAS DAS ENVOLTÓRIAS MÁXIMAS EM CADA SIMULAÇÃO .	63
TABELA 4.19 – RESUMO DE RESULTADOS DA VARIAÇÃO DO TIPO DE FLUIDO E EQUACIONAMENTO REOLÓGICO.....	65

# 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tratará sobre a utilização do software Riverflow2D para modelagem de fluidos não-newtonianos na estimativa de manchas de inundação causadas por ruptura hipotética de barragens de rejeitos. Serão apresentados testes de sensibilidade quanto ao tamanho de malha, adoção de diferentes coeficientes de rugosidade e uso de equacionamentos matemáticos que consideram a resistência ao escoamento causada pelas propriedades reológicas do fluido não newtoniano simulado em comparação à modelagem newtoniana.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Estudos de ruptura de barragens vêm ganhando cada vez mais relevância atualmente no Brasil, principalmente em relação a barragens de mineração, dadas as legislações e regulações federais e estaduais, tais como a lei federal 14.066/2020, a resolução nº95/2022 da ANM, a lei nº23.291/2019 e decreto nº48.078/2020 do estado de Minas Gerais, que foram criadas após as memoráveis tragédias de ruptura em Mariana e Brumadinho, em 2015 e 2019, que vitimaram centenas de pessoas no estado e que até hoje continuam impactando a vida e o meio ambiente locais.

No entanto, ainda são muitas as limitações dos estudos de ruptura hipotética de barragens principalmente pela variedade e complexidade das premissas assumidas para execução das simulações computacionais de estimativa de manchas de inundação. Segundo Matos e Eleutério (2019) essas limitações estão tanto atreladas ao desconhecimento de processos quanto de falta de dados disponíveis para implementação de modelos. Os autores reproduziram o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana/MG, e constataram discrepâncias nos resultados simulados perante os dados reais, atribuindo-as às incertezas dos parâmetros de simulação adotados.

As limitações dos estudos estão relacionadas muitas vezes à falta de disponibilidade de dados, mas, mais comumente, à falta de metodologias moldáveis às características específicas das barragens. Ainda, as informações e metodologias assumidas são inseridas em um modelo hidrodinâmico, que por si só ainda possui limitações e incertezas no próprio processo de modelagem e equacionamentos numéricos envolvidos.

Entender a sensibilidade dos modelos quanto à variação dos principais parâmetros que devem ser adotados a cada simulação ajuda a configurar de maneira mais eficiente o modelo e permite obtenção de resultados mais apropriados.

Portanto, testes de sensibilidade com variação de premissas em um modelo hidrodinâmico são essenciais para sua correta aplicação, dada a variabilidade de resultados que podem ser obtidos pelo mesmo simulador sob diferentes premissas adotadas em um mesmo caso de estudo.

## 1.2 OBJETIVOS

Realizar testes de sensibilidade no software Riverflow2D a partir da comparação de resultados de manchas de inundação geradas com o uso de diferentes premissas quanto ao tamanho da malha bidimensional, valores de coeficiente de rugosidade e consideração ou não do comportamento de fluido newtoniano comparando diferentes equacionamentos reológicos.

Como objetivos específicos deste trabalho pode-se listar:

- Apresentação de dados necessários à elaboração de um estudo de ruptura hipotética de barragens;
- Comparação de resultados entre simulações com malhas de diferentes tamanhos, diferentes coeficientes de rugosidade e diferença da consideração de fluido newtoniano ou não newtoniano com diferentes equacionamentos reológicos na propagação de ondas de inundação;
- Apresentação de resultados de hidrogramas e vazões máximas, área da mancha de inundação com comparação de envoltórias máximas, comparação de tempos de chegada, profundidades e velocidades máximas;
- Apresentação das conclusões, recomendações e limitações do estudo e do software Riverflow2D através de análise crítica dos resultados.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Os estudos de ruptura hipotética de barragens de mineração tentam estimar uma área de inundação que ocorreria após uma emergência com abertura de brecha na barragem. Além dos parâmetros hidrológicos e da hipótese de modo de falha, essa estimativa da mancha de inundação é realizada pela adoção de metodologias empíricas para determinação de características geométricas e de tempo de abertura de brecha e estimativa de volume mobilizado, para posterior obtenção de hidrograma de ruptura e modelagem do escoamento no vale de jusante com uso de modelos hidrodinâmicos. Estas são as principais temáticas que exigem definições de premissas para realização do citado estudo. Atualmente, as maiores incertezas nos estudos de ruptura de barragens de mineração recaem sobre os parâmetros da brecha e a determinação do volume mobilizado na ruptura. Martin e Akkerman (2017) discutem abertamente os desafios envolvidos na condução de estudos de ruptura hipotética para barragens da mineração, seja na definição dos parâmetros de brecha e do volume mobilizado ou em relação à propagação e extensão dos danos potenciais.

Apresenta-se os diversos softwares disponíveis para simulações hidráulicas, a partir de da adaptação de uma tabela do *Canadian Dam Association (CDA)* (2021), para conhecimento, do qual este trabalho destaca o Riverflow2D com o objetivo de se testar a sensibilidade frente à parâmetros de entrada iniciais.

TABELA 2.1 – EXEMPLOS DE SOFTWARES DE MODELAGEM HIDRÁULICA QUE SE APLICAM À MODELAGEM DE RUPTURA DE BARRAGENS

Modelos	Tipo	Desenvolvedor	Última versão lançada	Licenciado ou gratuito	Fluidos newtonianos	Fluidos não-newtonianos
RiverFlow2D (Hydronia LLC, 2022)	2D	Hydronia LLC	v8.04 (Lançado em 2022)	Licenciado	Sim	Sim
HEC-RAS (USACE, 2022)	1D/2D	Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA	6.3.1 (Lançado em 2022)	Gratuito	Sim	Sim
		Centro de Engenharia Hidrológica				
FLO-2D (FLO-2D Software Inc, 2022)	2D	FLO-2D Software Inc.	0.10.65 (Lançado em 2022)	Licenciado	Sim	Sim
MADFLOW (Chen and Lee, 1998)	Quasi-2D/3D	Developed originally for academic research since 1998	-	Gratuito	Sim	Sim
OpenFOAM (Esi-OpenCFD, 2022)	3D	Esi-OpenCFD	v2206 (Lançado em 2022)	Gratuito e código aberto	Sim	Sim
Delft3D-FLOW (Deltares, 2021)	2D/3D	Deltares	6.04.00.69179 (Lançado em 2021)	Gratuito e código aberto	Sim	Não
FLDWAV (Fread and Lewis, 1998)	1D	Serviço Nacional de Meteorologia (NWS).	2-0-2-2 beta	Gratuito	Sim	Sim
		O NWS deixou de desenvolver o FLDWAV após 2005.	(Lançado em 2005).			
MIKE 21 (Instituto Hidráulico Dinamarquês, 2022)	2D	Instituto Hidráulico Dinamarquês (DHI)	Mike 2022 Atualização 1	Licenciado	Sim	Sim
			(Lançado em 2022)			
TUFLOW (British Maritime Technology Group, 2020)	1D/2D/3D	British Maritime Technology (BTM) Group	Classic (2020-10-ae) e FV (2020.03).	Licenciado	Sim	Sim
			(Lançados em 2020)			
Telemac MASCARET System (Telemac- Mascaret Consortium, 2022)	2D	Telemac- Mascaret Consortium	V8p3r1 (Lançado em 2022)	Gratuito e código aberto	Sim	Sim
FLOW-3D HYDRO (Flow Science Inc., 2022)	2D/3D	Flow Science Inc.	2022 R2 (Lançado em 2022)	Licenciado	Sim	Sim
DAN3D (McDougall and Hungr, 2004)	Quasi-3D	McDougall and Hungr (2004)	-	Gratuito	-	Sim
		GEAMA and Flumen Institute	V3.2.0 (Lançado em 2022)	Gratuito	Sim	Não

Fonte: Adaptado de CDA (2021).

Na bibliografia, vários autores comparam diferentes modelos numéricos, porém independentemente do software adotado as incertezas da modelagem permanecem. Toombes (2014) conclui, após comparação de modelos numéricos uni e bidimensionais e modelos físicos, que modelagens hidrológicas e hidráulicas são um dos campos com mais incertezas na engenharia civil. O autor afirma que as modelagens incluem muitas imprecisões e, portanto, carregam riscos em seus resultados, destacando que apenas existem diretrizes para modelagens, mas sem existir regulações ou normas de fatores de segurança a serem adotados.

Neste trabalho, o foco é a modelagem da propagação de uma onda de ruptura no software Riverflow2D. Portanto, a revisão bibliográfica, é direcionada à exposição dos equacionamentos reológicos disponíveis neste software em questão, assim como de itens relacionados à elaboração de malhas computacionais e ao coeficiente de rugosidade, contemplando assim os temas pertinentes aos estudos de sensibilidade que serão desenvolvidos neste trabalho.

## 2.1 ABORDAGEM GERAL: RIVERFLOW2D

O RiverFlow2D é um software comercial desenvolvido pela empresa Hydronia LLC (HYDRONYA, 2023). O modelo hidrológico-hidráulico de volumes finitos é capaz de contemplar em simulações em rios com leito móvel e transporte de poluentes. Ainda, segundo o manual da versão mais recente O software tem diferentes módulos e abordagens, como os módulos de drenagem urbana (UD); de transporte de sedimentos (ST); de escoamento de lama e rejeitos (MT); de transporte de poluentes (PL); de qualidade da água (WQ); e de derramamentos de óleo em terra ou água (OilFlow2D).

O modelo hidrodinâmico do RiverFlow2D resolve as Equações de Águas Rasas em duas dimensões, usando simplificação da componente vertical da equação de Navier-Stokes, equação que engloba os conceitos da conservação de massa e da quantidade de movimento. O passo de tempo de cálculo é variável e utiliza como base o número de Courant, preferencialmente igual a um, deixando o modelo mais estável pela existência desse ajuste automático, sem permitir ao usuário a escolha desse intervalo computacional. O *software* possui interface gráfica do usuário (GUI) desenvolvida através de plug-in do software de informações geográficas de código aberto QGIS, o que facilita a edição do modelo com base nas ferramentas do software existente.

Sua malha não estruturada formada por triângulos de diferentes tamanhos (TIN – Irregular Tin Surface) permite a adaptação aos obstáculos da topografia na área modelada. O modelo pode ser processado na Unidade de Processamento Gráfico (GPU), otimizando em até 700 vezes o tempo computacional comparado a um computador com um único processador (HYDRONIA, 2023).

Ademais, o RiverFlow2D é capaz de representar estruturas hidráulicas tais como pontes, pilares de pontes, barragens, bueiros e açudes. Contempla ainda a possibilidade de inserção de dados de chuva, evaporação, infiltração, erosão, deposição, vento, fontes e lagos e abertura de brecha.

Em relação à aplicação do modelo para simulação de rompimento de barragens de mineração é possível utilizar como condições de contorno de entrada curvas chave ou de descarga; hidrogramas de fluidos ou sedimentos; cotogramas; imposição de escoamento uniforme; e entrada e saída livre.

Para a abertura de brecha, pode-se configurar a abertura gradual por processo erosivo do talude, por *piping* ou ainda inserir uma relação de tempo e abertura pré-definida. Ainda é possível, através da utilização de dados topográficos de elevação inicial, simular a mobilização instantânea (liquefação e instabilização) de uma estrutura.

Por fim, pode-se extrair resultados das simulações por meio de seções transversais, pontos de observação e perfis longitudinais. Pelo uso do QGIS, é possível ainda visualizar e gerar resultados espacialmente para obtenção de resultados hidráulicos nos diferentes tempos de processamento ou para valores máximos.

## 2.2 MALHAS COMPUTACIONAIS

As malhas computacionais permitem a leitura da informação dos modelos digitais de terreno criando uma das principais condições de contorno do modelo. A malha controlará o fluxo de fluido pela área do modelo, especificamente calculando e controlando a elevação do escoamento, velocidade e outras variáveis hidráulicas para cada célula em cada passo de tempo e a interação entre células adjacentes (USACE, 2022).

Atualmente, os modelos numéricos mais versáteis permitem o refino da malha em pontos específicos de interesse, através de uso de *breaklines* ou polígonos de definição de refino das malhas computacionais.

O formato e a discretização da malha computacional influenciam na representação numérica do terreno para uso nas simulações. O Riverflow2D possui malha com elementos triangulares irregulares, permitindo uso de diferentes tamanhos de triângulos em uma só malha, se adaptando melhor à topografia e seus obstáculos ou estruturas presentes no terreno, conforme mencionado no subcapítulo anterior (HYDRONIA, 2023).

## 2.3 EQUACIONAMENTOS REOLÓGICOS: A CONSIDERAÇÃO DE FLUIDO NÃO NEWTONIANO EM PROPAGAÇÃO DE ONDAS NO SOFTWARE RIVERFLOW2D

O fluido liberado em abertura de brechas em barragens de rejeito tem concentração de sólidos variável, compondo diferentes comportamentos de escoamento hiperconcentrado. Na FIGURA 2.1 (CDA, 2021), apresenta-se os tipos de escoamentos conforme concentrações volumétricas do fluido do escoamento. Na citada figura, baseada e adaptada dos trabalhos de Martin et al. (2019) e Julien and O'Brien (1985), as concentrações, em termos de volume, de até 20% possuem comportamento aquoso (*Water Flood*), entre 20 e 45% escoamento líquido de lama (*Mud Flood*), entre 45 e 55% um escoamento mais viscoso de lama (*Mud Flow*) e entre 55 e 80% comportamento de escorregamento (*Flow Slide Slumping*). Vale ressaltar que as concentrações de sólidos indicadas são mais aplicáveis aos rejeitos de rochas duras do que a outros tipos de rejeitos (CDA, 2021). No caso de estudo que será abordado nos capítulos seguintes a concentração volumétrica adotada foi de 47,3%.



TABELA 2.2 – MODELOS REOLÓGICOS DISPONÍVEIS NO RIVERFLOW-2D

MODELO	EQUAÇÃO DE RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO	TIPO DE FLUIDO
<i>Turbulent Manning</i>	$\tau_b = \tau_f + \rho g \psi \frac{n^2  u ^2}{h^{\frac{1}{3}}}$	Turbulento newtoniano
<i>Full Bingham</i>	$2\tau_b^3 - 3 \left( \tau_y + 2\mu_B \frac{ u }{h} \right) \tau_b^2 + \tau_y^3 = 0$	Visco plástico coesivo
<i>Simplified Bingham</i>	$\tau_b = \frac{2}{3} \tau_y + 3\mu_B \frac{ u }{h}$	Visco plástico coesivo
<i>Turbulent Coulomb</i>	$\tau_b = \tau_f + \rho g \psi \frac{n^2  u ^2}{h^{\frac{1}{3}}}$	Turbulento / fricção com $\tau_f = (\rho g \psi h - P_b) \tan \delta_f$
<i>Turbulent Yield</i>	$\tau_b = \tau_y + \rho g \psi \frac{n^2  u ^2}{h^{\frac{1}{3}}}$	Turbulento coesivo
<i>Turbulent Coulomb/Yield</i>	$\tau_b = \min(\tau_y, \tau_f) + \rho g \psi \frac{n^2  u ^2}{h^{\frac{1}{3}}}$	Turbulento coesivo / fricção sendo $\tau_f = (\rho g \psi h - P_b) \tan \delta_f$
Quadrático	$\tau_b = \tau_y + \frac{k_0}{8} \mu_B \frac{ u }{h} + \rho g \psi \frac{n^2  u ^2}{h^{\frac{1}{3}}}$	Turbulento / viscosidade coesiva com $k_0 = 24$
Granular	$\tau_b = \rho g \psi h \tan \delta_f$	Seco, somente fricção
<i>Viscoplastic Coulomb<sup>1</sup></i>	$\tau_b = \tau_f + \left( \frac{2m+1}{m} \right)^m \mu_p \left( \frac{ u }{h} \right)^m$	Pseudoplasticidade Friccional $m < 1$ Dilatante $m > 1$ , com $\tau_f = (\rho g \psi h - P_b) \tan \delta_f$

1- Tratado também como modelo Herschel-Bulkley

Sendo:

- $\tau_b$  é a tensão cisalhante;
- $\tau_f$  é a tensão limite de escoamento friccional;
- $\tau_y$  é a tensão limite de escoamento coesivo;
- $\rho$  é a densidade;
- $g_\psi$  é a projeção da gravidade normal ao fundo;
- $|u|$  é a velocidade;
- $\mu_B$  é a viscosidade plástica do material;
- $h$  é a profundidade do escoamento;
- $n$  é o número de Manning;
- $k_0$  é um parâmetro de resistência;
- $\delta_f$  é o ângulo de atrito interno;
- $\mu_p$  é o parâmetro de viscosidade plástica;
- $m$  é o índice de fluxo;
- $\gamma$  é a taxa de cisalhamento.

As equações de resistência ao escoamento apresentadas na TABELA 2.2 são incorporadas como perdas de energia do escoamento não newtoniano na equação principal de águas

rasas. O que se percebe nos equacionamentos apresentados, segundo o manual do *software*, é que existem diferentes parcelas de tensão cisalhante, referentes à tensão turbulenta/dispersiva, viscosa e de limite de escoamento.

As parcelas existentes em cada modelo determinam o comportamento reológico que está sendo estimado. As principais classificações de fluidos, dadas em função do comportamento do material em função da variação da taxa de cisalhamento aplicada são apresentadas na FIGURA 2.2.

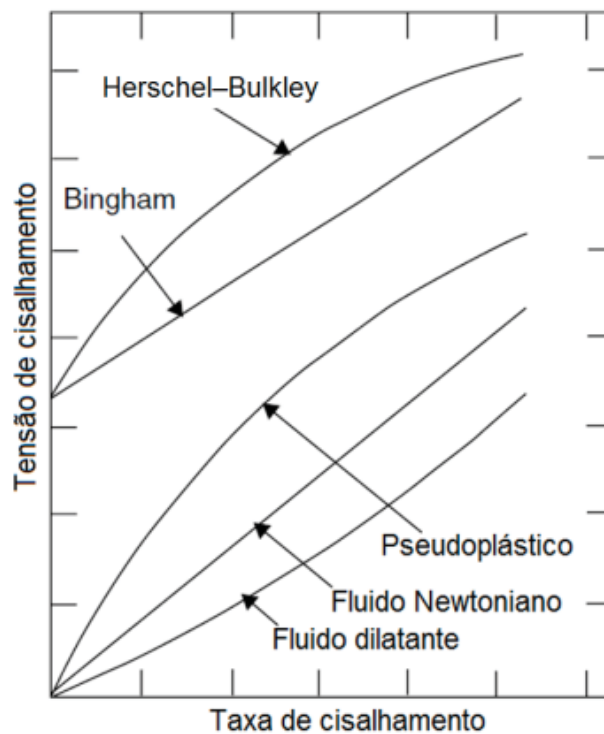


FIGURA 2.2 – COMPORTAMENTO DOS DIFERENTES TIPOS DE FLUIDO QUANDO SUBMETIDOS À VARIAÇÕES DA TENSÃO DE CISALHAMENTO (adaptado de MACHADO, 2017)

Ainda, dentre as capacidades do Riverflow2D para simulação de escoamentos hiperconcentrados, existe a opção de modelagem dos fluidos mantendo suas propriedades constantes ou com a possibilidade de variação dessas propriedades. A consideração de um fluido homogêneo, sem variação no espaço e tempo das características geotécnicas e reológicas do fluido são base da opção de propriedades constantes, enquanto a opção variável considera diferentes classes de sedimentos na fase sólida e consegue avaliar erosão e deposição do material, variando sua concentração volumétrica assim como propriedades geotécnicas e reológicas (HYDRONIA, 2023).

## 2.4 COEFICIENTE DE RUGOSIDADE

O coeficiente de rugosidade de Manning é utilizado para traduzir a perda de carga em escoamentos com fluido newtoniano e não newtonianos. No RiverFlow2D percebe-se a utilização de parcela numérica, conforme Equação 2.1, nos modelos reológicos: Turbulent Manning, Turbulent Coulomb, Turbulent Yield, Turbulent Coulomb/Yield e Quadrático, conforme já apresentado na TABELA 2.2.

$$\tau_b = \rho g_\psi h C_f |u|^2, \text{ sendo } C_f = \frac{n^2}{h^3} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

- $\tau_b$  = tensão cisalhante turbulenta de fundo;
- $\rho$  = densidade da mistura de partículas e água;
- $u$  = velocidade;
- $g_\psi$  = projeção da gravidade normal ao fundo;
- $C_f$  = coeficiente de fricção;
- $h$  = profundidade.

Nota-se também que o coeficiente de Manning não é observado na formulação dos modelos reológicos *Full Bingham* e *Simplified Bingham*, em que se observa perdas somente pela tensão limite de escoamento e tensão viscosa, e modelos exclusivos de fricção.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia é baseada na utilização do *software* Riverfow2D para simulação da propagação de uma onda de ruptura em um modelo com variação dos dados de refino da malha computacional, valores de coeficiente de rugosidade e uso dos diferentes equacionamentos reológicos para avaliação da sensibilidade do modelo às mudanças desses parâmetros.

Para tal, serão utilizados dados de um caso de estudo de uma barragem de mineração. Apresenta-se então, primeiramente, os critérios técnicos e premissas adotadas para realização do estudo de ruptura hipotética desta barragem. Na sequência são detalhadas as metodologias aplicadas para cada teste de sensibilidade em relação aos parâmetros anteriormente citados de malha, coeficiente de rugosidade e equacionamento de propagação de onda.

#### 3.1 PREMISSAS DO CASO DE ESTUDO

Neste item serão descritas informações sobre a barragem a ser utilizada no estudo, seu reservatório e seu vale de jusante. Também serão abordadas condições de contorno do modelo, com exceção da malha computacional, coeficiente de rugosidade e consideração do modelo reológico no escoamento, que serão abordados em tópicos específicos, uma vez que irão variar conforme as análises de sensibilidades que são propostas neste trabalho.

- Descrição geral da estrutura

A barragem alvo do estudo fez parte de um empreendimento de mineração do quadrilátero ferrífero em Minas Gerais, e é utilizada para armazenamento de rejeitos úmidos finos/superfinos gerados no tratamento para concentração de minério de ferro. É uma estrutura geotécnica de 47 m de altura e comprimento de crista aproximado de 536 m. A construção da estrutura contou com um dique de partida de solo compactado e um alteamento a jusante construído em duas etapas de mesmo material. O maciço conta com filtro vertical e tapete drenante.

- Capacidade de armazenamento e volume mobilizado na ruptura

A barragem tem capacidade de armazenamento aproximado de 10 hm<sup>3</sup>. Deste volume, são 9,5 hm<sup>3</sup> de rejeito com água intersticial e 0,5 hm<sup>3</sup> de água livre. Foi considerada, para a

ruptura, a mobilização de cerca de 98% do volume de rejeito que estava contido no reservatório, considerando que parte do rejeito ficaria ainda dentro do reservatório após a abertura da brecha como se percebe nos casos reais de ruptura de barragem de rejeitos.

- Caracterização Geotécnica e Reológica do rejeito

Como uma das hipóteses do trabalho é a modelagem com escoamentos hiperconcentrados, nos quais as forças viscosas e a resistência ao cisalhamento alteram a dinâmica de escoamento do fluido, foi necessário indicar a densidade dos sólidos, a concentração volumétrica das misturas, bem como a viscosidade e tensão limite de escoamento desta.

A amostra de rejeito ensaiada em laboratório é classificada como franco siltosa (Argila 9,1%, Silte 62,9% e Areia 28%), conforme FIGURA 3.1.

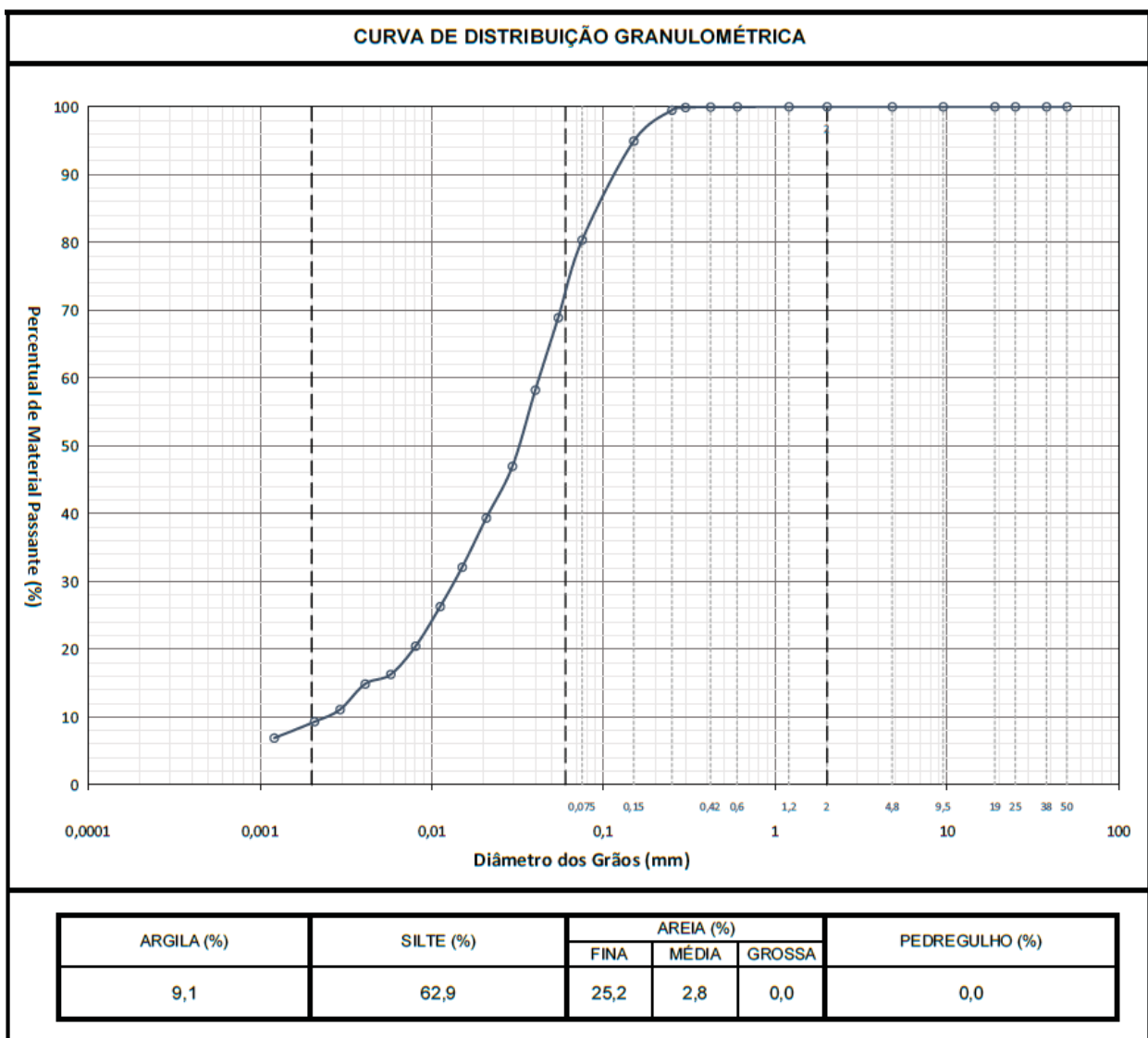


FIGURA 3.1 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA DE REJEITO.

Ademais, foi adotada a densidade dos grãos de  $3,28 \text{ t/m}^3$  a densidade aparente seca de  $1,59 \text{ t/m}^3$ . Considerando essas características, calcula-se a concentração volumétrica da mistura entre rejeitos mobilizados, água intersticial presente nos rejeitos e água livre do lago da barragem no instante da ruptura. A concentração volumétrica é dada pela razão entre volume de sólidos e volume total. Para o cenário modelado, a concentração volumétrica foi calculada em 47,3%, considerada uma concentração alta que caracteriza um *MudFlow* segundo a classificação de O'Brien (2008). No entanto, pode-se observar o comportamento ainda bem fluido nessa concentração volumétrica conforme *Slump test* ilustrado na FIGURA 3.2.

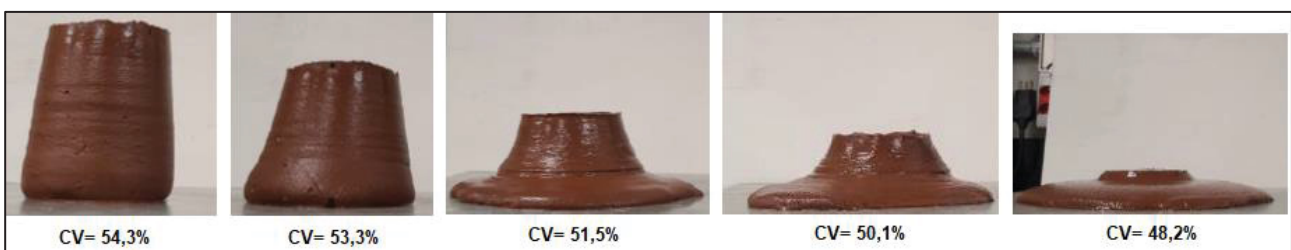


FIGURA 3.2 - CONSISTÊNCIA DO REJEITO ANALISADO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DA MISTURA – RESULTADOS SLUMP TEST MINIATURA.

Ainda, com os resultados obtidos do ensaio de reologia, com uso de reômetro rotacional, foram construídas curvas de tensão limite de escoamento e de viscosidade em função da concentração volumétrica de sólidos das amostras analisadas, com intuito de inserir como entrada no modelo computacional utilizado a fim de considerar a concentração volumétrica do fluido variável, conforme demonstram as FIGURA 3.3 e FIGURA 3.4.

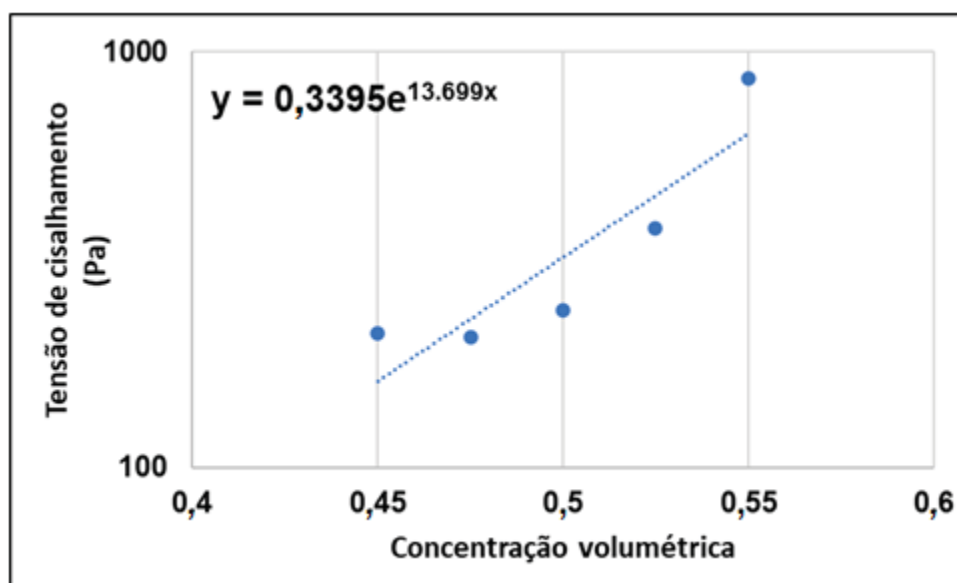


FIGURA 3.3 - TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DA MISTURA.

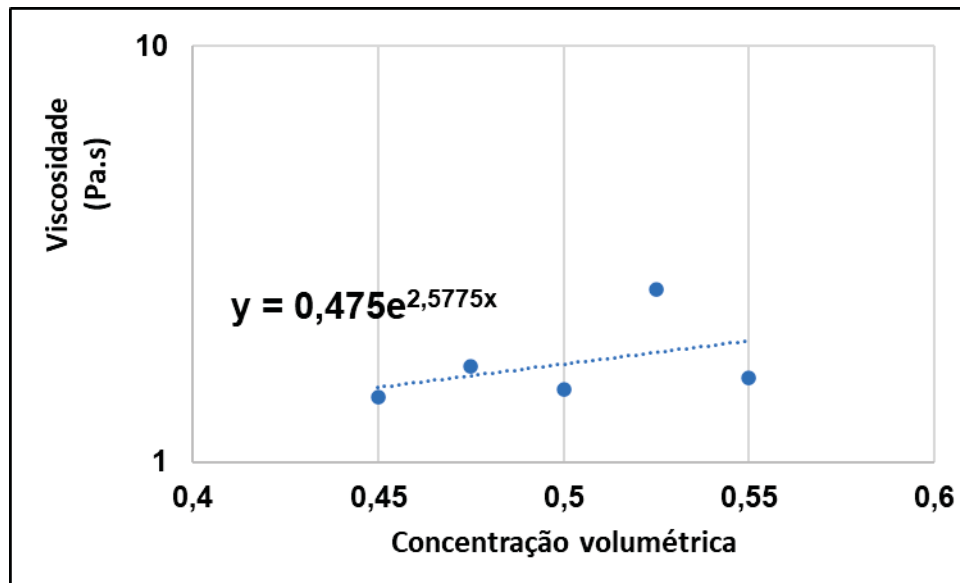


FIGURA 3.4 - VISCOSIDADE EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DA MISTURA.

Ademais, como dado de entrada para o modelo reológico de Herschel-Bulkley foi considerado um índice de fluxo “ $m$ ” de 0,747, índice de consistência “ $\mu_p$ ” de 3,904 obtidos a partir da regressão linear dos dados de tensão cisalhante por taxa de rotação do reômetro para a concentração volumétrica de 50%, conforme metodologia de Burger (2014). Foi adotado um ângulo de atrito de 2 graus, compatível com valores conservadores da bibliografia para rejeito liquefeito (Blight, Fourie and Papageorgiou, 2003; Fontaine and Martin, 2015).

A formulação de equilíbrio da concentração da mistura adotada para os cenários de ruptura foi proposta por Van Rijn (1984), enquanto a formulação de velocidade de sedimentação foi proposta por Wu-Wong (2006), conforme manual do Riverflow2D e não são alvo de análise deste trabalho.

- Modo de falha, brecha e hidrograma de ruptura

Como modo de falha considerou-se o galgamento da estrutura, dada uma falha no sistema extravasor em um evento de chuva com recorrência decamilenar. A abertura da brecha foi proposta conforme metodologia de Froehlich (2019), resultando em uma geometria trapezoidal de 121,1 m de largura superior, 27,1 m de largura inferior e 47 m de altura. O tempo de abertura da brecha foi calculado, pela citada metodologia em 21 minutos. Na FIGURA 3.5 é apresentado o hidrograma de ruptura obtido, com pico de 13.095 m<sup>3</sup>/s, a

partir da inserção dos parâmetros de brecha e curva cota-volume da barragem no modelo paramétrico HEC-HMS 4.6 (US ARMY, 2022).

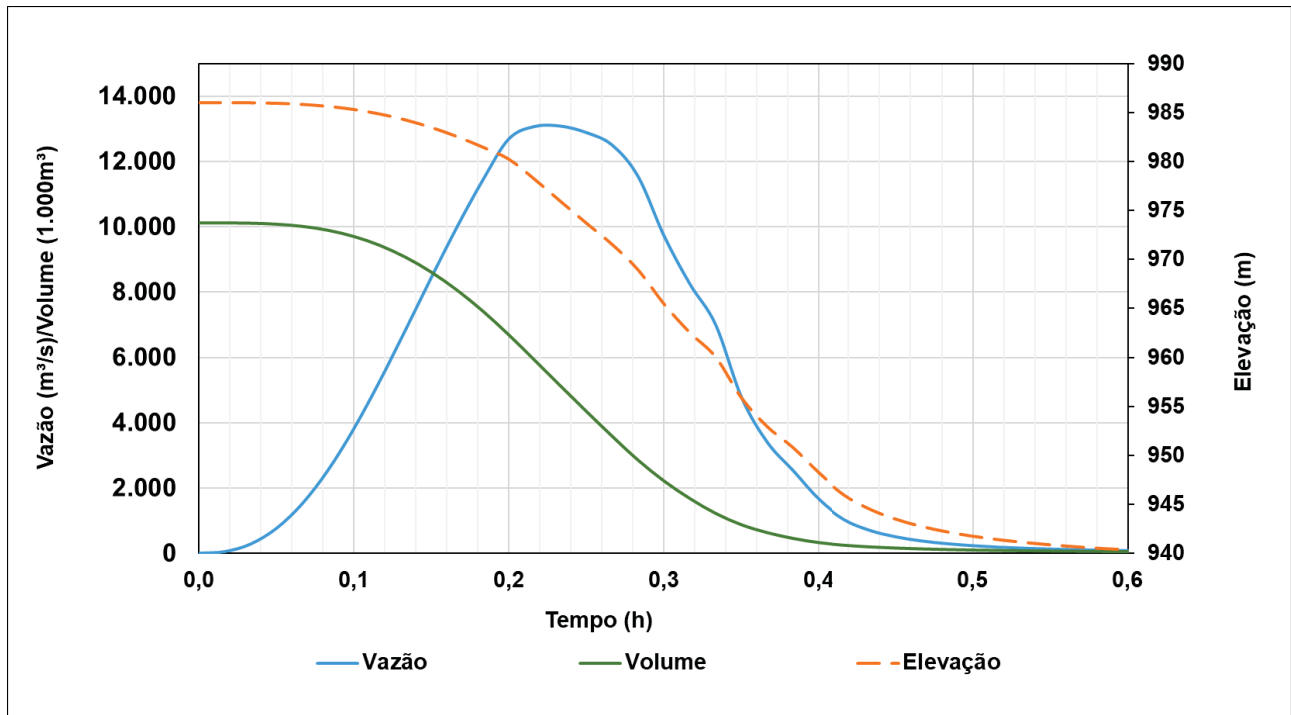


FIGURA 3.5 – HIDROGRAMA DE RUPTURA – CENÁRIO DE RUPTURA EXTREMO.

- Informações hidrológicas do vale de jusante

No modelo, além do hidrograma de ruptura, foi considerado o vale de jusante preenchido com uma vazão constante referente a um tempo de recorrência de 2 anos. As vazões foram obtidas através de análises estatísticas de séries de vazões de estações fluviométricas próximas, obtidas na HIDROWEB (ANA, 2021), e áreas de drenagem equivalentes à área de estudo, sendo regionalizadas e maximizadas pelo método de Fuller (1914). Foram inseridas quatro entradas de vazão natural ao longo do modelo, considerando os incrementos de área de drenagem no local do estudo, conforme TABELA 3.1.

TABELA 3.1 –VAZÕES DE PICO E TEMPO DE RETORNO POR ANO HIDROLÓGICO DE EVENTOS EXTREMOS NA REGIÃO DO ESTUDO.

Ponto de entrada	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	Vazão ordinária TR 2 anos (m <sup>3</sup> /s)	Vazão ordinária com Fuller (m <sup>3</sup> /s)	Vazões incrementais (m <sup>3</sup> /s)
1	5,8	0,66	1,69	1,69
2	19,6	2,45	5,12	3,43
3	129,8	18,91	30,59	25,47
4	202,7	30,61	47,15	16,56

- Modelo digital de terreno

Para compor o modelo foi utilizado modelo digital de terreno com precisão de 1m, obtido através de uso de tecnologia a laser (LIDAR) em aeronave não tripulada. O modelo não conta com seções topobatimétricas, dado que o rio é de pequeno calibre e as vazões do hidrograma de ruptura extravasariam a calha do rio com facilidade.

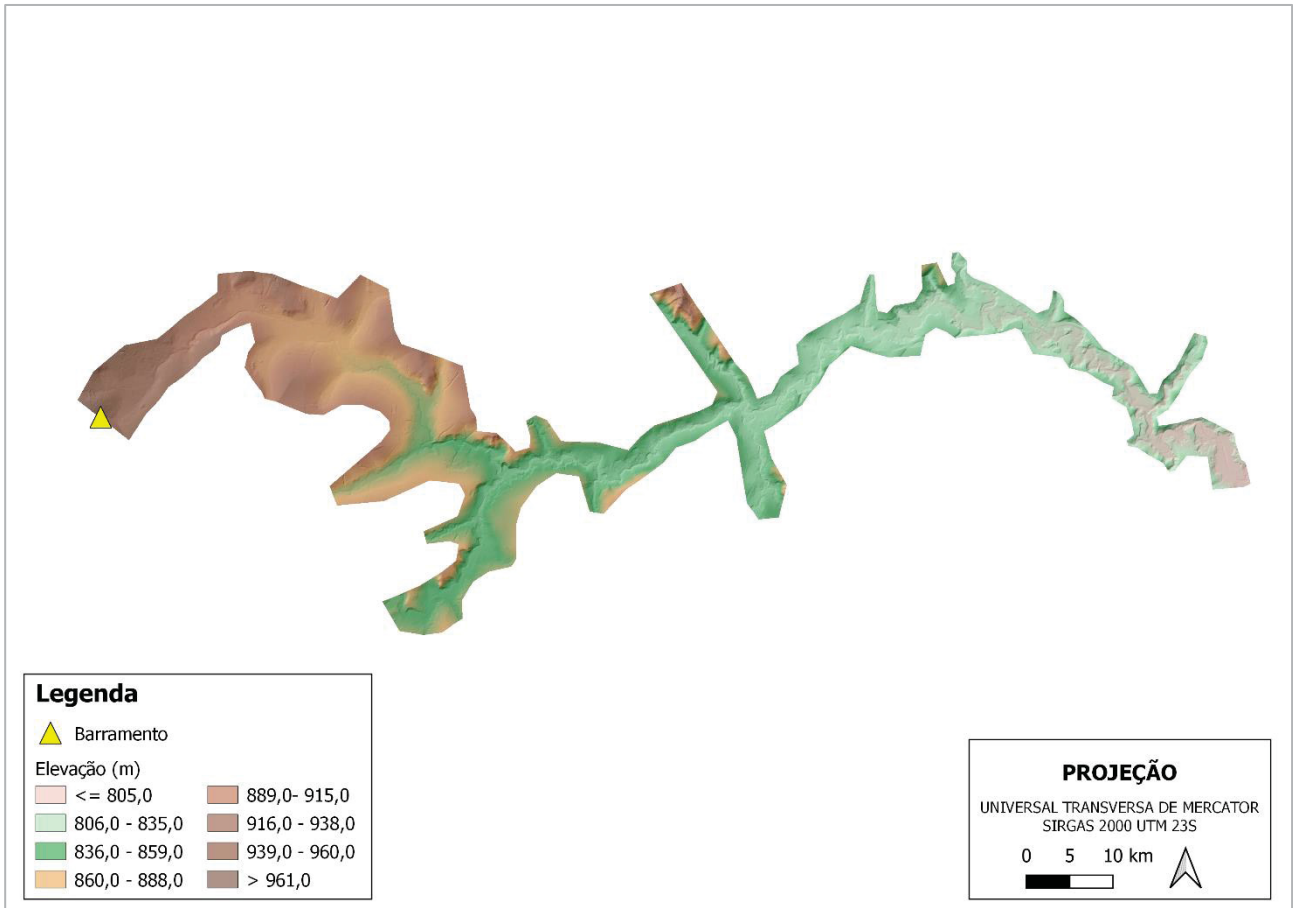


FIGURA 3.6 – ILUSTRAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE TERRENO

O trecho modelado possui aproximadamente 18 km de extensão.

- Critério de parada de modelagem

Para compor o critério de final de modelagem, a jusante do final do modelo se encontra um reservatório com capacidade de armazenamento suficiente para abatimento da onda de ruptura que adentra o lago. A condição de contorno de jusante foi imposta como uma declividade baixa representando a entrada no lago logo a jusante. O modelo não contemplou a área do reservatório.

### 3.2 MODELAGEM DA MALHA COMPUTACIONAL

Para a propagação de cheias de ruptura (tempo x espaço) e consequente definição de áreas potencialmente inundáveis, utilizou-se o *software* RiverFlow2D, desenvolvido pela Hydronia LLC, em sua versão 8.0.4.

O modelo utiliza células triangulares adaptáveis que permite que o campo de fluxo seja bem definido. Na análise de sensibilidade, serão testadas cinco malhas, sendo elas de 50 m, 20 m, 10 m, 7,5 m e 5 m.

A malha é gerada automaticamente pelo próprio software e uma linha (*breakline*) foi traçada no talvegue a jusante para garantir a continuidade do fluxo pela parte mais funda deste talvegue.

Ressalta-se que o refino da malha em menores tamanhos gera maior precisão de resultados, no entanto aumenta o esforço e tempo computacional da simulação. Por isso, busca-se utilizar a maior malha possível que garanta resultados com erros aceitáveis.

Nesta avaliação foi utilizado computador com processador Intel® Core™ i5-9400F CPU @ 2.90GHz com 6 núcleos, 32GB de memória RAM e GPU NVIDIA GeForce RTX 2070 SUPER com 8.0 GB memória dedicada e 16.0GB memória compartilhada.

### 3.3 COEFICIENTE DE RUGOSIDADE

A área potencialmente atingida pela onda de inundação, no caso de uma ruptura da barragem, compreende trechos com vegetação natural, campo e propriedades particulares. Assim, adotou-se os coeficientes de Manning apresentados na TABELA 3.2, de acordo com valores propostos por Chow (1959). Para a análise deste trabalho, a partir da designação do uso do solo por imagens de satélite apresentados na FIGURA 3.7, serão avaliados os valores médios, assim como os valores multiplicados por 0,8 e 1,2 representando limites superiores e inferiores dos testes de sensibilidade do coeficiente de rugosidade do modelo, conforme variação de 20% sugerida pelo relatório *Australian Rainfall and Runoff* do *Australian Engineers* (2012).

TABELA 3.2 – COEFICIENTES DE RUGOSIDADE DE MANNING UTILIZADOS.

Cobertura	Coefficiente de Manning (Valores médios de Chow, 1959)	Limite Superior (x1,2)	Limite Inferior (x0,8)
Mata	0,070	0,084	0,056

Cobertura	Coefficiente de Manning (Valores médios de Chow, 1959)	Limite Superior (x1,2)	Limite Inferior (x0,8)
Área urbana	0,060	0,072	0,048
Campo	0,045	0,054	0,036
Solo Exposto	0,035	0,042	0,028
Calha do rio	0,020	0,024	0,016

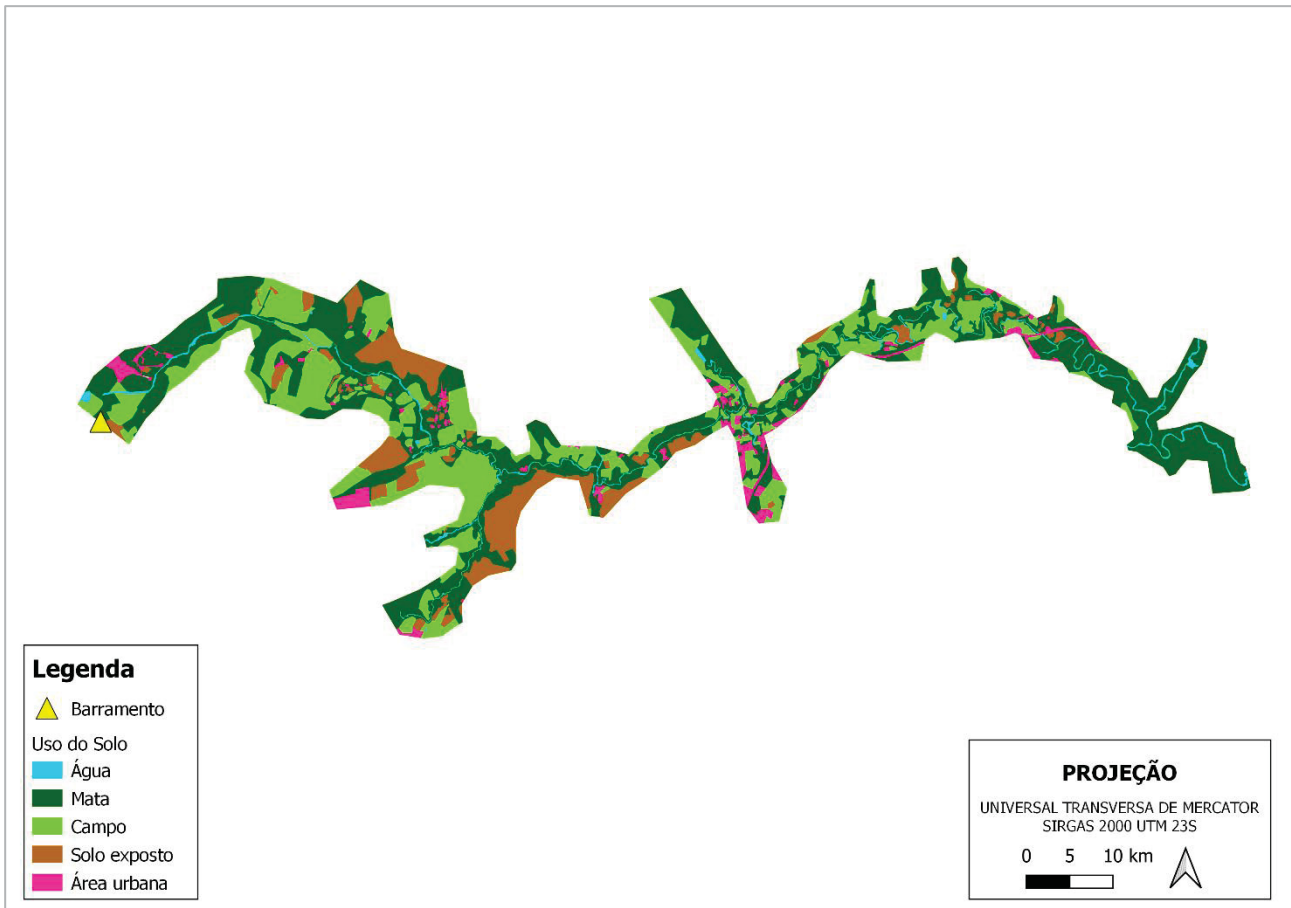


FIGURA 3.7 – USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DO VALE DE JUSANTE PARA DEFINIÇÃO DOS COEFICIENTES DE RUGOSIDADE DE MANNING

### 3.4 TIPO DE FLUIDO E EQUACIONAMENTO REOLÓGICO

A perda de carga e a propagação da onda no vale de jusante em um vale de jusante é dependente do tipo de fluido considerado na simulação: newtoniano ou não newtoniano. No caso de fluido não newtoniano, ou hiperconcentrado, ainda pode-se variar o equacionamento reológico utilizado na modelagem, conforme equacionamentos apresentados no item de revisão bibliográfica.

Para este trabalho, serão comparadas simulações com consideração de fluido newtoniano e fluido não newtoniano com uso dos modelos reológicos Quadrático, *Full Bingham* e Herschel-Bulkley, pois se configuram como principais modelos com diferenças mais significativas em seus equacionamentos tornando mais justificável a comparação de comportamento. É utilizada a configuração de concentração volumétrica variável, de acordo com equacionamentos apresentados nas FIGURA 3.3 e FIGURA 3.4.

## 4 RESULTADOS

Para apresentação de resultados, ao longo do trecho modelado, foram inseridas seções representativas a fim de se obter valores para parâmetros hidráulicos que permitissem uma melhor avaliação do comportamento da propagação do hidrograma de ruptura ao longo do trecho de inundação, conforme é ilustrado na FIGURA 4.1.

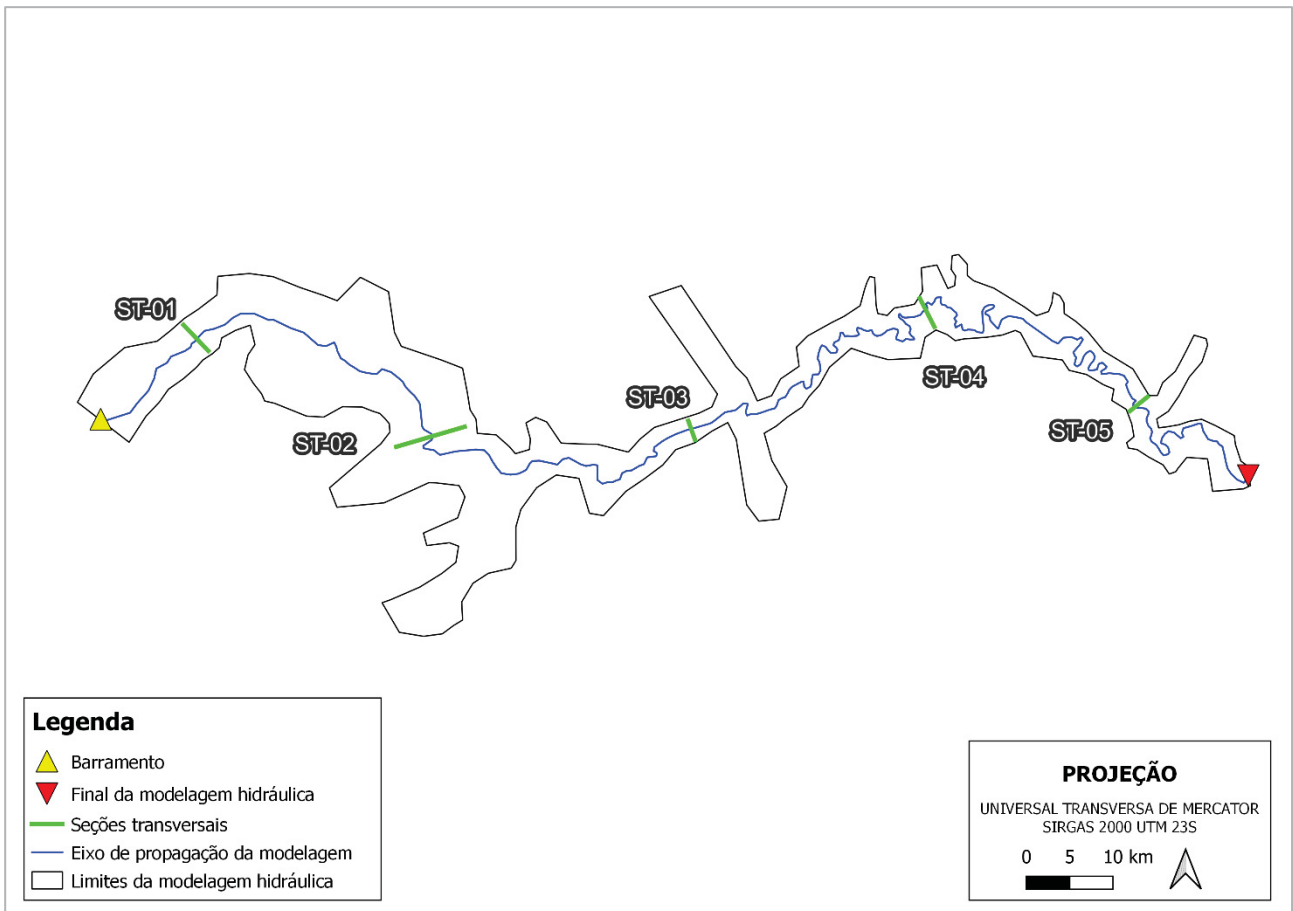


FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS.

As seções ST-01 a ST-05 estão localizadas a aproximadamente 1,5, 5, 8,5, 12,5 e 16 km da barragem respectivamente.

A seguir são apresentados os resultados dos diferentes modelos rodados a fim de testar a sensibilidade do modelo quanto ao tamanho da malha computacional, coeficiente de Manning e consideração do comportamento reológico.

Foi utilizada uma simulação base, chamada de Modelo Base, a partir da qual serão variados os parâmetros citados acima, de acordo com as especificações apresentadas na TABELA 4.1, a fim de facilitar a comparação de resultados que é apresentada nos subitens deste capítulo do trabalho.

TABELA 4.1 – RELAÇÃO DE SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA TESTES DE SENSIBILIDADE.

ID da simulação	Tamanho da Malha (m)	Coefficiente de Rugosidade	Tipo de Fluido/ Modelo Reológico
<b>Modelo Base</b>	<b>5</b>	<b>1 (valor médio)</b>	<b>Não-newtoniano/Quadrático</b>
1-A	7,5	1 (valor médio)	Não-newtoniano/Quadrático
1-B	10	1 (valor médio)	Não-newtoniano/Quadrático
1-C	20	1 (valor médio)	Não-newtoniano/Quadrático
1-D	50	1 (valor médio)	Não-newtoniano/Quadrático
2-A	5	0,8 (limite inferior)	Não-newtoniano/Quadrático
2-B	5	1,2 (limite superior)	Não-newtoniano/Quadrático
3-A	5	1 (valor médio)	Newtoniano
3-B	5	-	Não-newtoniano/Full Bingham
3-C	5	1 (valor médio)	Não-newtoniano/Herschel-Bulkley

Os resultados de profundidade, velocidade, vazão de pico, área da envoltória máxima da mancha de inundação, tempo de chegada da onda de ruptura<sup>1</sup> e tempo de computação serão apresentados de forma comparativa entre os cenários para discussões de resultados e tecimento das conclusões.

#### 4.1 SENSIBILIDADE AO TAMANHO DE DETALHAMENTO DA MALHA COMPUTACIONAL

Compara-se neste item os resultados obtidos dada a variação do tamanho da malha computacional nas simulações: “Modelo Base”, 1-A, 1-B, 1-C e 1-D que possuem malhas com tamanhos de 5, 7,5, 10, 20 e 50 metros respectivamente.

---

<sup>1</sup> Tempo para a frente da onda sobrelevar o escoamento a 2 pés (0,61m).

#### 4.1.1 Hidrogramas e vazões máximas

Nas FIGURA 4.2 a FIGURA 4.6 serão apresentados os hidrogramas obtidos nas 5 seções de resultado para cada simulação.

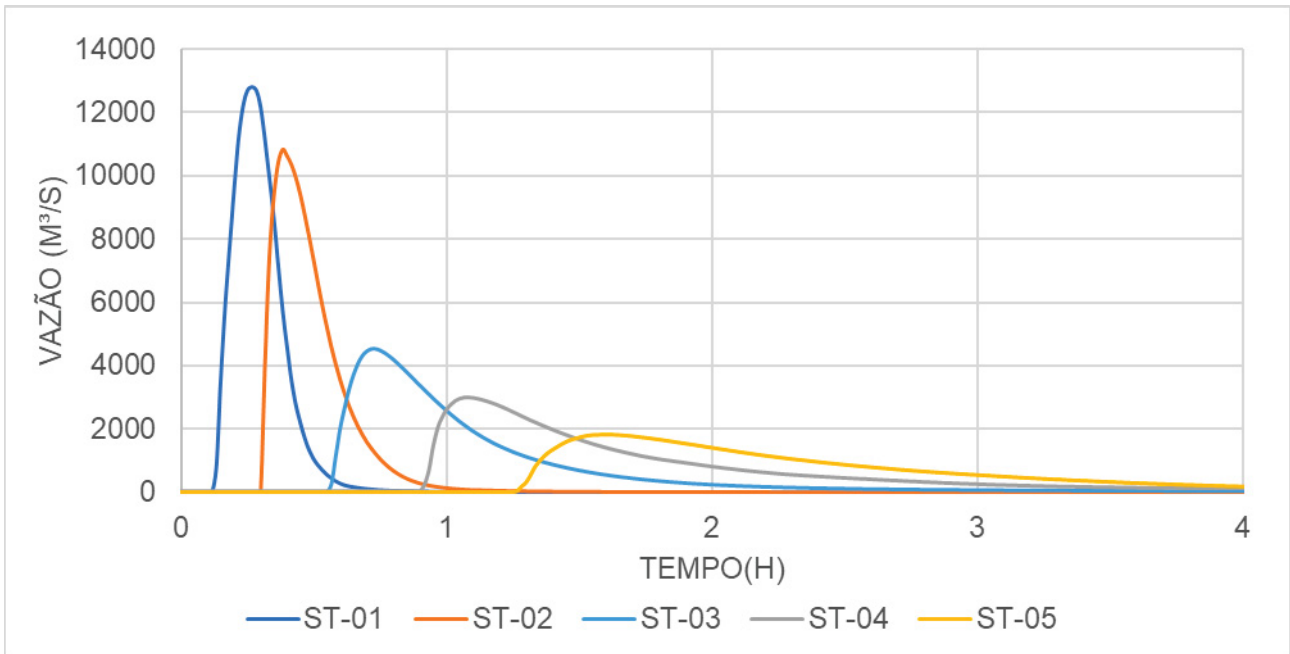


FIGURA 4.2 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO MODELO BASE

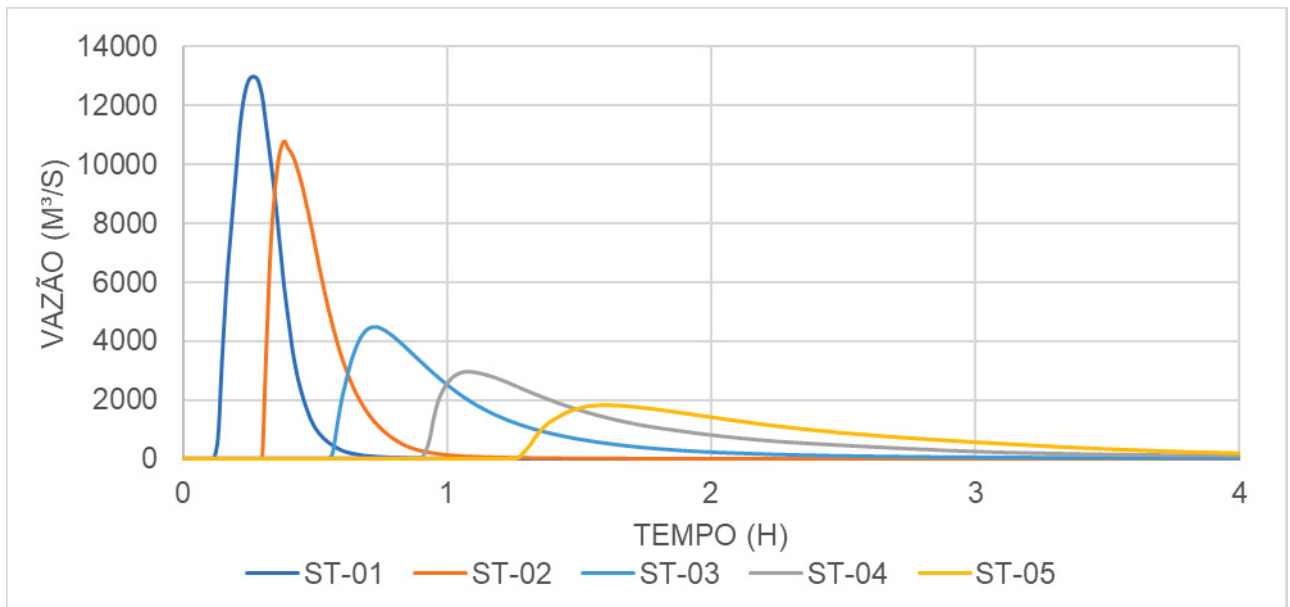


FIGURA 4.3 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 1-A

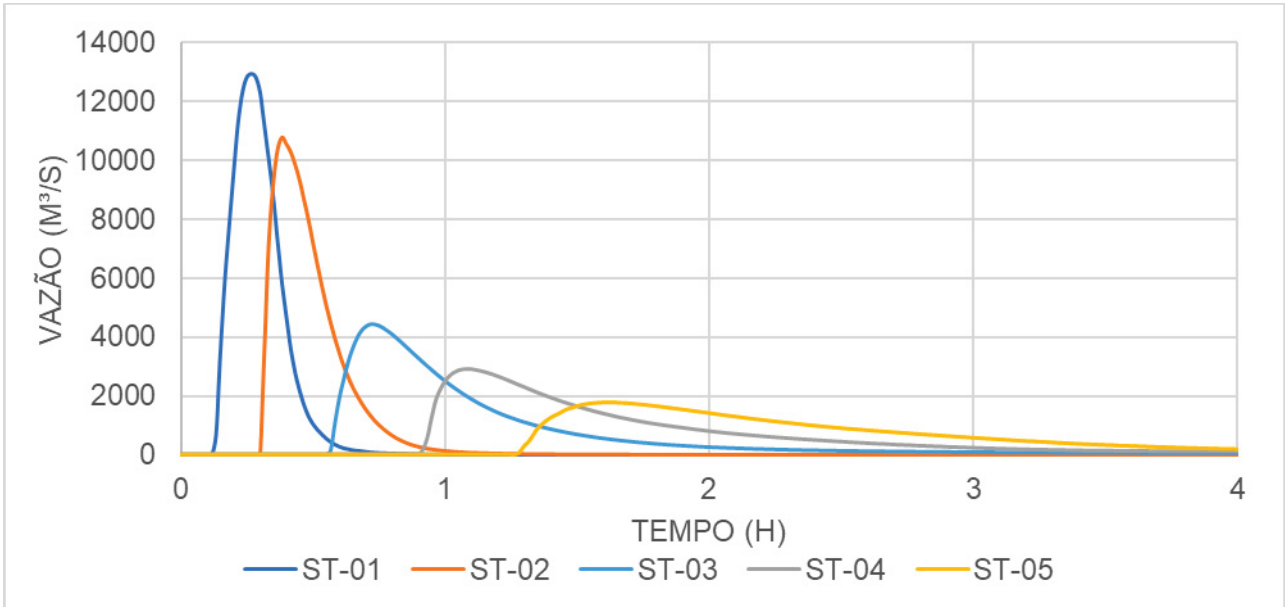


FIGURA 4.4 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 1-B

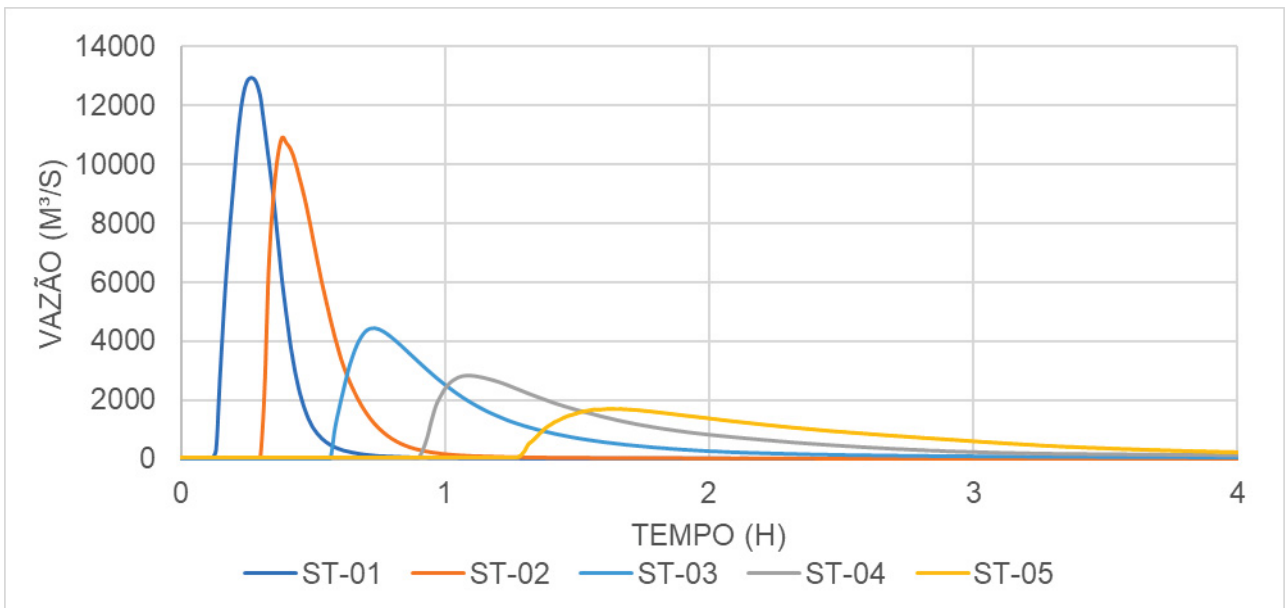


FIGURA 4.5 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 1-C

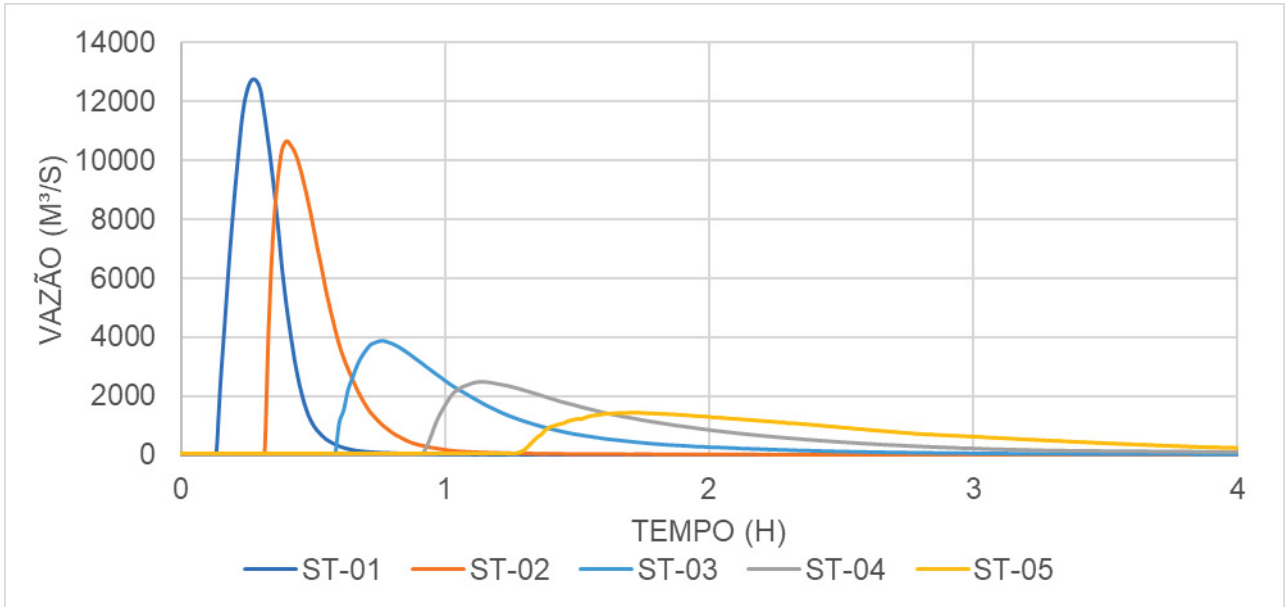


FIGURA 4.6 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 1-D

Na TABELA 4.2 serão especificadas as vazões máximas por seção em cada simulação.

TABELA 4.2 – VAZÕES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO

Vazões Máximas por seção de resultado (m <sup>3</sup> /s)					
Modelos	Modelo Base	1-A	1-B	1-C	1-D
Tamanho da malha (m)	5	7,5	10	20	50
ST-01	12810	12990	12930	12940	12730
ST-02	10820	10800	10790	10900	10660
ST-03	4545	4494	4456	4442	3886
ST-04	3009	2959	2905	2845	2473
ST-05	1848	1824	1780	1720	1438

Apresenta-se na FIGURA 4.7, para cada seção de resultado, uma comparação gráfica entre as vazões máximas e o coeficiente de variação desse parâmetro obtido entre as simulações.

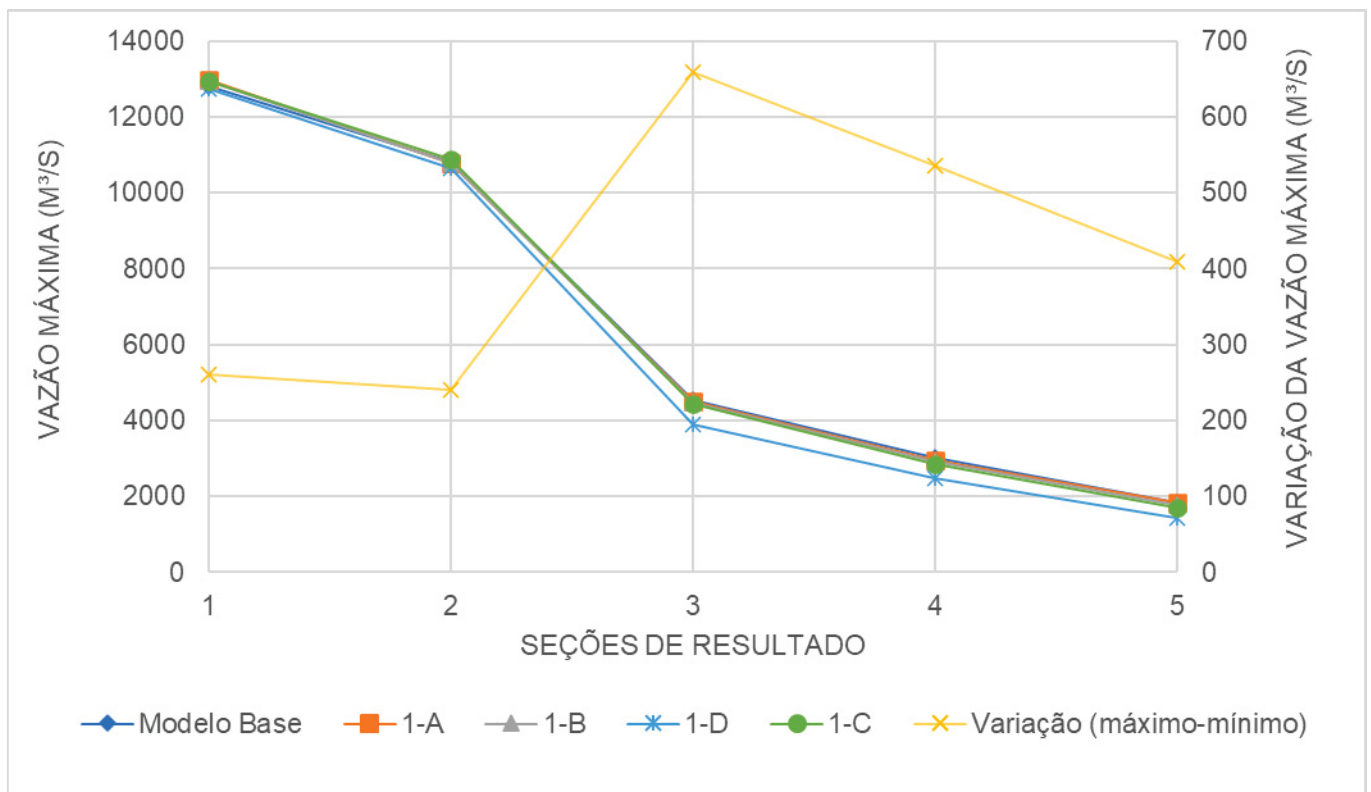


FIGURA 4.7 – VAZÕES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO

#### 4.1.2 Profundidades máximas

Na TABELA 4.3 serão especificadas as profundidades máximas por seção em cada simulação.

TABELA 4.3 – PROFUNDIDADES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO

Profundidades Máximas por seção de resultado (m)					
Modelos	Modelo Base	1-A	1-B	1-C	1-D
Tamanho da malha (m)	5	7,5	10	20	50
ST-01	13,66	13,58	13,67	13,88	14,73
ST-02	12,81	12,85	12,93	12,96	13,52
ST-03	15,23	15,25	15,25	15,4	13,24
ST-04	8,88	8,83	8,8	8,78	8,42
ST-05	10,27	10,34	10,27	9,99	9,63

Apresenta-se na FIGURA 4.8, para cada seção de resultado, uma comparação gráfica entre as profundidades máximas e o coeficiente de variação desse parâmetro obtido entre as simulações.

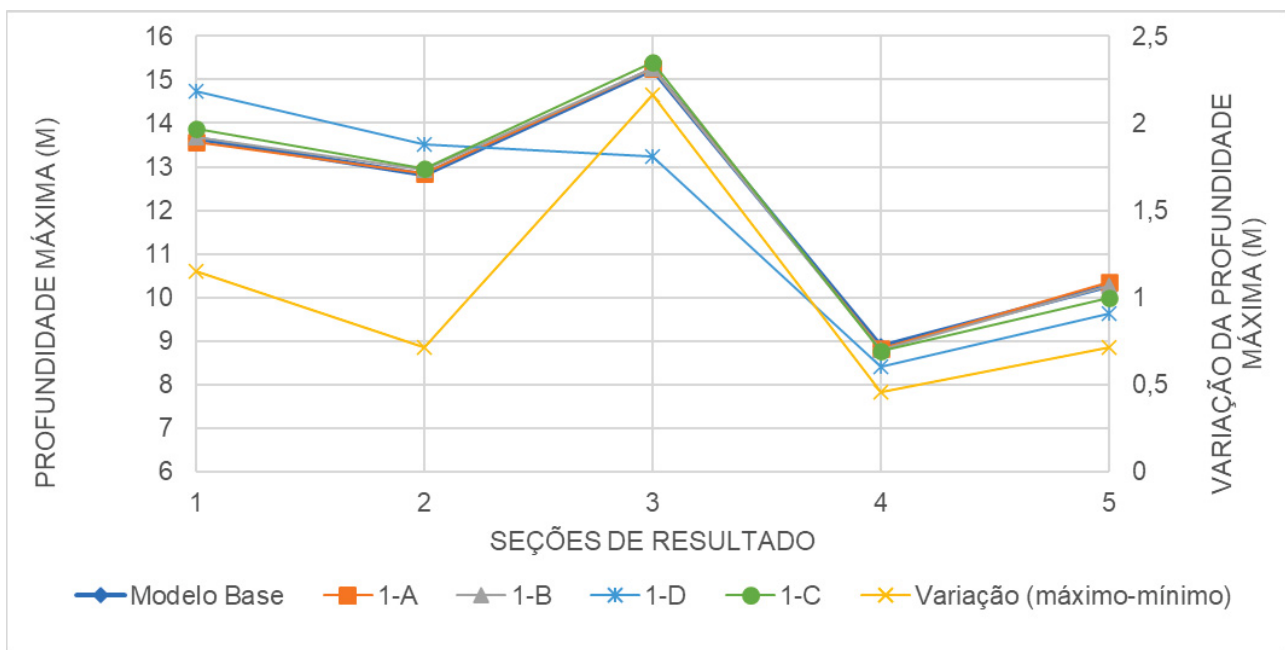


FIGURA 4.8 – PROFUNDIDADES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO

### 4.1.3 Velocidades máximas

Na TABELA 4.4 serão especificadas as velocidades máximas por seção em cada simulação.

TABELA 4.4 – VELOCIDADES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO

Velocidades Máximas por seção de resultado (m/s)					
Modelos	Modelo Base	1-A	1-B	1-C	1-D
Tamanho da malha (m)	5	7,5	10	20	50
ST-01	13,63	13,64	15,64	13,56	10,43
ST-02	9,98	9,93	9,77	9,87	9,56
ST-03	5,56	4,72	4,44	4,25	4,43
ST-04	5,41	5,29	5,68	5,01	4,63
ST-05	4,10	3,54	3,38	3,02	2,46

Apresenta-se na FIGURA 4.9, para cada seção de resultado, uma comparação gráfica entre as velocidades máximas e o coeficiente de variação desse parâmetro obtido entre as simulações.

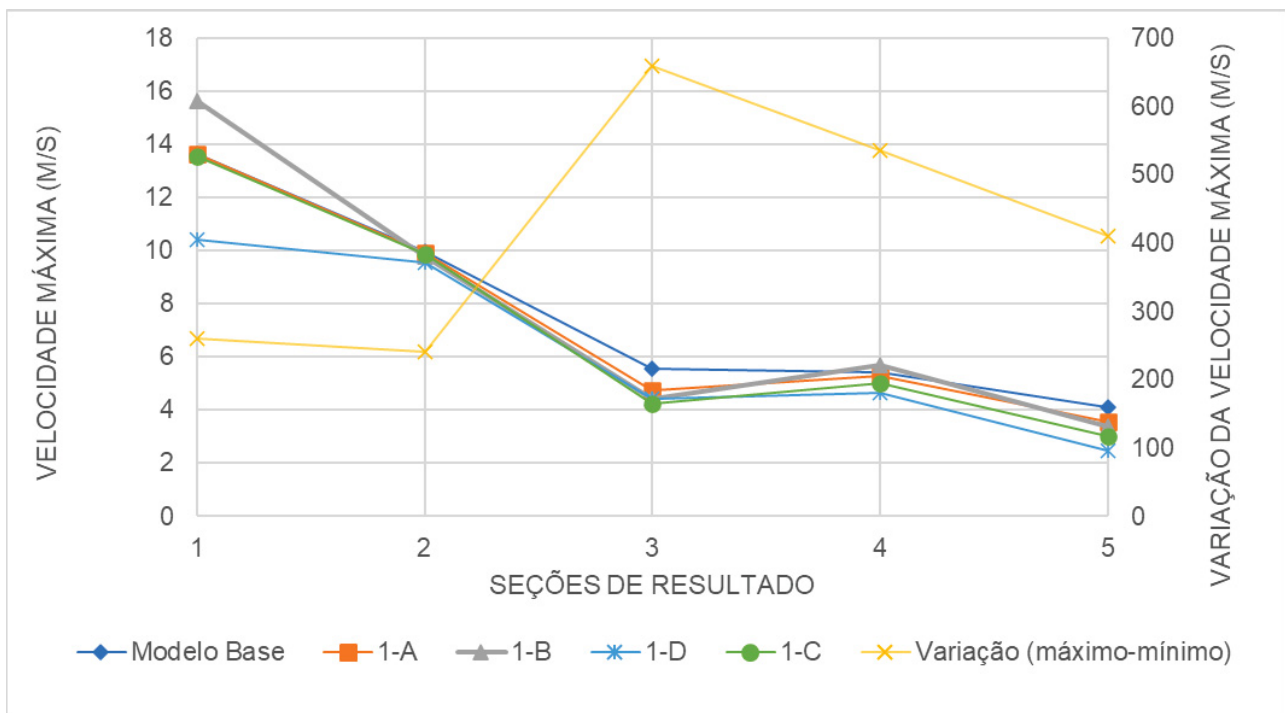


FIGURA 4.9 – VELOCIDADES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO

#### 4.1.4 Tempos de chegada

Na TABELA 4.5 serão especificadas os tempos de chegada por seção em cada simulação.

TABELA 4.5 – TEMPOS DE CHEGADA POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO

Tempos de chegada por seção de resultado (min)					
Modelos	Modelo Base	1-A	1-B	1-C	1-D
Tamanho da malha (m)	5	7,5	10	20	50
ST-01	7	7	7	7	8
ST-02	18	18	18	18	19
ST-03	33	33	33	35	36
ST-04	54	54	54	54	56
ST-05	76	76	76	78	78

Apresenta-se na FIGURA 4.10, para cada seção de resultado, uma comparação gráfica entre os tempos de chegada e o coeficiente de variação desse parâmetro obtido entre as simulações.

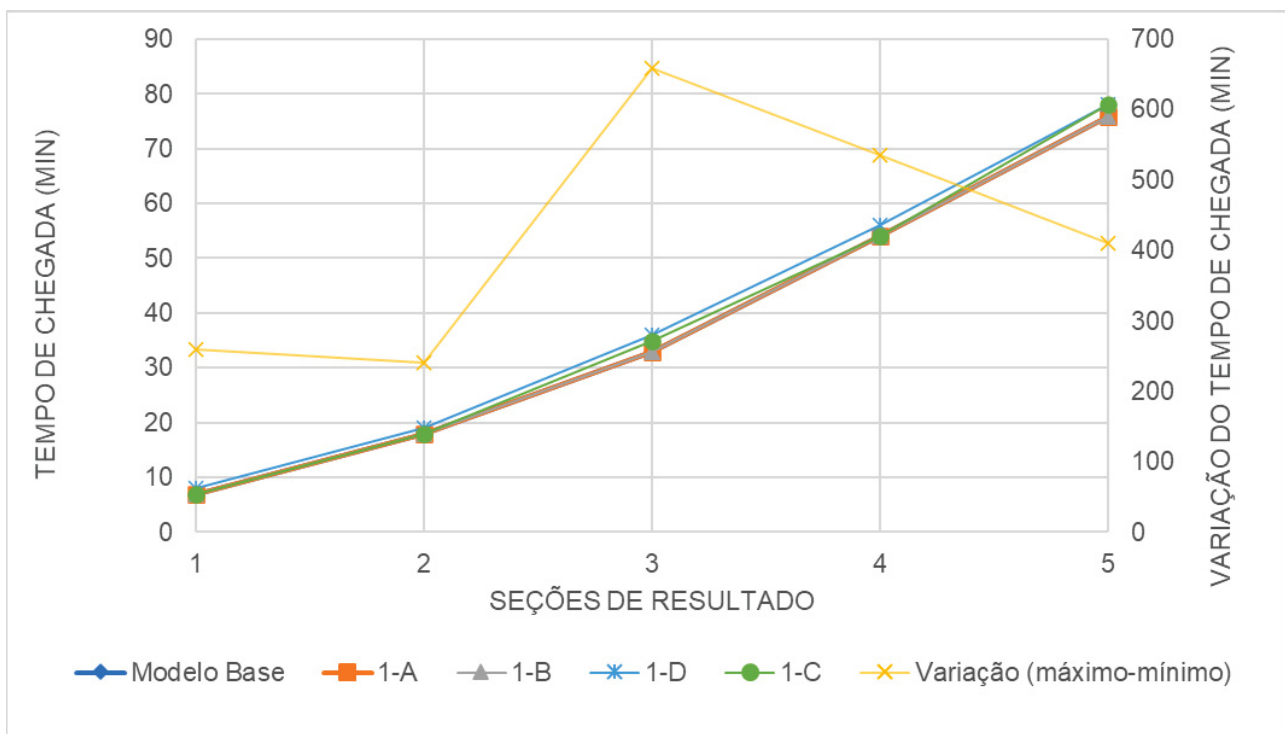


FIGURA 4.10 – TEMPOS DE CHEGADA POR SEÇÃO DE RESULTADO

#### 4.1.5 Envoltórias máximas

Na TABELA 4.6 serão especificadas as áreas das envoltórias máximas cada simulação.

TABELA 4.6 – ÁREAS DAS ENVOLTÓRIAS MÁXIMAS EM CADA SIMULAÇÃO

Áreas das envoltórias máximas (m <sup>2</sup> )					
Modelos	Modelo Base	1-A	1-B	1-C	1-D
Tamanho da malha (m)	5	7,5	10	20	50
Áreas (km <sup>2</sup> )	5,15	5,15	5,16	5,21	5,26

Apresentam-se na FIGURA 4.11 as envoltórias máximas obtidas nas simulações.

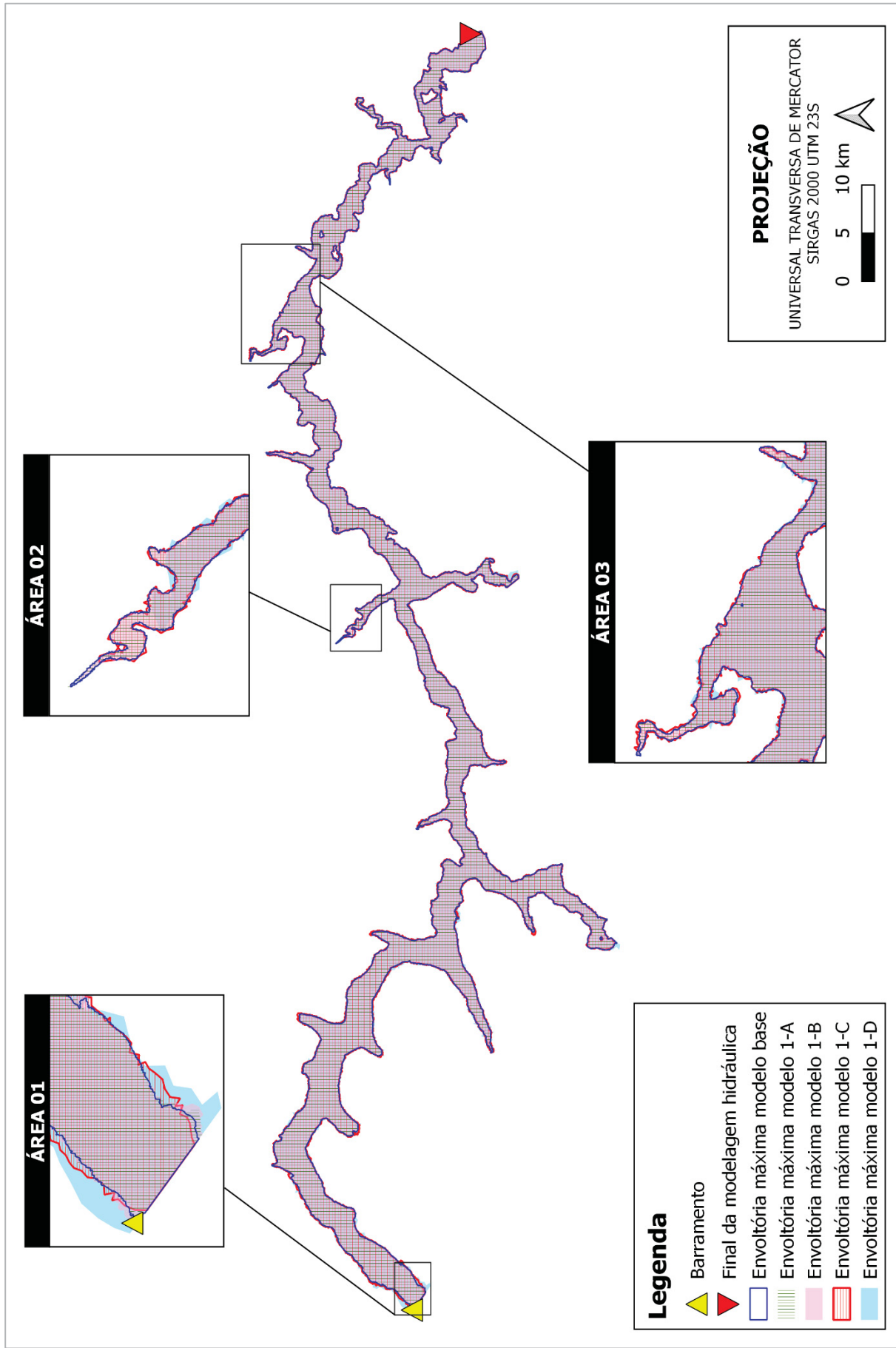


FIGURA 4.11 – ENVOLTÓRIAS MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO

#### 4.1.6 Discussão de resultados e tempo computacional

Na TABELA 4.7 é apresentado quadro resumo dos resultados apresentados neste subcapítulo, referentes à variação do tamanho das células da malha computacional. Ainda, apresenta-se adicionalmente o tempo computacional gasto para rodar cada simulação, uma vez que a escolha da malha pode ser considerada como um balanço entre qualidade de resultados e gasto computacional.

TABELA 4.7 – RESUMO DE RESULTADOS DA VARIAÇÃO DO TAMANHO DAS CÉLULAS DA MALHA COMPUTACIONAL E TEMPO COMPUTACIONAL

Quadro Resumo de resultados - Teste de Malha					
Modelos	Modelo Base	1-A	1-B	1-C	1-D
Tamanho da malha (m)	5	7,5	10	20	50
Vazões Máximas por seção de resultado (m <sup>3</sup> /s)					
ST-01	12.810	12.990	12.930	12.940	12.730
ST-02	10.820	10.800	10.790	10.900	10.660
ST-03	4.545	4.494	4.456	4.442	3.886
ST-04	3.009	2.959	2.905	2.845	2.473
ST-05	1.848	1.824	1.780	1.720	1.438
Profundidades Máximas por seção de resultado (m)					
ST-01	13,66	13,58	13,67	13,88	14,73
ST-02	12,81	12,85	12,93	12,96	13,52
ST-03	15,23	15,25	15,25	15,4	13,24
ST-04	8,88	8,83	8,8	8,78	8,42
ST-05	10,27	10,34	10,27	9,99	9,63
Velocidades Máximas por seção de resultado (m/s)					
ST-01	13,63	13,64	15,64	13,56	10,43
ST-02	9,98	9,93	9,77	9,87	9,56
ST-03	5,56	4,72	4,44	4,25	4,43
ST-04	5,41	5,29	5,68	5,01	4,63
ST-05	4,1	3,54	3,38	3,02	2,46
Tempos de chegada por seção de resultado (min)					
ST-01	00:00:07	00:00:07	00:00:07	00:00:07	00:00:08
ST-02	00:00:18	00:00:18	00:00:18	00:00:18	00:00:19
ST-03	00:00:33	00:00:33	00:00:33	00:00:35	00:00:36
ST-04	00:00:54	00:00:54	00:00:54	00:00:54	00:00:56
ST-05	00:01:16	00:01:16	00:01:16	00:01:18	00:01:18
Áreas das envoltórias máximas					
Áreas (km <sup>2</sup> )	5,15	5,15	5,16	5,21	5,26
Tempo computacional gasto					
Tempo (min)	112	64	34	10	2

A análise dos resultados das simulações de sensibilidade de malha revela que:

- Em termos de vazão máxima e hidrogramas, houve pouca variação de magnitude, sendo a tendência geral um aumento da vazão de pico quanto menor for o detalhamento da malha;
- Em termos de profundidade máxima, foram observados dois comportamentos distintos. No trecho inicial da simulação nas seções ST-01 e ST-02, as maiores profundidades se deram com a maior malha enquanto nas demais seções a maior profundidade deu-se nas menores malhas;
- Ao se observar as velocidades, o comportamento geral é de se ter maiores velocidades com menores malhas;
- Os tempos de chegada não variaram muito, porém existe uma diferença de minutos com maior tempo de chegada quanto maior for a malha e essa diferença se acumula, gerando maiores diferenças nas seções mais distantes da barragem, em que o escoamento percorre maior trecho da malha;
- Em termos de áreas das manchas de inundação existe pequena diferença de quanto maior a malha maior a envoltória com maiores diferenças no início do trecho de propagação; e
- O esforço computacional se difere muito e varia entre 2 e 112 minutos nas simulações rodadas, sendo a maior malha a mais rápida de rodar pela menor quantidade de cálculos.

Avalia-se que quanto menor a malha maior precisão na envoltória se tem, no entanto, as diferenças de magnitude dos parâmetros analisados revelam que as duas menores malhas testadas, de 5 e 7,5 metros possuem praticamente o mesmo resultado e não compensaria o gasto computacional da simulação com células de 5 m.

A variação de parâmetros, representados nos gráficos deste capítulo foi maior na seção 3. Isso pelos valores da simulação 1-D com malha de 50m. Se os dados dessa simulação forem excluídos do cálculo da variação de parâmetros, observa-se pouca variação dos parâmetros entre as simulações de malhas entre 5m e 20m para o caso de estudo, indicando-se o uso da malha de 20m como mais vantajosa para o estudo dado o tempo computacional reduzido.

## 4.2 SENSIBILIDADE EM RELAÇÃO AO COEFICIENTE DE RUGOSIDADE

Compara-se neste item os resultados obtidos nas simulações 2-A, “Modelo Base” e 2-B, dada a variação dos coeficientes de rugosidade em 20% para menos (2-A) e para mais (2-B) frente aos valores médios bibliográficos adotados no Modelo Base.

### 4.2.1 Hidrogramas e vazões máximas

Nas FIGURA 4.12 a FIGURA 4.14, serão apresentados os hidrogramas obtidos nas 5 seções de resultado para cada simulação.

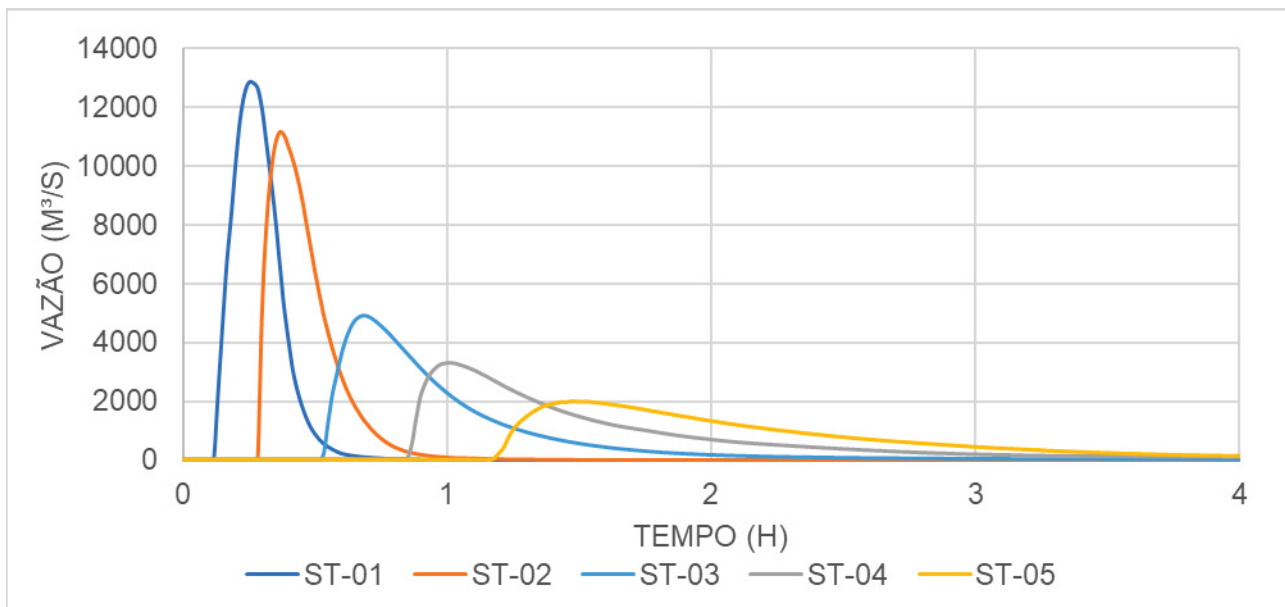


FIGURA 4.12 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 2-A

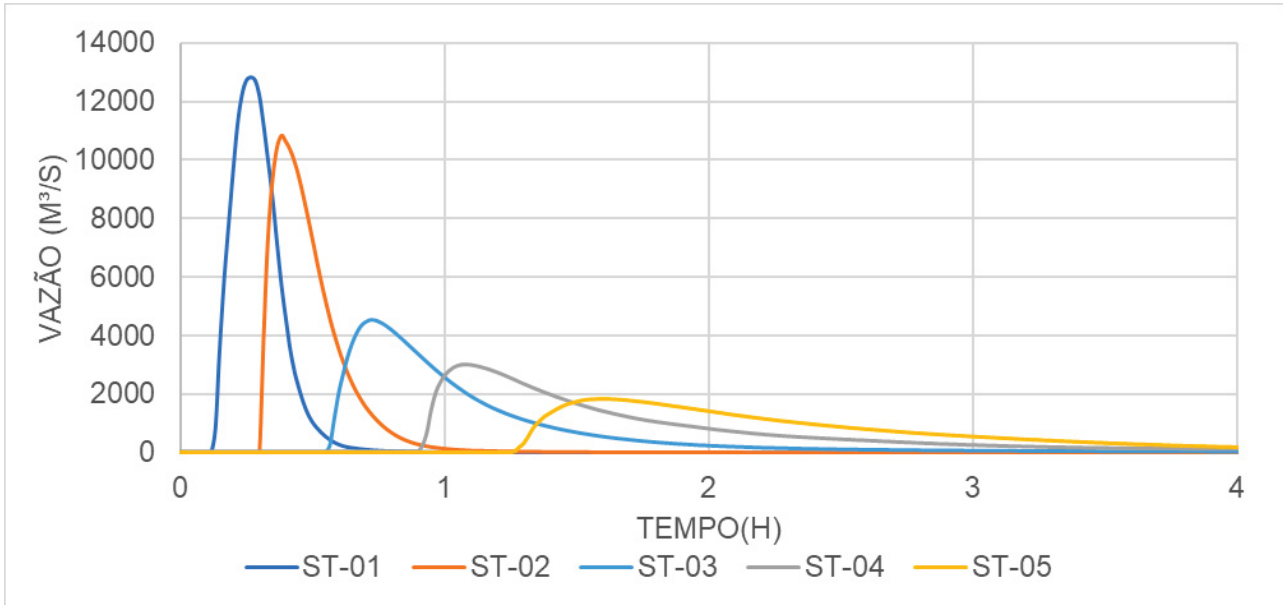


FIGURA 4.13 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO MODELO BASE

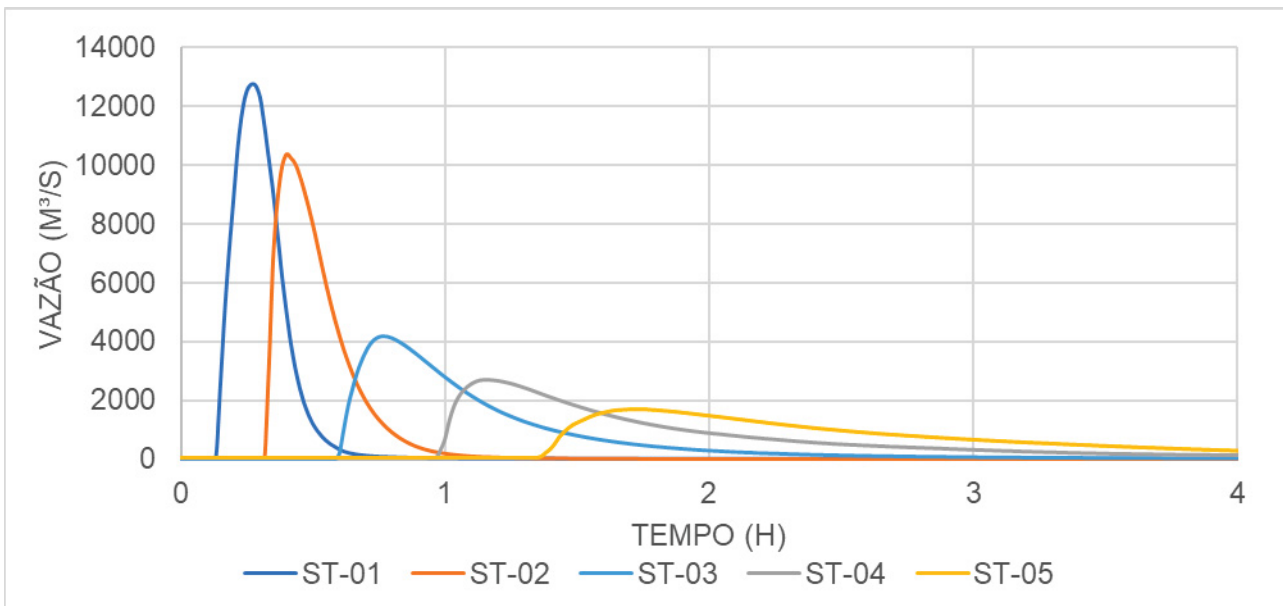


FIGURA 4.14 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 2-B

Na TABELA 4.8 serão especificadas as vazões máximas por seção em cada simulação.

TABELA 4.8 – VAZÕES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO

Vazões Máximas por seção de resultado (m <sup>3</sup> /s)			
Modelos	2-A	Modelo Base	2-B
Coefficiente de rugosidade	Limite Inferior (x0,8)	Valores médios bibliográficos	Limite Superior (x1,2)
ST-01	12870	12810	12740
ST-02	11140	10820	10370
ST-03	4928	4545	4200
ST-04	3317	3009	2684
ST-05	2016	1848	1696

Apresenta-se na FIGURA 4.15, para cada seção de resultado, uma comparação gráfica entre as vazões máximas e o coeficiente de variação desse parâmetro obtido entre as simulações.

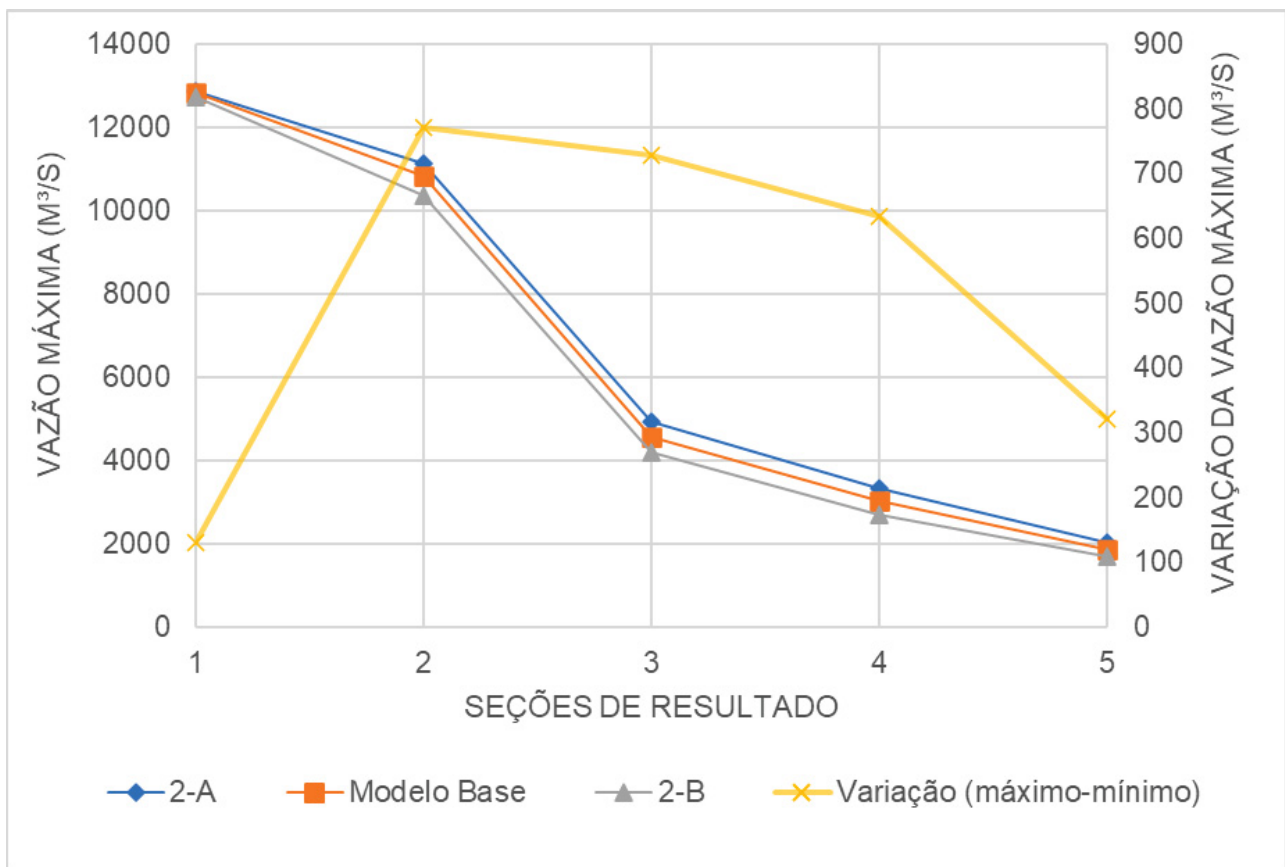


FIGURA 4.15 – VAZÕES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO

#### 4.2.2 Profundidades máximas

Na TABELA 4.9 serão especificadas as profundidades máximas por seção em cada simulação.

TABELA 4.9 – PROFUNDIDADES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO

Profundidades Máximas por seção de resultado (m)			
Modelos	2-A	Modelo Base	2-B
Coefficiente de rugosidade	Limite Inferior (x0,8)	Valores médios bibliográficos	Limite Superior (x1,2)
ST-01	13,64	13,66	14,83
ST-02	12,43	12,81	13,05
ST-03	15,15	15,23	15,28
ST-04	8,77	8,88	8,94
ST-05	10,16	10,27	10,19

Apresenta-se nas FIGURA 4.16, para cada seção de resultado, uma comparação gráfica entre as profundidades máximas e o coeficiente de variação desse parâmetro obtido entre as simulações.

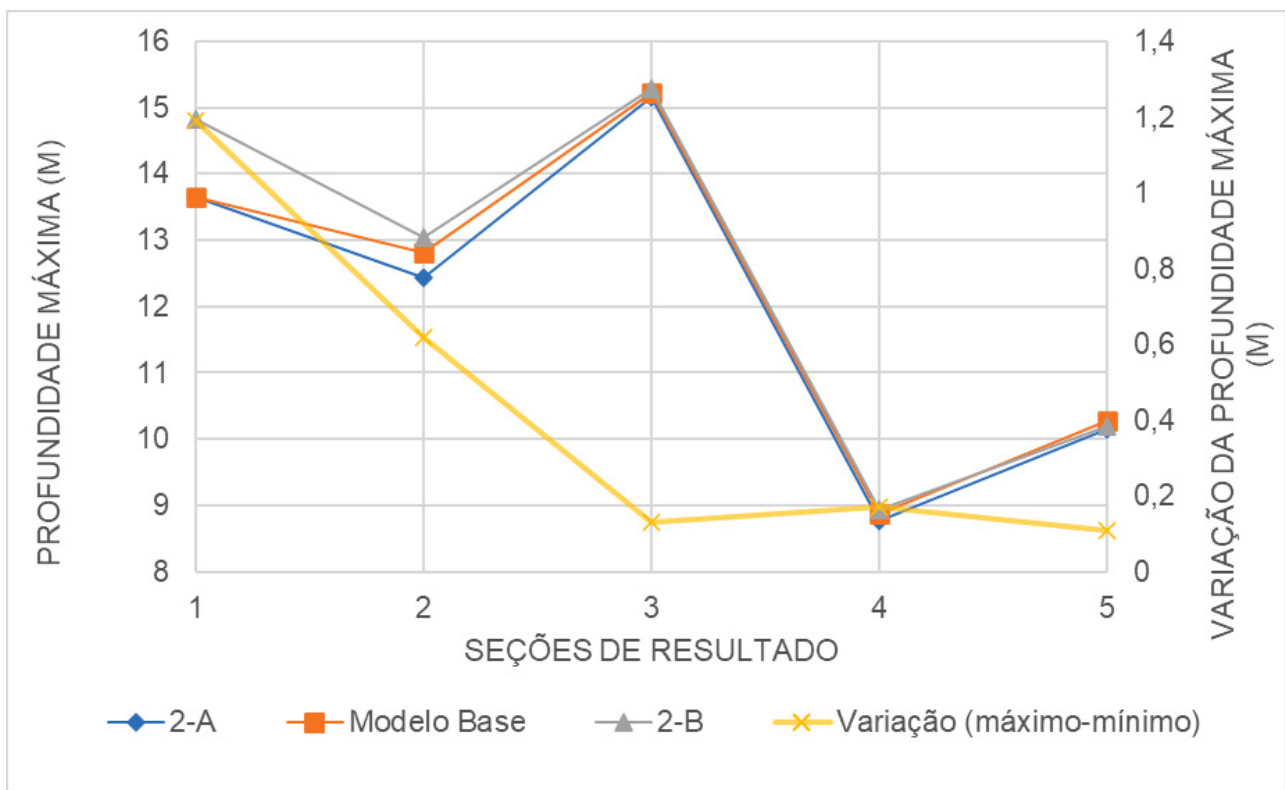


FIGURA 4.16 – PROFUNDIDADES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO

### 4.2.3 Velocidades máximas

Na TABELA 4.10 serão especificadas as velocidades máximas por seção em cada simulação.

TABELA 4.10 – VELOCIDADES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO

Velocidades Máximas por seção de resultado (m/s)			
Modelos	2-A	Modelo Base	2-B
Coefficiente de rugosidade	Limite Inferior (x0,8)	Valores médios bibliográficos	Limite Superior (x1,2)
ST-01	14,11	13,63	12,89
ST-02	10,77	9,98	9,21
ST-03	5,72	5,56	5,65
ST-04	6,06	5,41	4,98
ST-05	5,14	4,10	3,33

Apresenta-se na FIGURA 4.17, para cada seção de resultado, uma comparação gráfica entre as velocidades máximas e o coeficiente de variação desse parâmetro obtido entre as simulações.

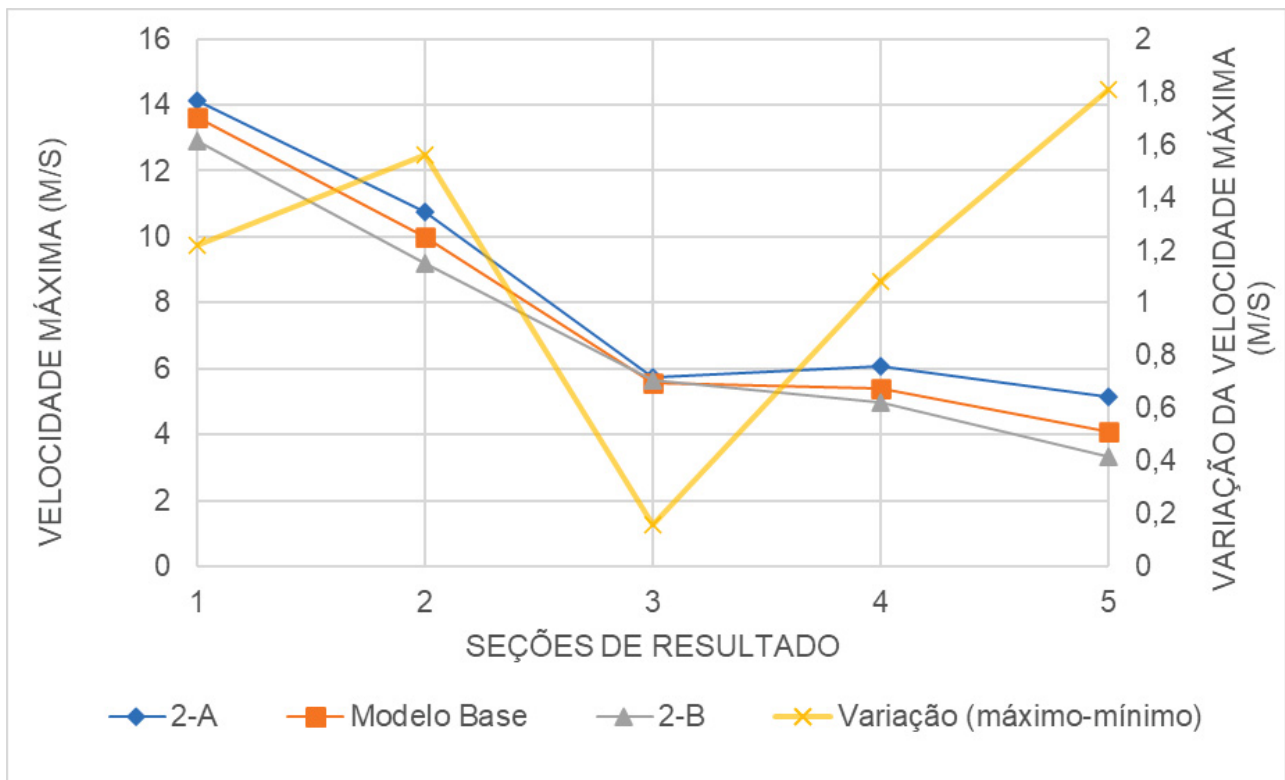


FIGURA 4.17 – VELOCIDADES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO

#### 4.2.4 Tempos de chegada

Na TABELA 4.11 serão especificadas os tempos de chegada por seção em cada simulação.

TABELA 4.11 – TEMPOS DE CHEGADA POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO

Tempos de chegada por seção de resultado (min)			
Modelos	2-A	Modelo Base	2-B
Coefficiente de rugosidade	Limite Inferior (x0,8)	Valores médios bibliográficos	Limite Superior (x1,2)
ST-01	7	7	7
ST-02	18	18	20
ST-03	31	33	35
ST-04	52	54	58
ST-05	71	76	82

Apresenta-se nas FIGURA 4.18, para cada seção de resultado, uma comparação gráfica entre os tempos de chegada e o coeficiente de variação desse parâmetro obtido entre as simulações.

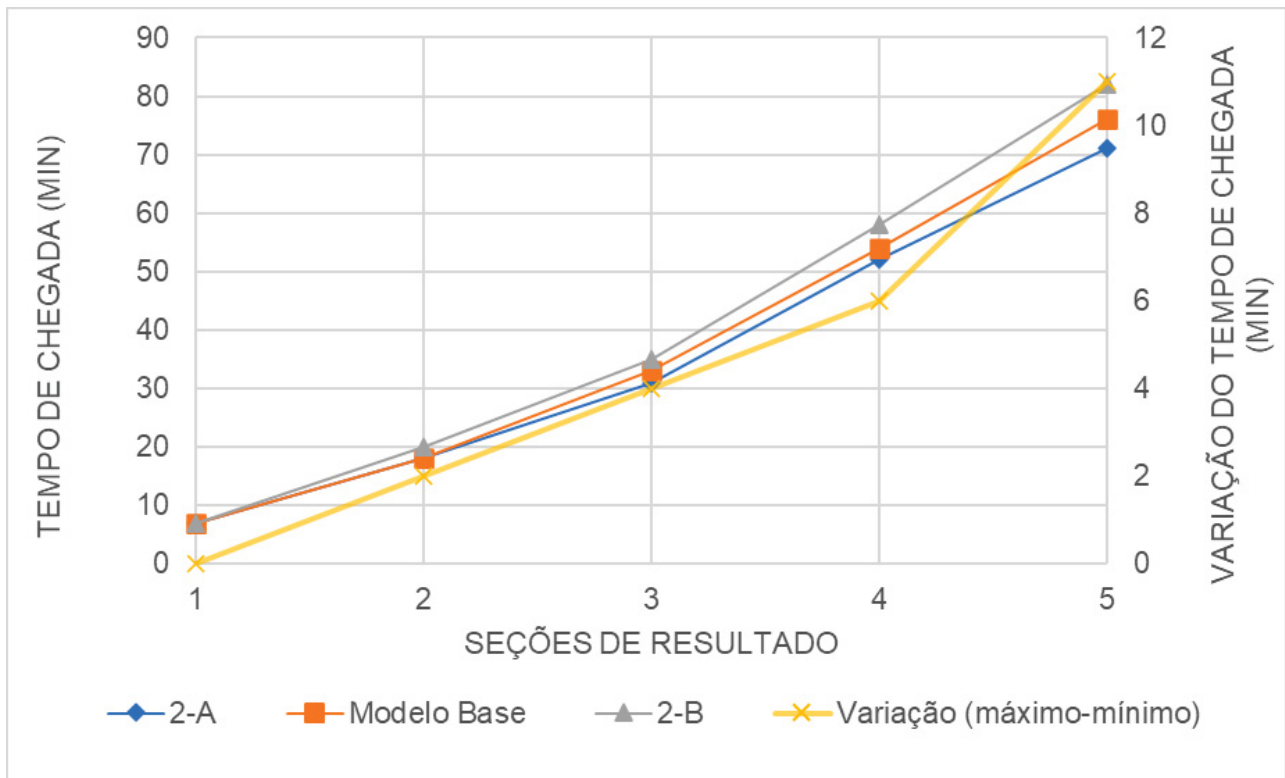


FIGURA 4.18 – TEMPOS DE CHEGADA POR SEÇÃO DE RESULTADO

#### 4.2.5 Envoltórias máximas

Na TABELA 4.12 serão especificadas as áreas das envoltórias máximas cada simulação.

TABELA 4.12 – ÁREAS DAS ENVOLTÓRIAS MÁXIMAS EM CADA SIMULAÇÃO

Áreas das envoltórias máximas (m <sup>2</sup> )			
Modelos	2-A	Modelo Base	2-B
Coefficiente de rugosidade	Limite Inferior (x0,8)	Valores médios bibliográficos	Limite Superior (x1,2)
Áreas (km <sup>2</sup> )	5,11	5,15	5,20

Apresentam-se na FIGURA 4.19 as envoltórias máximas obtidas nas simulações.

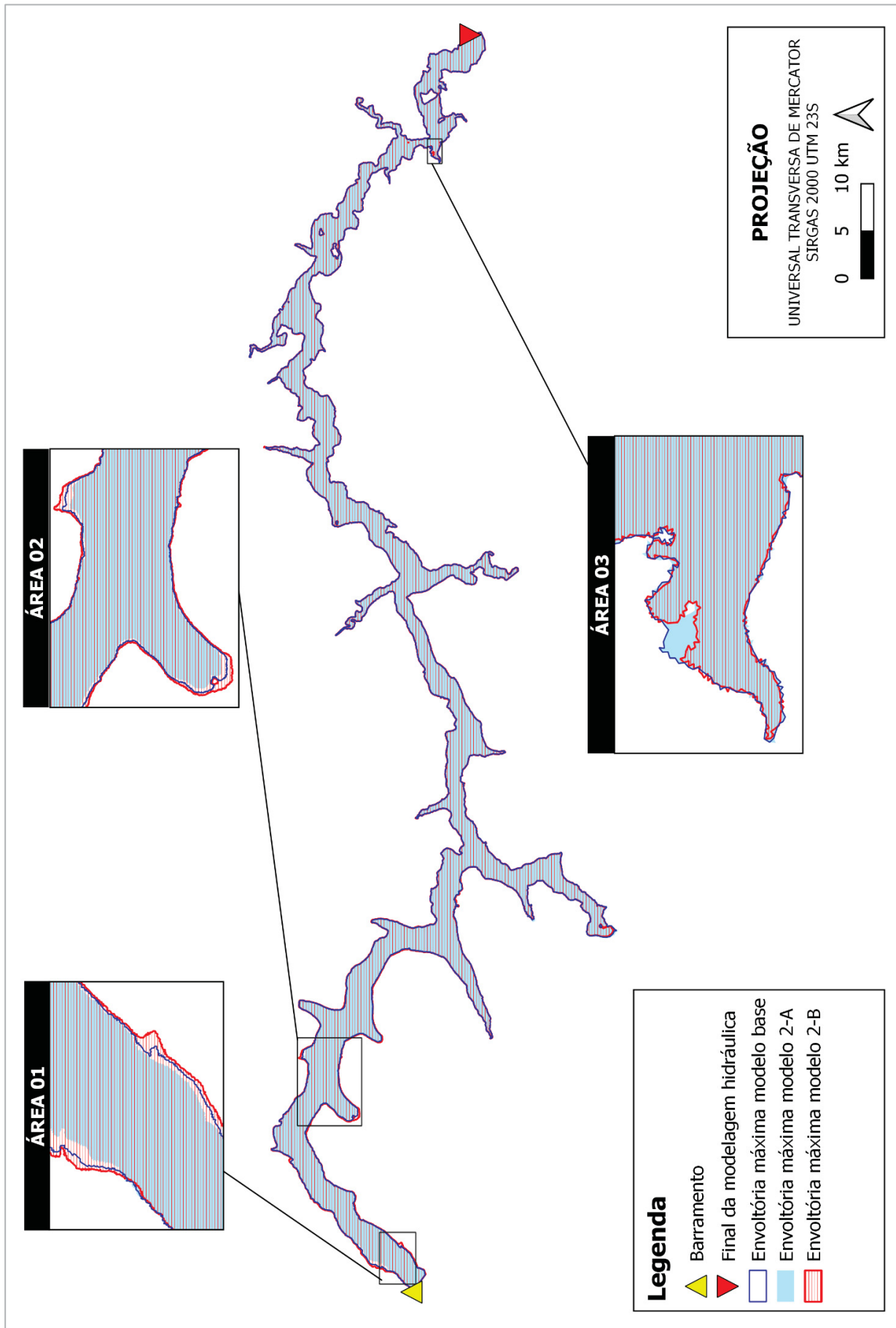


FIGURA 4.19 – ENVOLTÓRIAS MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO

#### 4.2.6 Discussão de resultados e tempo computacional

Na TABELA 4.13 é apresentado quadro resumo dos resultados apresentados neste subcapítulo, referentes à variação dos coeficientes de rugosidade. Ainda, apresenta-se adicionalmente o tempo computacional gasto para rodar cada simulação.

TABELA 4.13 – RESUMO DE RESULTADOS DA VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE RUGOSIDADE E TEMPO COMPUTACIONAL

Quadro Resumo de resultados - Teste de Coeficiente de Rugosidade			
Modelos	2-A	Modelo Base	2-B
Coeficiente de rugosidade	Limite Inferior (x0,8)	Valores médios bibliográficos	Limite Superior (x1,2)
Vazões Máximas por seção de resultado (m <sup>3</sup> /s)			
ST-01	12870	12810	12740
ST-02	11140	10820	10370
ST-03	4928	4545	4200
ST-04	3317	3009	2684
ST-05	2016	1848	1696
Profundidades Máximas por seção de resultado (m)			
ST-01	13,64	13,66	14,83
ST-02	12,43	12,81	13,05
ST-03	15,15	15,23	15,28
ST-04	8,77	8,88	8,94
ST-05	10,16	10,27	10,19
Velocidades Máximas por seção de resultado (m/s)			
ST-01	14,11	13,63	12,89
ST-02	10,77	9,98	9,21
ST-03	5,72	5,56	5,65
ST-04	6,06	5,41	4,98
ST-05	5,14	4,1	3,33
Tempos de chegada por seção de resultado (min)			
ST-01	00:00:07	00:00:07	00:00:07
ST-02	00:00:18	00:00:18	00:00:20
ST-03	00:00:31	00:00:33	00:00:35
ST-04	00:00:52	00:00:54	00:00:58
ST-05	00:01:11	00:01:16	00:01:22
Áreas das envoltórias máximas			
Áreas (km <sup>2</sup> )	5,11	5,15	5,2
Tempo computacional gasto			
Tempo (min)	112	112	155

A análise dos resultados das simulações de sensibilidade do coeficiente de rugosidade revela que:

- Em termos de vazão máxima e hidrogramas, houve pouca variação de magnitude, sendo a tendência geral um aumento da vazão de pico quanto menor for o valor do coeficiente de rugosidade;
- Em termos de profundidade máxima, foi observado o comportamento geral de aumento das profundidades com o aumento do valor do coeficiente de rugosidade;
- Ao se observar as velocidades, o comportamento geral é de se ter maiores velocidades com menores valores de coeficiente de rugosidade;
- Os tempos de chegada variaram, sendo um maior tempo de chegada quanto maior o coeficiente de rugosidade. Ainda, quanto mais distante da barragem, maior essa diferença, dado o maior tempo de efeito do contato com a maior rugosidade;
- Em termos de áreas das manchas de inundação existe pequena diferença em que quanto maior o coeficiente de rugosidade, maior a área da mancha; e
- O esforço computacional se difere pouco, com maior tempo na simulação com maiores coeficientes de rugosidade, dado o maior número de células molhadas a serem calculadas.

Os resultados demonstram que maiores coeficientes de rugosidade aumentam o tamanho da mancha, diminuem a velocidade do escoamento e aumentam o tempo de chegada. Estes resultados revelam que dependendo do propósito da simulação, pode-se calibrar o coeficiente de rugosidade de forma diferente. Por exemplo, para simulações em que se objetiva ter a população atingida pela ruptura, indica-se uso de maiores coeficientes para se ter uma mancha com maior envoltória, trabalhando a favor da segurança. Já para um plano de evacuação e cálculo de tempos disponíveis para salvamento, recomenda-se uso de menores valores de coeficiente de rugosidade, a fim de se obter menores tempos de chegada e mais uma vez trabalhar a favor da segurança.

### 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE ESCOAMENTO NEWTONIANO E NÃO NEWTONIANO COM MODELO REOLÓGICO QUADRÁTICO, *FULL BINGHAM* E *HERSCHEL-BULKLEY*

Compara-se neste item os resultados obtidos nas simulações 3-A, “Modelo Base”, 3-B e 3-C dada a variação da consideração de fluido newtoniano (3-A) e não newtoniano com uso dos equacionamentos Quadrático (Modelo Base), Full Bingham (3-B) e Herschel-Bulkley (3-C).

#### 4.3.1 Hidrogramas e vazões máximas

Nas FIGURA 4.20 a FIGURA 4.23 serão apresentados os hidrogramas obtidos nas 5 seções de resultado para cada simulação.

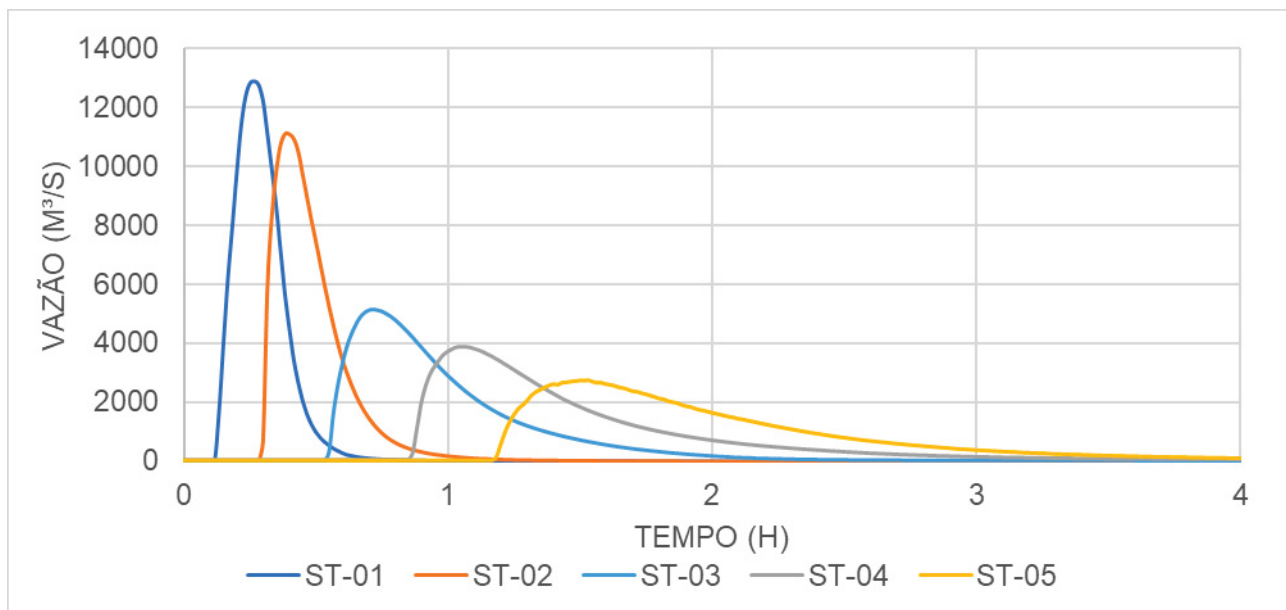


FIGURA 4.20 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 3-A

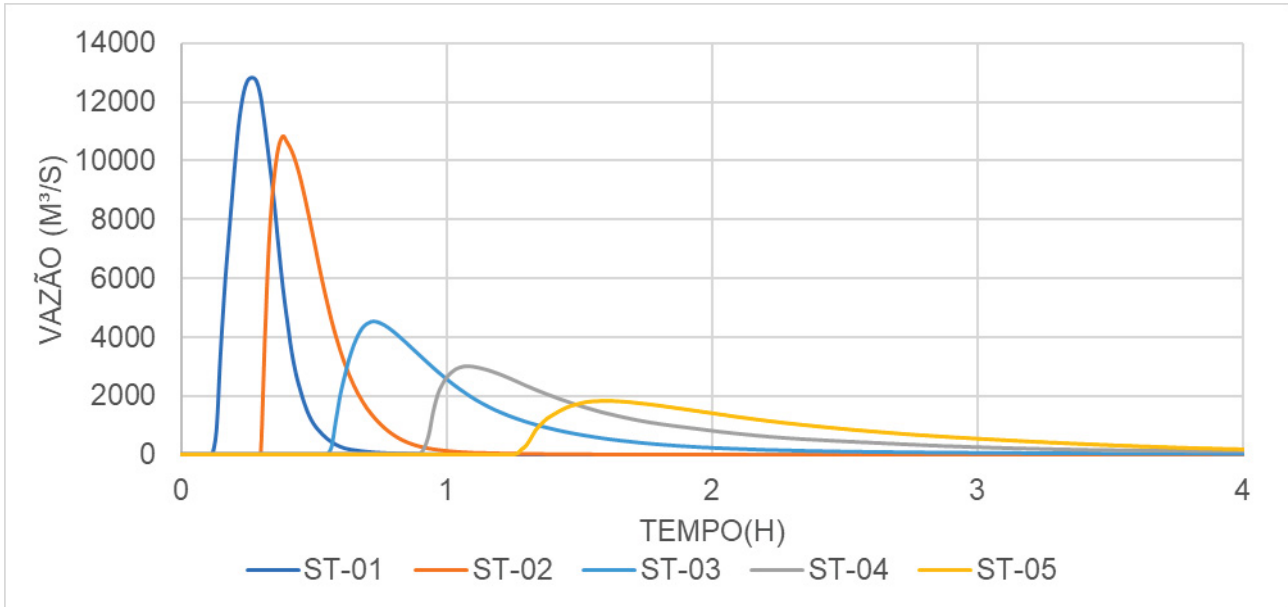


FIGURA 4.21 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO MODELO BASE

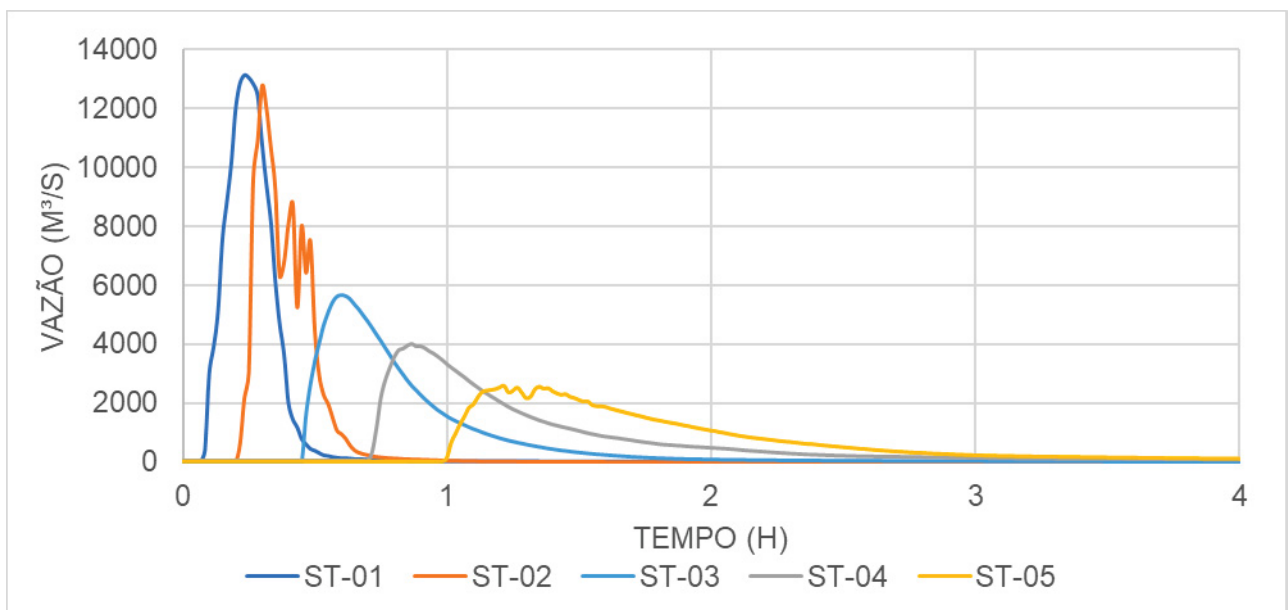


FIGURA 4.22 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 3-B

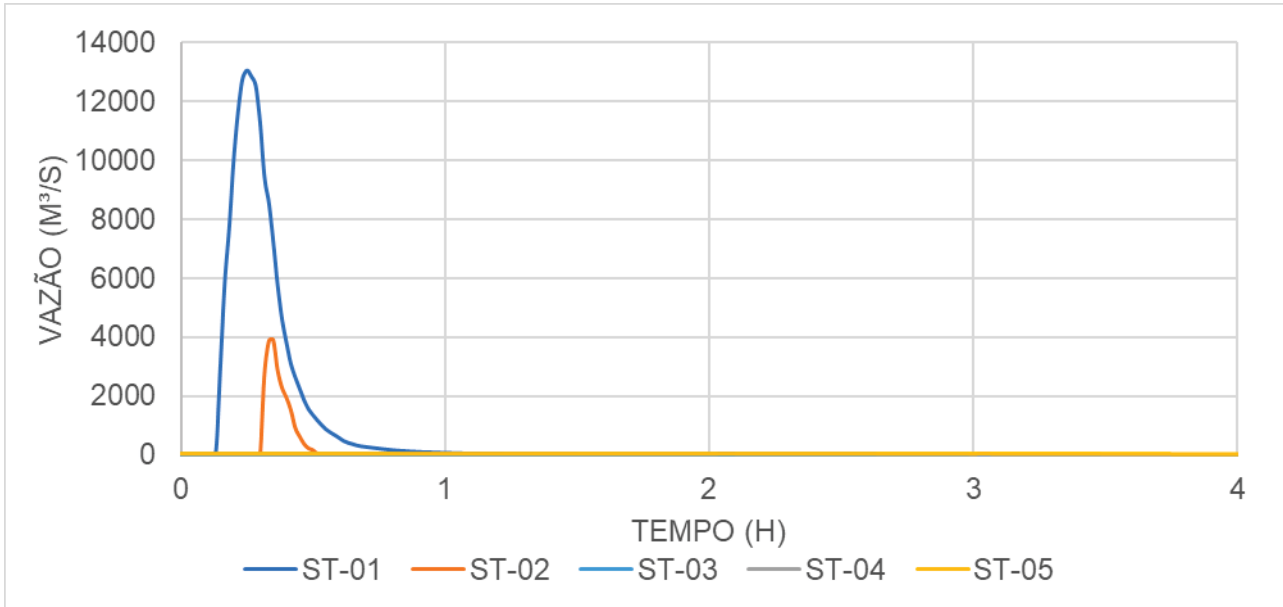


FIGURA 4.23 – HIDROGRAMAS DA SIMULAÇÃO 3-C

Na TABELA 4.14 serão especificadas as vazões máximas por seção em cada simulação.

TABELA 4.14 – VAZÕES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO

Vazões Máximas por seção de resultado (m <sup>3</sup> /s)				
Modelos	3-A	Modelo Base	3-B	3-C
Tipo de Fluido/ Equacionamento reológico	Newtoniano/ NA	Não Newtoniano/ Quadrático	Não Newtoniano/ <i>Full Bingham</i>	Não Newtoniano/ Herschel-Bulkley
ST-01	12880	12810	13160	13070
ST-02	11060	10820	12770	3894
ST-03	5141	4545	5689	7
ST-04	3891	3009	3990	32
ST-05	2729	1848	2577	30

NA - Não se Aplica

Apresenta-se na FIGURA 4.24, para cada seção de resultado, uma comparação gráfica entre as vazões máximas e o coeficiente de variação desse parâmetro obtido entre as simulações.

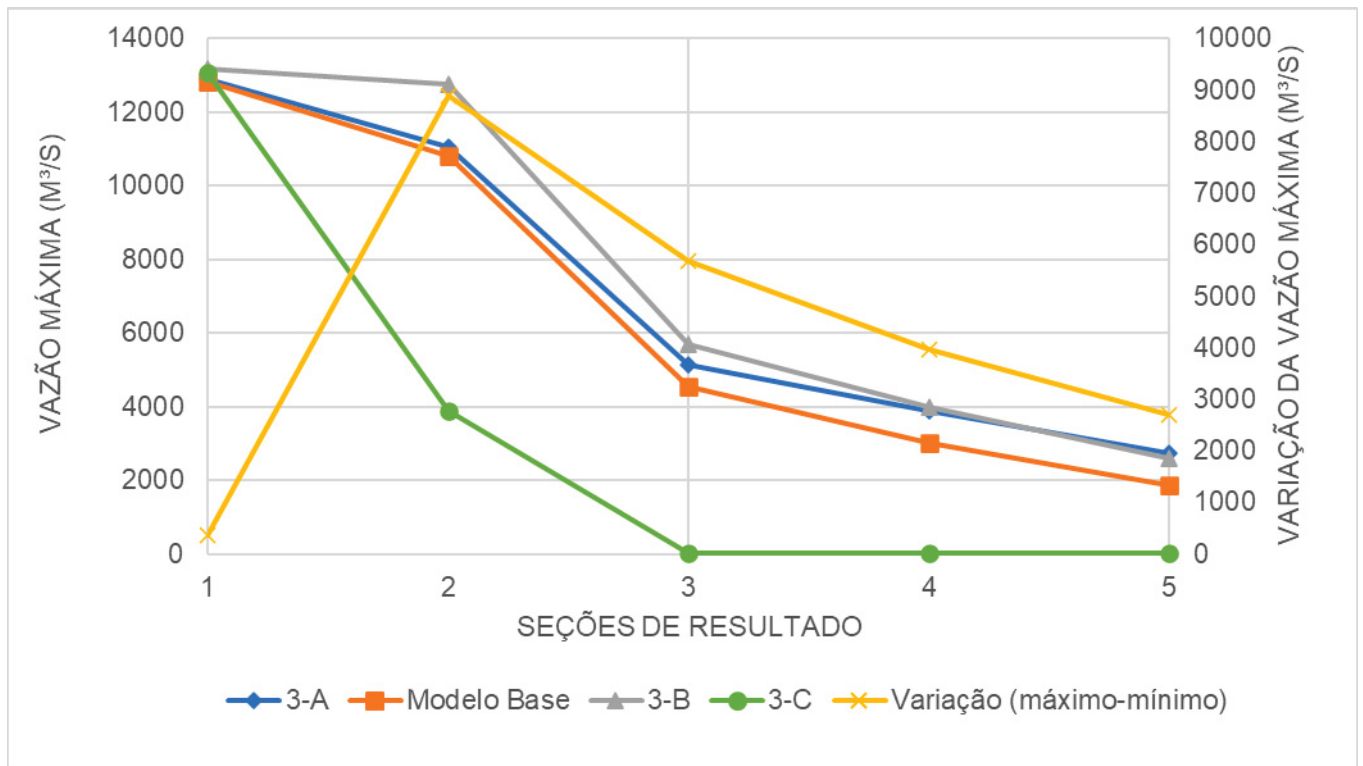


FIGURA 4.24 – VAZÕES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO

### 4.3.2 Profundidades máximas

Na TABELA 4.15 serão especificadas as profundidades máximas por seção em cada simulação.

TABELA 4.15 – PROFUNDIDADES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO

Profundidades Máximas por seção de resultado (m)				
Modelos	3-A	Modelo Base	3-B	3-C
Tipo de Fluido/ Equacionamento reológico	Newtoniano/ NA	Não Newtoniano/ Quadrático	Não Newtoniano/ <i>Full Bingham</i>	Não Newtoniano/ Herschel-Bulkley
ST-01	13,12	13,66	8,48	13,4
ST-02	12,84	12,81	13,88	10,03
ST-03	15,45	15,23	14,23	1,33
ST-04	9,19	8,88	8,41	0,9
ST-05	11,71	10,27	10,98	1,58

NA - Não se Aplica

Apresenta-se na FIGURA 4.25, para cada seção de resultado, uma comparação gráfica entre as profundidades máximas e o coeficiente de variação desse parâmetro obtido entre as simulações.

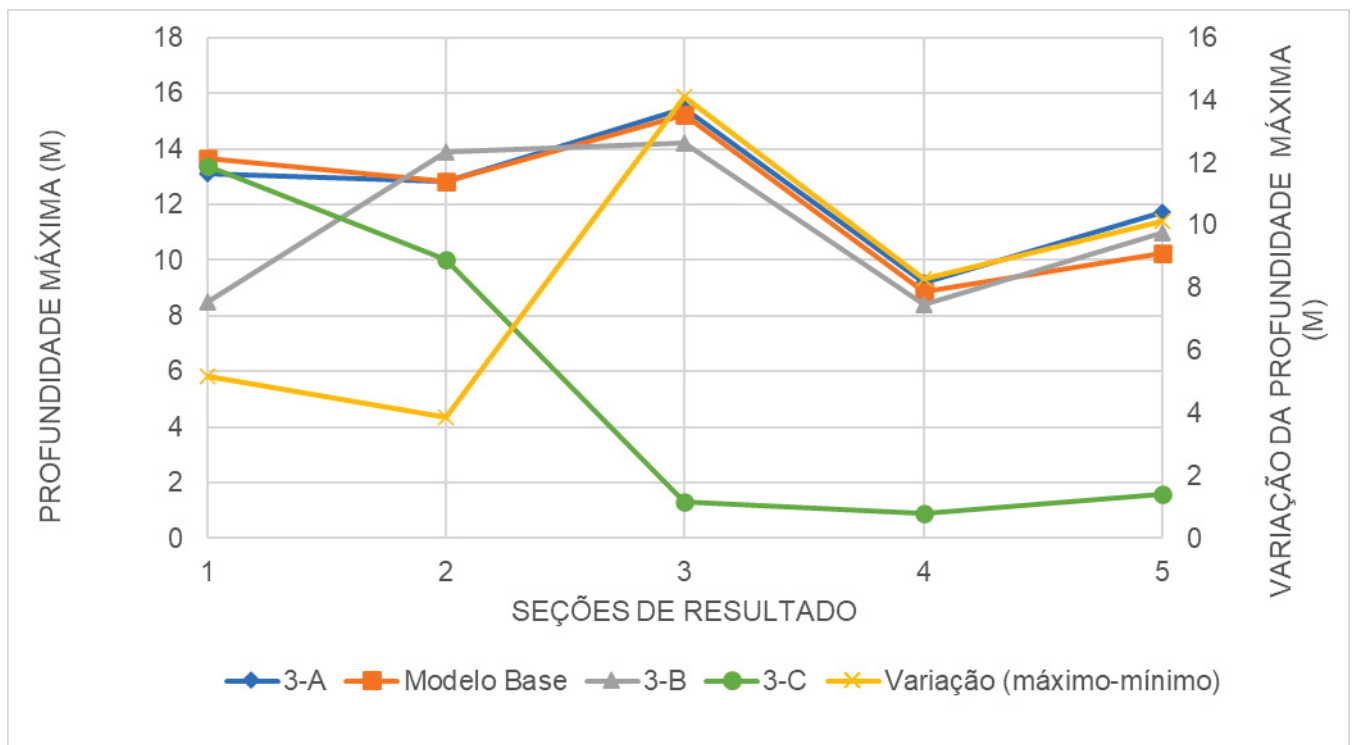


FIGURA 4.25 – PROFUNDIDADES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO

### 4.3.3 Velocidades máximas

Na TABELA 4.16 serão especificadas as velocidades máximas por seção em cada simulação.

TABELA 4.16 – VELOCIDADES MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO

Velocidades Máximas por seção de resultado (m/s)				
Modelos	3-A	Modelo Base	3-B	3-C
Tipo de Fluido/ Equacionamento reológico	Newtoniano/ NA	Não Newtoniano/ Quadrático	Não Newtoniano/ <i>Full Bingham</i>	Não Newtoniano/ Herschel-Bulkley
ST-01	13,99	13,63	31,8	14,27
ST-02	10,12	9,98	24,75	6,69
ST-03	6,12	5,56	11,23	0,72
ST-04	6,16	5,41	10,76	2,02
ST-05	5,68	4,10	10,25	1,35

NA - Não se Aplica

Apresenta-se na FIGURA 4.26, para cada seção de resultado, uma comparação gráfica entre as velocidades máximas e o coeficiente de variação desse parâmetro obtido entre as simulações.

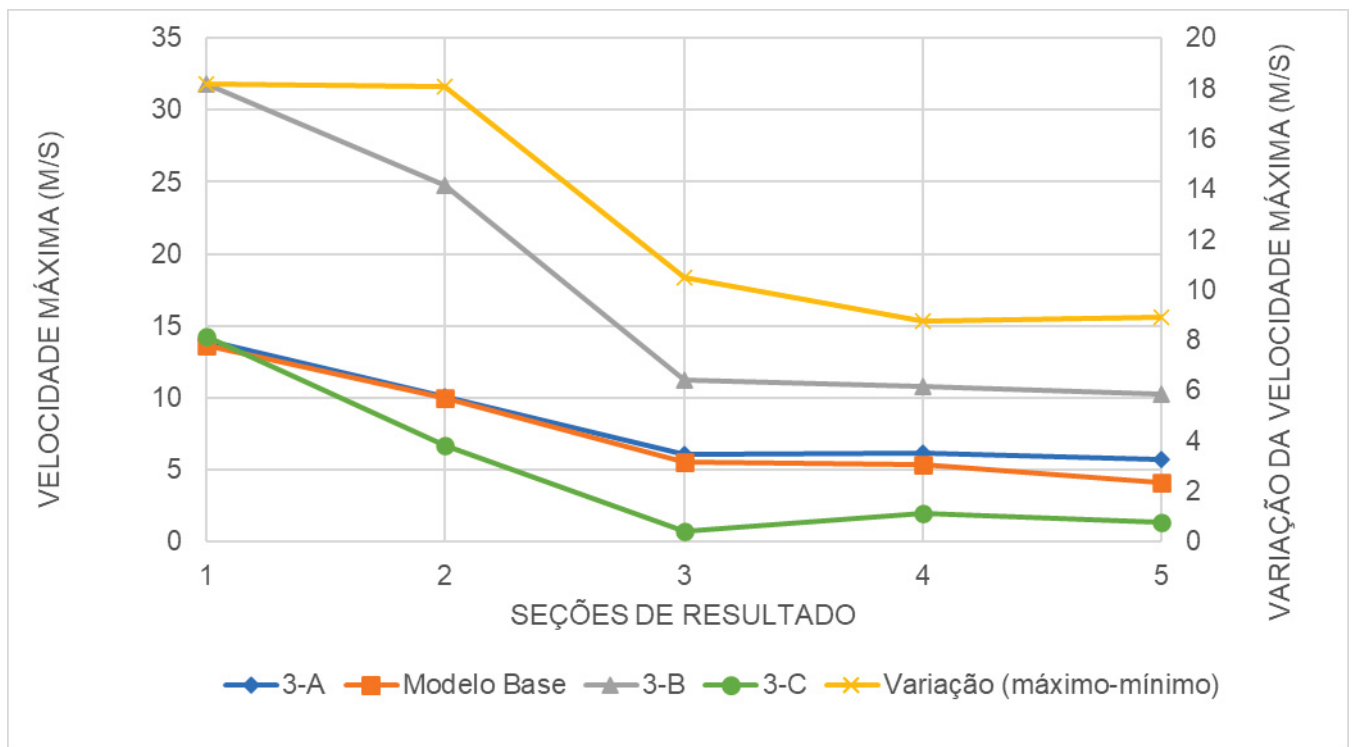


FIGURA 4.26 – VELOCIDADES MÁXIMAS POR SEÇÃO DE RESULTADO

#### 4.3.4 Tempos de chegada

Na TABELA 4.17 serão especificadas os tempos de chegada por seção em cada simulação.

TABELA 4.17 – TEMPOS DE CHEGADA POR SIMULAÇÃO EM CADA SEÇÃO DE RESULTADO

Tempos de chegada por seção de resultado (min)				
Modelos	3-A	Modelo Base	3-B	3-C
Tipo de Fluido/ Equacionamento reológico	Newtoniano/ NA	Não Newtoniano/ Quadrático	Não Newtoniano/ <i>Full Bingham</i>	Não Newtoniano/ Herschel-Bulkley
ST-01	7	7	5	7
ST-02	18	18	13	18
ST-03	33	33	28	NA
ST-04	52	54	43	NA
ST-05	71	76	60	NA

NA - Não se Aplica

Apresenta-se na FIGURA 4.27, para cada seção de resultado, uma comparação gráfica entre os tempos de chegada e o coeficiente de variação desse parâmetro obtido entre as simulações.

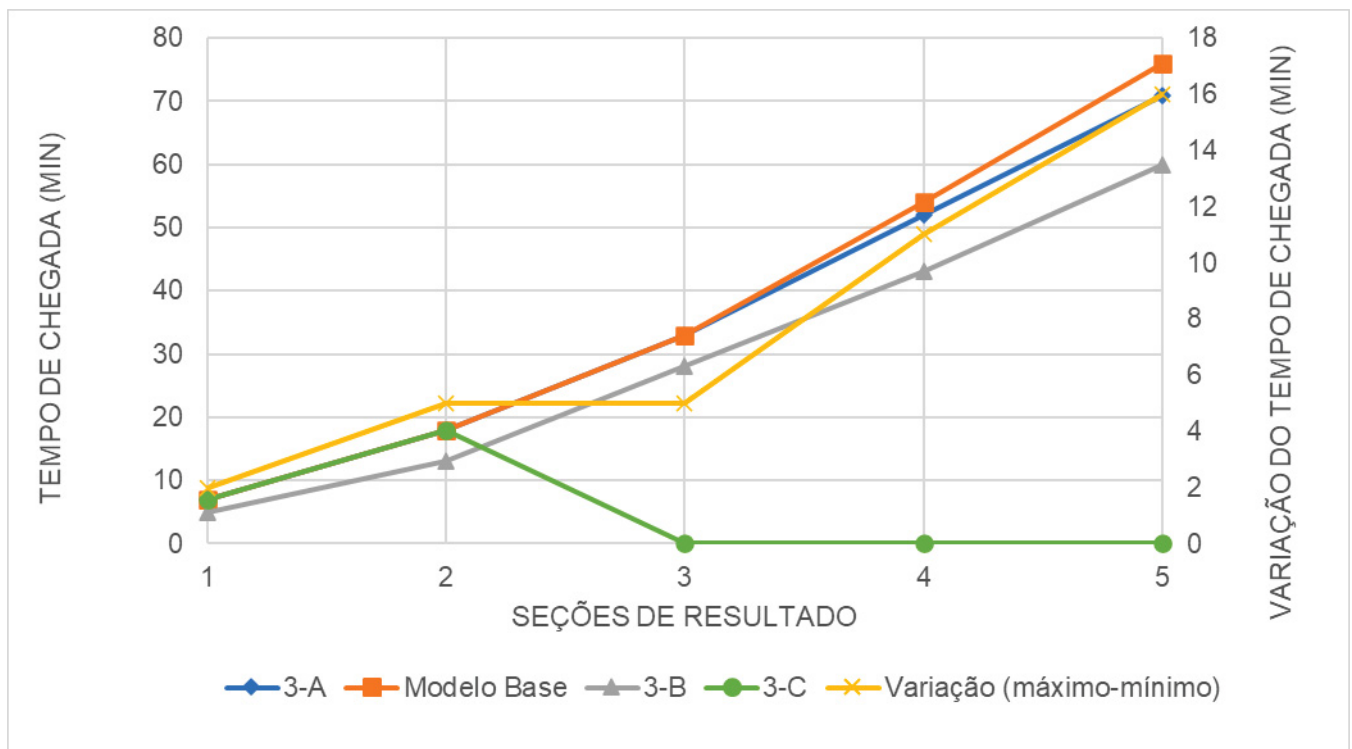


FIGURA 4.27 – TEMPOS DE CHEGADA POR SEÇÃO DE RESULTADO

#### 4.3.5 Envoltórias máximas

Na TABELA 4.18 serão especificadas as áreas das envoltórias máximas cada simulação.

TABELA 4.18 – ÁREAS DAS ENVOLTÓRIAS MÁXIMAS EM CADA SIMULAÇÃO

Áreas das envoltórias máximas (m <sup>2</sup> )				
Modelos	3-A	Modelo Base	3-B	3-C
Tipo de Fluido/ Equacionamento reológico	Newtoniano/ NA	Não Newtoniano/ Quadrático	Não Newtoniano/ <i>Full Bingham</i>	Não Newtoniano/ Herschel-Bulkley
Áreas (km <sup>2</sup> )	5,42	5,15	6,47	2,65

NA - Não se Aplica

Apresentam-se na FIGURA 4.28 as envoltórias máximas obtidas nas simulações.

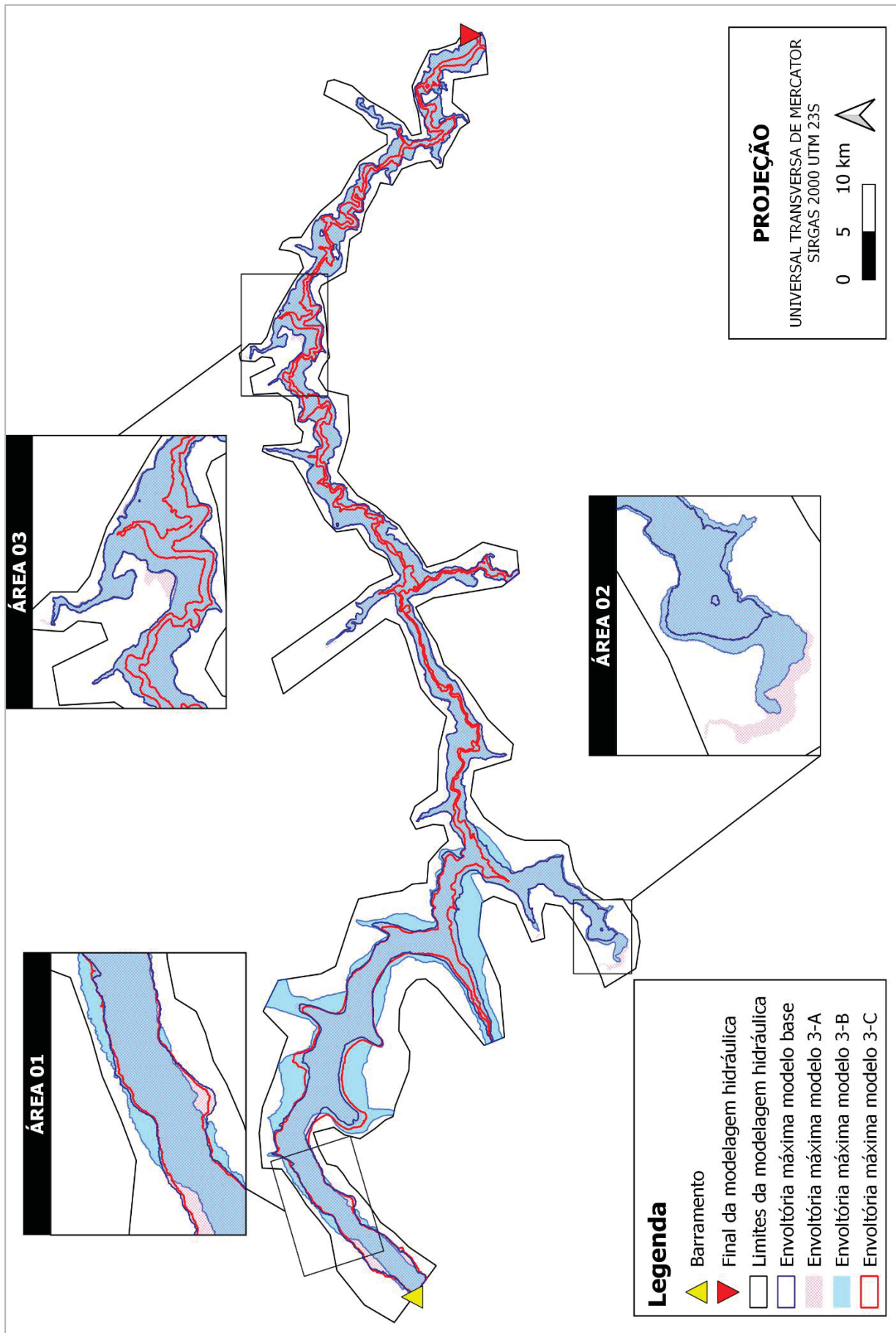


FIGURA 4.28 – ENVOLTÓRIAS MÁXIMAS POR SIMULAÇÃO

#### 4.3.6 Discussão de resultados e tempo computacional

Na TABELA 4.19 é apresentado quadro resumo dos resultados apresentados neste subcapítulo, referentes à variação dos equacionamentos de perda de carga. Ainda, apresenta-se adicionalmente o tempo computacional gasto para rodar cada simulação.

TABELA 4.19 – RESUMO DE RESULTADOS DA VARIAÇÃO DO TIPO DE FLUIDO E EQUACIONAMENTO REOLÓGICO

Quadro Resumo de resultados - Teste de Tipo de Fluido e Equacionamento Reológico				
Modelos	3-A	Modelo Base	3-B	3-C
Tipo de Fluido/ Equacionamento reológico	Newtoniano/ NA	Não Newtoniano/ Quadrático	Não Newtoniano/ <i>Full Bingham</i>	Não Newtoniano/ Herschel-Bulkley
Vazões Máximas por seção de resultado (m <sup>3</sup> /s)				
ST-01	12880	12810	13160	13070
ST-02	11060	10820	12770	3894
ST-03	5141	4545	5689	7,02
ST-04	3891	3009	3990	31,61
ST-05	2729	1848	2577	29,66
Profundidades Máximas por seção de resultado (m)				
ST-01	13,12	13,66	8,48	13,4
ST-02	12,84	12,81	13,88	10,03
ST-03	15,45	15,23	14,23	1,33
ST-04	9,19	8,88	8,41	0,9
ST-05	11,71	10,27	10,98	1,58
Velocidades Máximas por seção de resultado (m/s)				
ST-01	13,99	13,63	31,8	14,27
ST-02	10,12	9,98	24,75	6,69
ST-03	6,12	5,56	11,23	0,72
ST-04	6,16	5,41	10,76	2,02
ST-05	5,68	4,1	10,25	1,35
Tempos de chegada por seção de resultado (min)				
ST-01	00:00:07	00:00:07	00:00:05	00:00:07
ST-02	00:00:18	00:00:18	00:00:13	00:00:18
ST-03	00:00:33	00:00:33	00:00:28	-
ST-04	00:00:52	00:00:54	00:00:43	-
ST-05	00:01:11	00:01:16	00:01:00	-
Áreas das envoltórias máximas				
Áreas (km <sup>2</sup> )	5,42	5,15	6,47	2,65
Tempo computacional gasto				
Tempo (min)	110	112	167	126

NA - Não se Aplica

A análise dos resultados das simulações de sensibilidade da consideração de fluidos newtonianos e não newtonianos e equacionamentos reológicos revela que:

- Em termos de vazão máxima e hidrogramas, existiram variações significativas entre as simulações. Primeiramente, percebe-se similaridade de vazões entre o modelo base com fluido não newtoniano e equacionamento reológico quadrático com as vazões da simulação com fluido newtoniano. Os hidrogramas ficaram com formatos similares também.

Em sequência, se observa que a simulação 3-B, com fluido não newtoniano e equacionamento reológico *Full Bingham* possui maiores magnitudes de vazão, principalmente nos trechos iniciais do modelo. No entanto a simulação teve hidrograma instável na ST-02, explicado por uma limitação de modelagem que se deu por falta de informação topográfica e consequente impossibilidade de expansão da malha computacional. O fluxo preso na malha próximo à região da ST-02 aumentou o pico de vazão localmente dada à instabilidade gerada. Aparentemente foi um efeito local pois demais hidrogramas voltam a se comportar conforme esperado.

Já na simulação 3-C, com fluido não newtoniano e equacionamento reológico de Herschel-Bulkley, observa-se que a onda de ruptura atingiu somente as seções ST-01 e ST-02, deplecionando totalmente no trecho entre a ST-02 e ST-03. As vazões das seções ST-03 a ST-05 representam apenas vazão natural no trecho.

- Em termos de profundidade máxima, o comportamento observado foi similar ao das vazões máximas. A exceção foi a primeira seção da simulação 3-B que teve uma diminuição da profundidade, porém teve um grande aumento da velocidade, condizente com a reduzida tensão basal do escoamento dado que esta formulação não é influenciada pela rugosidade do terreno;
- As velocidades não variaram muito entre as simulações, sendo a exceção novamente a simulação 3-B que apresentou velocidades muito maiores que as demais, mais uma vez atribuída a menor parcela de tensões de resistência ao escoamento;
- Os tempos de chegada variaram, sendo a simulação 3-B, pelas maiores velocidades, a que possuiu menores tempos de chegada, menores até que da simulação 3-A, com fluido newtoniano. O modelo base teve comportamento próximo ao escoamento

newtoniano com um pequeno aumento do tempo de chegada. A avaliação do tempo de chegada da simulação 3-C ficou comprometida, dado que a onda só atinge as duas primeiras seções e as diferenças de tempo de chegada são mais notáveis nas seções mais distantes do barramento;

- Em termos de áreas das manchas de inundação existem diferenças significativas principalmente pela maior área da mancha da simulação com uso do equacionamento reológico de *Full Bingham* (3-B) e a menor mancha gerada pelo equacionamento de Herschel-Bulkley (3-C), dado o deplecionamento do escoamento ocorrido logo após a seção ST-02. A mancha extremamente maior da simulação 3-B, inclusive chegou a atingir em alguns pontos os limites da malha computacional, analisa-se que ela teria área ainda maior do que calculado neste trabalho, enquanto a menor mancha do escoamento 3-C explicado pela não atingimento da onda em todo vale de jusante; e
- O esforço computacional se difere pouco, com maior tempo na simulação 3-C dado, dado o maior número de células molhadas a serem calculadas.

Os resultados demonstram que, para este caso de estudo o equacionamento quadrático teve maior similaridade ao escoamento newtoniano, apesar de algumas pequenas diferenças no aumento do tempo de chegada e alargamento da mancha em pontos específicos mais ao início da malha computacional.

Ainda se obteve como resultado que o uso do equacionamento reológico de *Full Bingham* (3-B), pela ausência de tensões de resistência ao escoamento pela rugosidade resultou em grandes velocidades e vazões, aumentando a mancha de forma considerável, com maiores diferenças nos trechos mais iniciais da malha, destoando bastante dos comportamentos das demais simulações.

Finalmente se comenta da simulação com uso do equacionamento de Herschel-Bulkley que aparentou ter as maiores tensões de resistência ao escoamento dada a parada da propagação da onda no meio do trecho de simulação.

A incerteza do comportamento reológico se dá desde a limitação da amostragem de rejeito na barragem, que geralmente se dá em camadas mais superficiais dos reservatórios por vezes não representando o material do reservatório como um todo. Ainda, existe o fator de escala, em que as tensões e viscosidades são testadas, geralmente, em pequenas amostras e corpos de prova por palhetas dos reômetros rotacionais.

As curvas de viscosidade e tensão para concentração volumétrica ensaiada no reômetro também variam conforme faixa de consideração da taxa de rotação da palheta do instrumento teste, sendo mais uma incerteza na definição do comportamento reológico ou na definição.

Desta forma se confirma a grande variabilidade de resultados que se pode obter com variação dos equacionamentos reológicos e consideração ou não de fluido não newtoniano. Avalia-se para cada modelo deve-se testar a sensibilidade de resultados, adotando equacionamento mais adequado ao objetivo da simulação. Reitera-se que as análises feitas nesse trabalho se referem a um vale de jusante específico, com concentração volumétrica e características reológicas específicas, e ajustes de parâmetros de entrada feitos e analisados para o caso de estudo e extrapolações para outros casos devem ser executadas com cautela.

#### 4.4 PRINCIPAIS RESULTADOS, APRESENTAÇÃO DAS LIMITAÇÕES DO ESTUDO E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

O teste de sensibilidade quanto à discretização da malha computacional revelou que o refinamento das malhas causa aumento considerável do esforço computacional, porém, para o caso de estudo, em termos de variação de parâmetros hidráulicos não se teve grande variabilidade das malhas com 20m e menores tamanhos.

O teste de sensibilidade dos coeficientes de rugosidade revelou que maiores coeficientes de fato aumentam a profundidade e vazão dos escoamentos, diminuindo as velocidades de propagação da onda e aumentando os tempos de chegada. Conclui-se que a calibração do coeficiente deve ser feita de acordo com o objetivo da simulação dada a incerteza de qual parâmetro seria o correto a ser utilizado.

O teste de sensibilidade sobre consideração de fluido newtoniano e não newtoniano assim como variação dos equacionamentos reológicos confirmou grande variabilidade de resultados e comportamentos de escoamentos com a variação dos equacionamentos.

Em suma, a recomendação geral é de se definir premissas de modelagem no Riverflow2D a partir do objetivo principal de cada modelagem, pois como visto a variabilidade de resultados conforme premissas adotadas é grande. Uma simulação para obtenção de níveis de água, por exemplo, se comportaria bem, segundo o exemplo exercitado neste trabalho,

com malhas mais refinadas, coeficientes de rugosidade médios, com testes de sensibilidade para definição de equacionamento reológico. Já uma simulação para obtenção de tempos de chegada para planejamento de uma comunidade potencialmente atingida pela ruptura de uma barragem seria mais conservadora se adotasse malha não tão refinada, coeficientes de rugosidade mais baixos e fluido newtoniano.

Uma simulação com falta de dados e mais incertezas atribuídas aos dados de entrada do modelo, pode-se considerar o fluido como newtoniano, que não considera a perda de carga devido às propriedades do fluido, se obtendo manchas maiores, se tornando mais conservador pois tem-se uma envoltória maior e tempos de chegada que não desconsideram o efeito da reologia do material.

A utilização do equacionamento reológico de *Full Bingham* neste caso de estudo resultou em manchas maiores e com menores tempos de chegada comparado com fluido newtoniano, além de apresentar velocidades extremamente altas e duvidosas. Recomenda-se cautela ao adotar esse equacionamento reológico, dados os resultados diferentes do esperado.

Ainda, como principais limitações deste estudo, pode-se citar:

- Uso de apenas um modelo/uma barragem, resultados podem estar associados à topografia (declividade/ tamanho do talvegue/controles hidráulicos), tipo de material e concentração volumétrica adotada (podem alterar o resultados das análises dos equacionamentos reológicos utilizados);
- Condições iniciais definidas e fixas (estudos reais possuem incerteza da adoção de premissas que neste estudo foram fixadas)
- Não foi considerada variabilidade dos equacionamentos de sedimentação e não foi configurada erosão do terreno natural no modelo. Esses fatores influenciam diretamente no comportamento da propagação da onda de ruptura e foram desconsiderados a fim de se observar melhor a influência das variáveis de controle que foram utilizadas neste estudo.

Assim, recomendações para estudos futuros são elencados para continuação da pesquisa na área de modelagem de ruptura de barragens. Neste âmbito, pode-se citar:

- Possibilidade de variação do tamanho da malha conforme necessidade, ao invés de se trabalhar com um tamanho de célula fixo ao longo de todo modelo, por exemplo criando áreas de refino mais próximos às estruturas hidráulicas (ex.: a própria

barragem, vertedouros, pontes), em calhas do rio onde existe fluxo preferencial e próximo a áreas urbanas, por exemplo.

- É possível trabalhar com valores únicos médios de coeficiente de rugosidade para se testar os efeitos desta simplificação no modelo sem considerar o uso do solo específico por área do vale de jusante.
- Pode-se testar demais equacionamentos reológicos disponíveis para levantamento de limitações, fazer retro análises de casos reais de ruptura para verificar aplicabilidade das equações e ainda, testar ajustes dos parâmetros de consistência e índice de fluxo para o equacionamento de Herschel-Bulkley, a fim de se testar a sensibilidade desses parâmetros no escoamento.

Ademais, outros aspectos sobre modelagem podem ser considerados, tais como:

- A variação de equacionamentos na consideração de leitos móveis (equacionamentos de erosão e sedimentação);
- Caracterização do material do solo no vale de jusante para implantação de equacionamento de erosão do talvegue;
- A variação do material ou da concentração volumétrica e suas influências perante diferentes equacionamentos reológicos;
- Comparação do Riverflow2D com outros modelos computacionais disponíveis para criar sensibilidade de escolha entre diferentes abordagens numéricas.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo de ruptura hipotética em vários cenários que variaram parâmetros de entrada e de configuração do modelo a fim de avaliar a sensibilidade e o funcionamento do *software* Riverflow2D.

A simulação contou com a ruptura por galgamento de uma barragem de mineração de grande porte, que armazena rejeitos finos provenientes da produção de minério de ferro. Foram utilizados dados reológicos obtidos a partir de ensaios de laboratório do rejeito da barragem em questão e modelo digital de terreno de precisão.

Foram descritos os dados necessários para elaboração do estudo, a fim de detalhar os *inputs* utilizados no modelo. Apresentaram-se 10 simulações com variações de tamanho de malha computacional, variação dos coeficientes de Manning adotados e consideração de fluido newtoniano; fluido não newtoniano com equacionamento reológico pelo modelo quadrático, *Full Bingham* e de Herschel-Bulkley.

O resultado obtido nas simulações realizadas foi apresentado e interpretado, validando o comportamento do modelo matemático aplicado, apontando a sensibilidade em cada âmbito analisado e trazendo conclusões e recomendações para elaboração de modelos e uso do *software* Riverflow2D.

O teste de sensibilidade quanto à discretização da malha computacional revelou que o refinamento das malhas causa aumento considerável do esforço computacional, porém, para o caso de estudo, em termos de variação de parâmetros hidráulicos não se teve grande variabilidade das malhas com 20m e menores tamanhos.

O teste de sensibilidade dos coeficientes de rugosidade revelou que maiores coeficientes de fato aumentam a profundidade dos escoamentos, diminuindo as vazões e velocidades de propagação da onda e aumentando os tempos de chegada. Conclui-se que a calibração do coeficiente deve ser feita de acordo com o objetivo da simulação dada a incerteza de qual parâmetro seria o correto a ser utilizado.

O teste de sensibilidade sobre consideração de fluido newtoniano e não newtoniano assim como variação dos equacionamentos reológicos confirmou grande variabilidade de resultados e comportamentos de escoamentos com a variação dos equacionamentos.

Como recomendação para estudos futuros, além dos itens citados nas discussões de resultado, indica-se a reprodução deste tipo de estudo de sensibilidade com mais casos de estudo para análise da influência de diferentes topografias no uso do software e exploração da sensibilidade de outros parâmetros, dados de entrada ou equacionamentos disponíveis para uso no software.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13028: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 22 p., 2017;
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA), HIDROWEB. Disponível em: [www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br), acesso: janeiro de 2021.
- BLIGHT, G.E., FOURIE A. AND PAPAGEORGIOU, G.. An investigation of flow failures from breached tailings dams. Pitagora Editrice. Bologna, Italy. 2003. 258-263 p.
- BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Resolução nº95 de 7 de fevereiro de 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/noticias/veja-o-que-muda-com-a-resolucao-anm-ndeg-95-2022/resolucao\\_anm\\_no95-1.pdf/view](https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/noticias/veja-o-que-muda-com-a-resolucao-anm-ndeg-95-2022/resolucao_anm_no95-1.pdf/view). Acesso em abril de 2022.
- BRASIL. Lei Federal nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm). Acesso em abril de 2022.
- BURGER, J. H. Non-Newtonian Open Channel Flow: The Effect of Shape. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia, Cape Peninsula University of Technology, Cape Town. Fevereiro, 2014.
- Canadian Dam Association (CDA). Technical Bulletin: Tailings Dam Breach Analysis. 2021.
- CHOW, V.T. "Open-channel hydraulics". New York, McGraw-Hill.1959.
- FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente. "Termo de Referência para a Entrega de Estudos de Ruptura Hipotética de Barragens". *Fundação Estadual do Meio Ambiente*. 2021. Minas Gerais, Brasil.
- FONTAIN, D., MARTIN, V. Tailings Mobilization Estimates for Dam Breach Studies. Proceedings Tailings and Mine Waste 2015. Vancouver, BC. Outubro, 2015.
- FROEHLICH, D. C. Embankment Dam Breach Parameter and Their Uncertainties. Journal of Hydraulic Engineering. 2008. ASCE.
- FROEHLICH, D. C. "Empirical Model of Embankment Dam Breaching". 2019. ASCE.
- FROEHLICH, D. C., TUFAIL, M. Evaluation and Use of Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties. In proceedings of the annual conference of the association of state dam safety officials, 2004, Phoenix, 15 p.
- FULLER, W. E., Flood flows. Transactions, ASCE, v. 77, Paper No 1293, p. 564-617, 1914.
- GIANTOMASO, C.E.F, BLENINGER, T. Comparação entre Cenários de Dia Seco e Dia Chuvoso em Estudo de Ruptura de Barragem de Mineração. XXX Congresso Latinoamericano de Hidráulica. Brasil. 2022.

HYDRONIA, RiverFlow2D. Disponível em: [www.hydronia.com/riverflow2d](http://www.hydronia.com/riverflow2d), acesso: abril de 2023.

MACHADO, V.O.O. Simulação computacional de um fluido de Herschel-Bulkley em escoamento de Taylor-couette. Trabalho de conclusão de curso. UTFPR. 2017.

MARTIN, V. AKKERMAN, A. Challenges with conducting tailings dam breach assessments. In: 85th ICOLD Annual Meeting, 2017. Prague, Czech Republic.

MATOS, A. C. S., ELEUTÉRIO J. C. “Modelagem Hidrodinâmica da Onda de Cheia Decorrente da Ruptura Hipotética da Barragem de Fundão”. *XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. ABRH. 2019. Foz do Iguaçu, Brasil.

MINAS GERAIS. Decreto Estadual nº48.078 de 5 de novembro de 2020. Disponível em: [https://www.snisb.gov.br/Entenda\\_Mais/legislacao-aplicada/mg-legislacao-mineira-decreto-48078-de-05\\_11\\_2020-assembleia-de-minas.pdf/view](https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/legislacao-aplicada/mg-legislacao-mineira-decreto-48078-de-05_11_2020-assembleia-de-minas.pdf/view). Acesso em abril de 2022.

MINAS GERAIS. Lei Estadual nº23.291 de 25 de fevereiro de 2019. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=LEI&num=23291&comp=&ano=2019>. Acesso em abril de 2022.

O'Brien, J.S. and Julien, P.Y.. Physical properties and mechanics of hyper-concentrated sediment flows. Proceedings of ASCE Specialty Conference on Delineation of Landslides, Flash Flood and DebrisFlow Hazards. August. Utah Water Research Laboratory, Utah State University, Logan, Utah. 1985

TOOMBES, L. How Far Can You Push a HEC-RAS Model and Other Conundrums – A Nam Theun 2 Case Study. 5th International Symposium on Hydraulic Structures. Jun. 2014. DOI: 10.14264/uql.2014.46

US ARMY CORPS OF ENGINEERS, HEC-HMS. Disponível em: [www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/). Acesso: abril de 2022.

USACE. *HEC-RAS Users Manual*. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest>. Acesso em: abril de 2022.